

Análise tridimensional das tensões em uma barragem e suas fundações: implicações na avaliação da segurança

Three dimensional stress analysis of a dam and its foundation: implications on safety evaluation

Waldemar Hachich*

Luiz Guilherme de Mello**

Werner Bilfinger***

Miguel Bucalem****

RESUMO - Durante as escavações para a execução das fundações da Barragem do Castanhão, detectou-se a presença de uma depressão de paredes íngremes, no leito do rio Jaguaribe, preenchida com areias de compactação média a fofa. A construção da barragem sobre essa fundação, incluindo esse paleocanal, foi simulada em análises incrementais tridimensionais pelo MEF, com materiais em regime elástico linear em cada incremento, mas com parâmetros diferentes entre incrementos, caracterizando assim uma análise não linear. As análises confirmaram que o paleocanal, em função do possível preenchimento com materiais mais deformáveis, poderia provocar recalques diferenciais significativos no corpo da barragem, mas sem riscos de trincas ou de tensões de tração importantes. A redistribuição de tensões provocava, no entanto, aumento no potencial de liquefação e redução do coeficiente de segurança dos círculos críticos mais profundos.

SYNOPSIS - Excavations of the foundations of the Castanhão Dam revealed a canyon along the Jaguaribe river, filled with sands of medium to low relative density. Construction of the dam over this foundation, including the canyon, was simulated in incremental, piece-wise linear elastic 3D FEM analyses. Analyses confirmed that the softer materials in the canyon led to increased differential settlements of the dam, but with low risk of tension cracks developing. Stress redistribution led, however, to an increase in the liquefaction potential and a decrease of the safety factor of the deeper critical circles.

* Prof. Titular, Escola
Politécnica da USP, São Paulo,
Brasil, whachich@usp.br

** Sócio, Vecttor Projetos,
São Paulo, Brasil,
lgmello@vecttor.com.br

*** Sócio, Vecttor Projetos,
São Paulo, Brasil,
werner@vecttor.com.br

**** Prof. Titular, Escola
Politécnica da USP, São
Paulo, Brasil,
mbucale@usp.br

Palavras-chave – Barragem, análise, MEF, 3D, tensões, arqueamento, estabilidade, liquefação

1 - INTRODUÇÃO

Durante as escavações para a execução das fundações da Barragem do Castanhão, no Estado do Ceará, Brasil, detectou-se a existência, no leito do rio, de uma depressão de paredes íngremes preenchida com areias de compactação média a fofa. Esse "canyon", que passou a ser denominado paleocanal, foi escavado no passado remoto pelo rio Jaguaribe nos gnaisses do "bedrock" local, atingindo mais de 25 m de profundidade em alguns pontos. O seu preenchimento com materiais muito heterogêneos, mais deformáveis do que o restante da fundação e do que o corpo da barragem de terra compactada, impunha uma reavaliação cuidadosa da segurança da obra.

Além disso, prospecções de campo revelaram que a heterogeneidade extrema dos materiais arenosos não estava restrita ao paleocanal, mas estendia-se pela fundação da barragem em toda a área do grande leito do rio Jaguaribe.

Dois eram os problemas potenciais associados a essa feição geológica:

1. o aumento da magnitude dos recalques diferenciais, em função das espessuras muito variáveis de material deformável na fundação, com risco de trincamento da obra paralelamente ao paleocanal, ou seja, exatamente no sentido montante-jusante;
2. a redistribuição de tensões, provocada pela presença do paleocanal, com regiões mais rígidas tendendo a absorver maior parcela das cargas verticais e o conseqüente alívio das regiões menos rígidas, podendo ocasionar:
 - a. redução dos coeficientes de segurança do talude de jusante da barragem, em período operacional, mesmo quando considerados apenas os carregamentos estáticos;
 - b. aumento da susceptibilidade a fenômenos sísmicos, cuja probabilidade de ocorrência na região era considerada não desprezível por diversos estudos.

Os estudos aqui relatados, desenvolvidos em 1998, incluíram análises de tensões e de deslocamentos na barragem e em suas fundações e visavam a orientar providências de projeto e execução da barragem de terra, face aos condicionantes acima mencionados. A barragem de terra acabou sendo substituída por uma barragem de concreto rolado, mas por motivos que não ficaram restritos aos resultados destes estudos.

2 - ESTRUTURA DO ESTUDO

2.1 - Organização geral

O estudo preliminar das características geométricas e geotécnicas do problema tornou claro que a redistribuição de tensões e o campo de deslocamentos só poderiam ser adequadamente

estudados por meio de uma análise tridimensional de parte da Barragem do Castanhão, incluindo suas fundações.

A porção definida para análise tinha 400 m de extensão ao longo do vale do Rio Jaguaribe por cerca de 280 m de largura no sentido transversal ao vale, englobando a ombreira direita e a região da fundação da barragem, na qual se detectou a presença do paleocanal, estendendo-se transversalmente ao vale até uma distância suficiente para que pudesse ser considerada desprezível a perturbação causada pela existência do paleocanal (Figura 1).

Os estudos foram conduzidos segundo a estrutura apresentada a seguir.



2.2 - Análises de estabilidade: coeficientes de segurança sob condições estáticas

A existência, em uma estrutura deformável (por exemplo a barragem e sua fundação), de uma região *mais* deformável, seja pela maior espessura de material, seja pela maior deformabilidade desse material, leva à transferência das cargas verticais de peso próprio para as regiões menos deformáveis.

Esse efeito é conhecido como arqueamento, pois a distribuição de tensões decorrente lembra aquela de um arco, com concentração nos apoios e alívio no intradorso. Esse alívio de tensões — no caso em pauta interessam principalmente as componentes verticais — pode levar à redução de momentos atuantes e resistentes. A redução destes últimos é particularmente importante em materiais cuja resistência é predominantemente decorrente do atrito.

Em conseqüência os coeficientes de segurança contra o escorregamento dos taludes podem, na realidade, ser algo inferiores àqueles determinados pela via usual, mesmo sob solicitação exclusivamente estática (gravitacional).

Para o estudo desta condição, as tensões verticais obtidas nas análises tensão-deformação tridimensionais (incorporando, portanto, os efeitos de arqueamento), foram utilizadas para reavaliar os

resultados obtidos em programas usuais de análise bidimensional de estabilidade de taludes, levando a coeficientes de segurança mais realistas.

2.3 - Verificação da susceptibilidade a sismos

Embora seja corriqueira para as centrais nucleares, a análise dinâmica da estrutura, no domínio do tempo, não é rotineiramente exigida para barragens no Brasil, mercê dos registros históricos pouco significativos de sismos em território brasileiro. Fora do Brasil essa via de solução é por vezes adotada para barragens em regiões de acentuada sismicidade (vide, por exemplo, Popescu *et al.*, 1997).

No presente estudo adotou-se um via alternativa composta de duas verificações mais simples cujos resultados, combinados, foram considerados adequados para orientar eventuais decisões relacionadas com a susceptibilidade a sismos:

- análises pseudo-dinâmicas de estabilidade;
- análises de potencial de liquefação.

2.4 - Verificação dos recalques diferenciais

O problema dos recalques diferenciais não reside propriamente na magnitude dos recalques, no caso das barragens, mas na eventual ocorrência de tensões de tração em regiões do maciço compactado, com a possibilidade de abertura de trincas.

Tal situação é particularmente preocupante se tais trincas se desenvolverem no sentido montante-jusante, constituindo-se em caminhos preferenciais de fluxo durante a operação do reservatório. Por essa razão essa questão foi tratada pela análise e interpretação das tensões normais a planos verticais montante-jusante, tensões estas obtidas das simulações numéricas tridimensionais de construção da barragem.

3 - DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA E GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO

O primeiro passo da análise foi, obviamente, a definição da geometria da fundação e, em especial, do paleocanal. Verificou-se que a escala das informações plani-altimétricas disponíveis não permitia traduzir com fidelidade as impressões visuais e fotográficas relativas às paredes do paleocanal, mas foi necessário respeitar a objetividade dos levantamentos topográficos.

A Figura 1 apresenta a geometria do topo rochoso na fundação da região analisada (o eixo da barragem corresponde à abscissa $X=0.0$).

Os parâmetros geológico-geotécnicos das areias da fundação foram obtidos a partir de sondagens e ensaios de penetração. A erraticidade desses sedimentos aluvionares levou a interpretar as prospecções realizadas de uma forma quantitativa, porém não geometricamente referenciada: todas as prospecções (SPT e CPT) foram analisadas e

interpretadas probabilisticamente quanto às espessuras das camadas e quanto às respectivas resistências ao cisalhamento, deformabilidades e permeabilidades (de certa forma traduzidas pelas resistências à penetração, tanto estáticas quanto dinâmicas); no entanto, nas análises não foi imposta a *localização* de cada furo de prospecção, por se considerar que, dada a erraticidade do processo de deposição, o perfil observado em determinado furo poderia, com igual probabilidade, ter sido observado em qualquer outro ponto da fundação. Formulação semelhante, para situação de erraticidade comparável, foi a adotada por Popescu *et al.* (1997). Não se identificou correlação estatisticamente significativa entre espessuras e deformabilidades das areias de fundação: camadas espessas podiam ser, com igual frequência, de material muito ou pouco deformável.

Assim sendo, para cada etapa do estudo selecionaram-se, a partir das curvas de distribuição de espessuras e de resistências à penetração, os perfis considerados mais críticos perante o fenômeno estudado naquela etapa. Tal decisão de Engenharia prende-se à necessidade de se garantir segurança adequada inclusive contra situações desfavoráveis que, ainda que não detectadas pelas sondagens disponíveis, são igualmente prováveis àquelas detectadas, simplesmente em função do caráter errático dos depósitos de várzea.

4 - ANÁLISES TENSÃO-DEFORMAÇÃO TRIDIMENSIONAIS

4.1 - Definições gerais

São bastante mais comuns as análises tensão-deformação baseadas em modelos bidimensionais, isto é, modelos em que as estruturas reais, tridimensionais, são modeladas de forma aproximada em duas dimensões. Trata-se de uma simplificação que em muitos casos leva a resultados aceitáveis, não se justificando maiores níveis de sofisticação.

No caso presente, porém, diversos motivos tornavam imperiosa a análise tridimensional:

- a obliquidade do paleocanal com relação ao eixo da barragem (Figura 1);
- as variações geométricas naturais dessa feição: taludes de inclinações muito variáveis, regiões mais profundas associadas a uma paleocachoeira, etc.;
- as variações geométricas e geotécnicas da seção transversal concebida para a barragem;
- a variabilidade natural das propriedades geotécnicas do material aluvionar do paleocanal e da fundação em geral, cujo efeito é exatamente o que se pretende investigar.

