

## **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO ASFÁLTICO.**

*Saboya Jr, F.<sup>1</sup>, Gomes Filho, R.P.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>UENF/Laboratório de Engenharia Civil, saboya@uenf.br

<sup>2</sup>UENF/Laboratório de Engenharia Civil, betopgf@hotmail.com

**Resumo** – Atualmente, o estudo a respeito da utilização do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) – produto utilizado em pavimentação de estradas – como núcleo de uma barragem de enrocamento, substituindo o núcleo formado por solos argilosos, vem atestando as vantagens de sua utilização. Tendo em vista a enorme diminuição da espessura do núcleo asfáltico em relação aos núcleos argilosos, este estudo a respeito de seu comportamento perante possíveis cargas aplicadas ao corpo da barragem é fundamental para detalhar o que ocorre com o material diante das condições impostas. Neste estudo, baseado na modelagem de elementos finitos, seguiu-se uma linha de análise do comportamento mecânico e hidráulico deste núcleo asfáltico, desde as etapas construtivas até a etapa de enchimento a montante, utilizando diferentes propriedades dos materiais para que fosse possível a comparação dos resultados a fim de chegar a uma composição que melhor se adequasse aos esforços os quais o núcleo era submetido. A análise foi feita com o auxílio de dois programas computacionais, um que gerava dados de saída de acordo com cada tipo de condição e outro que reproduzia as deformações sofridas pela estrutura.

**Palavras-chave:** Barragem de enrocamento, núcleo asfáltico, modelagem de elementos finitos.

**Área do Conhecimento:** Geotecnia

### **Introdução**

No país, o grande potencial energético provido pelo movimento da água, propiciou a utilização de obras de contenção, que represam água e utilizam-na para a produção de energia elétrica<sup>1</sup>. O desenvolvimento de barragens de enrocamento com núcleo asfáltico tem despertado grande interesse no país, sendo na Europa utilizado a cerca de 70 anos. A sua estrutura é composta por zonas com fragmentos de rochas de diferentes dimensões e pelo núcleo impermeabilizante que proporciona uma vantagem notável em relação aos solos argilosos por apresentar uma espessura inferior a 1 metro, condicionando uma enorme economia no que diz respeito ao tempo gasto durante a compactação,

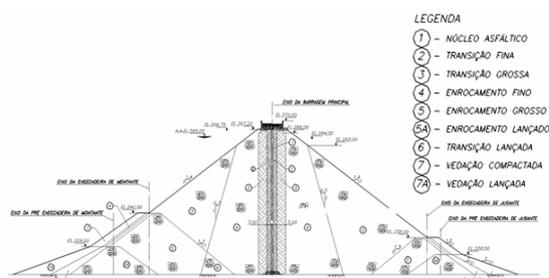
facilidades de utilização do material mesmo diante de condicionantes naturais desfavoráveis e em relação à preservação do solo que seria utilizado. Porém é indispensável a análise do comportamento deste núcleo betuminoso diante das cargas exercidas sobre ele, sendo necessárias, então, ferramentas que permitem a análise real a partir de modelos reduzidos que tornam possível simular as condições atuantes neste, dentre elas a modelagem de elementos finitos (MEF) e a Centrífuga Geotécnica.

### **Metodologia**

O estudo foi realizado entre junho de 2009 e abril de 2010 no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) do Centro de Ciências e

Tecnologias (CCT), na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ.

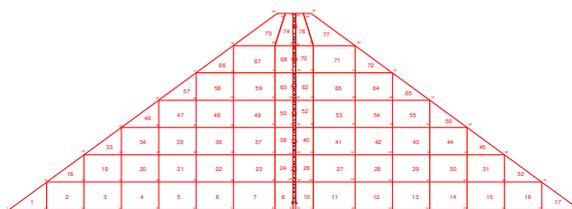
O projeto foi baseado em uma barragem neste modelo, a Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó (Figura1) localizada no Rio Uruguai, na divisa dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. A barragem possui 48 metros de altura, 598 metros de extensão. O núcleo asfáltico em estudo possui uma espessura de menos de 1 metro.



