

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS GRAVIDADE DE CONCRETO SOB AÇÃO DO GALGAMENTO: ANÁLISE DE TENSÕES E ESTABILIDADE

Rita de Cássia SILVA
Pesquisadora/Dr^a – Projeto METAHIDRO UnB/ELETRONORTE.

Débora de Melo Pinto CAVALCANTE
Bolsista de IC – Projeto METAHIDRO UnB/ELETRONORTE.

Lineu José PEDROSO
Professor – Universidade de Brasília.

Antonival Lima ALBUQUERQUE
Eng^o Civil –ELETRONORTE.

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de analisar estaticamente o comportamento de uma barragem de concreto gravidade que é submetida ao galgamento. Mostra-se a importância do estudo a partir de alguns exemplos de acidentes que tal fenômeno pode ocasionar. Para se visualizar melhor como o maciço se comporta, faz-se um estudo do campo de tensões na base de uma barragem real submetida ao galgamento, de modo a se comparar valores calculados e valores obtidos pelo programa CADAM. Além disso, o estudo também propõe a verificação dos principais coeficientes de segurança nos casos analisados e sua relação com os carregamentos propostos para análise.

ABSTRACT

This paper intends to analyze statically the behavior of the concrete gravity dam when under loads due to an overtopping. It explains the importance of studying this theme when showing some accidents evolving the phenomenon. So as to visualize how is the behavior of the dam, a study of the field of stress on the base of the solid is done in one profile with similar dimensions of one recognized dam; this procedure objectives to compare the calculated values with those generated from the program CADAM when a simulation of overtopping is added to the others loadings. After that, the study proposes a verification of the safety coefficients and the relationship of these and the additional load of overtopping.

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental e o alto crescimento demográfico colaboram para o aumento dos desastres associados à água, visto que esse é um bem de consumo essencial à vida humana. A primeira causa, por exemplo, vem do alto crescimento de indústrias que colaboram para a poluição atmosférica a partir da emissão de gases tóxicos, os quais destroem a camada de ozônio e aumentam o efeito estufa. A conjugação desses acontecimentos sucessivos proporciona aumento da temperatura global e conseqüente aumento de precipitações, muitas vezes desastrosas quando concentradas numa mesma região. O alto crescimento demográfico remete ao aumento da utilização da água para as necessidades básicas e conseqüentemente, a formação de reservatórios torna-se cada vez mais importante no uso cotidiano.

A formação de reservatórios de água requer algo que possa barrar o curso de algum rio para aumentar o nível de água, independente da utilização da mesma. Tal construção é conhecida como barragem e deve ser projetada para suportar carregamentos de variados tipos e intensidades, considerando-se, principalmente as situações de precipitações extremas que podem ocasionar alagamentos a jusante.

No presente trabalho, que representa a continuação de estudos anteriores [1], ressalta-se a importância do estudo do galgamento a partir da sua definição e da sua relação com a segurança de barragens. Para ressaltar a importância do fenômeno em nosso meio, destacam-se alguns acidentes ocorridos em barragens brasileiras. Uma análise mais aprofundada sobre o assunto é obtida a partir da análise de tensões num perfil típico de barragem gravidade de concreto, quando este se sujeita ao galgamento de uma lâmina de água através de sua crista; para tanto, serão feitas simulações no programa CADAM utilizando-se uma lâmina de galgamento proporcional a que ocasionou a ruptura da barragem de Arneiroz II em 2004.

2. DEFINIÇÃO DE GALGAMENTO

Uma barragem é uma estrutura construída transversalmente a um rio ou um talvegue com a finalidade de obter a elevação do seu nível de água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água. A cota superior da barragem define o seu coroamento, e não se considera qualquer abaulamento, meio-fio, parapeitos, defensas ou outras estruturas que não sejam parte da estrutura principal do barramento de água [2].

O galgamento, ou *overtopping*, pode ser definido como o fluxo de água através do topo ou coroamento de uma barragem [11]. Em geral, tal fenômeno se deve à ocorrência de chuvas intensas que elevam o nível de água acima do topo ou do coroamento e pode gerar a ruptura da estrutura ou não de uma barragem. A ruptura de uma barragem pode ser definida como a perda da integridade estrutural, podendo ocorrer uma liberação incontrolável do conteúdo de água de um reservatório, ocasionada pelo colapso da estrutura ou parte dela.



FIGURA 1: Esquema da Ocorrência de Galgamento Através de uma Parede de Concreto [11]

A ocorrência de enchentes encontra-se geralmente associada a duas causas básicas: aos fatores climáticos (intensidade e duração das precipitações que ocorrem na área das bacias) e aos fatores fisiográficos (área, formato, declividades, tipo do solo, cobertura vegetal etc.), que determinam o maior ou menor grau com que são sentidos os efeitos de uma precipitação nas bacias hidrográficas. Outro fator determinante para a manifestação de enchentes é o desmatamento e a ocupação desordenada das áreas de várzeas, com conseqüente assoreamento do leito dos cursos d'água. Esse tipo de degradação é relativamente comum no território das bacias metropolitanas e contribui para agravar a incidência de enchentes [3,12].

3. O GALGAMENTO RELACIONADO À SEGURANÇA DE BARRAGENS

A segurança de uma barragem é definida como a capacidade da mesma para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que reflitam nos aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

Um acidente é um evento correspondente à ruptura parcial ou total da obra e/ou sua completa desfuncionalidade, com graves conseqüências econômicas e sociais. Por outro lado, um incidente é um evento físico indesejável que prejudica a funcionalidade e/ou a inteireza da obra, podendo vir a gerar eventuais acidentes caso não seja corrigido a tempo [2]. O risco de acidentes destas estruturas está associado quase sempre a catástrofes. Além da possibilidade da perda de vidas humanas, a ruptura de uma obra hídrica resulta em destruição de patrimônio, danos ao meio ambiente e interrupção de serviços públicos [3].

Todas as barragens devem ser classificadas quanto às conseqüências de uma ruptura ou dano em potencial, em que devem ser considerados, entre outros, os seguintes fatores: aspectos sociais, ambientais, estruturais e econômicos.

A diferenciação entre as categorias de conseqüências e o relacionamento com os requisitos de segurança é sugerida, para refletir os valores e prioridades da sociedade na alocação e distribuição de recursos e fundos a serem utilizados na proteção e salvamento de vidas, e para a salvaguarda. As conseqüências incrementais da ruptura de uma barragem devem ser avaliadas em termos de:

- Perda de vidas;
- Valor econômico de outras perdas e/ou danos à propriedade, instalações, outras barragens, bem como a perda na geração de energia e fornecimento de

água. Onde apropriado, outros custos de impactos, social e ambiental, devem ser considerados;

- Outras conseqüências menos quantificáveis relacionadas a impactos sociais, e ambientais, que não possam exigir condições baseadas no local específico da ocorrência.

Devido a estas conseqüências, as barragens devem ser submetidas periodicamente a uma reavaliação de suas condições de segurança, segundo sua classificação quanto às conseqüências de ruptura.

Uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça às exigências de comportamento necessárias para evitar acidentes e incidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. Ela deve ter estabilidade adequada para suportar com segurança os carregamentos extremos a ela aplicados, bem como as cargas normais do projeto. A seleção do critério de segurança para carregamentos extremos deve-se basear na conseqüência da ruptura da barragem.