Base impenetrável com muro após correções (8.6.98)

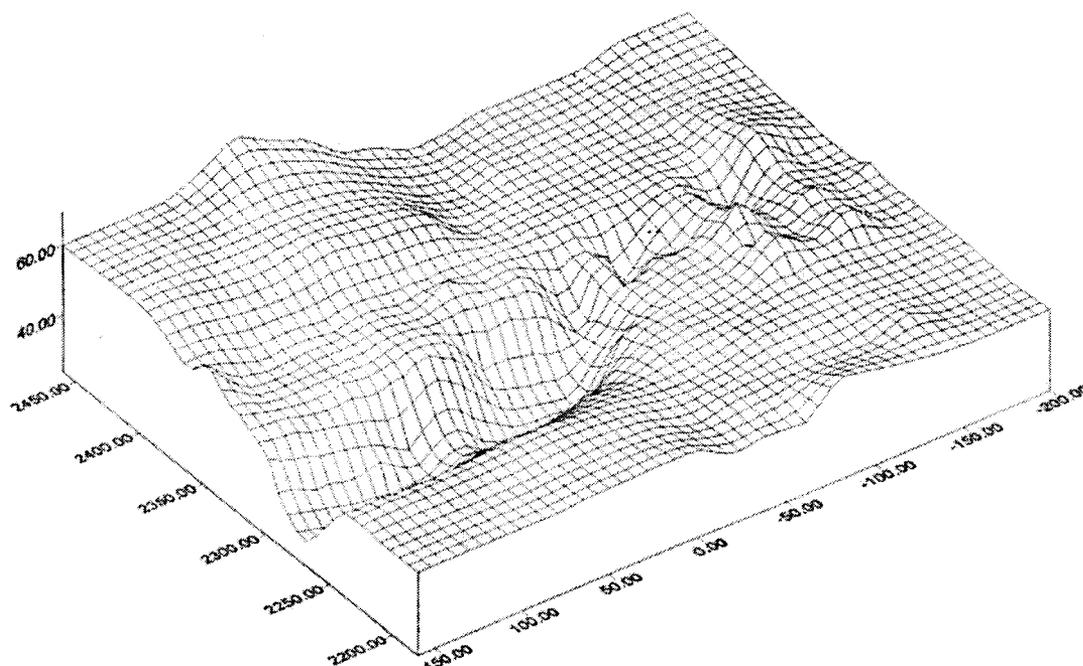


Fig. 1 – Topografia do topo rochoso da região analisada.

As análises tridimensionais permitiram estimar com maior realismo deslocamentos (recalques, em particular), tensões e deformações a serem utilizados nas etapas subsequentes do estudo.

O problema foi analisado pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o programa Adina, versão 7.1 com os "softwares" de apoio necessários para a geração das malhas tridimensionais de elementos finitos (Patran, versão 7). Esses programas, que fazem parte do acervo do Laboratório de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMC), foram na época processados em estações de trabalho Silicon Graphics Indigo 2 e Sun Microsystems Enterprise 3000.

A construção da barragem foi simulada em 6 camadas com espessuras decrescentes da base para a crista: 20 m (aproximadamente), 15 m, 10 m, 5 m, 5 m, 5 m. Uma fase final de carregamento correspondia à aplicação da pressão hidrostática à região de montante da barragem (enchimento do reservatório). Embora tenha sido adotado o modelo elástico linear para representar o comportamento de todos os materiais, a simulação da construção por fases e, além disso, com variação dos parâmetros elásticos de fase para fase, caracteriza uma análise não linear.

Face às incertezas quanto à distribuição e compacidade do material de fundação, foram conduzidas análises paramétricas, com variação das propriedades de volumes preestabelecidos desse material, de maneira a avaliar a sensibilidade dos resultados.

4.2 - Definição da geometria

A definição da geometria, etapa preliminar do estudo, foi desenvolvida pela Vector em colaboração com o LMC, após visita à obra pela equipe da Vector, para esclarecer dúvidas existentes quanto aos levantamentos topográficos disponíveis, definindo e validando as informações a serem utilizadas nos estudos.

O volume a ser analisado foi inicialmente representado por 16 seções transversais à barragem, identificadas pelos números, estacas e ordenadas Z indicadas no Quadro 1.

As seções 5 (vide, por exemplo, a Figura 10 adiante) e 11, foram consideradas as mais representativas, nas análises subsequentes, de uma seção do paleocanal e de uma seção fora dele, ou seja, na área da calha do rio Jaguaribe.

Quadro 1 - Seções transversais à Barragem do Castanhão

Seção	Estaca	Ordenada Z
1	109	0
2	110+10	30
3	112	60
4	113+10	90
5	114	100
6	114+10	110
7	115	120
8	115+10	130
9	116	140
10	116+10	150
11	117	160
12	117+10	170
13	118	180
14	119+10	210
15	121	240
16	123	280

4.3 - Discretização

O esforço necessário nas fases de definição da geometria e discretização foi muito superior ao inicialmente previsto, por questões ligadas à complexidade da geometria, ao número de materiais diferentes e às mudanças bruscas das regiões associadas a cada material quando se consideram seções distintas, principalmente na região do paleocanal. Sabia-se, no entanto, que a qualidade dos resultados dependia criticamente da fidelidade desse modelo geométrico discretizado.

A malha gerada, com 40.486 elementos tetraédricos e 8.176 nós — reduzindo o problema a um sistema de 20.160 equações simultâneas — está esquematicamente representada na Figura 2.

4.4 - Atribuição de parâmetros

O Quadro 2 apresenta um resumo dos parâmetros adotados para os diversos materiais do corpo da barragem, para cada uma das fases da construção. Esses valores foram fixados com base em alguns poucos ensaios com materiais semelhantes e em dados bibliográficos (Cruz, 1996).

Para todos os materiais adotou-se coeficiente de Poisson de 0,25.

Considerando-se a erraticidade dos depósitos aluvionares do material arenoso da fundação, discutida no item 3, e a conveniência de se manter uma razoável flexibilidade para variação dos parâmetros elásticos desse material, a fundação da barragem foi subdividida em grandes volumes da seguinte forma:

- fora do paleocanal
 - uma camada superficial, C3, com 3 m de espessura;
 - uma camada correspondente ao restante da espessura de areia, CF;
- dentro do paleocanal
 - uma camada superficial, com 3 m de espessura, C3;
 - uma camada imediatamente subjacente, C4, com 4 m de espessura;
 - uma camada correspondente ao restante da espessura de areia, CF.

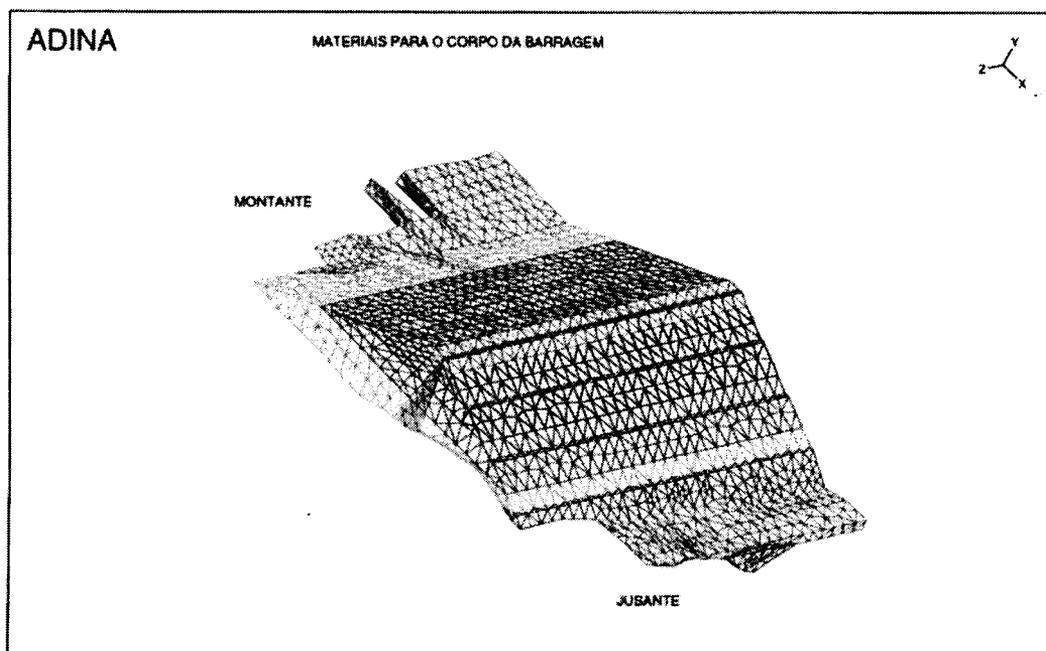


Fig. 2 – Malha de elementos finitos adotada.

Quadro 2 - Parâmetros elásticos adotados para os materiais da Barragem do Castanhão e da sua fundação (0 indica camada inexistente na fase de simulação considerada)

MÓDULOS DE ELASTICIDADE FASE A FASE
(kgf/cm²)

Material	Zona	Camada	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
Aterro	1	camada 1	920	760	700	670	655	645
Filtro	2	camada 1	1430	1290	1200	1150	1100	1050
Aterro	3	camada 1	920	760	650	580	530	490
Aterro	4	camada 1	920	760	650	650	650	650
Aterro	5	camada 1	920	760	760	760	760	760
Aterro	6	camada 1	920	790	790	790	790	790
Aterro	7	camada 1	920	810	810	810	810	810
Aterro	8	camada 1	920	860	860	860	860	860
Enroc.	9	camada 1	930	930	930	930	930	930
Aterro	10	camada 2	0	940	900	870	850	830
Filtro	11	camada 2	0	1450	1360	1310	1260	1210
Aterro	12	camada 2	0	940	840	780	760	730
Aterro	13	camada 2	0	940	840	840	840	840
Aterro	14	camada 2	0	940	900	900	900	900
Aterro	15	camada 2	0	960	960	960	960	960
Aterro	16	camada 2	0	975	975	975	975	975
Aterro	17	camada 2	0	1000	1000	1000	1000	1000
Aterro	18	camada 3	0	0	975	920	890	870
Filtro	19	camada 3	0	0	1480	1430	1380	1330
Aterro	20	camada 3	0	0	975	920	890	870
Aterro	21	camada 3	0	0	975	975	975	975
Aterro	22	camada 3	0	0	1000	1000	1000	1000
Aterro	23	camada 4	0	0	0	1000	940	920
Filtro	24	camada 4	0	0	0	1500	1450	1400
Aterro	25	camada 4	0	0	0	1000	940	920
Aterro	26	camada 5	0	0	0	0	1000	940
Filtro	27	camada 5	0	0	0	0	1500	1450
Aterro	28	camada 5	0	0	0	0	1000	940
Aterro	29	camada 6	0	0	0	0	0	1000
Filtro	30	camada 6	0	0	0	0	0	1500
Aterro	31	camada 6	0	0	0	0	0	1000
Filtro Horizontal								
Filtro	3'	camada 1	1340	1200	1100	1050	1025	1000
Filtro	4'	camada 1	1340	1200	1100	1100	1100	1100
Filtro	5'	camada 1	1340	1200	1150	1150	1150	1150
Filtro	6'	camada 1	1340	1220	1220	1220	1220	1220
Filtro	7'	camada 1	1340	1240	1240	1240	1240	1240
Filtro	8'	camada 1	1340	1280	1280	1280	1280	1280

zona X' => imediatamente abaixo da zona X

Nas simulações numéricas foram consideradas três diferentes condições de deformabilidade da fundação, de acordo com o Quadro 3. No decorrer das análises revelou-se desnecessário explorar a possibilidade, prevista inicialmente, de se ter

$E_{C3} \neq E_{C4}$, isto é, módulo de Young da camada superficial da fundação diferente do módulo da camada imediatamente subjacente, na região do paleocanal.

