

INCLUSÃO DE CUNHAS DE REDISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO CENTRADO

Victor F. B. de Mello

Victor de Mello e Engenheiros Associados Ltda. S/C

Claudio F. Mahler

COPPE/UFRJ (Programa de Engenharia Civil)

E-mail: Mahler@coc.ufrj.br

Edwin A. Z. Iturri

COPPE/UFRJ (Programa de Engenharia Civil)

E-mail: bobra@pec.coppe.ufrj.br

XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, 1997, SP, Vol. 2, pp. 233-243.

RESUMO

A distribuição de tensões na parte superior de barragens de enrocamento com núcleo centrado pode apresentar problemas causados pelo elevado gradiente de tensões entre o enrocamento e o núcleo. Com o intuito de minimizar este efeito propõe-se a inclusão de cunhas de material mais mole em parte do enrocamento, as quais tem a finalidade de redistribuir as tensões na parte superior da barragem, para uma forma semelhante a uma barragem homogênea. O presente trabalho aprofunda tal estudo, considerando o efeito do coeficiente de Poisson no comportamento global da barragem, em particular quando da inclusão das cunhas de redistribuição de tensões.

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de tensões que ocorre em barragens de enrocamento com núcleo centrado na seção montante-jusante próxima da crista compreende uma transferência de cargas do núcleo para as abas, devido à maior deformabilidade do mesmo e gradientes de tensão que ocorrem nesta região, os quais favorecem o surgimento de trincas horizontais e um conseqüente fraturamento hidráulico.

Visando minimizar tal efeito e obter uma distribuição de tensões mais suave próximo da crista, propõe-se a inclusão de cunhas de material mais deformável no enrocamento. Tais cunhas tem a finalidade de evitar o arqueamento excessivo na parte central no plano normal da barragem, conduzindo a uma distribuição de tensões próxima da crista próxima à distribuição que uma barragem homogênea apresentaria e diminuindo as possibilidades de possíveis trincas horizontais e o conseqüente fraturamento hidráulico.

Os conceitos básicos do Método dos Elementos Finitos (MEF), bem como as técnicas empregadas neste trabalho na sua aplicação a Barragens de Terra e Enrocamento não serão aqui apresentados, podendo ser encontrados em Mahler, 1974 e Iturri, 1991. O MEF vem sendo empregado com sucesso no Brasil em Obras de Terra desde o início da década de 70 (vide Souto Silveira e Zagottis, 1970 e 1971 e Lacerda e Mahler, 1973). Já nestes trabalhos o MEF foi empregado para analisar efeitos do processo construtivo, posição de filtro, adensamento e parâmetros, em particular o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Vale ressaltar aqui a importância do coeficiente de Poisson e os cuidados que devem ser tomados quando da adoção de valores próximos a 0,5, o que pode causar sérios problemas no que se refere a instabilidade numérica na simulação. É importante frisar ainda, que é recomendável a análise em precisão estendida, em todas as análises numéricas em particular as que contém elementos com materiais de resistência e deformabilidade muito diversa. Esta recomendação é válida em especial, no caso em que na análise numérica se empreguem parâmetros de coeficiente de Poisson maiores do que 0,45.

Para verificar o comportamento das cunhas de redistribuição de tensões fez-se assim também uso do Método dos Elementos Finitos (De Mello e outros, 1996). Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da proposta de uma melhor redistribuição das tensões devido à introdução das cunhas na parte superior da barragem. Algumas questões contudo ficaram ainda por ser melhor estudadas no que se refere ao efeito do coeficiente de Poisson e efeitos de incompatibilidade numérica do sistema. Este trabalho procura esclarecer melhor estes aspectos e avançar na questão do efeito do coeficiente de Poisson. No presente trabalho, optou-se por utilizar parâmetros constantes durante a construção e a formulação elasto-plástica de Drucker e Prager, dada a menor quantidade de parâmetros e a pequena variação do módulo de elasticidade durante o processo construtivo, conforme já observado por Lacerda e Mahler (1973).

Para se ter uma análise totalmente validada utilizou-se dois programas de elementos finitos (CONSATPLAST e CRISP) conforme descrito no item seguinte. Fez-se com isto o necessário Bench Mark dos resultados e dos programas para a análise em questão.

2. PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS USADOS

O programa CONSATPLAST Iturri (1991) é uma adaptação do programa CONSAT (Mahler, 1974), para simulação da construção de aterros incluindo a formulação elastoplástica segundo Drucker e Prager (1952). O programa utiliza elementos quadráticos e triangulares de segunda ordem e possibilita a análise de deformação plana, com tensões totais, não linear hiperbólica de Duncan e Chang (1970) modificada ou a utilização de um procedimento em que as relações tensão-deformação são direcionadas diretamente a partir de ensaios de laboratório. Na modificação para análise elasto-plástica, fez-se uso do Modelo Elasto-Plástico perfeito com a Lei de Escoamento Associada de Drucker e Prager (1953) que idealiza o comportamento tensão-deformação específica do material com a lei de fluxo associada, cuja função de plastificação é fornecida por:

$$f_p = \beta \cdot I_1 + J_2 - k \quad (1)$$

Na equação acima, I_1 é o primeiro invariante de tensões e J_2 , o segundo invariante dos desvios de tensões, β e k são constantes físicas que dependem da coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ). Para o estado plano de deformações β e k são expressos pelas equações:

$$\beta = \tan \phi / (9 + 12 \tan^2 \phi)^{1/2} \quad (2a)$$

$$k = 3c / (9 + 12 \tan^2 \phi)^{1/2} \quad (2b)$$

A simulação emprega um processo incremental-iterativo combinado com o método das tensões iniciais, sendo a convergência acelerada através do Line Search Method (Crisfield, 1983 e

Iturri, 1991). Se necessário, o procedimento deve ser repetido até que se consiga a necessária convergência.

O programa de elementos finitos CRISP foi desenvolvido para análise de problemas geoestáticos sob carregamentos monotônicos de carga e descarga (Britto e Gunn, 1990). O CRISP pode realizar análises drenada, não-drenada e de adensamento, segundo a teoria acoplada de Biot (Small e outros, 1976), plano deformação, axi-simétrica e tridimensional. Para análises drenadas e não-drenadas o fluido dos poros é considerado como um outro material, de acordo com a técnica proposta por Simpson (1973).

O programa faz uso das seguintes leis constitutivas: elástica linear isotrópica, anisotrópica, elástica linear com o módulo elástico variando linearmente com a profundidade, Cam-Clay modificado, Cam-Clay elasto-plástico perfeito (von Mises, Tresca, Drucker e Prager e Mohr-Coulomb) e o modelo de Schofield (1980). Possibilita a utilização de 11 tipos de elementos diferentes. A não-linearidade física é aproximada fazendo uso da técnica incremental dividindo a carga aplicada em um certo número de incrementos, iguais ou não, para cada nova camada.

3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E PARÂMETROS ADOTADOS

A partir de uma sugestão de Mello (1989) para o projeto da Barragem Bekhme no Iraque de 240 metros, escolheu-se como caso hipotético semelhante, simétrico, com inclinação nas abas de 1:1,6 (V:H). As malhas básicas empregadas são as mesmas para ambos os programas, valendo observar que o programa CRISP faz uso do conceito de superelemento, para cada um dos elementos da malha.

A barragem (Figura 1) foi dividida em três zonas, enrocamento, transição/filtro e núcleo, as quais também foram subdivididas em três zonas menores, elementos por camada. A simulação foi feita em treze etapas no CONSATPLAST e 10 etapas no CRISP92, pois as três primeiras etapas foram tratadas como elementos de fundação. Os parâmetros adotados para a análise elasto-plástica estão indicados na Tabela 1, sendo propositalmente mantidos constantes devido à constância aproximada do módulo de elasticidade durante os processo construtivo no

domínio elástico e a facilitação da análise quanto ao coeficiente de Poisson, quando o mesmo é mantido constante para cada um dos casos e cada uma das regiões estudadas.

Tabela 1 - Parâmetros adotados nas análises elasto-plásticas, propositadamente mantidos constantes para favorecer a comparação almejada.

