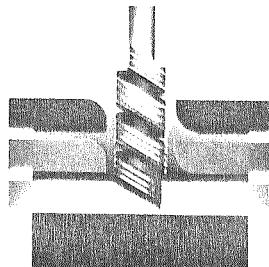


**X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS  
E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES**



**X COBRAMSEF**



**Volume 4**

Barragens e Obras de Terra

Solos Tropicais, Especiais (Expansivos, Colapsíveis  
e Dispersivos) e Pavimentos

SYSNO 0875099  
PROD 001521

ACERVO EBC

Foz do Iguaçu, Novembro de 1994

# ESTUDO DE SOLOS COLAPSÍVEIS DO NORDESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Miriam de Fátima Carvalho, Eng<sup>a</sup><sup>1</sup>

Orencio Monje Vilar<sup>2</sup>

Nélio Gaioto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestranda, Escola de Engenharia de São Carlos - USP

<sup>2</sup> Prof., Escola de Engenharia de São Carlos - USP

## RESUMO

O caráter colapsível dos solos coluvionares da região do Vale do Jequitinhonha no nordeste do estado de Minas Gerais é identificado através de resultados de ensaios de caracterização e edométricos com inundação. A camada de colúvio é representada por uma argila arenosa de baixa plasticidade (CL), com porosidade em torno de 46% e baixo grau de saturação. Neste trabalho os resultados dos ensaios são apresentados e analisados. São também estudadas correlações entre as deformações específicas por colapso em função das condições de umidade e das tensões de inundação, onde obteve-se correlações bastante razoáveis para uma função do tipo polinomial do grau 2.

## 1. INTRODUÇÃO

Os solos porosos e colapsíveis ocorrem em significativa área do Brasil. No estado de Minas Gerais já foram identificados na região de Três Marias (QUEIROZ, 1960), no município de Manga-Projeto de Irrigação do Jaíba (WOLLE et al, 1978) e em Uberlândia (COSTA, 1986).

Constatou-se, também, a ocorrência desses solos na região do Vale do Jequitinhonha, no nordeste do estado de Minas Gerais, durante os estudos de implantação e construção de pequenas barragens de perenização de cursos d'água, que foram executadas pela CEMIG - Companhia Energética do Estado de Minas Gerais.

É considerável a ocorrência de solos coluvionares nas regiões das ombreiras dessas barragens, os quais apresentam grande porosidade, porém com baixo teor de umidade (em geral abaixo do limite de plasticidade). Tais solos sofrem apreciável redução de volume quando submetidos ao umedecimento e carregamento. Essa redução de volume é conhecida como colapso da estrutura do solo. O colapso é decorrente da diminuição da resistência dos vínculos de cimentação e/ou de tensão capilar entre as partículas, devido à saturação, a qual permite que as partículas deslizem umas sobre as outras, movimentando-se para os espaços vazios.

Este trabalho apresenta uma investigação geológico-geotécnica dos solos de fundação de duas barragens de perenização (Bananal e Samambaia), a partir de dados de ensaios laboratoriais, na tentativa de configurar as características colapsíveis destes.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

As duas barragens em estudo localizam-se na região do Vale do Jequitinhonha, na porção nordeste do Estado de Minas Gerais. A Barragem de Bananal situa-se no Rio Bananal, afluente pela margem esquerda do Rio Salinas (Bacia do Rio Jequitinhonha), cerca de 30 Km à nordeste da cidade de Salinas. A Barragen de Samambaia localiza-se no Rio Mosquito, afluente da margem direita do Rio Pardo (Bacia do Rio Pardo), situada cerca de 15 Km à oeste da cidade de Águas Vermelhas. Cada barragem é considerada, neste trabalho, com sendo uma unidade de estudo.

A geologia da unidade de Bananal é caracterizada por rochas do Grupo Macaúbas, pertencentes ao super-grupo São-Francisco, constituídas por quartzo-micaxistos carbonáticos. Sobrepostos estão as coberturas detriticas e os aluvões recentes (ENGEVIX, 1988).

O domínio litológico da unidade de Samambaia é exercido por granitos de características intrusivas e pelos gnaisses da Associação Metamórfico-Migmatítica. Acima encontram-se os sedimentos terciários (Grupo Barreiras) e as coberturas detriticas do terciário-quaternário, sendo estas últimas de maior expressão na área (ENGEVIX, 1989).