Quadro 3 – Casos analisados quanto à deformabilidade dos materiais de fundação

Caso	Probabilidade de ocorrência	Descrição	Módulos de Young
1	< 5%	Uma condição crítica razoavelmente realista para a deformabilidade dos materiais de preenchimento do paleocanal	$E_{C3}=E_{C4}=750 \text{ kgf/cm}^2$ e $E_{CF}=250 \text{ kgf/cm}^2$
2	0%	Paleocanal preenchido de material "indeformável" (semelhante a rocha ou concreto); este caso foi analisado para permitir, por comparação com os demais, avaliar a redistribuição de tensões decorrente da existência de materiais deformáveis no paleocanal	$E_{C3}=E_{C4}=E_{CF}=9,2 \times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$ ("infinitamente" rígido)
3	< 0,5%	Uma condição considerada extrema para a deformabilidade dos materiais de preenchimento do paleocanal, maximizando o arqueamento e os recalques	$E_{C3}=E_{C4}=750 \text{ kgf/cm}^2$ e $E_{CF}=100 \text{ kgf/cm}^2$

Em cada caso os parâmetros foram escolhidos conservadoramente integrando-se informações tanto das distribuições de frequência de espessuras de camadas e de deformabilidade dos materiais (item 3), quanto de seções de compactidade relativa obtidas a partir dos ensaios de campo. Os valores de probabilidades de ocorrência sugeridos no Quadro 3 não devem ser vistos como resultados de aplicação de modelos probabilistas formais, mas como resultados da integração heurística (e subjetiva) de todas as informações disponíveis.

4.5 - Condições de contorno

Os contornos laterais ($Z=0$ e $Z=280$) foram considerados livres nas 3 direções, isto é, com possibilidade de deslocamentos verticais e horizontais. A interface fundação-rocha foi considerada indeslocável nas três direções, simulando um apoio sobre material indeformável e aderente às areias da fundação.

4.6 - Análise numérica

Cada análise numérica utilizando o programa ADINA, versão 7.1, compreendendo as 6 fases de construção e a aplicação do carregamento hidráulico, levou cerca de 15 horas de processamento ininterrupto de uma estação de trabalho gráfica de última geração em 1998 (Servidor Enterprise 3000 da Sun Microsystems Inc., com módulo processador Ultrasparc de 250 MHz).

4.7 - Apresentação dos resultados

A massa de informações produzida por análises tridimensionais de tensões e deformações só pode ser interpretada adequadamente através de gráficos. No caso presente esses gráficos foram gerados pelo "software" A dinaPlot, versão 7.1. Os gráficos mais relevantes para a análise interpretativa são apresentados nas figuras mencionadas adiante

5 - ANÁLISES DE ESTABILIDADE

5.1 - Condições gerais

Concentraram-se no talude de jusante as análises de estabilidade do maciço compactado, apoiado sobre areias de fundação em condição natural de compactidade. A solicitação condicionante da segurança é a eventual ocorrência de sismo. Tal condição só seria crítica para o talude de montante se combinada a uma situação transiente de rebaixamento rápido. A ocorrência simultânea desses dois eventos extremos é considerada suficientemente remota para justificar a concentração das tensões no talude de jusante em condição de operação.

Duas seções transversais foram consideradas para análise:

- a seção 5, estaca 114, $Z=100$ (vide Quadro 1), aproximadamente longitudinal ao paleocanal;
- a seção 11, estaca 117, $Z=160$ (vide Quadro 1), que passa pela fundação fora da região do paleocanal, sendo representativa do restante da área da calha do rio.

Quadro 4 - Parâmetros de resistência adotados para os materiais da Barragem do Castanhão e de sua fundação

Material	Peso Específico (tf/m ³)	Tensão normal efetiva (tf/m ²)	Intercepto de Coesão Efetiva (tf/m ²)	Ângulo de Atrito Efetivo (°)
Corpo da barragem	1,8	< 7	0	63,27
		entre 7 e 70	10	29,13
		> 70	0	35
Areia dos filtros	1,9		0	42
Enrocamento de pé	1,9		0	48
Areia da fundação	1,7		0	32

Os parâmetros geotécnicos de interesse estão resumidos no Quadro 4 e na Figura 3.

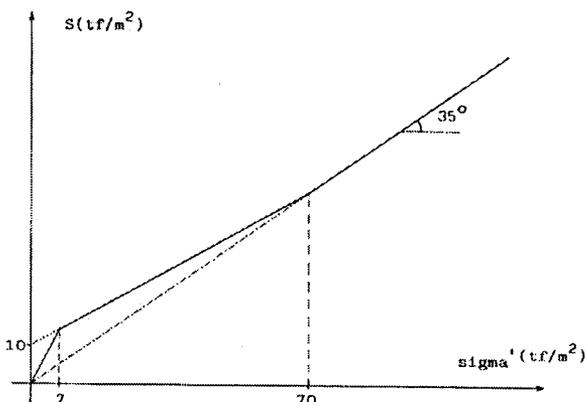


Figura 11

Fig. 3 - Envoltória de resistência adotada para o corpo da Barragem do Castanhão.

As pressões neutras de operação foram obtidas, simplificada, a partir de uma linha piezométrica compatível com os níveis de água de montante (106,00, NA máximo de amortecimento de cheias) e de jusante (57,00, cota da crista da ensecadeira de jusante).

Para cada uma das análises da seção do paleocanal (seção 5) foram consideradas duas condições de tensões nas bases das lamelas:

- a situação usual, em que a tensão na base da lamela é função direta do peso da coluna de solo imediatamente acima;
- a situação que leva em conta o arqueamento, com as tensões reduzidas no paleocanal em decorrência desse efeito; os valores das tensões reduzidas foram obtidos nas análises tensão-deformação tridimensionais descritas no item 4.

As Figuras 4 a 6 apresentam as distribuições de tensões verticais em seções longitudinais à barragem (transversais ao paleocanal) na sua crista ($X=0$), 30 m para jusante ($X=30$) e 30 m para montante ($X=-30$), obtidas nas análises tensão-deformação tridimensionais do item 4, para o Caso 1, do Quadro

3. As Figuras 7 e 8 apresentam os mesmos resultados para os Casos 2 e 3, na crista ($X=0$).

A análise comparativa das Figuras 4, 7 e 8 ilustra a redução das tensões verticais na seção do paleocanal, por efeito do arqueamento, e confirma que nas laterais ao paleocanal as tensões verticais são iguais ou superiores às de peso de solo, aumentando nos "encontros do arco"; é importante comparar também as Figuras 4 a 6 para verificação desse efeito ao longo do paleocanal.

Fica claro, portanto, que somente no paleocanal (seção 5) a redistribuição de tensões pode tornar mais crítica a condição de estabilidade, não se justificando, portanto, nenhuma análise adicional para a seção 11, na qual as tensões de peso de coluna de solo de cada lamela já são as mais críticas.

Todas as análises de estabilidade realizadas utilizaram modelos bidimensionais baseados no método do equilíbrio limite, por meio dos processos de Spencer e Sarma, conforme implementados no programa Estável, da Geoexpert (1999).

Nas análises pseudo-dinâmicas pelo processo de Spencer foram aplicadas acelerações horizontais e verticais representativas do máximo sismo previsível para a região da obra e comparados os coeficientes de segurança com aqueles normalmente aceitos para tais solicitações extremas.

A aceleração horizontal de projeto, $K_h = 0,20$ g, foi adotada com base no relatório CAS-051192, do Prof. Victor F. B. de Mello, para a Comissão do Meio Ambiente da Assembléia Legislativa do Estado do Ceará, o qual, por sua vez, estava fundamentado em Relatório Geológico-Tectônico do Prof. Georg Robert Sadowski. Considerando-se que todo e qualquer fenômeno sísmico gera acelerações nas três direções, foi também considerada a possibilidade da presença de uma pequena aceleração vertical, $K_v = 0,05$ g. Publicações do ICOLD sobre o assunto (ICOLD, 1989) recomendam valores ainda maiores para a relação K_v/K_h , mas considerou-se que aqueles valores seriam aplicáveis a regiões com atividade sísmica mais intensa.

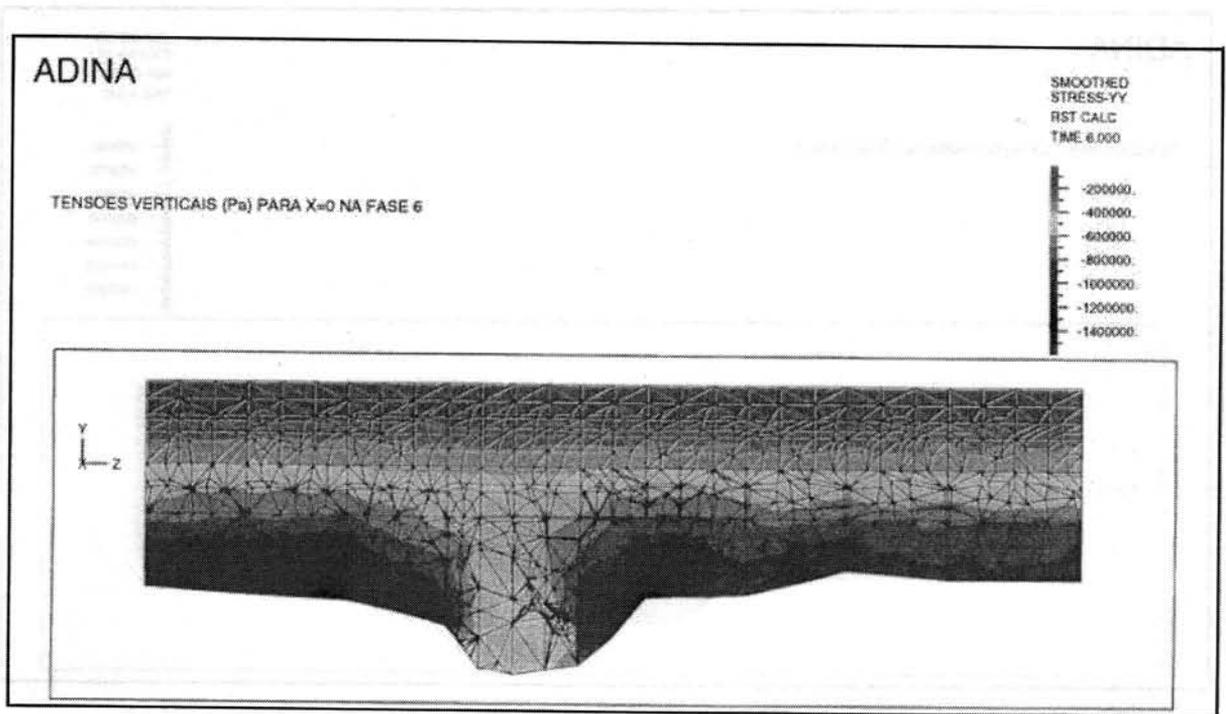


Fig. 4 – Tensões verticais de operação, caso 1, seção longitudinal sob a crista (X=0).