**Figura 1 - Desenho da barragem com os diferentes tipos de materiais representados.**

Foram utilizados programas baseados na Modelagem de Elementos Finitos. Antes de iniciar-se a utilização dos programas, foi necessária a criação de uma malha de elementos finitos representativa do corpo da barragem, especificando as coordenadas de cada ponto nodal, a partir de um referencial fixo. A malha utilizada (Figura 2) possui 77 elementos (12 triangulares e 65 quadrangulares) e 90 pontos nodais dispostos em 3 zonas com diferentes tipos de materiais, sendo a mais distante do núcleo composta por blocos de rocha, uma zona de transição com um material de granulação mais fina e o núcleo composto pelo material impermeabilizante asfáltico. Iniciando a análise computacional, um dos programas utilizado chama-se FEMODE 4, cujo funcionamento baseia-se na execução de um arquivo de entrada, feitos no bloco de notas no formato ASCII, com informações a respeito das coordenadas da barragem, especificando o número de camadas e de colunas de acordo

com a malha, características geométricas, propriedades dos materiais constituintes e sequências de interpolação. Esse software baseia-se no modelo hiperbólico para representar o comportamento tensão x deformação do material. Primeiramente, arquivos de entrada contendo apenas informações a respeito da construção da barragem foram feitos, a partir dos quais o programa gerava arquivos de saída, também no formato ASCII, com as informações referentes aos deslocamentos e tensões sofridos por cada ponto nodal da malha representativa da barragem devido apenas ao peso próprio desta. Uma segunda etapa consistiu em utilizar o mesmo arquivo de entrada anterior para obter os valores referentes à etapa de construção, a partir de um comando denominado PUNCH, e utilizá-los para gerar outro arquivo de entrada representando o enchimento da barragem a montante, para assim reproduzir o efeito da coluna de água represada sobre o núcleo asfáltico. Um arquivo de saída final possuía os valores dos deslocamentos e tensões relativos apenas ao enchimento. A visualização e interpretação destes valores de saída do FEMODE 4 eram feitas com o auxílio de outro programa, o MVIEW. Outros arquivos de entrada com o formato ASCII foram feitos utilizando os valores de saída obtidos, para que a interface do MVIEW interpretasse e reproduzisse o corpo da barragem levando em conta os efeitos de interesse, sendo possível visualizar a deformada do núcleo.



**Figura 2 - Desenho da malha utilizada para a modelagem através de elementos finitos.**

## Resultados

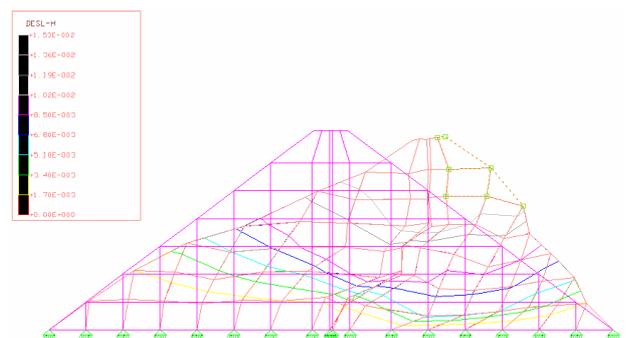
Uma primeira análise foi executada para atestar a funcionalidade e eficácia da malha escolhida, para ver se esta atenderia as condições reais, o que de fato se constatou. Por outro lado, analisando-se o efeito de todos os carregamentos atuando em conjunto, ou seja, a partir dos resultados obtidos após o enchimento da barragem com água no plano vertical do núcleo, chegou-se a resultados de deslocamentos horizontais e verticais máximos iniciais da ordem de alguns decímetros, o que era de se esperar para uma primeira rodagem utilizando valores grosseiros a respeito das propriedades do núcleo betuminoso. Uma segunda etapa transcorreu com o intuito de alterar as propriedades do núcleo, inclusive determinando que tipo de concreto betuminoso usinado a quente possuía o módulo de elasticidade mais eficaz, para cada vez mais refinar os valores até os que se julgavam ideais. As propriedades finais dos materiais estão representadas na Tabela 1 abaixo.

	Material 1 - Enrocamento	Material 2 - Areia	Material 3 - Núcleo
$\gamma$	21 KN/m <sup>3</sup>	15 KN/m <sup>3</sup>	25 KN/m <sup>3</sup>
K	400	2000	367,08
$K_{ur}$	1200	4000	0
n	0,25	0,5	0
$R_f$	0,65	0,7	0
$K_b$	150	1350	305,9
m	0,3	0,25	0
c	0	0	100 KPa
$\Phi$	38	41	40
$\Delta\Phi$	2	4	0
$K_o$	0,8	0,8	1

