

## UM SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO APLICADO A CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA

**Moisés Ângelo de Moura Reis Filho**

Universidade de Fortaleza - UNIFOR/ CE,  
Mestrado em Informática Aplicada – MIA  
Avenida Washington Soares, 1321 CEP 60811-341, Fortaleza, CE, Brasil,  
e-mail: mareis@stefanini.com.br

**Plácido Rogério Pinheiro e Francisco Chagas da Silva Filho**

Universidade de Fortaleza - UNIFOR/CE  
Avenida Washington Soares, 1321 CEP 60811-341, Fortaleza, CE, Brasil,  
e-mail: {placido, fchagas}@unifor.br

**Luiz Flávio Autran Monteiro Gomes**

Faculdades IBMEC/RJ  
Av. Rio Branco, 108, quinto andar, CEP: 20040-001, Rio de Janeiro, RJ,  
e-mail: autran@ibmecrj.br, tel.: (21)4503-4053

### Resumo

A tomada de decisões na construção de barragens de terra é feita de forma empírica, levando-se em conta projetos anteriores e a experiência dos engenheiros envolvidos. Apresentamos um processo de modelagem, com o objetivo de dar suporte a essas tomadas de decisões na construção de barragens de terra com seções do tipo homogêneas e zoneadas. Estruturado a partir de um modelo multicritério, aplicando o método ZAPROS III, que permite a melhor seleção de materiais e em modelos de programação matemática não linear inteira que visa à otimização dos custos. Um estudo de caso foi aplicado no projeto da barragem tipo zoneada do açude Frios.

Palavras-chave: Multicritério, Programação Não Linear Inteira Mista, Barragem de Terra, ZAPROS III

### Abstract

The decision making in construction of earth dams is made in an empirical way, taking into account previous projects and the experience of involved engineers. We present in this article a modeling process with the objective of giving support to decisions making in the construction of earth dams with homogeneous and zoned sections. The modeling process is based on a multicriteria model, using the ZAPROS III method that allows determining the best selection of materials and on mixed integer nonlinear programming models that optimize the construction costs. A case study was applied in the project of the dam Frios. (Brazil, CE).

Keywords: Multicriteria, Mixed Integer Nonlinear Programming, Earth Dams, ZAPROS III

## 1 Introdução

No decorrer da história do homem, a busca de locais em que houvesse a abundância de água sempre foi uma constante. Onde a água era escassa houve a necessidade da criação de mecanismos no qual garantisse que a mesma ficasse armazenada de alguma forma, por certo tempo, surgindo assim a necessidade da construção das barragens (ICOLD, 1999). Uma barragem consiste em uma intervenção do homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios, aos padrões demandados pela sociedade (CAMPOS, 1996).

No século XIX, por volta do ano de 1853, na França, com De Sazilly, surge a Engenharia de Barragens para tornar a construção das barragens algo embasado em cálculos matemáticos para provar a eficiência dos projetos (ESTEVES, 1964).

A construção de barragens de terra vem sendo aprimorada com o desenvolvimento tecnológico de maquinários de execução e de técnicas de construção (NARITA, 2000). Entretanto as decisões de aspectos importantes como, por exemplo, qual o tipo de material a ser utilizado, são tomadas de forma empírica, subjetiva e sem a garantia do menor custo da obra.

O objetivo deste trabalho é apresentar um processo de modelagem que seja capaz de ajudar a tomada de decisões, de maneira tal a otimizar os custos de construção de barragens de terra.

## 2 O Problema

Os materiais utilizados no processo de construção são normalmente os disponíveis nas jazidas escolhidas no local da barragem ou nas proximidades (VIEIRA, 1996). Nem sempre essas jazidas estão aptas para a exploração, o que importa, quase sempre, um gasto adicional. Diversas situações podem justificar esse custo, tais como a necessidade de um desmatamento ou o aluguel da área, pois a mesma se encontra em uma propriedade privada.

Cada jazida possui um ou vários materiais disponíveis (BOURDEAUX, 1982). O transporte desses materiais até o local de construção da barragem exige um custo que pode ser diferenciado ainda que os materiais estejam na mesma jazida, em virtude da dificuldade de extração. Além do custo de transporte, o volume de material necessário para a construção da barragem pode variar dependendo do tipo utilizado. Se construirmos uma barragem utilizando um material do tipo  $i$  o volume de material necessário pode ser maior que o necessário se o material do tipo  $i + 1$  fosse aplicado.

Os solos após a sua extração e transporte, normalmente, não possuem o seu índice de umidade no valor ótimo. Para corrigir esses desvios utiliza-se a compactação que em seu processo necessita da água. Existem diversos tipos de compactação que podem ser ou não empregados com determinados solos. Cada solo requer uma quantidade diferente de água que é obtida e transportada de fontes a um custo variável. Para cada tipo de compactação existe um custo dependente do solo a ser compactado. Isto ocorre porque os solos possuem curvas de compactação diferentes exigindo assim um esforço de compactação maior ou menor (MACHADO & MACHADO, 1997).