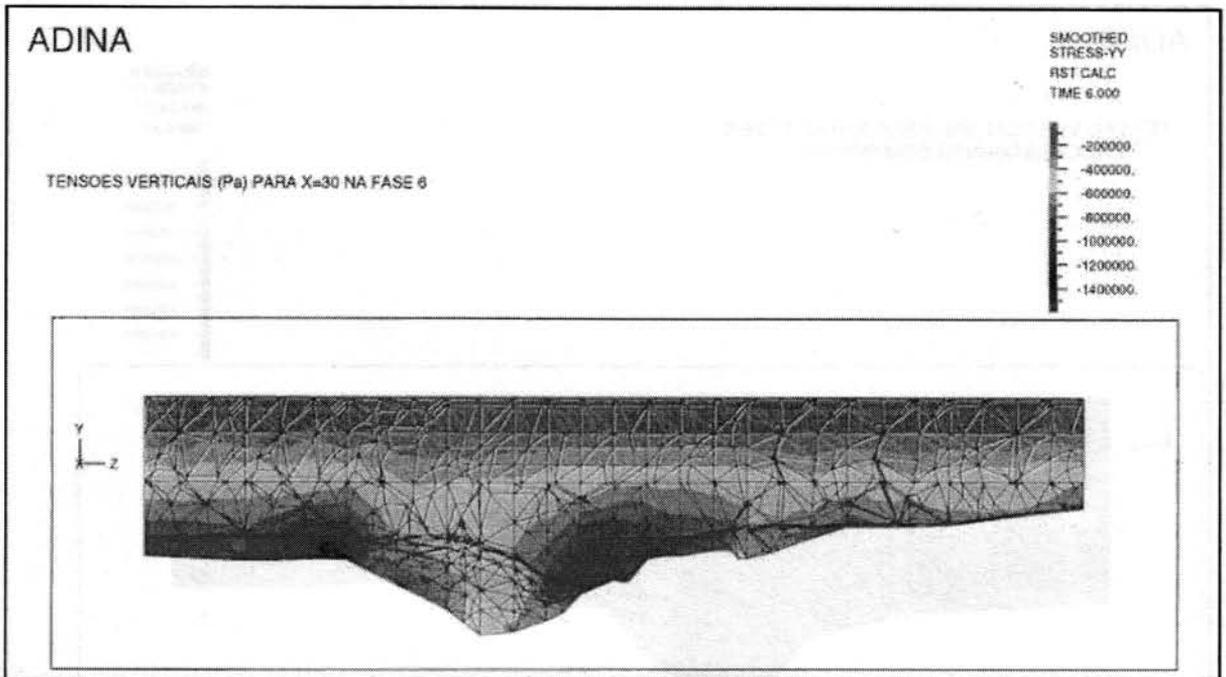


Fig. 5 – Tensões verticais de operação, caso 1, seção longitudinal 30 m a jusante da crista (X=30).

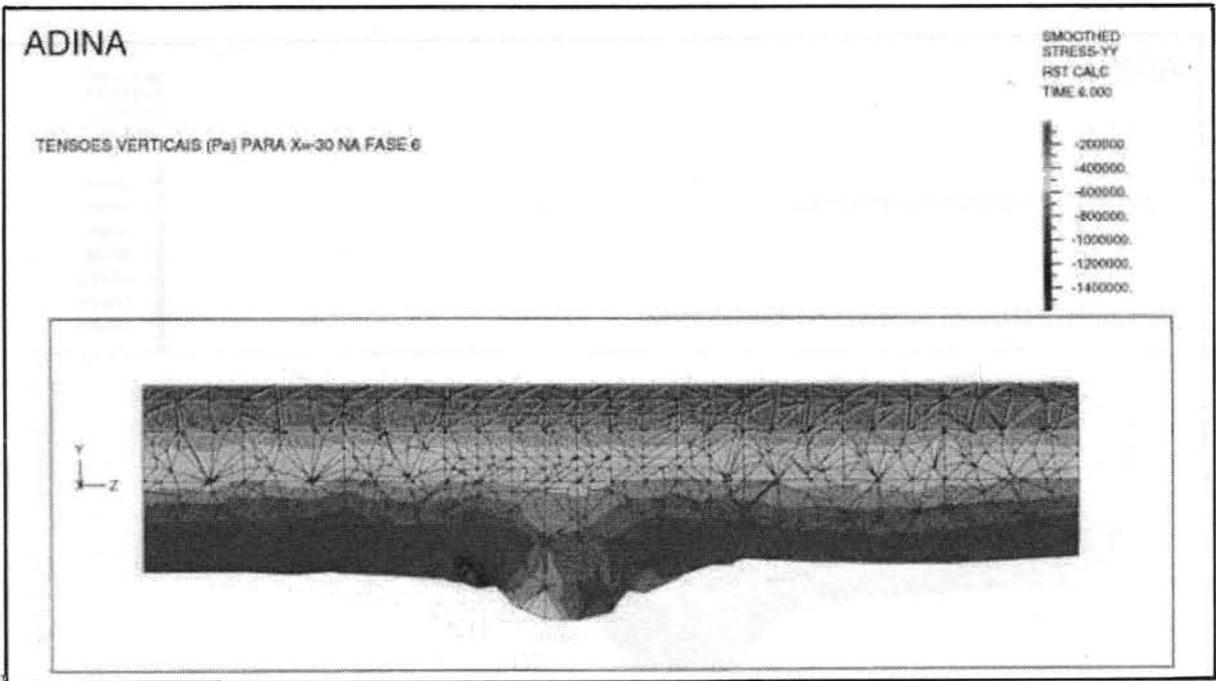


Fig. 6 – Tensões verticais de operação, caso 1, seção longitudinal 30 m a montante da crista (X=-30).

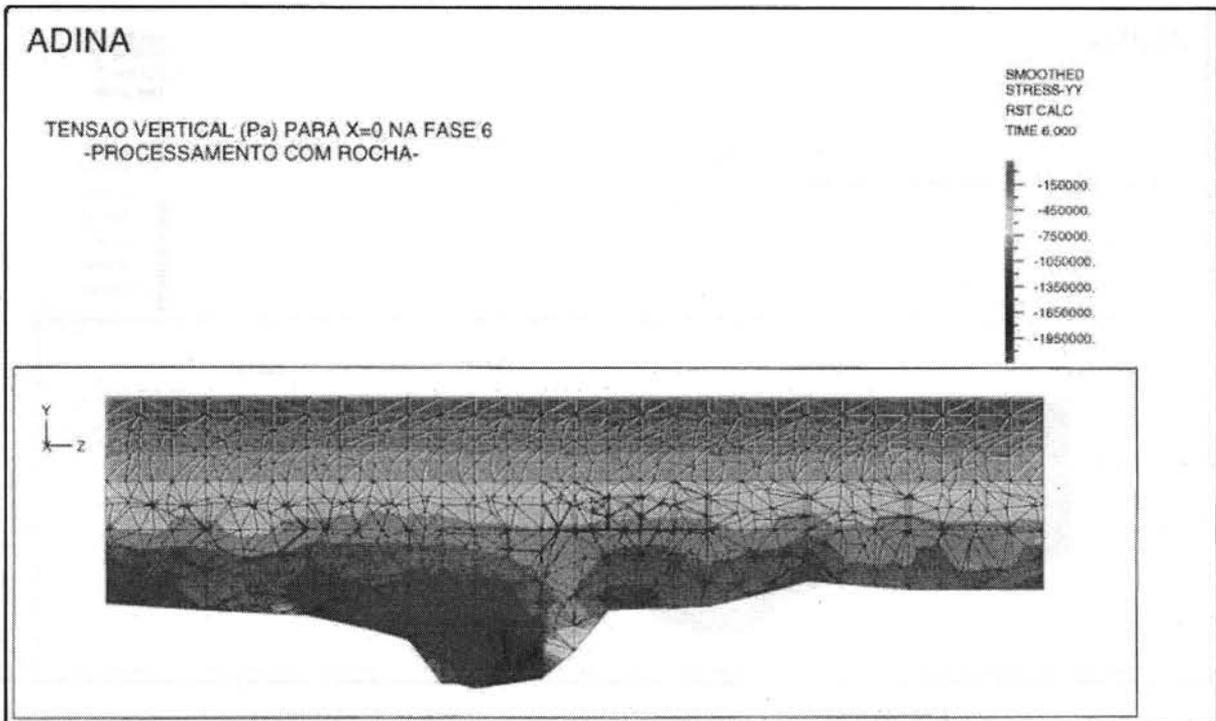


Fig. 7 – Tensões verticais de operação, caso 2, seção longitudinal sob a crista (X=0)

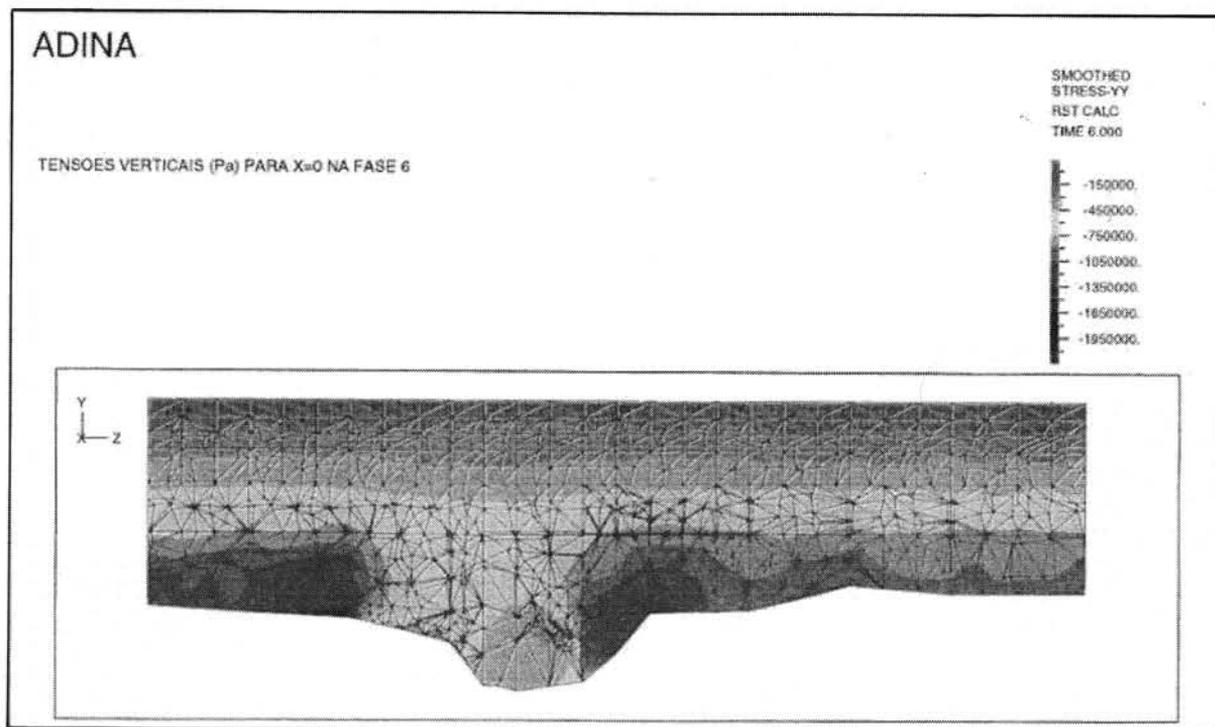


Fig. 8 – Tensões verticais de operação, caso 3, seção longitudinal sob a crista ($X=0$).

Foram analisadas, portanto, três condições de aceleração:

- Condição A - $K_h=K_v=0$;
- Condição B - $K_h=0,2$ e $K_v=0$;
- Condição C - $K_h=0,2$ e $K_v=0,05$.