4. O GALGAMENTO COMO CAUSA DE VÁRIOS ACIDENTES COM BARRAGENS

Os anos de 2003 e de 2004 trouxeram à tona para o grande público o problema do abandono das barragens brasileiras. Estima-se que nesse período mais de 400 barragens, de diversos tamanhos e tipos, tenham rompido em todo o Brasil, muitas delas pela incapacidade de suportar os eventos de cheia ocorridos no período. A Figura 1 ilustra o evento meteorológico atípico iniciado no fim o ano de 2003, perdurando até fevereiro de 2004 e que terminou por se dissipar no mês de março. A escala de cores mais escuras representa, conforme sua intensidade, chuvas acima da média esperada para o mês [3].

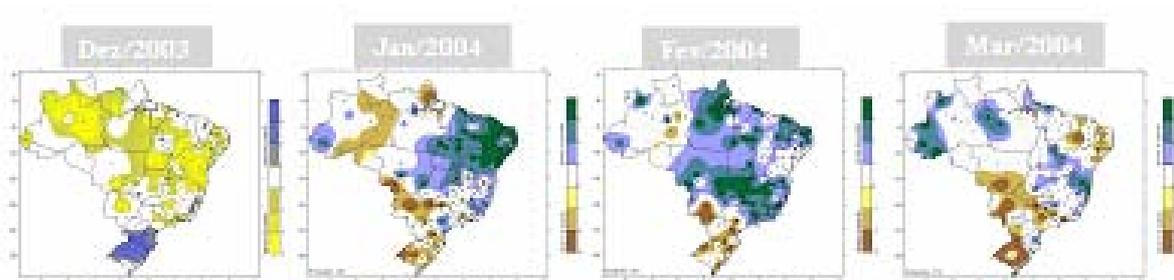


FIGURA 2: Evento Meteorológico Atípico Ocorrido em 2003/2004 (Fonte CPTEC/INPE) [3]

A maioria dos acidentes com barragens se deve à cheias inesperadas, as quais geram transbordamentos do reservatório e danos muitas vezes incalculáveis. Dentre os acidentes, podem-se destacar os seguintes casos: Barragem de Arneiroz II (CE, 2004) [2]; Açude de Orós (CE, 1960); Açude do Arroz (PB, 1978); Açude Gurguri (CE, 1996); Açude Mangueiras (CE, 1997); Barragem de resíduos de Cataguases (MG, 2003) [4].

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CARREGAMENTOS E O PERFIL A SER ANALISADO

Os seguintes casos de carregamentos serão considerados no estudo de estabilidade e respectivos cálculos do campo de tensões da barragem.

5.1 CASO DE CARREGAMENTO NORMAL (CCN)

Corresponde a todas as combinações de ações que apresentam grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, durante a operação ou manutenção normal da obra, em condições hidrológicas normais [2]. As condições relevantes a serem consideradas no presente estudo são as ações causadas pelo peso próprio, pressões hidrostáticas com NA do reservatório no nível máximo normal e subpressão.

5.2 CASO DE CARREGAMENTO EXCEPCIONAL (CCE)

Corresponde a quaisquer ações de cargas de ocorrência eventual de baixa probabilidade ao longo da vida útil da estrutura [2]. Considera-se neste estudo, a mesma relação de carregamentos considerados no CCN; entretanto, para condições de operação com as seguintes modificações: reservatório no NA máximo maximorum, NA a jusante correspondente à vazão zero, subpressão com drenos inoperantes e quaisquer esforços excepcionais sobre a estrutura, no presente trabalho, o galgamento.

5.3 PERFIL DE ANÁLISE

Tomando como base um perfil teórico de barragem com dimensões similares ao de um dos blocos de transição da Barragem de concreto de Itumbiara-GO, têm-se as dimensões simplificadas na Figura 3, onde a altura máxima da barragem é de 75,43m e o nível de água máximo é 72,43m.

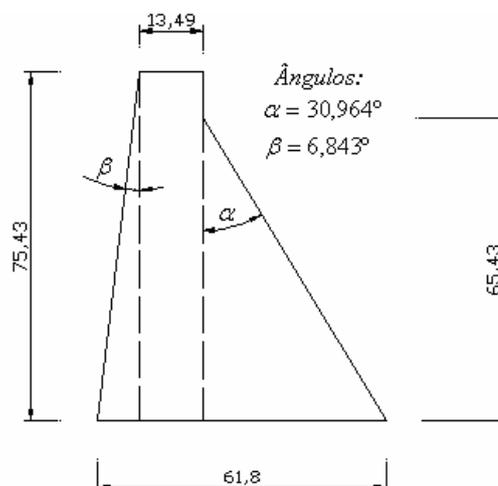


FIGURA 3: Perfil Típico da Barragem a ser Analisado

5.3.1 Estudo de Casos com a Combinação Usual das Solicitações sem a Subpressão na Fundação

Neste estudo, por simplificação, será considerada a eficiência máxima da drenagem na fundação da barragem, de forma que não haja força de subpressão na mesma; a lâmina d'água que galgará a barragem será calculada com base naquela do acidente experimentado pela barragem de Arneiroz II (CE, 2004) considerando-se uma proporção de alturas.

- Caso 1: Peso próprio (PP), força hidrostática (PH_u) a montante com NA máximo e NA a jusante igual a zero, peso da água a montante (Ph_u);
- Caso 2: Peso próprio (PP), força hidrostática a montante (PH_u) com NA máximo e NA a jusante igual a zero, peso hidrostático a montante (Ph_u), galgamento (V_f) de 1,17% da altura da barragem (lâmina de 88 cm);
- Caso 3: Peso próprio (PP), força hidrostática a montante (PH_u) com NA máximo e NA a jusante igual a zero, peso hidrostático à montante (Ph_u), galgamento (V_f) de 1,5% do nível de água máximo da barragem (lâmina de 109 cm);

Abaixo seguem figuras esquemáticas representando os casos citados.

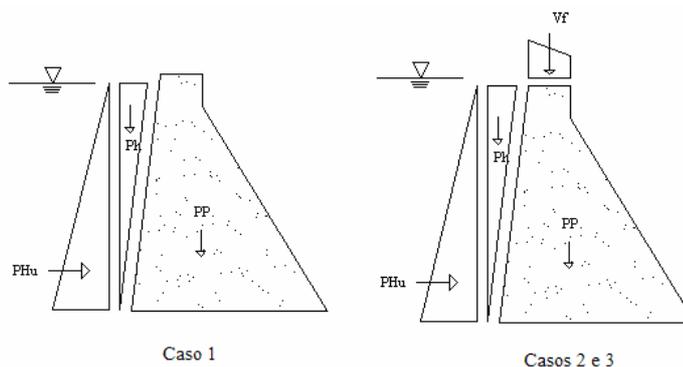


FIGURA 4: Esquema dos Carregamentos nos Casos 1, 2 e 3, Desconsiderando a Subpressão