Climatologicamente, a região caracteriza-se por uma concentração de chuvas no período de novembro a março, com alta variabilidade dos totais anuais de precipitação. Os valores mais baixos, em torno de 800 mm, são encontrados nos Vales dos Rios Jequitinhonha, São Francisco e seus afluentes; e os mais altos, da ordem de 1300 mm, na Serra do Espinhaço (CETEC, 1980; CEMIG, 1988). Apesar dos totais anuais não serem muito baixos, essa região se destaca por apresentar uma variabilidade na precipitação muito grande, com coeficiente de variação da ordem de 30 a 40%. Tal coeficiente caracteriza o baixo grau de representatividade de precipitação média, mostrando que a região está sujeita a períodos prolongados de estiagem (5 a 6 meses secos).

A temperatura do ar é relativamente estável durante o ano, apresentando média anual de 22°C a 26°C. A umidade relativa do ar é da ordem de 70%. Tais registros aliados à vegetação (mata cipó, cerrado e caatinga) caracterizam a região como semi-árida.

## 3. MATERIAIS E METÓDOS

Para a verificação da susceptibilidade ao colapso dos solos em questão utilizou-se dados de ensaios de caracterização e edométricos, referentes aos estudos básicos de implantação e execução das barragens. Os ensaios foram realizados pelo laboratório de solos da CEMIG, em amostras "tipo blocos indeformados" coletadas em solo coluvionar.

### 3.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram realizados conforme especificações da ABNT, abrangendo: análise granulométrica completa (NBR 7181/84), limite de plasticidade (NBR 7180/84), limite de liquidez (NBR 6459/84), peso específico dos grãos (NBR 6508/84) e peso específico natural pelo método da balança hidrostática (NB 2887/88).

Na Tabela 1 encontra-se, para cada unidade, os resultados dos ensaios de caracterização para os diversos blocos, bem como os índices físicos e a classificação do solo segundo a SUCS.

As amostras da unidade de Samambaia foram coletadas para investigar as deformações ocorridas no maciço de fundação após saturação do mesmo. A amostragem foi feita perfurando-se todo o maciço compactado até atingir a camada de colúvio, penetrando cerca de 50 cm neste, onde o solo foi amostrado. Vale ressaltar que parte do colúvio já havia sido escarificado e removido para assentamento do maciço compactado.

TABELA 1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Caracterização	SAMAMBAIA				BANANAL			
	Sam-01	Sam-02	Sam-03	Sam-04	Ban-01	Ban-02	Ban-03	Ban-04
Prof. (m)					1,10	2,30	6,0	1,3
$w_o$ (%)	14,5	13,2	13,9	12,6	10,1	10,5	14,8	9,9
$\gamma_s$ (kN/m³)	25,6	25,5	25,5	25,5	25,9	25,9	28,06	26,29
$\gamma_d$ (kN/m³)	13,42	13,88	14,10	14,69	13,58	13,99	14,35	14,67
LL (%)	35,9	36,4	35,8	38,2	33,0	28,2	30,6	32,2
IP (%)	11,6	10,9	13,9	13,5	14,3	11,0	13,8	11,9
$e_o$	0,908	0,837	0,809	0,736	0,907	0,851	0,955	0,792
n (%)	48	46	45	42	48	46	49	44
$Sr_o$ (%)	41,7	41,0	44,7	44,5	29,4	32,6	44,3	33,5
Argila (%)	63	56	61	58	41	37	36	39
Silte (%)	2	3	5	6	25	23	28	27
Areia (%)	33	34	34	33	34	40	36	33
Pedreg. (%)	2	7	-	3	-	-	-	-
SUCS	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL

### 3.2. ENSAIOS EDOMÉTRICOS

Foram realizados ensaios edométricos com inundação, para a determinação da colapsabilidade. Estes consistem, basicamente, em carregar a amostra no teor de umidade natural até uma determinada tensão e inundá-la, medindo-se as deformações provocadas pelo umedecimento.

O colapso do solo pode ser quantificado através da deformação específica por colapso ( $\varepsilon_{vc}$ ), (Figura 1) cujo valor é dado por:

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\Delta e_c}{1+e_1} \quad (1)$$

onde,  $\Delta e_c$  é a variação do índice de vazios devido à inundação;  $e_1$  é o índice de vazios imediatamente antes do colapso.

A maior parte dos corpos de prova foi submetida a estágios de carregamentos (P) de 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1600 kPa, com duração de 24 horas ou até a estabilização das deformações e descarregamentos de 160, 40, 10 kPa. Somente a amostra Ban-04 (prof. = 1,00 - 1,30 m) de Bananal foi submetida a carregamentos de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; 1000; 1200 kPa e descarregamentos de 400, 100 e 25 kPa.