O processo de Sarma fornece a aceleração horizontal crítica, K_c , que levaria o talude à iminência de escorregamento (coeficiente de segurança unitário). A medida da segurança é dada pela comparação dessa aceleração com a aceleração horizontal de projeto, K_h , mas é igualmente comum interpolar aquele que seria o coeficiente de segurança em condição estática correspondente à aceleração crítica; essas duas medidas de segurança são apresentadas neste estudo. O processo de Sarma não prevê, em sua formulação rotineira, a ocorrência simultânea de aceleração vertical.

Na Figura 9 apresenta-se a superfície crítica de uma das análises de estabilidade. Os resultados das diversas análises estão reunidos no Quadro 5.

5.2 - Análises sob tensões verticais plenas

Das análises e fetuadas sob a hipótese de atuação de tensões verticais plenas ficava claro que a Barragem do Castanhão era plenamente estável em condições estáticas, tanto na seção do paleocanal

quanto fora, com coeficiente de segurança da ordem de 2.

As condições pseudo-dinâmicas, porém, levavam a barragem a níveis de segurança considerados inaceitáveis na região do paleocanal (coeficiente de segurança da ordem de 1,11) e limítrofes nas seções externas a ele (coeficiente de segurança da ordem de 1,27), dado que para essa condição extrema seria exigível um coeficiente de segurança mínimo de 1,3.

5.3 - Análises sob tensões verticais reduzidas

Para se quantificar o efeito da redistribuição de tensões na estabilidade da seção 5 (paleocanal) foram consideradas as tensões verticais obtidas na análise tridimensional de tensões, Casos 1 e 3 (Quadro 3), representados respectivamente nas Figuras 10 e 11. Essas tensões foram aplicadas às bases das lamelas, em substituição às tensões de peso de solo das análises sob tensões verticais plenas, e as condições de equilíbrio foram revistas para as novas tensões, levando aos coeficientes de segurança das colunas identificadas como Caso 1 e Caso 3 no Quadro 5.

O gráfico da Figura 12 ilustra o efeito do arqueamento sobre as tensões verticais ao longo de uma superfície de escorregamento.

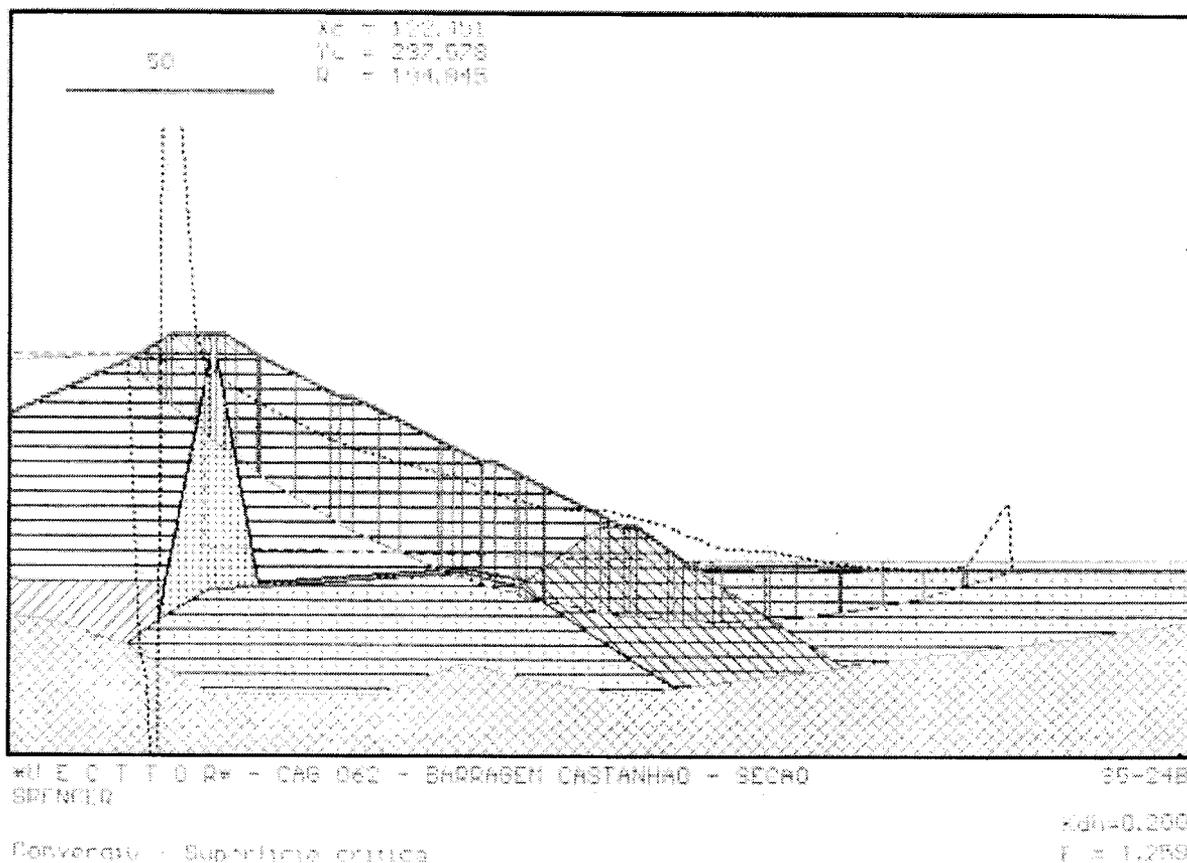


Fig. 9 – Análise de estabilidade da seção transversal 5, condição B, sob tensões verticais plenas.

Quadro 5 – Resultados das análises de estabilidade

Processo de Análise de Estabilidade	Acelerações	Superfície crítica ...	Seção 5			Seção 11
			Análises sob tensões verticais plenas	Análises sob tensões verticais reduzidas		
				Caso 1	Caso 3	
Spencer (coeficientes de segurança)	$K_H=K_V=0$ Condição A	da Condição A	1,986	2,000	2,081	2,088
		da <i>Condição C</i>	2,202	2,239	2,271	
	$K_H=0,2$ e $K_V=0$ Condição B	da Condição B	1,259	1,159	1,097	1,406
		da <i>Condição C</i>	1,270	1,025	0,934	
$K_H=0,2$ e $K_V=0,05$ Condição C	da Condição C	1,110	0,819	0,711	1,268	
Sarma (acelerações horizontais críticas)	K_C para $F=1$	desta pesquisa	$K_C=0,324$			$K_C=0,420$
	F eqüivalente para $K_H=K_V=0$		$F \cong 2,211$			$F \cong 2,113$

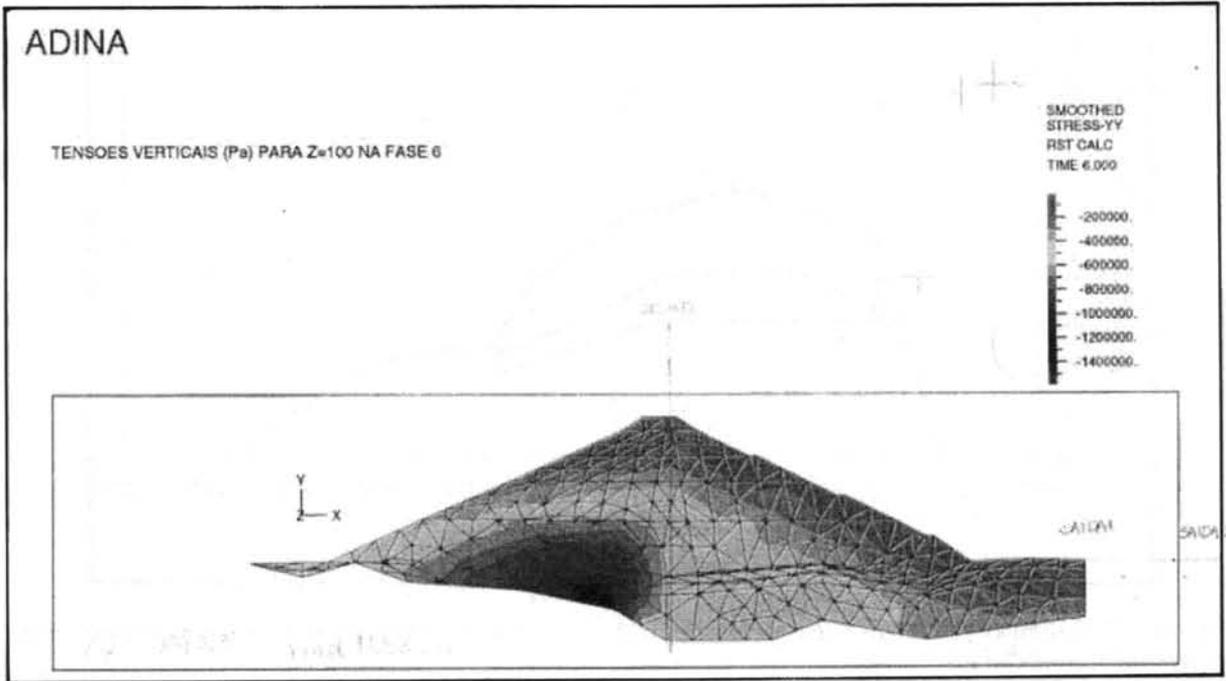


Fig. 10 – Tensões verticais de operação, caso 1, seção transversal 5, estaca 114, Z=100.

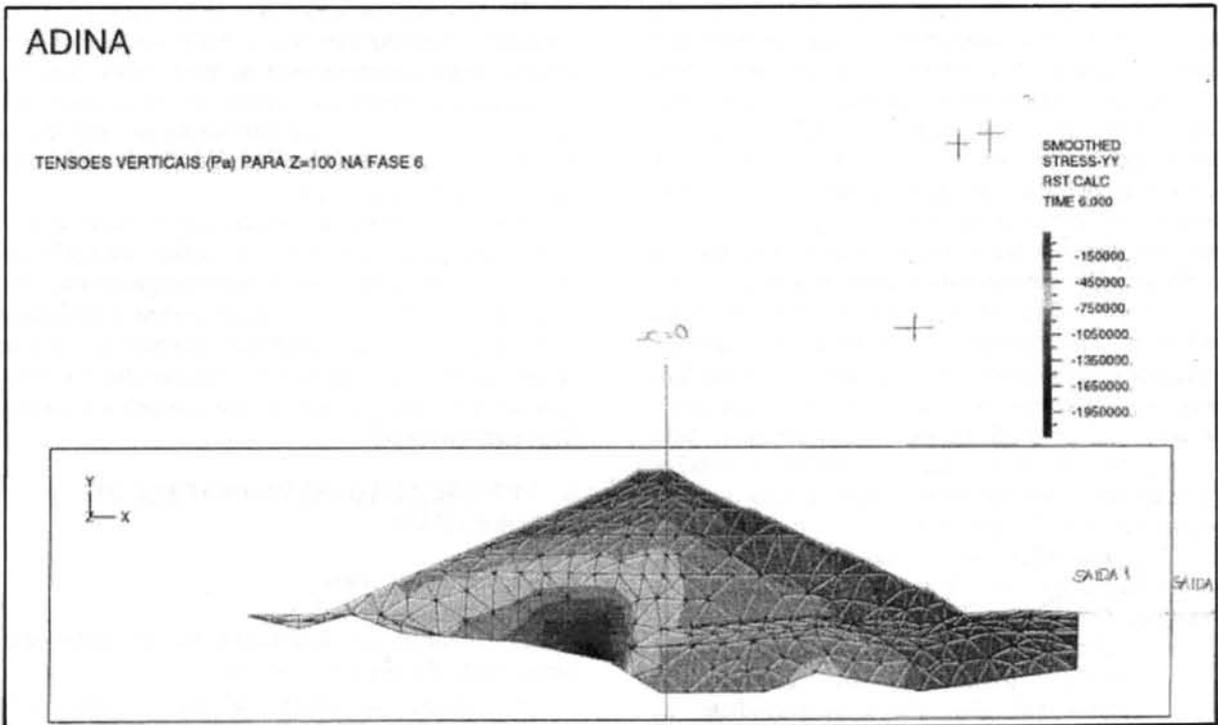


Fig. 11 – Tensões verticais de operação, caso 3, seção transversal 5, estaca 114, Z=100.