Uma barragem de terra pode ser do tipo zoneado ou homogêneo, de acordo com a quantidade de tipos de materiais utilizados na construção do maciço (VIEIRA, 1996). A decisão de quais tipos de materiais utilizar, qual o tipo de compactação, quais jazidas explorar e se a barragem deve ser zoneada ou homogênea de forma otimizada é bastante complexa. Desse modo, pode ser enunciado o problema da construção de uma barragem da seguinte forma: *“Construir uma barragem de terra selecionando as jazidas, os materiais, as fontes de água e os tipos de compactação que implicarão em um menor custo de construção levando-se em conta o custo de transporte de água necessária para a compactação, o de transporte de material, o tipo de seção da barragem e o processo de compactação empregado”*.

## 3 O Processo de Modelagem

O processo de modelagem proposto é estruturado a partir de um modelo multicritério e modelos em programação não linear inteira mista.

### 3.1 O Modelo Multicritério

A escolha dos materiais que compõe a barragem e as quantidades utilizadas são, normalmente, determinadas pelo engenheiro, que para tanto se utiliza do histórico e a experiência de outros projetos, observando-se características geotécnicas dos materiais disponíveis. Apresenta-se um modelo multicritério com o intuito de classificar os materiais disponíveis em um ranking. Com essa ordenação visamos facilitar a escolha dos materiais e as quantidades que os mesmos devem ser utilizados se forem escolhidos para a construção.

## Os Critérios

Foram escolhidos critérios de características geotécnicas:

1. Compressibilidade: Facilidade com que o solo diminui de volume quando submetido à determinada pressão (FIORI, 2001). Os valores possíveis para esse critério variam de muito baixa (C1) até alta (C4);
2. Resistência ao cisalhamento: Capacidade do solo de resistir a tensões cisalhantes (PINTO, 2002). Devido à natureza friccional a ruptura se dá preferencialmente por cisalhamento tornando-se uma característica importante a ser observada para a estabilidade de taludes. Os valores possíveis para esse critério variam de muito alta (RC1) a baixa (RC4);
3. Permeabilidade: A facilidade com que a água flui através do solo (PINTO, 2002). A água pode atuar sobre elementos da estrutura e gerar condições desfavoráveis à segurança e ao desempenho dos mesmos. Os valores do critério vão de muito impermeável (P1) até permeável (P4);
4. Trabalhabilidade: Facilidade de manuseio e uso do material na obra. Varia de muito boa (T1) a ruim (T4);
5. Resistência ao Piping: Fenômeno que provoca a remoção de partículas do interior do solo devido ao fluxo da água pela estrutura, formando canais que evoluem em sentido contrário ao fluxo podendo causar colapso da estrutura (FIORI, 2001). Os valores possíveis para esse critério variam de alta (RP1) a baixa (RP4);

Além das características geotécnicas citadas adicionamos outros critérios ao modelo. A inquietação cada vez maior com o meio ambiente torna o impacto causado pela construção de obras de engenharia um critério importante. A utilização de um determinado material que possua características geotécnicas boas pode causar um grande impacto na natureza, tornando a sua utilização menos interessante que a de outro material com características similares, mas que provoque um menor impacto. Destarte o engenheiro precisa avaliar, também, esse aspecto na hora da escolha do material. Os outros critérios considerados são a qualidades do material e a dificuldade de extração.

6. Qualidade do Material: Varia de muito boa (Q1) a ruim (Q4);
7. Dificuldade de Extração: Refere-se aos empecilhos encontrados no processo de extração do material considerando todas as jazidas disponíveis. Os valores possíveis para esse critério variam de baixa (D1) a muito alta (D4);
8. Impacto ambiental: Refere-se ao impacto causado ao meio ambiente, posto que o material em questão será utilizado na obra. Os valores para esse critério vão de nenhum (I1) a alto (I4);

## Uso do Método Multicritério ZAPROS III

O modelo multicritério proposto tem o intuito de classificar os materiais disponíveis em um ranking. O método escolhido para realizar essa tarefa foi o ZAPROS III (LARICHEV, 2001).

O método ZAPROS III pertence à família dos métodos VDA (*Verbal Decision Analysis*). Todos os critérios relacionados no modelo são de caráter qualitativo (LARICHEV *et al.*, 1998). As informações dos materiais e jazidas obtidas nos estudos preliminares são estimativas qualitativas (VIEIRA, 1996). Dessa forma, essa particularidade vem de encontro a essa característica do método ZAPROS III tornando-a o motivo principal da escolha do método para o modelo multicritério.

Segue a descrição do método.

### *Definição das preferências do tomador de decisão*

Utilizando o conjunto de valores possíveis para um critério podemos criar uma escala de valores. A mudança em um nível nessa escala de um critério é denominada de variação de qualidade (QV).

A definição das preferências do tomador de decisão consiste nas comparações em pares de todas as QV de dois critérios supondo que os demais critérios possuem os seus melhores valores. Por exemplo, “O que você prefere: uma alternativa em que o critério *i* tenha o valor alterado de *f* para *k* ou uma alternativa que tenha o critério *j* alterado de *s* para *u* ( $x_{if} \rightarrow x_{ik}$  ou  $x_{js} \rightarrow x_{ju}$ ;  $k > f$ ;  $u > s$ )?”. As

respostas possíveis para essa pergunta são: a primeira, a segunda ou são as alternativas são a mesma coisa.