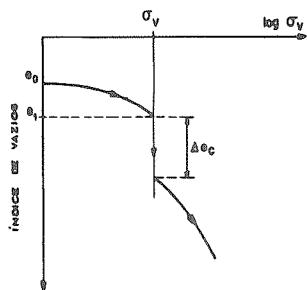


Figura 1. Representação Gráfica do Colapso

Em cada amostra realizaram-se ensaios edométricos, na umidade natural e em várias tensões de inundação, onde determinaram-se as deformações específicas de colapso correspondentes à tensão de inundação. Na Figura 2 estão representadas as curvas de compressão ( $e/e_0$  x log P) de alguns ensaios edométricos realizados para a amostra de Bananal, as quais são consideradas típicas dos solos ensaiados.

A deformação específica por colapso, de 19,92% da amostra de Bananal (Ban-04), a uma tensão vertical de 800 kPa (Figura 2), corresponde ao colapso máximo observado em todos os ensaios edométricos. A maioria dos corpos de prova não sofreu deformações de colapso significativas para baixas tensões, sendo que, em alguns casos o material chegou a sofrer uma leve expansão.

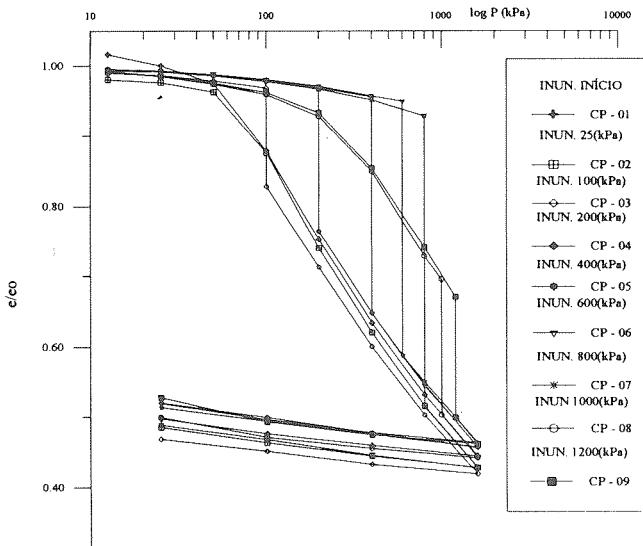


Fig.2 - Curvas de Compressão  $e/e_0$  x  $\log P$  (Bananal)

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS

### 4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os solos estudados podem ser classificados como argila arenosa de baixa a média plasticidade (CL), constituídos predominantemente pela fração argila e/ou silte. Esses materiais apresentam porosidade volumétrica da ordem 46%, que associada a baixos teores de umidade, proporcionam ao solo as características ideais para sofrer o colapso.

Segundo FEDA (1966), o solo para ser colapsável deve apresentar uma porosidade maior que 40%. Já para DUDLEY (1970), o solo deve apresentar limite de liquidez abaixo de 45% e índice de plasticidade abaixo de 25%. Os valores encontrados estão coerentes com as afirmações desses autores.

Do emprego dos critérios de identificação da colapsabilidade, baseados nos índices físicos e limites de Atterberg, pode-se afirmar que o critério de Prikłonskij (1952) in FEDA (1966) apresentou-se completamente inadequado para as duas unidades. Já o critério de Feda (1966) apresentou-se inadequado para a amostra Ban-04 de Bananal e para todas as amostras de Samambaia. Isso se deve ao fato que esses critérios consideram que para o solo apresentar uma condição de instabilidade estrutural, ele deve possuir umidade natural muito próxima ou maior que a do limite de liquidez, o que não se aplica aos solos estudados.

Os critérios de Denisov (1951) e do Código de Obras da U. R. S. S. (1962 e 1977) in FEDA (1966), os quais baseiam-se nos índices de vazios no estado natural e no estado do limite de liquidez do solo, apresentaram bons resultados. Cabe ressaltar que o critério de Denisov (1951) não considera nenhuma classificação para solos que apresentam coeficiente de colapsabilidade ( $K$ ) no intervalo entre 0,75 a 1,5. Porém, neste trabalho, os solos que apresentam  $K$  dentro deste intervalo foram considerados colapsáveis. Isso está de acordo com as propostas de Nowatzki apud MENDONÇA (1990).