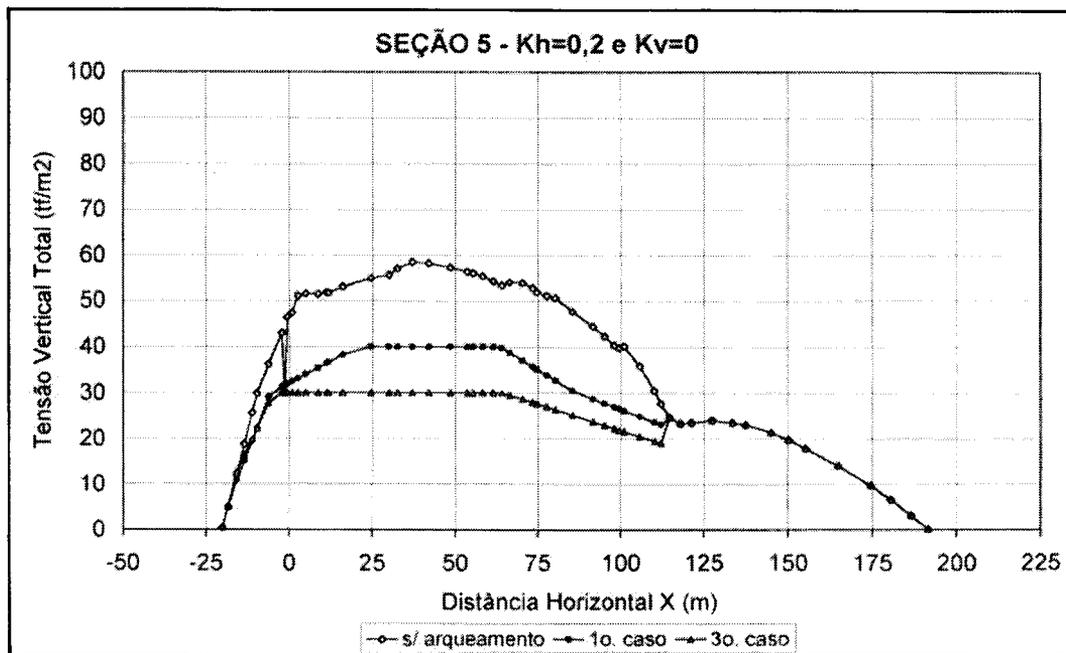


Fig. 12 – Efeito do arqueamento sobre as tensões verticais a o longo da superfície de escorregamento: seção transversal 5, condição B.

Como era de se esperar, o arqueamento se faz mais sensível para a hipótese de deformabilidades do Caso 3, no qual é maior o contraste de rigidez entre as camadas superiores do paleocanal e a camada inferior (vide Quadro 3). Esse fato se reflete também nos coeficientes de segurança do Quadro 5: superfícies de escorregamento mais rasas (como, por exemplo, aquelas da Condição A) experimentam um aumento do coeficiente de segurança (pela redução dos momentos solicitantes), pois nella a contribuição do atrito para a resistência é relativamente menor, o que faz com que o resultado final da redistribuição de tensões seja favorável. Em tais situações, por prudência investigou-se também o coeficiente de segurança da superfície mais profunda (aquela da Condição C) sob tensões verticais reduzidas, na tentativa de identificar possíveis situações mais críticas. Esse cuidado não teria sido necessário se tivesse sido utilizada uma rotina capaz de *pesquisar* superfícies de escorregamento, pelo método do equilíbrio limite, interpolando tensões verticais nas bases das lamelas *diretamente* a partir dos gráficos das Figuras 10 e 11.

Os resultados de todas essas análises, consubstanciados no Quadro 5, revelaram o seguinte:

- sob condições e estáticas a redistribuição de tensões decorrente da presença do paleocanal não chega a prejudicar as condições de estabilidade da obra, conforme evidenciado pelos valores dos coeficientes de segurança, que se mantiveram próximos de 2;

- sob solicitações sísmicas, o quadro, que já não era favorável sem a redistribuição de tensões (coeficiente de segurança de 1,11), tornava-se inaceitável, com coeficientes de segurança inferiores a 1.

Deve-se ter em mente que todas as análises de estabilidade conduzidas foram bidimensionais e que algum efeito tridimensional se faria sentir também no equilíbrio limite na região do paleocanal, tal como acontece com a redistribuição de tensões, o que levaria a coeficientes de segurança um tanto superiores aos calculados.

Por outro lado, se levada em consideração a impressão geral de que os dados topográficos utilizados para a geração do modelo geométrico do paleocanal eram mais favoráveis do que a realidade observada no campo, pode-se concluir que nesse sentido a situação real de segurança tendia a ser um pouco mais crítica do que a revelada pelos números acima apresentados.

6 - VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO

6.1 - Condições gerais

O potencial de liquefação foi avaliado pela combinação de três informações:

- curvas de índice de vazios crítico em função de tensões confinantes, obtidas através de ensaios especiais sobre areias supostamente semelhantes às areias de fundação da Barragem do Castanhão;

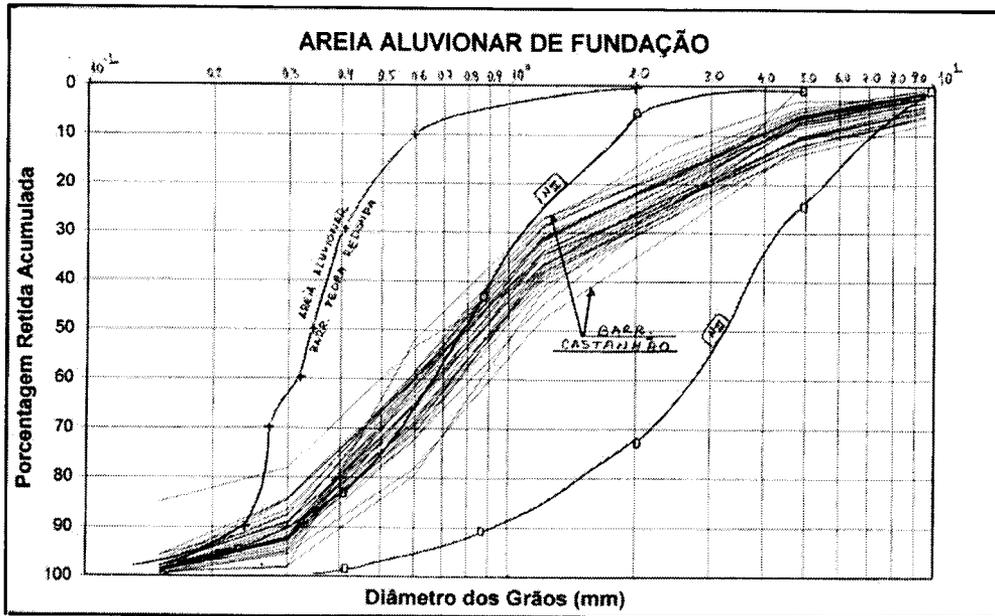


Figura 32

Fig. 13 – Curvas granulométricas das diversas areias consideradas.

- tensões médias de confinamento nos materiais de fundação, derivadas das análises de tensões tridimensionais;
- gama de variação da compacidade relativa das areias da fundação, deduzida a partir dos ensaios CPT.

Se as areias de fundação tivessem índices de vazios inferiores aos seus índices de vazios críticos, para as tensões de confinamento vigentes, poderia ser afastada a hipótese de liquefação.

6.2 Curvas de índice de vazios crítico em função de tensões confinantes

Em função da indisponibilidade de resultados de ensaios triaxiais especiais das areias de Castanhão, num primeiro momento pensou-se em utilizar os resultados obtidos para as areias de fundação da Barragem de Pedra Redonda, apresentadas por Cruz (1996). Verificou-se no entanto que a granulometria daquelas areias era significativamente diferente da granulometria das areias de fundação da Barragem do Castanhão, conforme se pode verificar na Figura 13, que reúne as curvas granulométricas das diversas areias consideradas neste estudo. As areias do Castanhão estão mais próximas, em termos granulométricos, das areias NII e NIII do artigo de Ferreira *et al.* (1990).

Segundo Ferreira *et al.* (op. cit.), para aquelas areias as curvas de índice de vazios crítico em função de tensão de confinamento foram determinadas em ensaios adensados-não drenados (CU), segundo o procedimento laboratorial proposto por Castro (1969).

Seria desejável, obviamente, que ensaios desse tipo tivessem sido realizados em amostras da própria areia da fundação da Barragem do Castanhão, para a

obtenção da sua curva de índice de vazios crítico. A comparação com outras areias introduz algumas incertezas devido a diferenças de granulometria e a possíveis diferenças de angularidade dos grãos (característica essa raramente reportada na descrição dos materiais granulares).

Na falta de informação experimental específica das areias do Castanhão, foi portanto adotada uma faixa situada entre as curvas de índice de vazios crítico das areias NII e NIII. Os índices de vazios das curvas originais de Ferreira *et al.* (op. cit.) foram convertidos em compacidades relativas, utilizando-se os valores de $e_{máx}$ e de $e_{mín}$ reportados pelos autores para as areias NII e NIII. Dessa forma, os resultados experimentais daqueles autores puderam ser aproveitados para a análise das areias de fundação da Barragem do Castanhão (curvas à direita da Figura 14), sem que houvesse necessidade de se estimar $e_{máx}$ e $e_{mín}$ dessas areias.

6.3 - Gama de variação da compacidade relativa

O primeiro passo deste item consistiu na escolha da correlação entre compacidades relativas e resistências de ponta dos ensaios CPT e SPT. Ambos os tipos de ensaios foram considerados, mas deu-se maior peso aos resultados de resistência de ponta do CPT, face à melhor qualidade das correlações disponíveis para esse ensaio.