As respostas acima permitem a criação do ranking de todos os QV das escalas dos dois critérios. Este ranking é denominado de *Joint Scale of Quality Variation* (denominada a partir daqui de JSQV) para dois critérios (LARICHEV, 2001).

Existem  $0.5N(N-1)$  pares possíveis de critérios que devem ser comparados baseados nas preferências do tomador de decisão. Após a criação dessas JSQV, deverá ser construída a JSQV de todos os critérios utilizando o seguinte algoritmo:

- 1) Identificar a QV que não é dominada por nenhuma outra e colocá-lo na JSQV de todos os critérios;
- 2) Excluir este item de todas as outras JSQV;
- 3) Retorna para o passo 1 até que todas as QV estejam na JSQV de todos os critérios;

Se em algum dos passos do algoritmo não for possível encontrar a próxima QV, existe então uma contradição nas preferências do tomador de decisão. O algoritmo pode descobrir a resposta contraditória e apontá-la para o tomador de decisão para que possa ser corrigida.

#### *Comparação das alternativas*

As QV da JSQV podem ser classificadas em um ranking de tal forma que o primeiro item possui o valor 1. O primeiro item é o preferível pelo tomador de decisão. Com base neste ranking podemos definir a qualidade de uma alternativa.

A relação entre quaisquer pares de QV na JSQV é definida ou determinada pela resposta direta do tomador de decisão ou através da transitividade. Dessa maneira, dada uma alternativa  $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{iN})$  é possível encontrar a QV correspondente para cada componente do vetor expressando, assim, a qualidade de cada alternativa.

#### *Ranking das alternativas*

Para a classificação das alternativas em um ranking deve ser utilizado o seguinte algoritmo:

##### Passo 1 – Definição do FIQ

Um índice formal de qualidade (FIQ) é utilizado com o objetivo de minimizar o número de comparações em pares das alternativas. Para cada alternativa é possível fazer a soma dos valores de ranking correspondente das QV dos seus componentes. É evidente que a alternativa melhor sempre possui um FIQ menor.

##### Passo 2 – O procedimento de comparação em pares

O seguinte procedimento de comparação é usado:

- As alternativas são listadas segundo a ordem dos seus FIQ.
- De acordo com essa ordem as alternativas são comparadas em pares. Se os componentes de ambos os vetores possuem o mesmo ranking, os vetores são equivalentes (Relação Binária 1).
- Dada três alternativas com FIQ crescentes. Se na comparação em pares concluirmos que:  $Alt\ i \rightarrow Alt\ j \rightarrow Alt\ k$ , então pela definição de JSQV temos que  $Alt\ i \rightarrow Alt\ k$ . Se  $Alt\ j$  e  $Alt\ k$  são incomparáveis, então a  $Alt\ i$  deve ser comparada com ambas alternativas.

##### Passo 3 – Seleção do item não dominante

Através da relação binária 2 selecionamos todas as alternativas não dominadas e criamos um primeiro núcleo.

Relação Binária 2 - “Se o ranking de todos os componentes da alternativa  $Y_i$  não são piores que os componentes da alternativa  $Y_j$  e pelo menos um dos ranking dos componentes de  $Y_i$  é melhor, então a alternativa  $Y_i$  é mais preferível a alternativa  $Y_j$ ”

Todas as alternativas selecionadas são retiradas e da mesma forma que o primeiro núcleo, deverão ser criados os núcleos subsequentes.

Alternativas pertencentes ao primeiro núcleo terão o ranking igual 1.

Uma alternativa possui ranking  $i$  se a mesma é dominada pela alternativa de ordem  $i-1$  e domina uma alternativa de ordem  $i+1$ .

Se as relações 1 e 2 não são verdadeiras então as alternativas  $Y_i$  e  $Y_j$  são incomparáveis (Relação Binária 3).

Se uma alternativa é dominada por outra de ordem  $i$ , mas domina uma alternativa de ordem  $i+j$ , então seu ranking varia dentro do intervalo de  $i+1$  até  $i+j-1$ .

### 3.2 Os Modelos Não Lineares Inteiros

Baseado no ranking gerado pelo ZAPROS III, o engenheiro definirá quais materiais podem ser utilizados na construção da barragem bem como suas quantidades mínimas e máximas. Essas definições serão usadas nos modelos não lineares inteiros mistos, de forma a que possa ser obtido o menor custo de construção. Além do menor custo, os modelos indicarão quais os materiais a serem utilizados e suas quantidades, quais jazidas explorar, quais os tipos de compactação aplicar em cada material utilizado e, finalmente, a quantidade de água necessária de cada fonte.

Os modelos em programação não linear inteira mista são estruturados a partir da programação matemática onde a função objetivo e as restrições podem ser representadas por funções não lineares cujas variáveis são discretas e contínuas (BAZARAA *et al.*, 1979).