5.3.2 Estudo de Casos com a Combinação Usual de Solicitação Incluída a Subpressão na Fundação

- Caso 4: Peso próprio (PP), força hidrostática (PH_u) a montante com NA máximo e NA à jusante igual a zero, peso hidrostático a montante (Ph_u), Força de Subpressão (U);
- Caso 5: Peso próprio (PP), força hidrostática à montante (PH_u) com NA máximo e NA a jusante igual a zero, peso hidrostático à montante (Ph_u), galgamento (V_f) de 1,17% da altura da barragem (lâmina de 88 cm), Força de Subpressão (U);
- Caso 6: Peso próprio (PP), força hidrostática a montante (PH_u) com NA máximo e NA à jusante igual a zero, peso hidrostático à montante (Ph_u), galgamento (V_f) de 1,5% do nível de água máximo da barragem (lâmina de 109 cm), força de subpressão (U);

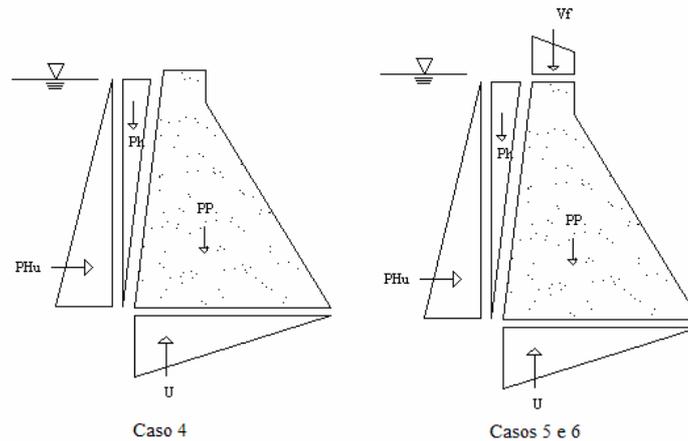


FIGURA 5: Esquema dos Carregamentos nos Casos 4, 5 e 6 Considerando a Subpressão

Para os seis casos citados acima, serão calculadas as tensões normais e de cisalhamento no plano yz bem como as tensões principais para todos os casos; para verificação de possíveis erros, serão comparados os valores calculados com os valores fornecidos pelo CADAM. Além disso, serão calculados os coeficientes de segurança ao deslizamento (CSD), à flutuação (CSF) e ao tombamento (CST).

Para o caso particular do galgamento, o fenômeno é simplificado ao se considerar apenas o adicional de carga hidrostática e uma carga vertical trapezoidal na crista da barragem (modelo do programa CADAM) que representa uma simplificação do problema. Tal simplificação é devida à complexidade do modelo interação escoamento-estrutura.

6. ANÁLISE DO CAMPO DE TENSÕES EM UMA BARRAGEM SUBMETIDA AO GALGAMENTO COM O AUXÍLIO DO PROGRAMA CADAM

Nesta seção, serão apresentados os resultados das análises de tensões obtidas com o auxílio do programa CADAM.

6.1 TENSÕES NORMAIS

As convenções utilizadas para o cálculo das tensões normais estão explicitadas na Figura 6.

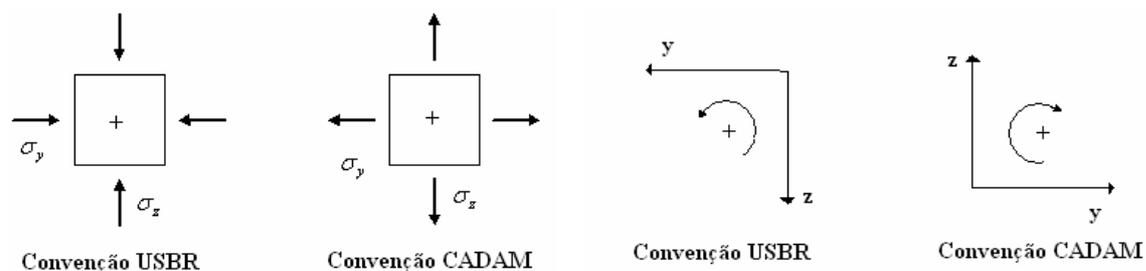


FIGURA 6: Convenções de Sinais para o CADAM e USBR [8]

6.1.1 Tensões Normais ao Plano Horizontal (Base) - σ_z

A partir da convenção utilizada pelo CADAM, a qual fornece um valor negativo quando a tensão normal é de compressão e um valor positivo quando a mesma é de tração, obtêm-se os seguintes resultados para a análise da seção da barragem ao nível da fundação:

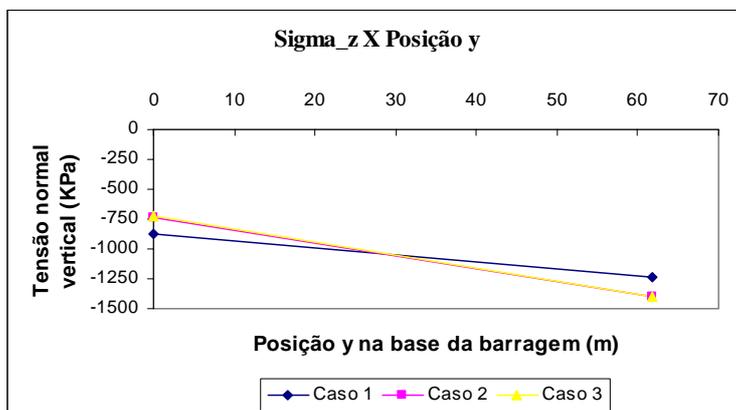


FIGURA 7: Variação da Tensão Normal (σ_z) de Montante ($y=0$) à Jusante ($y=61,8m$) para os Casos sem Subpressão

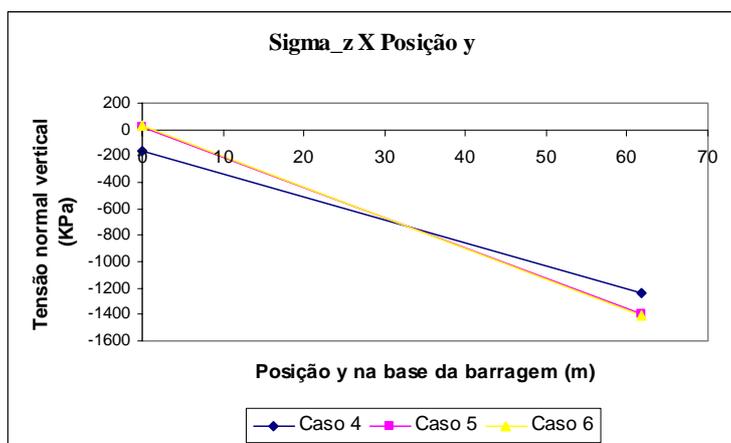


FIGURA 8: Variação da Tensão Normal (σ_z) de Montante ($y=0$) à Jusante ($y=61,8m$) para os Casos com Subpressão

Como era de se esperar, a variação de tensões normais verticais é linear no plano da base da barragem. Em todos os casos, pode-se notar que o pé da barragem, a montante, fica submetido a um valor menor de compressão do que o seu pé a jusante. Nos dois gráficos, observa-se que a presença de galgamento contribui para redução da tensão de compressão a montante, o que pode ser visto na diminuição (em módulo) do valor de σ_z ; aumentando a tensão de compressão a jusante, tanto nos casos em que há subpressão quanto nos casos em que não há.