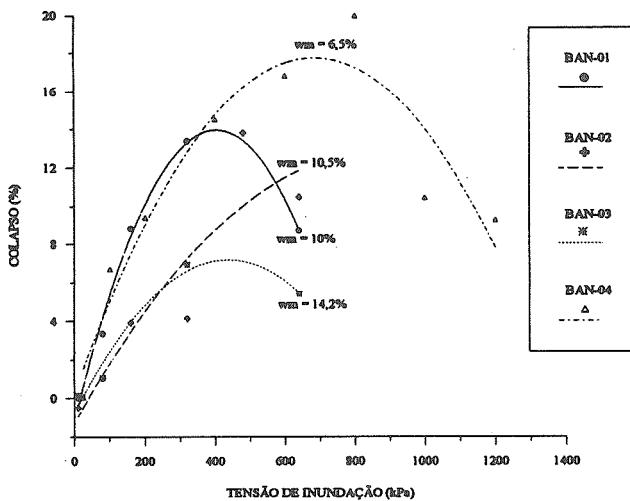
As diferenças encontradas na aplicação de tais critérios, para uma mesma amostra, já eram esperadas, visto que estes foram formulados para determinadas ocorrências de solo ou regiões a partir de conceitos empíricos e/ou testes rápidos. Portanto, há uma certa dificuldade na aplicação desses critérios em outros locais. Em geral, eles são usados em análises preliminares, por serem passíveis de erros e não considerarem os estados de tensões ao qual o solo pode estar submetido.

Neste trabalho adotou-se o critério de Vargas, como sendo o critério base para identificação da colapsabilidade. Por este critério, os solos são considerados colapsáveis quando  $\epsilon_{VC} \geq 2\%$ .

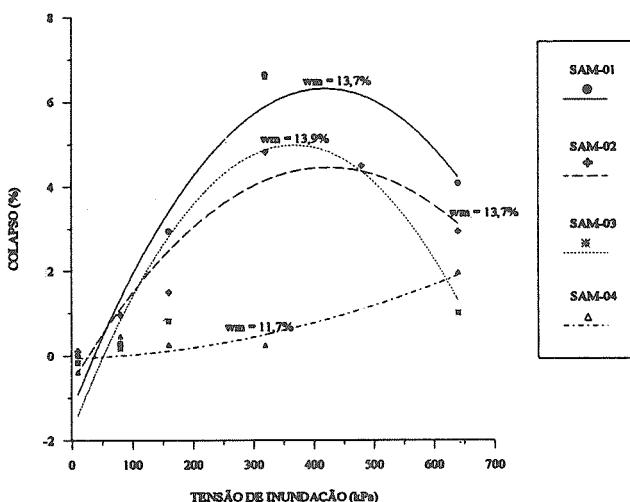
### 4.2. ENSAIOS EDOMÉTRICOS

As amostras ensaiadas possuem alto grau de colapsabilidade, pois adquirem  $\epsilon_{VC} > 2\%$  ou bem próximo deste, como é o caso de Sam-04, que apresenta  $\epsilon_{VC} = 1,94\%$  para uma tensão de 640 kPa. Com os resultados dos ensaios obteve-se correlações entre as deformações por colapso com a sobrecarga e com o teor de umidade (Figura 3).

Observa-se na Figura 3a uma tendência ao aumento das deformações por colapso com a tensão de inundação, para uma mesma umidade. Entretanto, após uma determinada tensão a deformação tende a diminuir. No mesmo gráfico pode-se observar que, para umidades



a) Bananal



b) Samambaia

Fig.3 - Variação do colapso com a sobrecarga e com o teor de umidade

médias maiores, como por exemplo ( $w_m = 14,2\%$ ), a deformação de colapso é menor, o que já era de se esperar, tendo em vista que uma das condições para potencialidade ao colapso é justamente o baixo teor de umidade. Vários autores, dentre eles ARAGÃO et al (1982), MENDONÇA (1990 e 1993), também constataram esse comportamento.

Para a unidade de Samambaia não foi possível constatar correlação entre a  $\sigma_{vc}$  e o teor de umidade (Figura 3b), pois esta última praticamente não varia. O material da amostra Sam-04, apesar de apresentar uma umidade mais baixa, não sofreu colapso. Isto pode ser em decorrência do material apresentar menor índice de vazios e maior peso específico seco, possuindo, portanto, uma estrutura mais estável. A Tabela 2 mostra os valores dos coeficientes de determinação polinomial de grau 2 ( $r^2$ ), resultantes dos ajustes das curvas de regressão, entre os pares de valores tensão de inundação ( $X$ ) e deformação específica por colapso ( $Y$ ), expressos em kPa e % respectivamente. Pode-se notar, nos valores apresentados, uma correlação bastante boa entre as variáveis.

Procurou-se estabelecer correlações entre as deformações por colapso com outras propriedades do solo, tais como, peso específico seco, unidade volumétrica, grau de saturação, limites de Atterberg e índices de vazios, mas estas foram prejudicadas devido ao reduzido número de dados e ao pequeno intervalo de variação entre eles.