Material	Parâmetros						
	E_s (kPa)	ν_1	ν_2	ν_3	c (kPa)	ϕ (graus)	γ (kN/m ³)
Enrocamento	120.000	0,35	0,40	0,45	0,0	45	19,0
Transição/filtro	150.000	0,35	0,40	0,45	0,0	45	19,0
Argila	15.000	0,35	0,40	0,45	140,0	25	19,0

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

São aqui apresentados apenas parte dos diversos casos estudados. Numa etapa inicial do estudo, as cunhas foram introduzidas desde a parte inferior do corpo da barragem. Constatou-se posteriormente que este dispositivo não contribuiria na uniformização das tensões na região próxima à crista, razão porque optou-se por utilizar as cunhas apenas na parte superior do corpo da barragem. Inicialmente utilizou-se a formulação hiperbólica (Duncan e Chang, 1970) nas versões simplificada e modificada com refinamento dos parâmetros R_f , n e K_{ur} , função carregamento descarregamento, o que melhorou os resultados. Contudo, estes ainda apresentaram ainda ruídos numéricos indesejáveis. Com a formulação elasto-plástica este problema foi superado. Como as tensões são a segunda variável do algoritmo numérico não há continuidade de tensões interelementos (Mahler, 1993) o que dificulta uma boa representação em regiões onde os materiais possuem características de diferenças bastante acentuadas. Escolheu-se assim, empregar a formulação elasto-plástica de Drucker e Prager implantada no programa CONSATPLAST. Os resultados obtidos estão indicados nas Figuras 2, 3, 4, 5 e 6. Tais resultados foram comparados com resultados obtidos com a formulação elasto-plástica implantada no programa CRISP, procedimento este que pode ser considerado como uma espécie de “Bench Mark” dos resultados e dos dois programas no que se refere a esta análise. Houve uma boa concordância quanto aos resultados em ambas as situações, sendo que os ruídos numéricos foram praticamente eliminados.

Os resultados obtidos são resumidos aqui em termos das isotensões horizontais. Estes casos compreendem a situação de uma barragem homogênea e heterogênea (Figura 2), e heterogênea com as cunhas introduzidas no enrocamento a 48, 40 e 32 metros do topo (Figuras 3, 4 e 5), e todos os três elementos indicados na Figura 6 sendo a cunha. O material adotado para a cunha foi o mesmo que o do núcleo. Nas Figuras 3, 4 e 5 e 6 os resultados de tensões horizontais próximos da crista com valores diferenciados para o coeficiente de Poisson são representados. Os resultados obtidos indicam claramente o papel conciliador em termos de tensões produzido pela cunha na parte superior da barragem, provocando uma redução no gradiente de tensões e aproximando a distribuição de tensões no topo à distribuição resultante de uma barragem homogênea e o efeito do coeficiente de Poisson em barragens de enrocamento.

5. CONCLUSÕES

O procedimento proposto para execução de barragens de enrocamento com núcleo centrado pode conduzir a soluções mais seguras quanto a fissuração da mesma em regiões próximas à crista sendo pois recomendável sua consideração a nível de projeto quanto a possíveis vantagens seja não só em termos de segurança, mas também no que se refere a possível economicidade da barragem como um todo.

Os resultados obtidos indicam a possibilidade de na construção de barragens de enrocamento utilizar-se o conceito de cunhas de materiais mais deformáveis dentro do enrocamento, provocando uma distribuição de tensões mais suave na crista da barragem e diminuindo o gradiente de tensões e a possibilidade de fraturamento hidráulico ou o surgimento de fissuras devido ao arqueamento, uma vez que o acomodamento do maciço nesta região, como um todo, ser também mais homogêneo.

A utilização da formulação de Drucker e Prager com a técnica incremental-iterativa combinada com o método de tensões iniciais, com a técnica de aceleração da convergência do Line Search Method mostrou-se uma ferramenta valiosa na análise deste problema.

Vale ainda observar que uma análise totalmente validada é a melhor base para desenvolver e examinar um projeto. Problemas podem ocorrer quando se acredita que os resultados da análise

são aceitáveis sem que se procure fazer nenhuma verificação dos resultados. Resultados de instrumentação de campo são também uma forma de referenciar as análises numéricas. Vale contudo observar, que de forma geral medem-se movimentos (primeira incógnita na formulação adotada usualmente no MEF) e não tensões (segunda incógnita ou secundária) e que por vezes os resultados dos deslocamentos coincidem com as observações de campo em uma região do maciço e não o fazem em outra. Assim, o Bench Mark, ou a análise com mais de um programa computacional para validação é extremamente recomendável em projetos de barragens de enrocamento.