Intuitivamente, poderia se pensar que a compressão a montante aumentaria porque o galgamento gera um esforço vertical orientado para baixo. Entretanto, o cálculo

dessa tensão σ_z não considera apenas o esforço vertical, mas também a parcela devido à flexão [6].

Comparando-se as Figuras 7 e 8 com relação à influência da subpressão, pode-se verificar que esta força é responsável por uma diminuição da tensão de compressão a montante, aumentando, portanto, a tração no calcanhar da barragem; tal força não influencia nas tensões à jusante. A Figura 9 representa o fator diferencial causado pela subpressão:

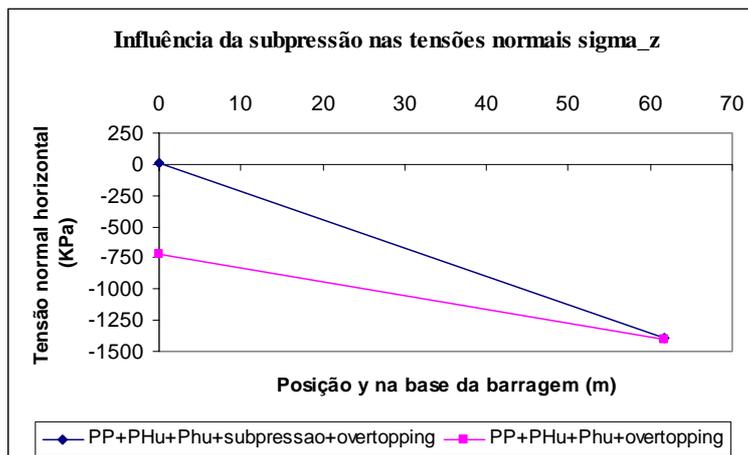


FIGURA 9: Influência da Subpressão nas Tensões Normais à Base

A partir do gráfico acima, nota-se que a subpressão não tem influência marcante na tensão normal a jusante. Já que não se considera NA a jusante (vide Figura 5), o diagrama de distribuição do carregamento é triangular, logo, a força resultante da subpressão se encontra a 1/3 do paramento de montante na base; tal força é responsável pelo aumento da tração no calcanhar da barragem, o que faz com que o módulo de σ_z diminua relativamente às duas situações mostradas na Figura 9.

6.1.2 Tensões Normais ao Plano Vertical - σ_y

O comportamento das tensões normais ao plano vertical (σ_y) pode ser mostrado pelas Figuras 10 e 11; considera-se nestes casos a convenção do USBR.

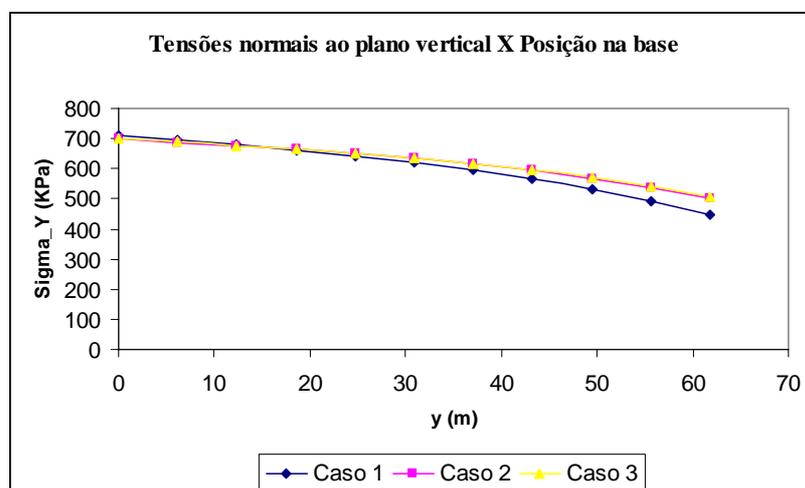


FIGURA 10: Variação de σ_y na Base da Barragem, de Montante à Jusante, Desconsiderando a Subpressão

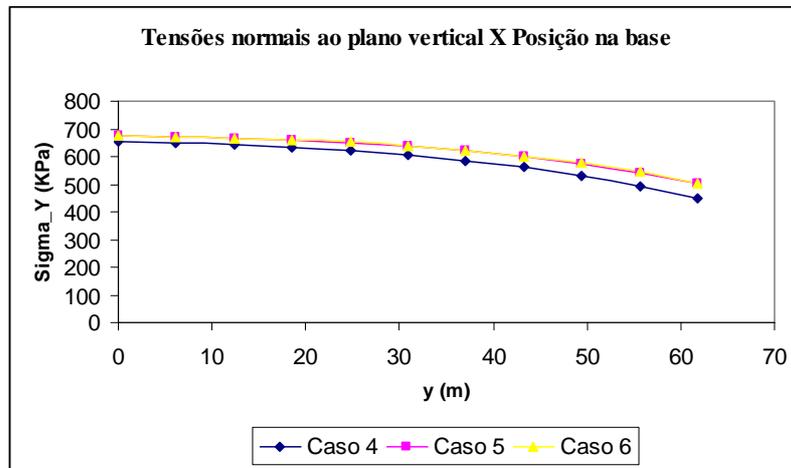


FIGURA 11: Variação de σ_y na Base da Barragem, de Montante à Jusante, Considerando a Subpressão

As tensões σ_y são regidas por uma equação de terceira ordem, diferentemente das tensões σ_z . Como o referencial adotado nestes gráficos de σ_y X y é relacionado à convenção do USBR (contrária à do CADAM), pode-se inferir que quanto mais positiva for o valor da tensão, maior será a compressão no dado local. Os resultados propostos nos gráficos das Figuras 10 e 11 mostram que a tensão de compressão é maior a montante do que a jusante, visto que não há coluna d'água a jusante.

Na Figura 10, onde não se considera a subpressão, percebe-se que o galgamento diminui ligeiramente a tensão normal de compressão ao plano vertical de montante e promove aumento dessa tensão a jusante. Por outro lado, a Figura 11 mostra que a subpressão contribui para que a presença de galgamento aumente a tensão de compressão ao plano vertical de montante e de jusante.

A Figura 12 mostra a influência da subpressão nas tensões normais ao plano vertical. Apesar de as tensões a montante serem bastante semelhantes, verifica-se que a subpressão numa barragem sujeita ao galgamento promove o aumento da tensão de compressão ao plano vertical.