TABELA 2. COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

AMOSTRA		EQUAÇÃO DA CURVA	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $r^2$ )
Identif.	$w$ média (%)		
Ban-01	10	$Y = 1,1835 + 0,07504X - 9,300E-05X^2$	0,989
Ban-02	10,5	$Y = -1,260 + 0,0326X - 1,893E-05X^2$	0,830
Ban-03	14,2	$Y = -0,7658 + 0,03626X - 4,149E-05X^2$	0,966
Ban-04	6,5	$Y = 0,3093 + 0,05104X - 3,735E-05X^2$	0,897
Sam-01	13,7	$Y = -1,275 + 0,03619X - 4,314E-05X^2$	0,908
Sam-02	13,6	$Y = -1,7827 + 0,03675X - 4,991E-05X^2$	0,706
Sam-03	13,9	$Y = -0,6337 + 0,0239X - 2,833E-05X^2$	0,905
Sam-04	11,7	$Y = -0,0617 + 0,00044X + 4,072E-06X^2$	0,865

## 5. CONCLUSÕES

Os solos coluvionares da região do Vale do Jequitinhonha, analisados neste estudo, apresentaram propriedades de alta colapsabilidade, conforme comprovado por ensaios edométricos. Este elevado caráter colapsível provavelmente ocorra em virtude da porosidade, cujo valor médio está em torno de 46% e do baixo grau de saturação que apresentam.

Estes solos, carregados e inundados, sofrem grandes deformações por colapso, sendo que em geral essas deformações tendem a aumentar com o aumento da tensão de inundação, até atingir um valor limite e depois começam a diminuir. Notou-se uma relação do tipo polinomial de grau 2 entre essas duas variáveis (Figura 3). Verificou-se, também, o aumento do colapso com a diminuição da umidade para uma mesma tensão vertical.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEMIG - Companhia Energética do Estado de Minas Gerais, o fornecimento dos dados e a permissão de publicá-los nesse trabalho.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ARAGÃO, C. J. G.; MELO, A. C., (1982). Fundações Rasas em Solo Colapsável - Um Caso no Semi-Árido de Pernambuco. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações, 7, Anais, ABMS, Vol. 2, setembro, p. 19-40, Olinda.
- CEMIG (1988). Estudo Hidrometeorológico da Bacia do Rio Jequitinhonha. Belo Horizonte, janeiro 1988 (Divisão de Hidrologia).
- CETEC (1980). Projeto Estudos Integrados do Vale do Jequitinhonha, Estudos Geológicos; Estudos Climáticos - Relatório Final, Belo Horizonte, outubro, 1980.
- COSTA, M. E. B. R.da, (1986). Estudo da Colapsibilidade dos Solos Superficiais de Uberlândia. São Carlos (SP), 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- DUDLEY, J. H., (1970). Review of Collapsing Soils. Journal of the Soil Mech. and Found. Division. ASCE, Vol. 96, nº SM3, maio, p.925- 947.
- ENGEVIX (1988). Relatório Final de Estudos Geológico-Geotécnicos do Projeto Básico - Aproveitamento de Bananal. Dezembro\1988.
- ENGEVIX (1989). Relatório Final de Estudos Geológico-Geotécnicos do Projeto Básico - Aproveitamento de Samamabaia. Abril\1989.
- FEDA, J., (1966). Structural Stability of Subsident Loess Soil from Praha-Dejvice. Engineering Geology, Vol.1, nº 3, março, p. 201-219, Amsterdam.
- MENDONÇA, M. B.de , (1990). Comportamento dos Solos Colapsáveis da Região de Bom Jesus da Lapa-Bahia. RJ, 270p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MENDONÇA, M. B.de; MAHLER, C. F.; PEREIRA, J. H. F., (1993). Ensaios de Laboratório em Solos Colapsáveis da Região de Bom Jesus da Lapa- Bahia. Solos e Rochas, 16, (3), p.159 - 172, São Paulo.
- QUEIROZ, L. A., (1960). Compressible Foundation at Três Marias Earth Dam. In: Pan American Conference on Soil Mech. and Foundation Engineering, 1, 1960. Proceedings. Vol. 2, p. 763-776, México.
- WOLLE, C. M. ; BENVENUTO, C.; VICTORIO, F. C.; POLLÀ, C. M.; SAAD, A. M. ; PULEGHINI, P. (1978). Estudo Preliminar da Colapsabilidade dos Solos no Projeto Jaíba (MG). In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 2, 1978. Anais. Tema I, Vol. 1, p. 179-193, São Paulo.