Foram consideradas as correlações apresentadas por Baldi *et al.* (1986), Kulhawy *et al.* (1990) e Lunne *et al.* (1997), e a partir delas foram traçados perfis individuais de compacidade relativa em função da profundidade, para cada furo de prospecção. Seções de compacidade relativa obtidas a partir desses perfis individuais não foram explicitamente consideradas na análise, pelas razões

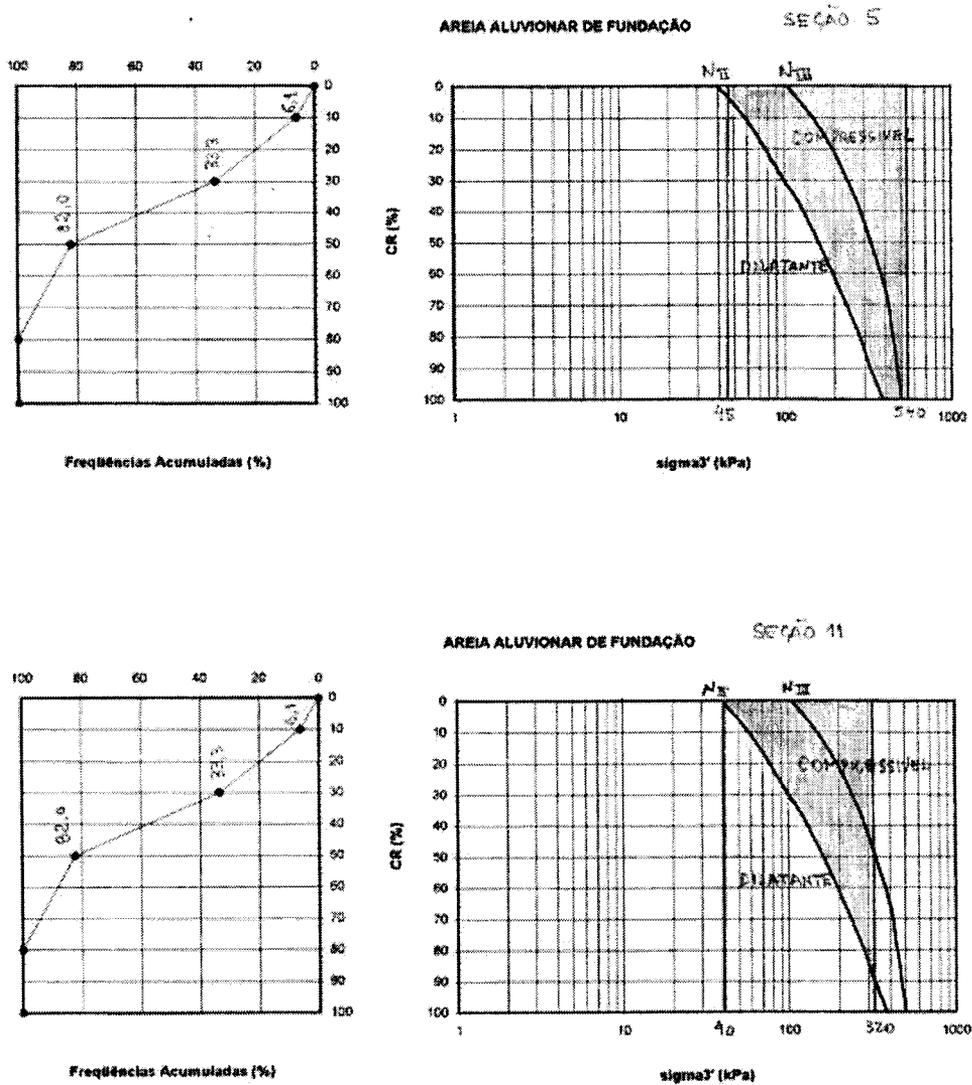


Fig. 14 – Potencial de liquefação.

de erraticidade discutidas no item 3. Em vez disso essas informações foram utilizadas para definir as curvas de frequências acumuladas de compacidade relativa das areias de fundação, apresentadas à esquerda da Figura 14.

Deve-se observar que as compacidades relativas (ou índices de vazios) que interessam ao fenômeno da liquefação são as existentes imediatamente antes da sollicitação pelo sismo. Nesse sentido os valores adotados neste estudo são ligeiramente conservadores pois foram determinados para uma situação "in situ" antes da aplicação do carregamento da barragem. Se desejado maior refinamento, as compacidades relativas poderiam ter sido ajustadas (aumentadas) em função das deformações volumétricas das areias de fundação causadas pela construção da barragem, deformações essas que no paleocanal são próximas de 2%,

conforme indicaram as análises tensão-deformação tridimensionais.

6.4 - Tensões médias de confinamento nos materiais de fundação

As curvas de compacidade relativa crítica (Figura 14) estão expressas em função da tensão principal menor efetiva, que no ensaio triaxial é igual em duas direções. Tornava-se necessário, portanto, estimar essa tensão na fundação da barragem. Considerou-se que a média de σ_2 e σ_3 das análises de tensões tridimensionais, aqui denominada σ_c , seria a melhor aproximação da tensão efetiva de confinamento dos ensaios triaxiais. A utilização da tensão normal octaédrica $(\sigma_1/3 + \sigma_2/3 + \sigma_3/3)$ teria exigido que os resultados experimentais fossem re-interpretados e expressos

igualmente em termos dessa tensão média de confinamento.

Gráficos de distribuição de tensões σ_c semelhantes ao da Figura 15 foram obtidos para as seções 5 e 11 e para os Casos 1 e 3 de deformabilidade das fundações.

No período operacional as pressões neutras de percolação deveriam ser subtraídas dessas tensões para se chegar às tensões *efetivas* de confinamento médio. Considerando-se que haveria regiões da fundação com pressões neutras baixas e que essas pressões neutras poderiam ser nulas durante um certo período após a construção, optou-se por considerar as tensões σ_c como se efetivas fossem, o que para estas análises corresponde a uma posição conservadora.

6.5 - Conclusões relativas ao potencial de liquefação

Todas as informações disponíveis relevantes para a estimativa do potencial de liquefação estão sintetizadas na Figura 14, para as seções 5 e 11.

As faixas de tensões σ_c obtidas das análises tridimensionais se sobrepõem à faixa de compacidades relativas críticas adotada como representativa das areias do Castanhão, da forma indicada pelas regiões sombreadas dos gráficos à direita da Figura 14. Essas regiões indicam condições (de tensões e de compacidade relativa) em que as areias da fundação poderiam exibir

comportamento de *redução* de índice de vazios no cisalhamento, com a conseqüente geração de sobrepressões neutras (sob solitação sísmica, por exemplo). A distribuição de freqüências de compacidades relativas, apresentada à esquerda da mesma figura, mostra que é muito elevada a probabilidade de ocorrência de camadas de areia com valores de compacidade relativa situados em uma faixa à qual os gráficos da direita associam comportamento compressível. Nessas condições *não podia ser descartada* a possibilidade de liquefação das areias de fundação, sob solitação sísmica.

Salienta-se, mais uma vez, que teria sido desejável, para uma decisão melhor fundamentada, dispor de ensaios triaxiais de potencial de liquefação realizados em amostras da própria areia da fundação da Barragem do Castanhão.

7 - VERIFICAÇÃO DOS RECALQUES DIFERENCIAIS

As Figuras 16 a 18 apresentam os deslocamentos verticais da seção da crista da barragem ($X=0$), respectivamente para os Casos 1 a 3 de deformabilidade do material de fundação.

Como era de se esperar, os recalques máximos do Caso 2 (Figura 17) e ram b astante menores, não excedendo valores da ordem de 30 cm, pois nesse caso se simulou o paleocanal preenchido com material praticamente indeformável.

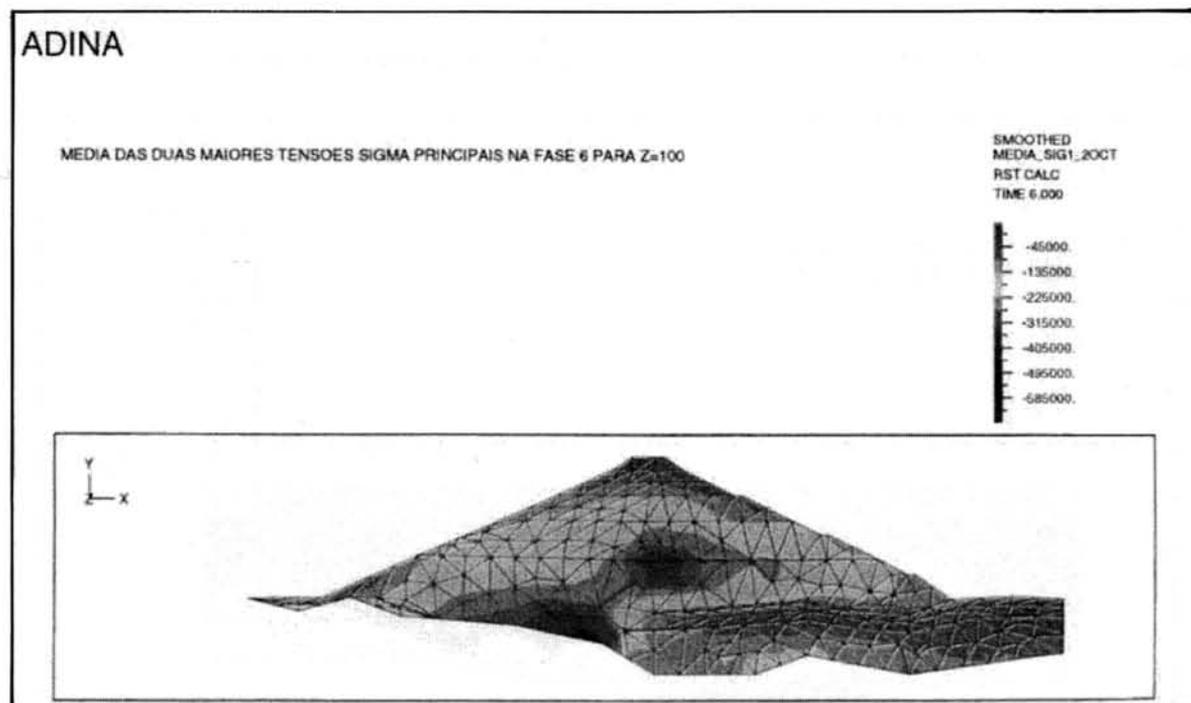


Fig. 15 – Tensão média de confinamento, caso 3, seção transversal 5, estaca 114, Z=100.

O preenchimento do paleocanal é, em média, mais deformável no Caso 3 (Figura 18), razão pela qual esse caso apresentava os maiores deslocamentos (da ordem de 70 cm). Ainda assim, os recalques diferenciais eram da ordem de 1:100, valor esse não totalmente incomum em barragens desse tipo.

Mais preocupantes que a magnitude dos recalques, porém, poderiam ser as eventuais tensões de tração por eles provocadas, na direção Z (tensões σ_z), em planos verticais montante-jusante: eventuais descontinuidades geradas nesses planos poderiam converter-se em caminhos preferenciais de percolação e, conseqüentemente, em risco para a obra.