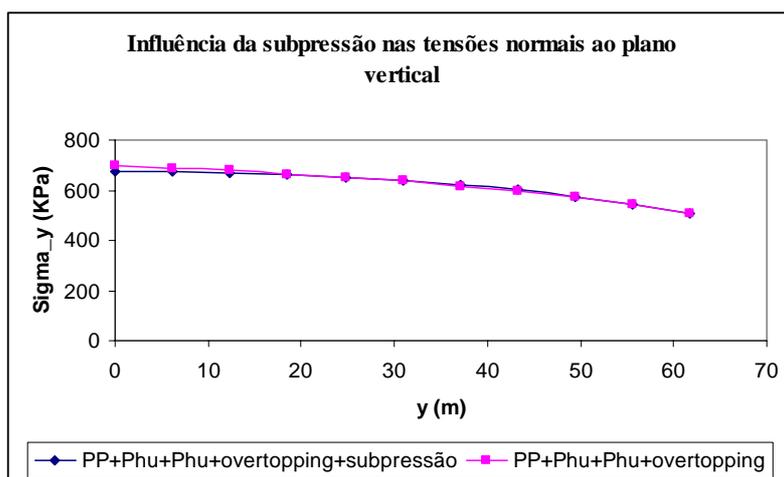


FIGURA 12: Influência Promovida pela Presença da Subpressão em Barragens Sujeitas ao Galgamento

Nota-se que em todos os casos o galgamento provocou um aumento de σ_y a jusante e que a subpressão não influenciou essas tensões a jusante. O aumento de σ_y nos casos em que há galgamento se deve ao aumento da força hidrostática a montante, visto que o galgamento provoca aumento do nível de água e conseqüente aumento da força de pressão hidrostática a montante (NA do reservatório atinge a cota de coroamento).

6.2 TENSÕES DE CISALHAMENTO

A convenção utilizada pelo USBR considera positivas as tensões de cisalhamento que se encontram no sentido representado pela Figura 13.

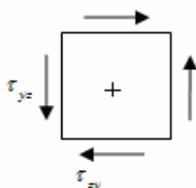


FIGURA 13: Convenção de Sinais para as Tensões de Cisalhamento Positiva Segundo USBR [8]

A partir dos dados fornecidos pelo CADAM, calculou-se a distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da base da barragem, a qual pode ser mostrada nas Figuras 14 e 15 a seguir.

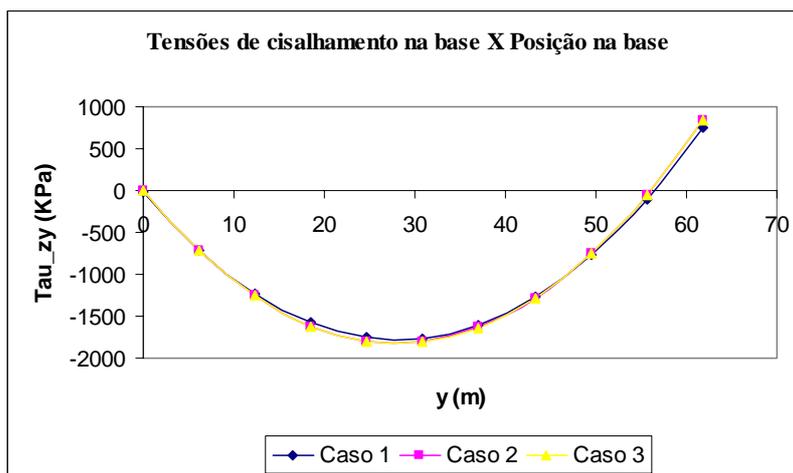


FIGURA 14: Variação das Tensões de Cisalhamento (τ_{zy}), de Montante à Jusante da Base, Desconsiderando a Subpressão

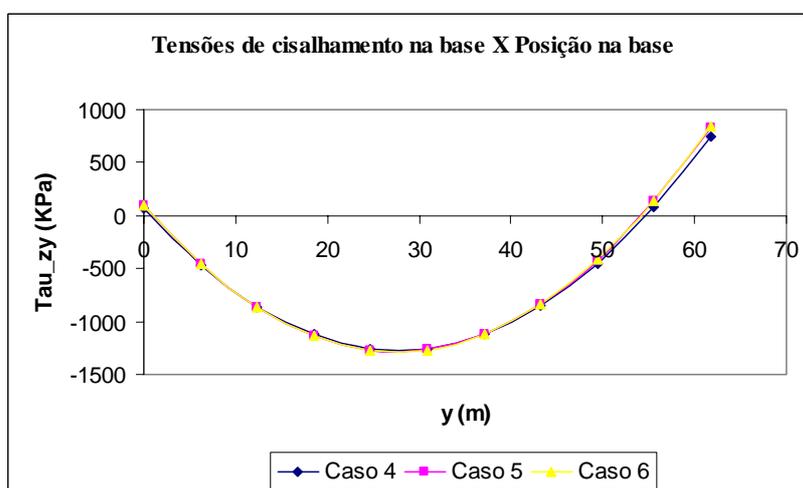


FIGURA 15: Variação das Tensões de Cisalhamento (τ_{zy}), de Montante à Jusante da Base, Considerando a Subpressão

Como esperado, as tensões de cisalhamento apresentam uma variação parabólica no plano horizontal (base) de montante a jusante. O pequeno valor da tensão de cisalhamento à montante se deve à pouca inclinação deste paramento; com um ângulo pequeno, o valor de sua tangente também o será. Considerando ou não a subpressão, observa-se o aumento de τ_{zy} à jusante da barragem, o que é causado pelo aumento do esforço normal de compressão ao plano da base neste local (item 6.1.1); tal aumento de tensão à jusante é mais enfatizado quando a barragem é submetida ao galgamento.

Analisando-se a Figura 16, pode-se fazer a comparação entre duas situações distintas. Uma em que a barragem está sujeita ao galgamento e a outra não. Comparando-se as curvas que relacionam casos com e sem galgamento nota-se que este carregamento excepcional provocou o aumento da tensão de cisalhamento a montante e a jusante. Para se saber a causa desses aumentos, segue-se a mesma linha de raciocínio empregada na análise das tensões normais verticais ao

plano da base, visto que as tensões de cisalhamento a montante e a jusante dependem diretamente de σ_z .

Para verificar a influência do galgamento nas tensões de cisalhamento, recorre-se ao item 6.1.1, onde se explica que as tensões normais σ_z a montante diminuem em módulo, ou seja, os valores ficam menos positivos quando o maciço é submetido ao galgamento; por isso, com um menor valor σ_{zU} , a tensão de cisalhamento τ_{zy} a montante aumenta quando a barragem é submetida ao galgamento devido ao sinal negativo da fórmula e a mudança no valor da pressão hidrostática. Da mesma forma, como visto anteriormente, a tensão σ_z aumenta em módulo a jusante, o que promove aumento de τ_{zy} a jusante da barragem que é submetida ao galgamento.

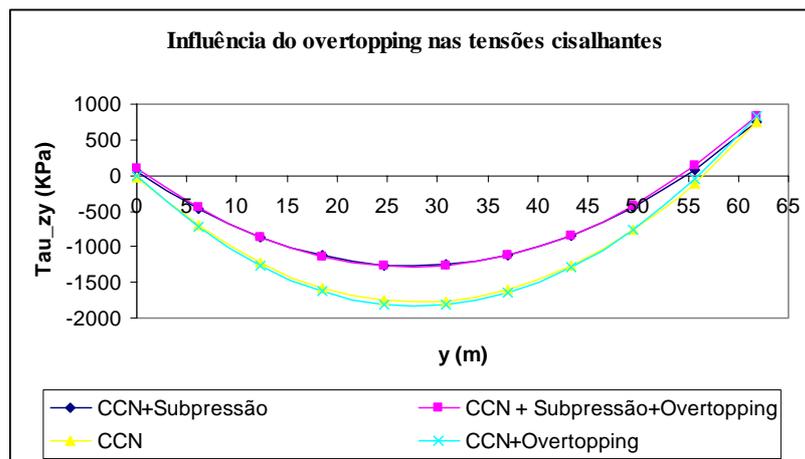


FIGURA 16: Influência do Galgamento nas Tensões de Cisalhamento

No caso em que se compara uma barragem sujeita ao galgamento e à subpressão com outra sujeita somente à subpressão, nota-se um aumento de no máximo 27,5 kPa nas tensões de cisalhamento a montante. Por outro lado, a comparação entre uma barragem sujeita apenas ao CCN (caso de carregamento normal) e outra sujeita a CCN+ galgamento sugere que o galgamento promove menor aumento em relação ao caso anterior (aumento máximo de 22,9 kPa).