A Figura 1 ilustra o processo de modelagem como um todo.

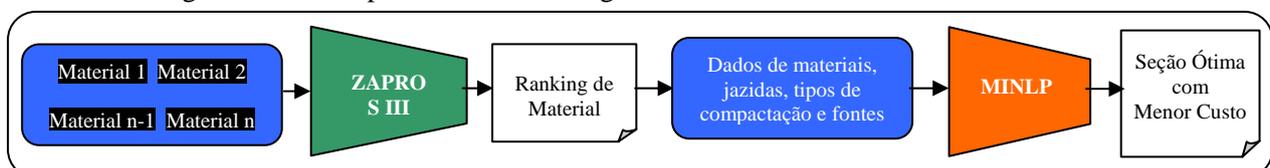


Figura 1 – Processo de Modelagem

O processo de modelagem consiste em dado um conjunto de materiais disponíveis para a construção da barragem, será realizada uma classificação utilizando-se um do método em multicritério, o ZAPROS III. O ZAPROS III será aplicado considerando que todos os critérios são qualitativos. Baseado no ranking gerado pelo método aplicado o engenheiro irá determinar as faixas de quantidades mínimas e máximas de cada material.

### Modelo para Barragens Homogêneas (com um só tipo de material)

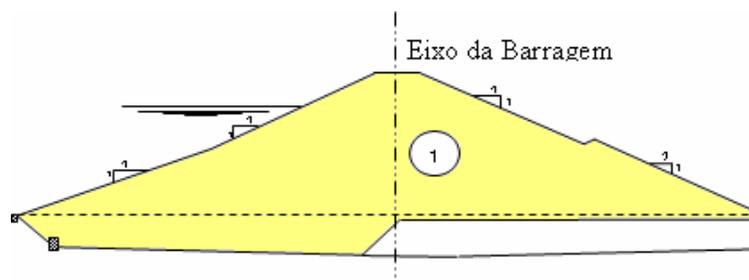


Figura 2 – Seção de uma barragem homogênea

As variáveis utilizadas são:

- $Q_{MaterialJazida_{ij}}$ : quantidade utilizada do material  $I$  da jazida  $J$  em  $m^3$ ;
- $Q_{AguaFonte_z}$ : quantidade de água utilizada da fonte  $Z$  em litros;
- $u_{Jazida_j}$ : variável binária indicando a utilização ou não da jazida  $J$ ;
- $u_{Material_i}$ : variável binária indicando a utilização ou não do material  $I$ ;
- $Q_{AguaFonte_z}$ : volume em litros de água utilizado caso a fonte  $Z$  seja utilizada.
- $u_{CompactTp_{wi}}$ : variável binária indicando a utilização ou não do tipo de compactação  $W$  para o material  $I$ .

**Função Objetivo:** Definida para minimizar o custo de construção da barragem utilizando como variáveis a quantidade de material utilizado, a quantidade de água para a compactação e o custo de exploração de cada jazida se esta for utilizada.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{CTMaterialJazida}_{ij} * \text{QMaterialJazida}_{ij} + \\
 & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{CCMaterialTpCompactacao}_{iw} * \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{QMaterialJazida}_{ij} \right) + \\
 & \sum_{z=1}^Z \text{CTagua}_z * \text{QAguaFonte}_z + \sum_{j=1}^J \text{CExploracaoJazida}_j * u\text{Jazida}_j
 \end{aligned} \tag{1}$$

- I: quantidade de materiais disponíveis;
- J: quantidade de jazidas disponíveis;
- W: quantidade de tipos de compactação disponíveis;
- CTMaterialJazida<sub>ij</sub>: Custo de transporte do material I da jazida J em R\$/m<sup>3</sup>;
- CCMaterialTpCompactacao<sub>iw</sub>: Custo de compactação do material I utilizando o tipo de compactação W em R\$/m<sup>3</sup>;
- CTagua<sub>z</sub>: Custo de transporte de água da fonte Z em R\$/l;
- CExploracaoJazida<sub>j</sub>: Custo de exploração da jazida J em R\$;

**Restrição 1:** Volume do material I utilizado não pode exceder a capacidade disponível desse material I na jazida J.

$$\forall i,1..I; \forall j,1..J \Rightarrow \text{QMaterialJazida}_{ij} \leq u\text{Material}_i * u\text{Jazida}_j * \text{VDMaterialJazida}_{ij} \tag{2}$$

- VDMaterialJazida<sub>ij</sub>: volume disponível do material I na Jazida J em m<sup>3</sup>.

**Restrição 2:** Soma do volume utilizado do material I de todas as jazidas tem que ser igual ao volume necessário para a construção da barragem se este material I for utilizado.

$$\forall i,1..I, \left( \sum_{j=1}^J u\text{Jazida}_j \text{QMaterialJazida}_{ij} \right) = \text{VNecessarioConstrucao}_i * u\text{Material}_i \tag{3}$$

- VNecessarioConstrucao<sub>i</sub>: Volume necessário do material I para a construção da barragem caso esse material seja utilizado em m<sup>3</sup>.