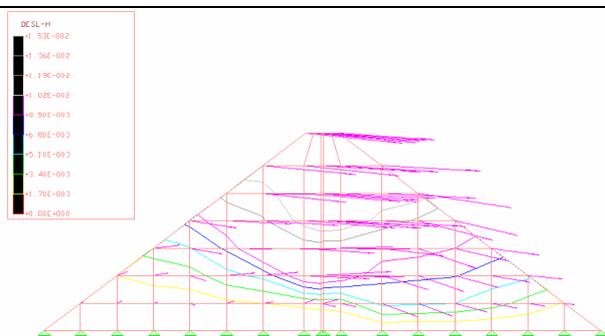
**Tabela 1 – Tabela com as propriedades dos 3 diferentes materiais que compõem a barragem.**

Outra rodagem no FEMODE 4 foi realizada com essas mudanças de características, e após a análise e visualização dos deslocamentos nos

pontos nodais constatou-se valores de deslocamentos horizontais máximos durante a etapa de construção, ou seja, oriundo do carregamento gerado pelo peso próprio da barragem, de 0,0992 m e deslocamentos verticais máximos de 0,2904 m, o que de se esperar já que o peso atua verticalmente nos pontos. No que diz respeito aos deslocamentos ocasionados pela ação da coluna de água a montante, foram obtidos deslocamentos horizontais máximos de 0.0153m e valores de deslocamentos verticais máximos de 0.0032m. A expectativa principal em relação aos valores obtidos nesta segunda análise era a respeito dos deslocamentos horizontais de cada ponto nodal da malha, devido a uma coluna de água atuar neste sentido, tendendo a deslocar os nós no sentido da montante para a jusante, sendo os valores máximos na parte superior do núcleo, esperando-se uma configuração deformada como a constatada na Figura 1.



**Figura 3(a) - Configuração deformada da malha representativa do corpo da barragem, com os deslocamentos de cada nó representado.**



**Figura 1(b) – Vetores de deslocamento dos pontos nodais da malha representativa do corpo da barragem.**

### **Discussão**

Um fator muito importante deve ser levado em conta, que é a respeito da definição das propriedades do material que constitui o núcleo asfáltico da barragem em análise. Todas as definições de valores foram baseadas em estimativas feitas, embasando-se na composição que julgava-se próxima a utilizada na prática. O procedimento ideal para a determinação dos parâmetros que definem cada material que compõe as três distintas zonas da barragem é a análise em laboratório, ou seja, é preciso que cada material seja testado e experimentado, separadamente, para que seja possível determinar o comportamento destes constituintes e definir se suas características satisfazem as condições de projeto ou se serão necessários ajustes para melhorar suas deficiências perante determinadas solicitações. De acordo com estudos a respeito dos deslocamentos verticais e horizontais do núcleo asfáltico de barragens de enrocamento, valores da ordem de 20 a 40 milímetros são obtidos em estruturas com dimensões semelhantes a do estudo realizado<sup>2</sup>, o que evidencia um adequado comportamento do material flexível e impermeável utilizado na confecção do núcleo, já que foram obtidos

deslocamentos horizontais e verticais da ordem de 10 e 20 milímetros, o que corresponde a cerca de 0,03% da altura total da barragem considerando um deslocamento máximo horizontal de 15 milímetros.

### **Conclusão**

Diante do que foi apresentado a respeito do estudo, é possível concluir que os resultados obtidos, devido às solicitações durante a construção e durante o enchimento da barragem, a respeito dos deslocamentos sofridos pelos pontos nodais que compõem o corpo da barragem num modelo reduzido virtual, se enquadraram nos valores que se esperavam, o que permite dizer que a barragem se comportou de maneira satisfatória.

Tal constatação possibilita afirmar que a ferramenta utilizada para o desenvolvimento do trabalho, a modelagem de elementos finitos (MEF), é apropriada para estudos como este, já que permite a análise do comportamento da barragem a partir de um modelo computacional que condiciona a imposição de certas condições que serão aplicadas sobre a estrutura durante seu desenvolvimento e implantação. E, obviamente, tal simulação só foi possível a partir da utilização de softwares que se mostraram totalmente adequados e eficazes para a concretização dos estudos.

### **Referências**

1. WCD. The World Commission on Dams. Barragens e Desenvolvimento: Um novo modelo para tomada de decisões – O Relatório da Comissão Mundial de Barragens. 2000.
  2. HÖEG, K.. Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams: Experience and Practice. Norwegian Geotechnical Institute. Oslo, 1993. 89 p.
- CRUZ, P.; MATERÓN, B.; FREITAS, M.. Barragens de Enrocamento com Face de

Concreto: Concrete Face Rockfill Dams.

Brasília: 2009.

CRUZ, P.T.. 100 Barragens Brasileiras. 2º

Edição: Oficina de Textos, 1996. 680 p.