Uma outra análise pode ser feita com relação à influência da subpressão. Nas Figuras 17 e 18 são feitas comparações de barragens submetidas aos mesmos carregamentos, considerando a subpressão ou não. Verificou-se que tal esforço provoca aumento da tensão de cisalhamento a montante e nenhuma mudança nas tensões a jusante.

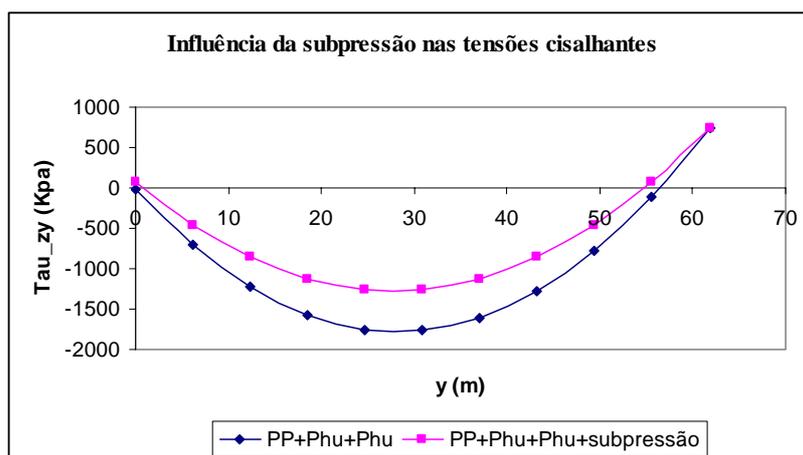


FIGURA 17: Influência da Força de Subpressão (U) nas Tensões de Cisalhamento τ_{zy} Desconsiderando o Galgamento

O aumento de τ_{zy_U} no calcanhar da barragem, à montante da mesma, pode ser explicado pelo contrabalanceamento das forças verticais que a resultante do esforço de subpressão promove; nos casos explicitados na Figura 17, a força de subpressão se contrapõe verticalmente ao peso próprio (PP) e ao peso da água (Ph_u), o que promove diminuição do esforço de compressão σ_{zU} que antes era sofrido neste local; como τ_{zy_U} depende do valor da tensão normal σ_{zU} , a diminuição deste valor provoca aumento de τ_{zy} . Por outro lado, a tensão de cisalhamento a jusante não se modifica, visto que a tensão normal σ_{zD} se mantém a mesma (item 6.1.1) [8].

6.3 TENSÕES PRINCIPAIS

As tensões normais $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$ que agem nos planos principais são denominadas tensões principais; quando um elemento se encontra neste estado, não há tensões de cisalhamento [7]. Embora seja possível dizer, por inspeção, qual dos dois planos principais está submetido a $\sigma_{m\acute{a}x}$ e qual está submetido a $\sigma_{m\acute{i}n}$, é preciso fazer a substituição do valor do ângulo para o qual o plano de tensões principais ocorre para se saber realmente qual face está submetida à tensão normal máxima ou mínima.

A Tabela 1 possui os valores encontrados para as tensões principais. Como já se sabe que o calcanhar da barragem é o local que mais sofre tração, dedicou-se especial atenção ao valor de tensão mínima de tração à montante. Por outro lado, o pé da barragem é o que mais sofre compressão, e por isso, atentou-se ao valor de tensão máxima de compressão à jusante.

Tensões principais (kPa)						
Valores Sigma	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Jusante_máx	1685,4666	1897,2019	1908,499	1685,466879	1897,20168	1908,49894
Jusante_mín	0,0002903	-0,00023	-0,00025	-1,02318E-12	1,5916E-12	-0,0002476
Montante_máx	926,27371	805,71171	801,2863	570,7228608	673,798636	674,97909
Montante_mín	661,2689	626,75306	625,355	163,3081862	-15,857247	-24,930776

TABELA 1: Valores Obtidos para as Tensões Principais a Montante e a Jusante

Como a convenção utilizada para obter os valores acima foi a convenção do USBR, verifica-se que não há tração a montante nos casos 1, 2, 3 e 4 visto que os seus valores são positivos. Tal fato não é verificado nos demais casos onde se nota que os demais valores são negativos, o que significa que há tração a montante da barragem.

De acordo com os dados do perfil de barragem considerado [5], a qual foi utilizada como fonte para as dimensões do modelo em estudo, considere o valor de resistência à compressão do concreto igual a $f_c' = 14000kPa$. Admitindo-se que a resistência à tração do concreto intacto é de aproximadamente 10% do valor da resistência à compressão, tem-se $f_t = 1400kPa$. Como a intenção é verificar o comportamento à tração do concreto na interface barragem/fundação, deve-se analisar a menor resistência suportada, a qual é 20% inferior à f_t [10,13,14]; desse modo, a resistência à tração requerida para comparação é um valor mínimo de $f_t' = 1120kPa$.

De acordo com os valores obtidos na Tabela 1, nota-se que os esforços de tração à montante da barragem nos casos 5 e 6 (4ª linha da Tabela 1) são inferiores à resistência de tração, em módulo, oferecida pelo concreto; ou seja, a solicitação atende à resistência característica de cálculo para este material. O mesmo ocorre com os valores de compressão a jusante do maciço em todos os casos (1ª linha da Tabela 1), os quais são menores que a resistência característica máxima à compressão de 14000 KPa.

6.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES FORNECIDOS PELO CADAM COM VALORES CALCULADOS

6.4.1 Tensões Normais

As tensões resultantes em qualquer seção transversal de uma viga são obtidas pela superposição das tensões axiais devidas aos esforços de flexão e aos esforços normais [6]. Considerando uma análise bidimensional do problema, visto que a barragem tem profundidade unitária, pode-se calcular a distribuição de tensões normais na base da barragem e se comparar aos valores obtidos pelo CADAM.

Casos	Valores do Cadam		Valores calculados		Erro (%)	
	<i>sig</i> Z_D	<i>sig</i> Z_U	<i>sig</i> Z_D	<i>sig</i> Z_U	<i>sig</i> Z_D	<i>sig</i> Z_U
1	-1239,314	-874,641	-1239,314	-874,641	0,0%	0,0%
2	-1395,001	-732,774	-1395,002	-732,775	0,0%	0,0%
3	-1403,308	-725,709	-1403,308	-725,708	0,0%	0,0%
4	-1239,314	-164,102	-1239,314	-164,103	0,0%	0,0%
5	-1395,001	15,852	-1395,001	15,852	0,0%	0,0%
6	-1403,308	24,918	-1403,309	24,917	0,0%	0,0%

TABELA 2: Comparação entre as Tensões Normais σ_z Calculadas e as Fornecidas pelo CADAM

A partir do erro percentual, verifica-se que os valores do CADAM reproduzem os valores calculados pela formulação apresentada.