6. BIBLIOGRAFIA

- BRITTO, A.M. e GUNN, M.J. (1990). CRISP90: User's and Programmer's Guide, Engineering Department, Cambridge, University.
- CRISFIELD, M.A. (1983). An arc-length method including line searches and accelerations. Int. Journal for Num. Methods in Engineering, vol. 19, p. 1269-1289.
- DRUCKER E PRAGER (1952). Soil Mechanics and plasticity analysis or limit design. Q. Appl. Math. 10 (2), p. 157-165.
- DUNCAN, J.M.. e CHANG, C.Y. (1970). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, J. Soil mech. Found. Div., 96, p. 1629-53.
- DE MELLO, V.F.B. (1977). Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams, Géotechnique 27, 3, 279-352.
- DE MELLO, V.F.B. (1988). Adelantos sugeridos de estabilidad de taludes en escalleras compactadas. Soc. Argentina de Mec. Suelos, SAMS y Centro Argentino de Ingenieros.
- DE MELLO, V.F.B. (1989), Projeto da Barragem Bekhme, Iraque.

- DE MELLO, V. F. B., MAHLER, C.F. e ITURRI, E. A. Z. (1996). Redistribuição de Tensões em Barragens de Enrocamento com Núcleo Centrado, INFOGEO, Simpósio de Informática em Geotecnia, Vol. II, pp. 121-131.
- ITURRI, E.A.Z. (1991). Análise Elasto-Plástica da Construção de Aterros. Dissertação de Mestrado apresentada à COPPE/UFRJ, RJ.
- LACERDA, W.A. e MAHLER, C.F. (1973). Comentários sobre as deformações de Barragens de Terra durante a construção analisadas pelo Método dos Elementos Finitos, IX Seminários Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro.
- MAHLER, C.F. (1974). Estudo e Aplicação do Método dos Elementos Finitos a Barragens de Terra. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, RJ.
- MAHLER, C.F. (1993). Observações sobre a utilização de elementos de 2ª ordem em análise de aterros pelo método dos elementos finitos. Solos e Rochas, v. 16, n. 2.
- SCHOFIELD, A.N. (1980). Cambridge geotechnical centrifuge operations. Géotechnique, 30 (3), p.227-268.
- SIMPSON, B. (1973). Finite element computations in soil mechanics. Ph.D. thesis, Cambridge University Engineering Department.
- SMALL, J.C., BOOKER, J.R. e DAVIS, E.H. (1976). Elastoplastic consolidation of soil. Int. Solids Structures, v. 12 (6), p.431-488.
- SOUTO SILVEIRA, E. B. & ZAGOTTIS, D.L. (1970). Elementos Finitos em Barragens de Terra - Influência da Posição do Filtro na Fissuração. VI Seminário Brasileiro de Grandes Barragens, Rio de Janeiro.
- SOUTO SILVEIRA, E. B. & ZAGOTTIS, D.L. (1971). Elementos Finitos em Barragens de Terra - Construção por Etapas e Simulação do Adensamento. VII Seminário Brasileiro de Grandes Barragens, Rio de Janeiro.