**Restrição 3:** Volume de água utilizado da fonte Z não pode exceder a capacidade total da fonte Z.

$$\forall z,1..Z, \text{QAguaFonte}_z \leq \text{VDAguaFonte}_z \tag{4}$$

- VDAguaFonte<sub>z</sub>: Volume em litros de água disponível da fonte Z.

**Restrição 4:** O volume de água utilizado para a compactação do material I utilizando o tipo de compactação W deve ser igual ao somatório dos volumes de água extraídos de todas as fontes.

$$\sum_{j=1}^J u\text{Jazida}_j \sum_{i=1}^I u\text{Material}_i \sum_{w=1}^W u\text{CompactTp}_{wi} * \text{QAguaMatTpCompact}_w * \text{QMaterialJazida}_{ij} = \sum_{z=1}^Z \text{QAguaJazid}_z \tag{5}$$

- QAguaMatTpCompact<sub>w</sub>: volume de água em litros utilizado para a compactação por m<sup>3</sup> de material utilizado.

**Restrição 5:** Somente um tipo de compactação será utilizado para o material escolhido I.

$$\forall i,1..I, \left( \sum_{w=1}^W u\text{CompactTp}_{iw} \right) = u\text{Material}_i \tag{6}$$

**Restrição 6:** Somente um tipo de material será utilizado ( $n=1$ ).

$$\left( \sum_1^I u_{Material_i} \right) = n \tag{7}$$

**Modelo para Barragens Zoneadas (com  $n$  tipos de materiais)**

Para as barragens zoneadas com  $n$  materiais, o modelo possui uma estrutura similar ao definido para barragens de seção homogênea com algumas modificações. Neste modelo incluiu-se a restrição 6 e 8 e alteraram-se as restrições 2 e 5 do modelo para barragens homogêneas. As variáveis, a função objetivo e as demais restrições são similares do modelo anterior.

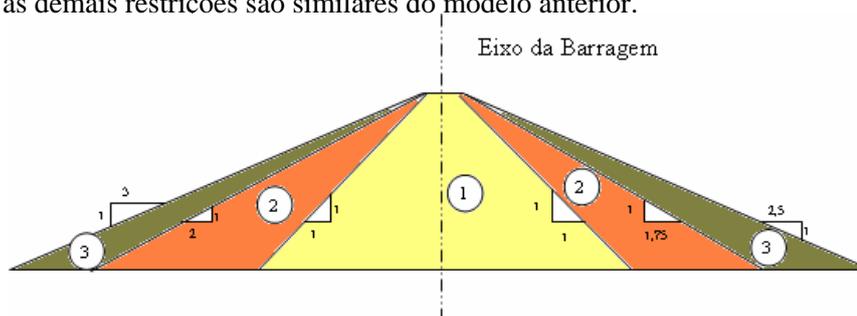


Figura 3 – Seção de uma Barragem Zoneada com 3 Materiais

**Restrição 2:** Soma do volume dos materiais utilizados de todas as jazidas exploradas deve ser igual ao volume total da barragem.

$$\sum_1^J \sum_1^I u_{Jazida_j} * u_{Material_i} * Q_{Material_i} = Vol_{TotalBarragem} \tag{8}$$

-VolTotalBarragem: volume total da barragem em  $m^3$ .

**Restrição 5:** O numero de tipos de compactação utilizado corresponde ao numero de materiais necessários para a construção ( $n$ ).

$$\sum_1^I \sum_1^W u_{CompactT_{P_{wi}}} = n \tag{9}$$

**Restrição 6:** Caso o material  $I$  seja utilizado o seu volume total dentro da barragem deve estar dentro dos limites especificados.

$$\forall i, 1..I, \left( \sum_1^J u_{Jazida_j} Q_{Material_i} \geq u_{Material_i} * vol_{MinMaterial_i} \right) \tag{10}$$

$$\forall i, 1..I, \left( \sum_1^J u_{Jazida_j} Q_{Material_i} \leq u_{Material_i} * vol_{MaxMaterial_i} \right) \tag{11}$$

**Restrição 8:** Um tipo de compactação para um material só será escolhido se o material também o for.

$$\forall i, 1..I, \left( \sum_1^W u_{CompactT_{P_{wi}}} \right) = u_{Material_i} \tag{12}$$

**4 Estudo de Caso**

Como estudo de caso os modelos foram aplicados no projeto de construção da barragem do açude Frios. A barragem está localizada no rio de mesmo nome, no município de Umirim, estado do Ceará. O açude Frios faz parte do conjunto de barragens que tem como finalidade regularizar o vale do Curu, permitindo a sua exploração agrícola, com destaque para o Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba (ARAÚJO, 1990).

A construção da obra teve início em maio de 1987 e foi finalizada no primeiro semestre de 1989. A barragem de terra tem seção zoneada e os materiais utilizados na construção do maciço são do tipo SC (*Sand-Clay*), SM (*Sand-Silt*) e solo residual, segundo a Classificação Unificada dos Solos (ARAÚJO, 1990).