6.4.2 Tensões de Cisalhamento

A partir do Método da Gravidade para análise de tensões, calcularam-se os valores das tensões de cisalhamento a montante e a jusante seus valores finais de tensões a montante e a jusante, os quais foram similares aos valores fornecidos pelo CADAM [8].

Tensões de cisalhamento - Valores do CADAM						
y	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Montante	-19,6924308	1,891498798	3,004711	65,57217	91,72363	93,08405
Jusante	743,5864519	836,9370348	842,0696	743,5865	836,937	842,0696
Tensões cisalhamento - Valores do USBR						
y	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Montante	-19,6924308	1,891498798	3,004711	65,57217	91,72363	93,08405
Jusante	743,5864519	836,9370348	842,0696	743,5865	836,937	842,0696

TABELA 3: Similaridade entre os Valores Calculados de $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ e os Valores Obtidos pelo CADAM

6.4.3 Tensões Principais

A partir da avaliação dos valores calculados, podem-se fazer uma comparação os valores obtidos pelo CADAM. A Tabela 4 demonstra a porcentagem de erro obtida para as tensões principais a montante e a jusante.

Comparações entre as tensões principais calculadas e as obtidas pelo CADAM							
	Tensões principais (kPa)				Resultante no terço médio?	% de erro	
	CADAM		Calculadas			Montante	Jusante
Casos	Mont y=0	Jus y=61,8	Mont y=0	Jus y=61,8			
1	887,641	1685,467	661,2689	1685,466589	Sim	25,50%	0,00%
2	743,327	1897,202	626,7531	1897,201905	Sim	15,68%	0,00%
3	736,16	1908,499	625,355	1908,498945	Sim	15,05%	0,00%
4	166,466	1685,467	163,3082	1685,466879	Sim	1,90%	0,00%
5	-15,964	1897,202	-15,8572	1897,201675	não	0,67%	0,00%
6	-25,435	1908,499	-24,9308	1908,498945	não	1,98%	0,00%

TABELA 4: Comparação entre as Tensões Principais Calculadas e do CADAM

Os erros percentuais fornecidos pela Tabela 4 podem ser devidos aos valores diferentes utilizados para o cálculo das tensões principais pelo CADAM. Como visto nos itens anteriores, houve uma boa aproximação dos valores calculados para σ_z e τ_{yz} , os quais são utilizados para o cálculo das tensões principais; entretanto, o CADAM não fornece os valores de σ_y calculados para se fazer uma comparação. Portanto, a diferença entre os valores de σ_y calculados e os fornecidos pelo CADAM podem ter gerado as discrepâncias entre os valores obtidos para as tensões principais a montante.

7. ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE SEGURANÇA

7.1 COEFICIENTE DE SEGURANÇA AO DESLIZAMENTO

O coeficiente de segurança ao deslizamento (CSD) é a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível (R) e a resultante das forças horizontais (H) na direção do plano analisado (base da barragem) [9]. Os valores calculados ou os obtidos pelo CADAM encontram-se na Tabela 5, bem como a comparação com os valores padrões. Vale ressaltar que o valor de resistência à compressão utilizado no cálculo refere-se ao valor de resistência do concreto da barragem de gravidade de Itumbiara, de acordo com a literatura [5].

Cálculo do CSD – com galgamento				Tabela para comparação		
Carregamento Usual + Galgamento	Valor Calculado	Valor de pico CADAM	Valor residual CADAM	Tipo de Análise	Caso de carregamento	
					Usual	Com galgamento
Caso 2	3,29	3,29	2,30	CSD de pico (sem teste)	3	2
Caso 3	3,28	3,27	2,29			
Caso 5	2,37	2,13	1,49	CSD de pico (com testes)	2	1,5
Caso 6	2,12	2,12	1,48			
				CSD residual	1,5	1,3

TABELA 5: CSD para Casos com Galgamento e Comparações

As forças que solicitam a barragem são relativas à pressão hidrostática. A força resistente se deve ao atrito seco (calculado em função das forças verticais) no corpo da barragem e à coesão entre as superfícies de deslizamento [9]. A diferença entre os coeficientes de pico e residual se deve ao deslocamento tangencial do maciço, o qual por sua vez se deve à coesão do concreto. Por esse motivo, a resistência de pico é maior que a residual, pois é aquela onde o material se encontra mais coeso.

A partir dos dados da Tabela 5, observa-se que os valores calculados foram mais próximos dos valores de pico fornecidos pelo CADAM. Isso ocorre pelo fato de se considerar a máxima coesão do concreto nos cálculos além do máximo valor do ângulo de atrito. Entretanto, tendo em vista que o valor de CSD residual considera o concreto menos coeso, pode-se tomar esse valor para comparação de forma a favorecer a segurança ao deslizamento. Assim, comparando-se os valores de CSD residual com os valores relativos ao CADAM, pode-se inferir que todos se encontram acima do valor mínimo de 1,3 para os casos onde há galgamento e de 1,5 para os casos onde não há.

7.2 COEFICIENTE DE SEGURANÇA AO TOMBAMENTO

A condição de não tombamento é aquela que satisfaz $\frac{M_e}{M_i} > 1$, se a razão for igual a

1 o equilíbrio é instável e não permanece na natureza. O coeficiente analisado para condição de não tombamento é, portanto, dado pela razão entre o momento produzido pelas forças estabilizantes (M_e) e o momento produzido pelas forças desestabilizantes (M_i) com relação ao pé da barragem [9].

Os cálculos foram feitos com base nos valores de forças resultantes fornecidos pelo CADAM e seus respectivos braços de alavanca com relação ao pé da barragem (jusante).

Casos	CST	CST	CST
	Calculado	CADAM	Requerido
1	4,0621268	4,062	1,2
2	3,5081154	3,507	1,2
3	3,4833254	3,482	1,2
4	1,6539273	1,51	1,2
5	1,5171889	1,517	1,2
6	1,510975	1,517	1,2

TABELA 6: Cálculo do CST

A partir dos dados da Tabela 6, percebe-se que os valores calculados são muito próximos aos valores fornecidos pelo CADAM. Todos os valores de CST estão acima do requerido, sendo que os menores valores referem-se aos casos em que há força de subpressão, a qual é responsável por um momento desestabilizante em relação ao pé da barragem.

8. CONCLUSÕES

Tendo como base os crescentes acidentes envolvendo barragens submetidas ao galgamento, observa-se a necessidade da avaliação do comportamento do maciço que é exposto a este tipo de carregamento excepcional. Embora as barragens de concreto sejam projetadas para suportarem diversos carregamentos, inclusive um carregamento como o galgamento, a possibilidade da ocorrência de precipitações mais intensas que o esperado é real e já se verifica em alguns casos. As conseqüências geradas por uma ocorrência desse tipo têm relevância social, econômica e ambiental; por esses motivos, o estudo apresenta uma contribuição inicial para um desenvolvimento mais apurado no que diz respeito à análise do comportamento da estrutura em relação às possibilidades de ocorrência de precipitações intensas.