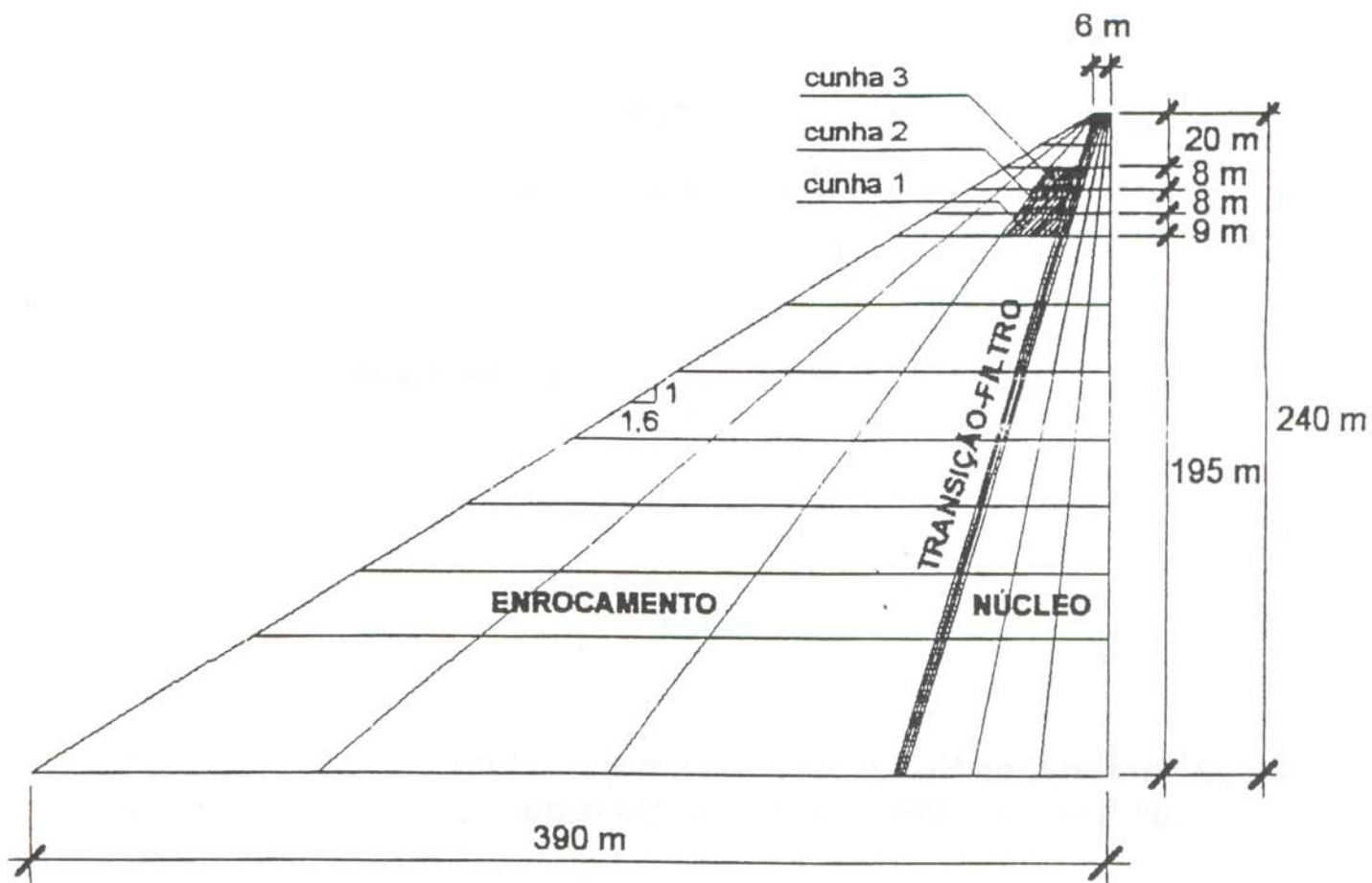


Fig. 1. Malha de Elementos Finitos Adotada

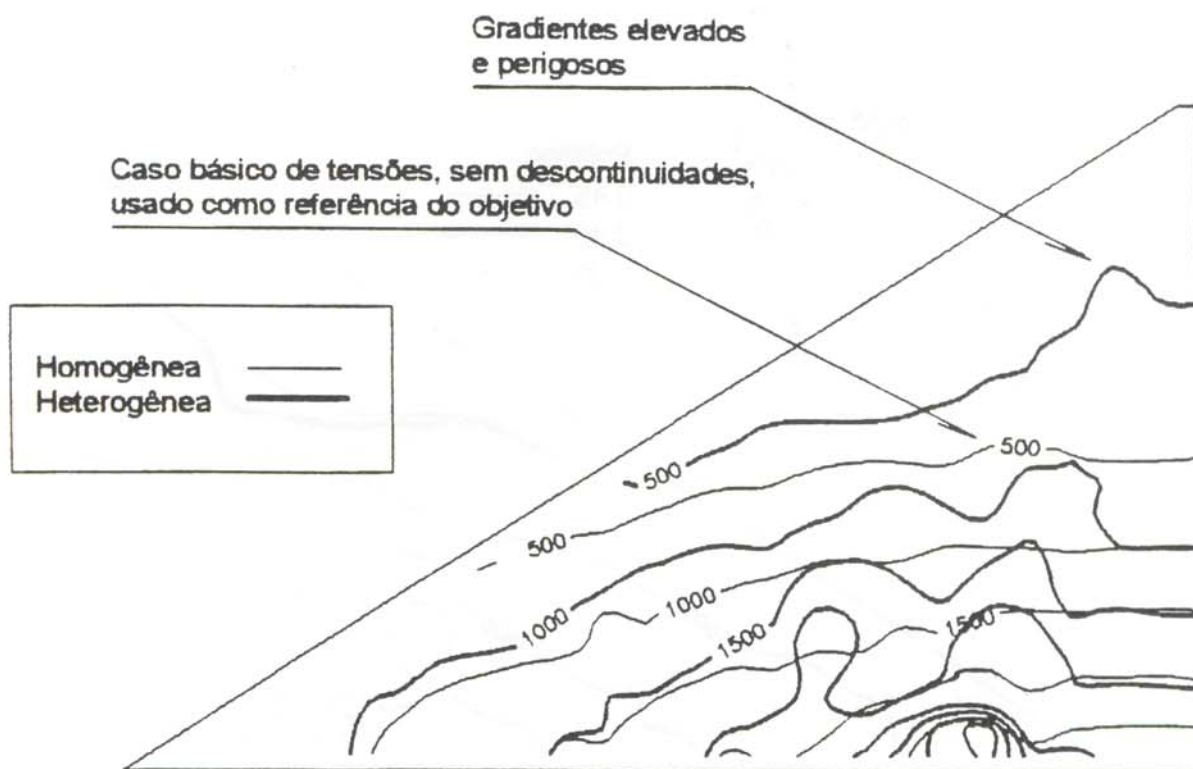


Fig. 2. Isotensões Horizontais - Barragem