### Dados da Barragem

Para a construção do maciço da barragem estavam disponíveis 3 (três) tipos de materiais dispostos em 8 (oito) jazidas. Denominaremos os materiais de M1 (solo SC), M2 (solo SM) e M3 (solo residual) e as jazidas de J1 a J8 (DNOCS/AGUASOLOS, 1984). Foram incluídos mais 3 tipos de materiais a fim de melhor ilustrar o exemplo. São eles M4 (solo CL), M5 (solo ML-SC) e M6 (solo ML) disponíveis também nas jazidas J1 a J8.

Os valores dos critérios para a aplicação do método ZAPROS III dos 6 materiais estão descritos na tabela 1.

**Tabela 1 - Valores dos Critérios para o ZAPROS III**

	SC	SM	SM-SC	CL	ML	ML-SC
<b>Compressibilidade</b>	C2	C2	C2	C1	C1	C3
<b>Resistência ao Cisalhamento</b>	RC2	RC2	RC3	RC3	RC4	RC3
<b>Permeabilidade</b>	P2	P3	P3	P2	P2	P2
<b>Resistência ao "Piping"</b>	RP1	RP2	RP2	RP1	RP3	RP2
<b>Trabalhabilidade</b>	T2	T3	T3	T2	T4	T3
<b>Qualidade do Material</b>	Q2	Q2	Q2	Q1	Q2	Q3
<b>Dificuldade de Extração</b>	D4	D4	D4	D4	D4	D4
<b>Impacto Ambiental</b>	I1	I2	I2	I2	I1	I3

Para a barragem do tipo homogênea, o volume de material necessário para o maciço foi considerado o mesmo para todos os materiais. Assim, o volume necessário para a construção utilizando quaisquer dos materiais é de 297.000 m<sup>3</sup>, conforme descrito na tabela 2 (coluna Vol. p/ Construção) (DNOCS/AGUASOLOS, 1984).

Para a barragem zoneada foram consideradas as seções com dois até cinco materiais e as quantidades mínimas e máximas de todos os materiais estão descritas na tabela 2 (colunas Vol. Mín p/ Construção e Vol. Máx p/ Construção).

Devido ao transporte do material, tem-se perda de umidade e as condições dos materiais nas jazidas torna-se necessário um ajuste na umidade para a realização da compactação (as adequações necessárias de cada material estão descritas na tabela 2 - Coluna Qtd. Água). A quantidade de água necessária por m<sup>3</sup> de material foi calculada utilizando as densidades dos materiais descritas na tabela 2 (coluna Densidade).

**Tabela 2 – Valor de umidade e volumes para construção.**

Material	Umidade	Qtd. Água m <sup>3</sup>	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vol. p/ Construção (m <sup>3</sup> )	Vol. Mín p/ Construção (m <sup>3</sup> )	Vol. Máx p/ Construção (m <sup>3</sup> )
SC	2 %	24,6	1230*	297.000	100.000	200.000
SM	1 %	11,0	1100*	297.000	70.000	120.000
SM-SC	1,5 %	18,50	1233*	297.000	37.000	85.250
CL	1,7 %	22,61	1330*	297.000	70.000	120.000
ML	1,8 %	21,19	1177*	297.000	22.000	70.050
ML-SC	1,3 %	13,43	1033*	297.000	60.000	110.000

A fonte de água utilizada para a realização da compactação é o próprio rio. Devido a esse fato o volume disponível é considerado finito o suficiente para as necessidades da construção (tabela 3). O custo de transporte de água está descrito na tabela 4.

Tabela 3 – Volume nas fontes

Fonte	Volume de Água Disponível
1	1000000 m <sup>3</sup>

Tabela 4 – Custo de transporte de água por m<sup>3</sup>.

Fonte	Custo Transporte de Água
F1	2,50 R\$/m <sup>3</sup>

A quantidade de água necessária para efetuar a compactação de um material utilizando um determinado tipo está descrita na tabela 5 e o custo por tipo de material e tipo de compactação na tabela 6.

Tabela 5 – Vol. de água necessário por m<sup>3</sup> de material compactado e tipo.

Material \ Tipo Comp.	Tipo Comp.		
	1	2	3
SC	24,6	24,7	24,6
SM	11,0	11,1	11,0
SM-SC	18,5	18,6	18,5
CL	22,6	22,7	22,6
ML	21,2	21,3	22,2
ML-SC	13,4	13,5	13,4

Tabela 6 - Custo de compactação de material por tipo de compactador em R\$/m<sup>3</sup>

Material \ Tipo Comp.	Tipo Comp.		
	1	2	3
SC	1.93	2.00	2.13
SM	1.95	2.05	2.17
SM-SC	1.90	1.98	2.10
CL	1.92	2.0	2.13
ML	1.95	1.99	2.13
ML-SC	2.0	2.03	2.10

Os volumes de materiais disponíveis em cada jazida estão descritos na tabela 7 e o custo de transporte na tabela 8. Algumas das jazidas só possuem um tipo de material.