O início do estudo possibilitou o conhecimento do uso do CADAM como ferramenta auxiliar na análise de tensões em barragens de concreto gravidade sujeitas ao galgamento. Para possibilitar o desenvolvimento mais aprofundado, fizeram-se vários testes no programa e verificou-se o melhor procedimento que se deve adotar para utilizá-lo de maneira eficiente.

Foram estudados seis casos, os quais foram divididos em dois grupos: os casos 1, 2 e 3 que desconsideram a subpressão e os casos 4, 5 e 6 que consideram a subpressão. Nos dois grupos, submeteu-se cada modelo aos mesmos carregamentos: peso próprio da barragem, pressão hidrostática a montante, peso hidrostático a montante e galgamento. Com estas divisões, foi possível analisar a interferência do galgamento no corpo do maciço ao se comparar com outro maciço submetido aos mesmos carregamentos. Além disso, verificou-se a influência da subpressão nas situações extremas: sem subpressão quando se imagina a não percolação da água pela rocha de fundação, ou com subpressão quando os drenos

encontram-se inoperantes. Para todos estes casos, fez-se a análise de tensões normais ao plano horizontal e vertical e das tensões de cisalhamento no plano analisado; calcularam-se as tensões principais a montante e a jusante e os coeficientes de segurança ao deslizamento e ao tombamento.

Na análise de tensões normais σ_z ao plano horizontal (base), verificou-se que as mesmas apresentavam maior compressão a jusante em todos os casos. A presença do galgamento diminui a tensão normal de compressão a montante e provoca aumento da mesma a jusante. Quanto à influência da subpressão, verificou-se que a mesma também provoca diminuição da tensão normal de compressão a montante; entretanto, não influencia na tensão normal a jusante.

As tensões σ_z referidas acima foram obtidas a partir da análise de tensões proposta no CADAM. A partir dos valores de resultantes de esforços obtidos do mesmo programa, foi possível calcular a variação das tensões normais ao plano vertical (σ_y) que varia em função de uma equação de 3º grau ao longo do plano analisado (base). Observou-se que, igualmente às tensões σ_z , as tensões σ_y contribuem para o aumento da tensão normal de tração a montante quando a barragem está submetida ao galgamento e sem a ação da subpressão. Por outro lado, a presença de galgamento quando há atuação de subpressão na barragem, contribui para aumentar a tensão de compressão ao plano vertical; portanto, pode-se inferir que a subpressão é responsável pelo aumento da compressão ao plano vertical de montante e pela não variação da tensão σ_y a jusante.

Na análise das tensões de cisalhamento no plano yz, observou-se que a curva que expressa a variação dessa tensão na base tem formato parabólico, como era de se esperar. As tensões τ_{zy} apresentam valor insignificante a montante devido a pouca inclinação do paramento neste local. Como as tensões de cisalhamento a montante e a jusante dependem diretamente das tensões normais verticais nestes locais, nota-se que τ_{zy} é maior a jusante em todos os casos analisados, seguindo a mesma linha de raciocínio do caso das tensões normais ao plano da base (σ_z).

O cálculo das tensões principais proporciona uma comparação entre as tensões admissíveis do concreto (à tração e à compressão). Neste âmbito, verificou-se que as tensões principais máxima de jusante foram inferiores a resistência de compressão característica do concreto adotado no modelo de perfil adotado. Quanto às tensões principais máximas de tração à montante, verificou-se que os dois casos mais críticos apresentaram valores inferiores à resistência característica de tração.

Um outro parâmetro de análise utilizado foram os coeficientes de segurança. O coeficiente de segurança ao deslizamento foi acima do requerido para os casos analisados e foram satisfatórios quando comparados ao CSD residual, o qual fornece maior margem de segurança. Os coeficientes de segurança ao tombamento CST, analisados para cada caso, foram satisfatórios quando comparados aos valores requeridos. O coeficiente de flutuação não foi calculado visto que há pouca utilização do mesmo para comparação.

Apesar dos resultados obtidos nesta análise preliminar, torna-se necessária uma maior investigação de modelos de cálculo que possam avaliar corretamente os mecanismos fenomenológicos que considerem o efeito do galgamento e sua interação com a estrutura “flexível” da barragem.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ELETRONORTE, ao CNPq e à FINATEC pelos recursos materiais (equipamentos) e financeiros (bolsas) colocados à disposição desta pesquisa.

10. PALAVRAS-CHAVE

Análise de tensões, método gravidade, galgamento, barragens de concreto, coeficientes de segurança.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] CAVALCANTE, D. M. P & SILVA, R. C. “Estudo do comportamento estático e dinâmico dos fluidos”. Relatório interno (GDPE): RTIC-DMPC1-08/2006-julho/agosto.
- [2] “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens” – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.
- [3] MENESCAL, R. A; MIRANDA, A. N.; PITOMBEIRA, E.S.; PERINI, D.S. “Prevenção de acidentes envolvendo barragens: Projeto de diagnóstico da segurança de barragens no Brasil (2005)”. In Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB.
- [4] Relatório Técnico – “Construção da Barragem Arneiroz II – Ocorrências durante o período chuvoso (2004)”. Ministério da Integração Nacional – Secretaria de Infra-estrutura Hídrica.
- [5] ÁVILA, J. P; BICUDO, R. I; PIERRE, L. F. “Main Brazilian dams: design, construction, and performance”. 1 ed. São Paulo: Editora Técnica LTDA, 1982. 653p.
- [6] TIMOSHENKO, S.P. & GERE, J. E. “Mecânica dos Sólidos I”. 1ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 1984. 450p.
- [7] BEER, F. P. & JOHNSTON, R. “Resistência dos materiais”. 3 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2005. 1255p.
- [8] RIBEIRO, P.M.V. & PEDROSO, L. J. “Redução das Equações Gerais para o Cálculo de Esforços e Tensões em um Perfil de Barragem Gravidade de Concreto (efeitos estáticos e sísmicos). Brasília:UnB-FT / ENC / GDPE, 2006. 140p. (Rel. Téc. De Pesquisa; RTP-PMVR2-03/2006).

- [9] PEDROSO, L. J. “Barragens de concreto: Aspectos Gerais e Fundamentos do Cálculo de Tensões e da Estabilidade baseado no Método de Gravidade”. Apostila do Curso de Barragens de Concreto - Semana da Engenharia Civil, 2002.
- [10] SILVA, R. C. “Considerações mecânicas relativas às juntas de subpressão e análise preliminar de alguns critérios de falha de barragens”. Relatório interno (GDFE): RTP-RCS6-11/2005
- [11] http://www.hydro.mb.ca/our_facilities/build_gen_station/glossary.html#o
- [12] http://www.panda.org/about_wwf/what_we_do/climate_changes/problemsweater_chaos/index
- [13] NRC – National Research Council – “Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance and Research Needs” (1990). National Academy Press, Washington, D.C.
- [14] Tinawi, R. et al. Canadian Electricity Association. “Structural Safety of Existing Concrete Dams: Influence of Construction Joints” (1998). Review of Literature and Background Material.