Homogênea e Heterogênea

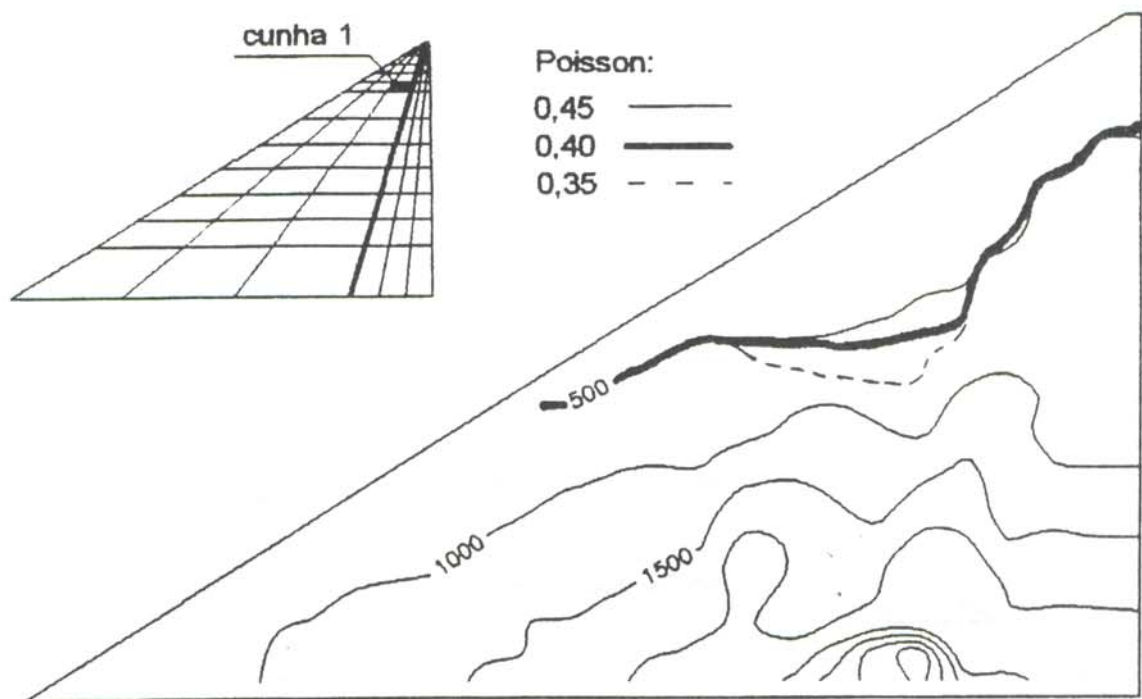


Fig. 3. Isotensões Horizontais - Barragem Heterogênea com cunha 1 de 9 m de espessura a 36 m do topo