Tabela 7 - Quantidade de Material Disponível por Jazida

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
SC	10.000*	30.000	103.250	0	102.137	145.360	0	0
SM	0	0	0	33.250*	0	0	100.920	0
SM-SC	0	0	0	50.000*	0	0	0	180.000
CL	15.000*	0	43.300*	0	25.470*	23.450*	0	0
ML	0	0	72.000*	109.320*	65.342*	0	10.000*	34.120*
ML-SC	32.300*	15.000*	0	0	25.000*	45.000*	0	90.000*

**Tabela 8 – Custo de transporte de material por jazida em R\$/m<sup>3</sup>**

Jazida \ Material	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
SC	2.3*	4.35	7.74	0	10.49	10.10	0	0
SM	0	0	0	2.2*	0	0	1.3	0
SM-SC	0	0	0	2.2*	0	0	0	1.3*
CL	2.3*	0	7.74*	0	10.49*	10.10*	0	0
ML	0	0	7.74*	2.2*	10.49*	0	1.3*	1.3*
ML-SC	0	4.35*	0	0	10.49*	10.10*	0	1.3*

A parte referente à exploração de jazidas está descrita na tabela 9. Como todas as jazidas estavam aptas para a exploração e sem nenhum custo adicional, se não o do transporte do material, o custo de exploração é considerado zero.

**Tabela 9 - Custo em R\$ para exploração da jazida.**

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
Custo (R\$)	0	0	0	0	0	0	0	0

Alguns dos dados descritos foram estimados ou constituem dados fictícios<sup>1</sup>. Essa ação foi tomada com o objetivo de apresentar o trabalho em toda sua plenitude, já que algumas informações não são guardadas nos memoriais dos projetos.

**Resultados**

Baseado nas preferências do tomador de decisão, a JSQV construída para todos os critérios é a seguinte:

$rc1 < p1 < c1 < rp1 < rc2 < p2 < rp2 < c2 < q1 < t1 < i1 < d1 < rc3 < p3 < rp3 < c3 < q2 < t2 < i2 < d2 < rc4 < p4 < rp4 < c4 < q3 < t3 < i3 < d3 < rc5 < p5 < rp5 < c5 < q4 < t4 < i4 < d4 < rc6 < p6 < rp6 < c6 < q5 < t5 < i5 < d5 < q6 < t6 < i6 < d6$
---

A partir da escala JSQV foi calculado o índice formal de qualidade (FIQ) de cada material e utilizando o algoritmo descrito do método ZAPROS foi gerado o ranking dos materiais conforme a tabela 10.

**Tabela 10 - FIQ de cada material**

	SC	SM	SM-SC	CL	ML	ML-SC
Compressibilidade	c1	c1	c1	-	-	c5
Resistência ao Cisalhamento	rc1	rc1	rc4	rc4	rc5	rc4
Permeabilidade	p1	p4	p4	p1	p1	p1
Resistência ao “Piping”	-	rp1	rp1	-	rp4	rp1
Trabalhabilidade	t1	t4	t4	t1	t5	t4
Qualidade do Material	q1	q1	q1	-	q1	q4
Dificuldade de Extração	d5	d5	d5	d5	d5	d5
Impacto Ambiental	-	i1	i1	i1	-	i4
<b>FIQ</b>	<b>69</b>	<b>128</b>	<b>148</b>	<b>88</b>	<b>149</b>	<b>205</b>
<b>RANKING</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>

<sup>1</sup> Os dados estimados ou fictícios estão assinalados com (\*).

Os materiais CL e SM pertencem ao segundo núcleo, mas são incomparáveis entre si, bem como os materiais SM-SC, ML e ML-SC que pertencem ao terceiro núcleo o que gerou os empates nos ranking 2 e 3, conforme a relação binária 3.

Com base no ranking o engenheiro definiu os valores referentes a volume mínimo e máximo que os materiais poderiam ter se utilizados na construção conforme a tabela 2 (colunas Vol. Mín p/ Construção e Vol. Máx p/ Construção).

Em seguida foram realizadas as simulações para a seção homogênea e zoneadas com até 5 (cinco) materiais. Os resultados obtidos estão descritos na tabela 11.