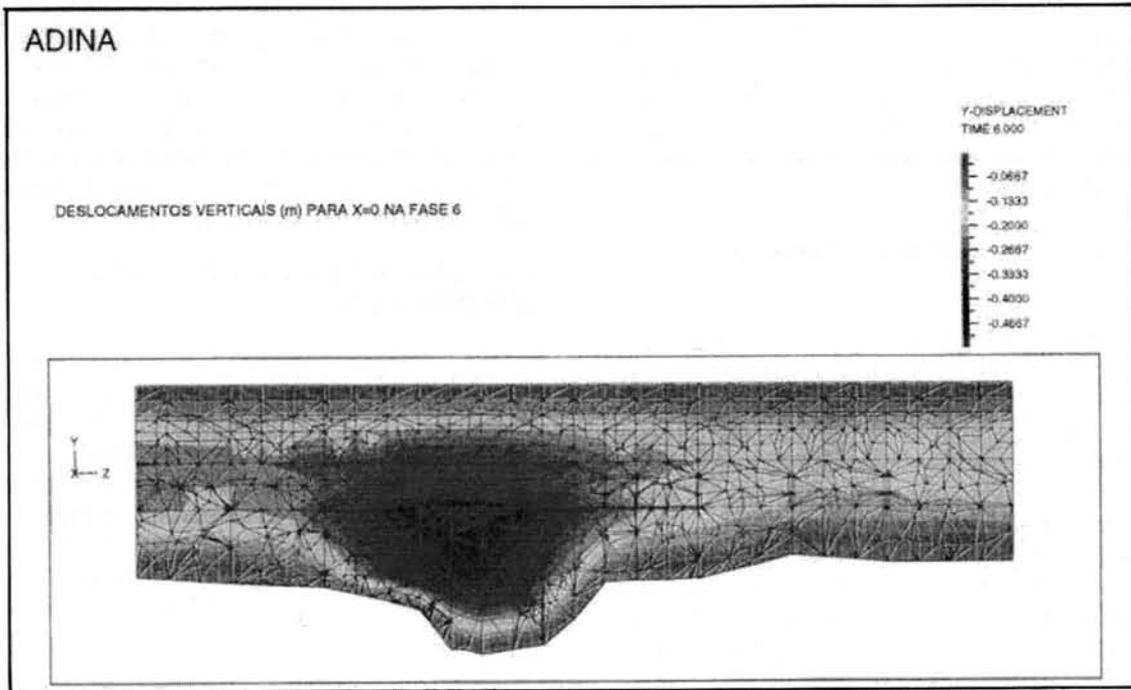


Fig. 16 – Deslocamentos verticais de operação, caso 1, seção longitudinal sob a crista (X=0).

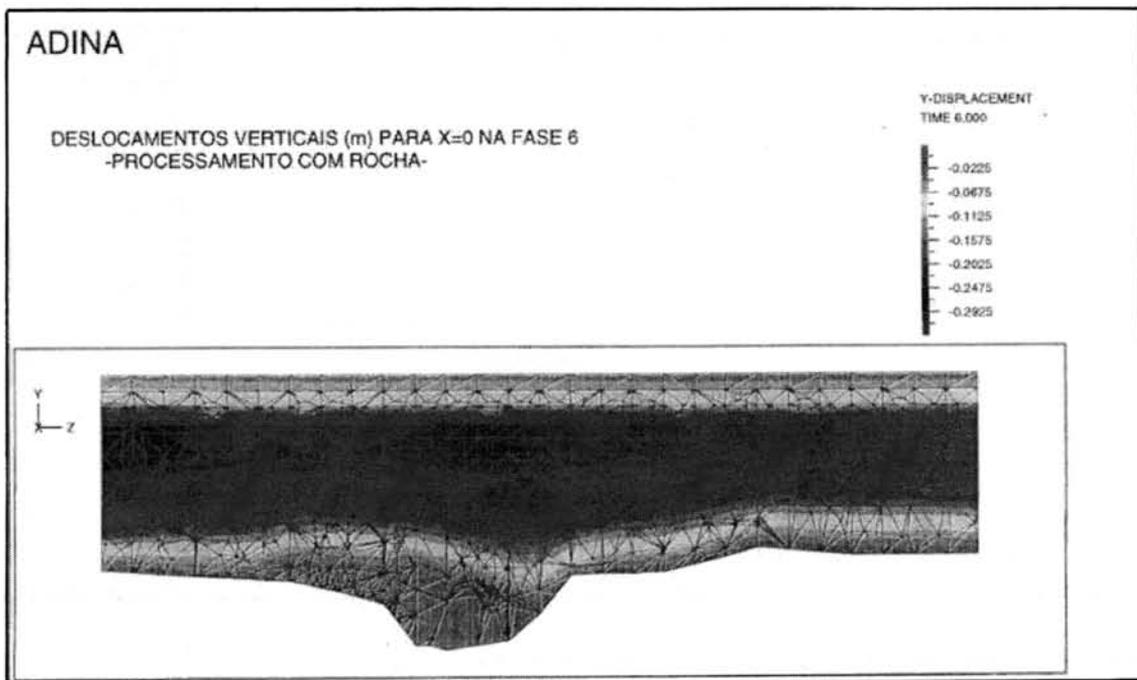


Fig. 17 – Deslocamentos verticais de operação, caso 2, seção longitudinal sob a crista (X=0).

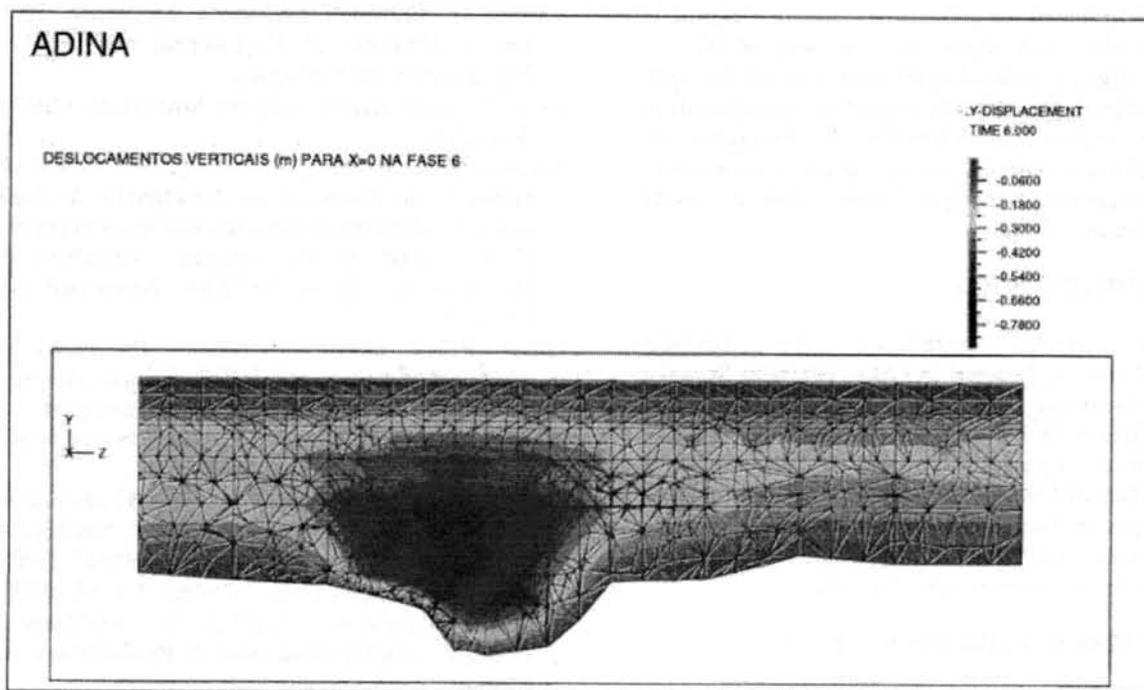


Fig. 18 – Deslocamentos verticais de operação, caso 3, seção longitudinal sob a crista (X=0).

As análises tridimensionais, no entanto, revelaram tensões de tração absolutamente desprezíveis, mesmo nas seções transversais consideradas mais críticas em termos de recalques diferenciais ($Z=80$ e $Z=150$), isto é, aquelas que se situam na transição do paleocanal para a calha da várzea do rio Jaguaribe. Além disso, o panorama de tensões σ_z mostrou-se também muito pouco influenciado pelas diferentes deformabilidades dos casos 1, 2 e 3.

8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análises tridimensionais mostraram que a redistribuição de tensões provocava, de fato, a redução dos coeficientes de segurança dos círculos mais profundos, passando pelo material de fundação, cuja resistência era predominantemente de atrito. Em círculos mais rasos o alívio de tensões tinha efeito menor (ou até contrário). Para as situações mais críticas, sob solitação sísmica, a situação tornava-se inaceitável do ponto de vista da segurança da Barragem do Castanhão (Quadro 5), sugerindo a necessidade de providências de projeto para a preservação de níveis de segurança compatíveis com a responsabilidade da obra. Entre essas providências, a mais óbvia seria a alteração da inclinação dos taludes do maciço compactado, tendo como critério a obtenção de um nível de segurança uniforme para os diversos trechos de barragem a longo da calha do rio, em função das particularidades de sua fundação.

O potencial de liquefação das areias da fundação era significativo, maior nas regiões submetidas a maiores tensões, inclusive no paleocanal e por efeito de arqueamento, já que a probabilidade de ocorrência de areias mais fofas era praticamente uniforme em qualquer região da fundação. Como se sabe, o potencial de liquefação só se materializaria em redução duradoura de tensões efetivas se se aceitasse que a dissipação fosse lenta ou impedida. E essa eventual redução de tensões efetivas só implicaria instabilização se não fosse garantido o adequado confinamento das areias de fundação por material com resistência adequada. Estavam portanto claras as vias de atuação, que incluíam também a densificação prévia das areias (por vibroflotação ou compactação dinâmica, por exemplo), para elevação da sua compacidade até um valor no qual o seu comportamento em eventual evento sísmico passasse a ser predominantemente dilatante. Dificuldades logísticas ou de cronograma poderiam ditar, alternativamente, a remoção das areias e sua recompactação, possivelmente com uso também dos cascalhos argilosos da região, solução essa que requereria apenas técnicas e equipamentos corriqueiros de terraplenagem.

A análise relevou que tensões de tração em planos verticais montante-jusante eram, nesse caso, pouco importantes ou limitadas em extensão, não oferecendo risco significativo para a estanqueidade ou estabilidade da obra.

Recalques diferenciais mostraram-se mais significativos quando se considerava preenchimento

mais deformável no paleocanal, mas a magnitude prevista não era incomum em obras desse porte.

Os estudos realizados levaram a resultados que, devidamente interpretados, mostraram a necessidade de tratamentos da fundação da Barragem do Castanhão e de otimizações de sua seção transversal, e forneceram subsídios para orientar essas providências.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DNOCS (Departamento Nacional de Obras contra as Secas) e à Construtora Andrade e Gutierrez pela oportunidade de haverem desenvolvido este estudo. Agradecem ainda ao Laboratório de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP pelos recursos computacionais colocados à disposição para a realização das análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkovsky, M. e Pasqualini, E. (1986) *Interpretation of CPTs and CPTUs; 2nd Part: drained penetration of sands*, Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar, Singapore, pp. 143-156.
- Castro, G. (1969) *Liquefaction of Sands*, Ph.D Thesis, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University.
- Cruz, P. (1996) *Cem Barragens Brasileiras*, Oficina de Textos.
- Ferreira, R. C. e Peres, J. E. E. (1990) *Estudo da Variação do Potencial de Liquefação de Areia com a Compacidade, Granulometria e Forma dos Grãos*, Anais do IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Salvador, Novembro, pp. 525-532.
- GEOEXPERT (1999) *Estável – Programa de Análise de Estabilidade de Taludes pelo Processo de Spencer*. Manual de Utilização. Geoexpert.
- ICOLD (1989) *Selecting Seismic Parameters for Large Dams*. Guidelines. Bulletin 72.
- Kulhawy, F. H. e Mayne, P. H. (1990) *Manual of Estimating Soil Properties for Foundation Design*, "Electric Power Research Institute", EPRI.
- Lunne, T., Robertson, P. K. e Powell, J. J. M. (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, 1st edition.
- Popescu, R., Prévost, J. H. e Deodatis, G. (1997) *Effects of spatial variability on soil liquefaction. Some design recommendations*. Géotechnique, 47, nº 5, pp. 1019-1036.