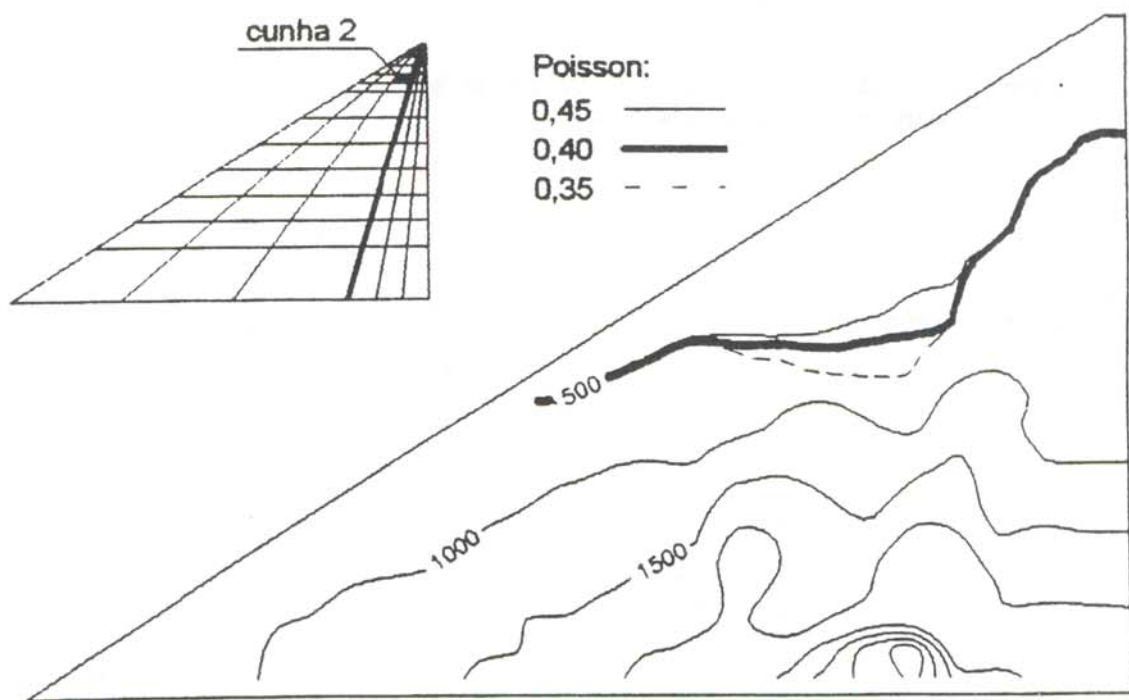


Fig. 4. Isotensões Horizontais - Barragem Heterogênea com cunha 2 de 8 m de espessura a 28 m do topo