**Tabela 11 - Resultados das simulações**

Seção	Custo (R\$)	Material	Tipo Compact.	Vol. Água (l)	Vol. material (m <sup>3</sup> )
Homogênea	22.574.120,00	1	3	7.306.200	Jaz. 1 = 10.000 Jaz. 2 = 30.000 Jaz. 3 = 103250 Jaz.5 = 8.390 Jaz.6 = 145.360
Zoneada (2 mat.)	17.465.220,00	1 e 2	1 - material 1 1 - material 2	5.674.200	<u>Material 1</u> Jaz.1 = 10.000 Jaz.2 = 30.000 Jaz.3 = 103.250 Jaz.6 = 33.750 <u>Material 2</u> Jaz.4 = 19.080 Jaz.7 = 100.920
Zoneada (3 mat.)	12.260.390,00	2, 3 e 6	3 - material 2 1 - material 3 3 - material 6	4.033.500	<u>Material 2</u> Jaz.4 = 19.080 Jaz.7 = 100.920 <u>Material 3</u> Jaz.8 = 67.000 <u>Material 6</u> Jaz.1 = 32.300 Jaz.8 = 77.700
Zoneada (4 mat.)	12.410.870,00	2, 3,5 e 6	1 material 2 3 material 3 1 material 5 3 material 6	4.092.900	<u>Material 2</u> Jaz.4 = 19.080 Jaz.7 = 100.920 <u>Material 3</u> Jaz.8 = 45.000 <u>Material 5</u> Jaz.7 = 10.000 Jaz.8 = 12.000 <u>Material 6</u> Jaz.1 = 32.300 Jaz.8 = 77.700
Zoneada (5 mat.)	14.372.000,00	2, 3, 4, 5 e 6	1 material 2 3 material 3 3 material 4 1 material 5 3 material 6	4.724.900	<u>Material 2</u> Jaz.4 = 7.080 Jaz.7 = 100.920 <u>Material 3</u> Jaz.8 = 37.000 <u>Material 4</u> Jaz.1 = 15.000 Jaz.3 = 43.300 Jaz.6 = 11.700 <u>Material 5</u> Jaz.7 = 10.000 Jaz.8 = 12.000 <u>Material 6</u> Jaz.6 = 32.300 Jaz.8 = 27.700

## 5 Conclusão

A melhor opção para a construção da barragem é a seção zoneada com 3 (três) materiais e esta foi a escolha feita no projeto segundo DNOCS/AGUASOLOS (1984).

Após a execução dos modelos observa-se que esta seleção foi a mais adequada. O custo para a construção da barragem utilizando essa seção com 3 (três) materiais é 1 % menor que a seção com somente 4 (quatro) tipos de materiais, a segunda mais barata, e 84 % menor que a construção utilizando a seção homogênea, a mais cara.

Com o processo de modelagem proposto em conjunto com os modelos apresentados, disponibiliza-se uma ferramenta para a tomada de decisão na construção de barragens de terra que vem a somar com a experiência dos engenheiros e o histórico de outras construções.

Com a ferramenta, baseado no ranking gerado pelo ZAPROS III, será definido os materiais e seus limites de volumes na construção da barragem. Essas informações serão utilizadas nos modelos não lineares que irão minimizar o custo de construção (conforme explicado anteriormente na figura 1).

As simulações para as diversas seções servem como insumo para que sejam realizados estudos comparativos. As diferenças de custos oriundas desses estudos fornecem um percentual que será utilizado na justificativa da escolha da seção dentro do projeto tornando-a mais clara.

O estudo de caso demonstra que os modelos podem ainda incluir novas variáveis com o objetivo de refletir de forma mais real a construção de barragens de terra.

## 6 Referencias bibliográficas

- [1] ARAÚJO, José Amaury de Aragão, coord. “*Barragens no Nordeste do Brasil; experiência do DNOCS em barragens na região semi-árida*”. 2. ed. Fortaleza, DNOCS, 1990. 328p.
- [2] BAZARAA, M.S.; SHERALI, H.D.; SHETTY, C.M.” *Non linear Programming: theory and algorithms*”, John Wiley & sons, 1979.
- [3] BORDEAUX, Guy H R M. “*Projeto e construção de barragens de terra e enrocamento*”, 1982.
- [4] CAMPOS, N. B. “*Dimensionamento de reservatórios*”. Fortaleza: UFC, 1996. 56 p.
- [5] DNOCS/AGUASOLOS. *Barragem Frios*. Fortaleza, 1984. t.1,3-5.
- [6] ESTEVES, Virgilio Penalva. *Barragens de terra*. Campina Grande: Escola Politécnica da USP, 1964
- [7] FIORI, Alberto Pio.”*Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*” / Aleberto Pio Fiori, Luigi Carmignani, 2001.
- [8] ICOLD. *Benefits and Concerns About Dams*. July, 1999.
- [9] LARICHEV, Oleg I. “*Ranking Multicriteria Alternatives: the method ZAPROS III*”, European Journal of Operational Research, 131:550-558, 2001.
- [10] LARICHEV, Oleg & BROWN, Rex & FLANDERS, Nick & ANDREYEVA, Elena. “*Numerical and Verbal Decision Analysis Compared in Practice - Part I: Siberian and Alaskan Test Cases*”, Março, 1998.
- [11] MACHADO, Sandro Lemos & MACHADO, Miriam de Fátima C, “*MECÂNICA DOS SOLOS I - Conceitos introdutórios*”, ebook, 1997, disponível em [http://www.ucsal.br/lab\\_solo/index.asp](http://www.ucsal.br/lab_solo/index.asp).
- [12] NARITA, Kunitomo. *Design and Construction of Embankment Dams*, Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology, 2000.
- [13] PINTO, Carlos de Sousa. “*Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*”. 2ª. Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- [14] Tabela de Preços da Secretaria Municipal de Infra-Estrutura Urbana e Obra do Estado de São Paulo disponível em <http://portal.prefeitura.sp.gov.br/> e acessada em 15/04/2005.
- [15] VIEIRA, V. P. P. B. et al. “*Roteiro para projeto de pequenos açudes*”. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1996. 160 p.