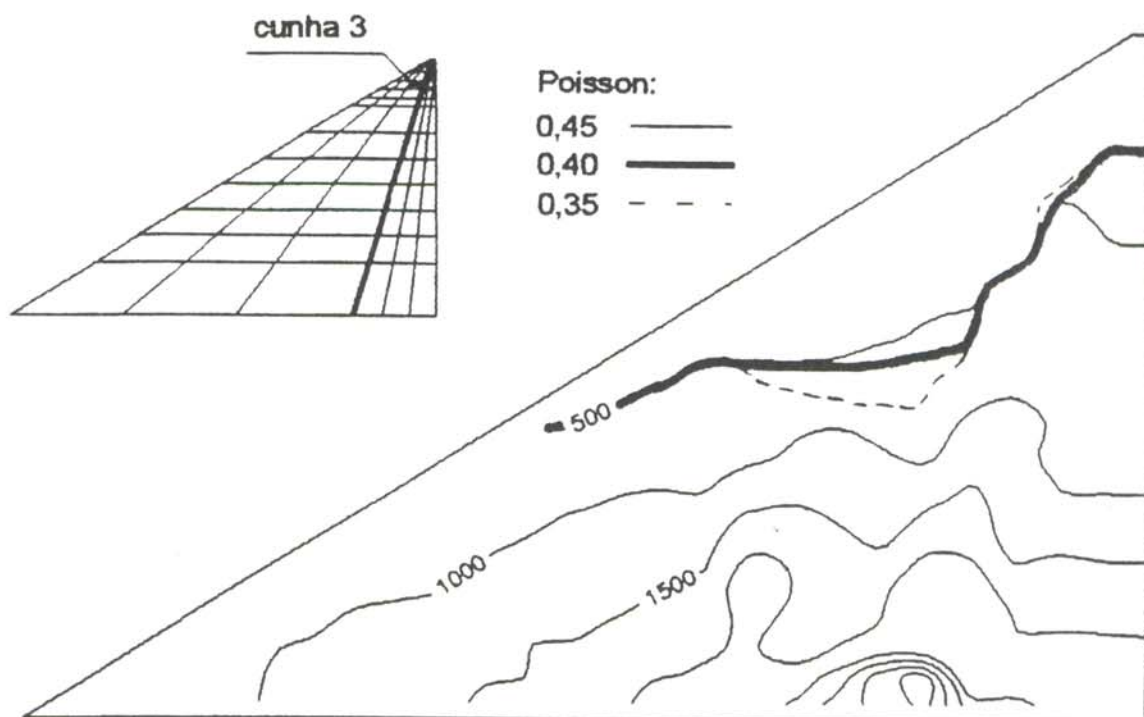


Fig. 5. Isotensões Horizontais - Barragem Heterogênea com cunha 3 de 8 m espessura a 20 m do topo

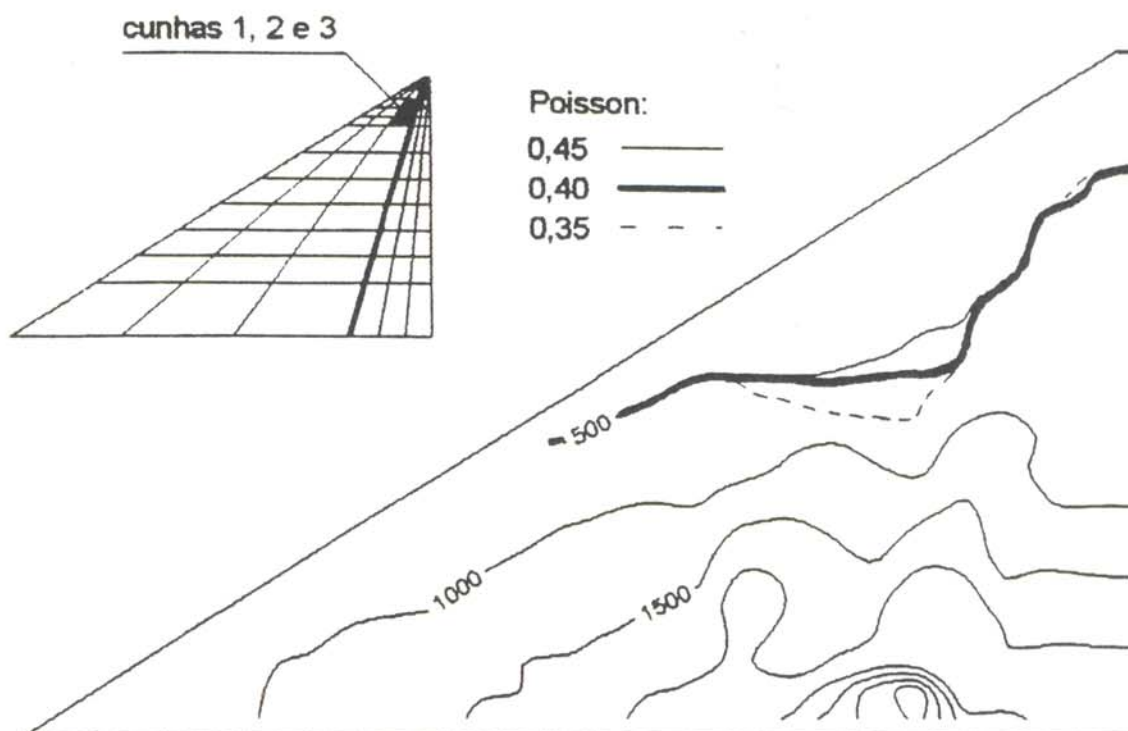


Fig. 6. Isotensões Horizontais - Barragem Heterogênea com cunhas 1, 2 e 3 de 25 m de espessura a 20 m do topo