

A INFLUÊNCIA DE JUNTAS DE CONSTRUÇÃO NA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA.

Construction joints influence on the stability of an earth dam.

NÉLIO GAIOTO*

SANDRO LEMOS MACHADO**

RESUMO - Apresenta-se um estudo para avaliação da influência de juntas de construção sobre a estabilidade do talude de jusante de uma barragem de terra. Amostras indeformadas, retiradas de juntas de construção da barragem, foram submetidas a ensaios de compressão triaxial, para avaliação da sua resistência ao cisalhamento. A barragem está sendo construída em etapas, com crescimento para jusante, para contenção de rejeitos de mineração de ouro. Já foram concluídas 7 etapas e a barragem encontra-se com cerca de 55 m de altura máxima, devendo alcançar, no final, 80 m. Nos estudos de estabilidade, utilizaram-se o método de Spencer de equilíbrio limite e o método dos elementos finitos. Os dois métodos de análise apresentaram resultados próximos, apesar dos enfoques distintos. As análises de estabilidade indicaram que superfícies de projeção poligonal, passando pelas juntas de construção, podem ser mais críticas que superfícies cilíndricas. Quanto mais próxima ao talude de jusante, menor o fator de segurança.

SINOPSIS - This paper presents a study on the influence of construction joints on the stability of an earthfill dam. With this aim, undisturbed samples from the construction joints were taken out, and submitted to triaxial tests to evaluate its shear strength. The dam has been built in stages, by the downstream method, with the purpose of tailing disposal from a gold mining. Seven stages already has been concluded and the maximum height reached is 55 meters. At the last stage the dam will be 80 meters height. In the stability analysis, Spencer equilibrium limit and finite element methods were used. Both methods, using either circular and polygonal projection surfaces of sliding, presented similar results, in despite of the distinct approach. The stability analysis showed that polygonal projection surfaces passing through the construction joints and as near as possible of downstream slope may be more critical than circular surfaces of sliding.

1 - INTRODUÇÃO

Com o objetivo de armazenar rejeito da mineração de ouro, está sendo construída, próxima à cidade de Paracatu, Minas Gerais, uma barragem de aterro compactado. A operação da mina foi iniciada em 1987, com a exploração de 6,7 milhões de toneladas de minério por ano, com taxa de 0,5 g de ouro por tonelada de rocha. O rejeito produzido corresponde a um solo silto-argiloso, com cerca de 95% passando na peneira 200 (0,074 mm) e com permeabilidade da ordem de 5×10^{-5} cm/s, lançado no reservatório da barragem com teor de sólidos de 40%. Devido a estas características, ficou inviável o seu aproveitamento como material de construção do maciço do barramento, mesmo com a utilização de hidrociclones (Gaioto, 1989). Por outro lado, a grande disponibilidade de solos argilosos e siltosos na área do reservatório e em ambas as margens, conduziu o projeto para a alternativa de barragem homogênea, de aterro compactado. A previsão inicial de exploração de minério

* Professor do Departamento de Geotecnia EESC/USP - Brasil

** Doutorando do Departamento de Geotecnia EESC/USP - Brasil

era de cerca de 100 milhões de toneladas, o que iria requerer um barramento com aproximadamente 55 m de altura máxima. Atualmente a produção é de cerca de 14 milhões de ton/ano e a barragem deverá alcançar cerca de 80 m de altura.

A barragem foi projetada para ser construída em etapas, com alteamentos sucessivos, inicialmente a cada ano e, à medida que a área do reservatório cresce, a cada 2 ou 3 anos (Borges et al., 1991). Os alteamentos são executados com deslocamento do eixo da barragem para jusante. Segundo a previsão inicial, elaborada durante o projeto básico, a barragem seria construída em 9 etapas, o que permitiria uma redução de custos, em valor presente, da ordem de 31%, em relação à alternativa de etapa única. Por sua vez, este procedimento apresenta o inconveniente de produzir extensas juntas longitudinais de construção no interior do maciço de terra, a cada nova etapa construída. O presente estudo está sendo desenvolvido com o objetivo de analisar a influência dessas juntas de construção na estabilidade do talude de jusante da barragem.

2 - CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A barragem é do tipo homogêneo, de aterro compactado, com talude de montante 1V:2H e talude de jusante com inclinação de 1V:2H e 1V:2,2H, subdividido em trechos com cerca de 8 m de desnível cada um, separados por bermas com larguras de 3, 5 e 10m, com inclinação média 1V:2,65H. Nas duas últimas etapas, o talude de montante foi construído com inclinação de 1V:1,8H e, estudos de estabilidade indicaram a possibilidade de torná-lo mais íngreme, ou seja, 1V:1,5H, a partir da 8ª etapa. Estas modificações foram apoiadas no benefício decorrente da crescente deposição dos rejeitos junto ao talude de montante da barragem e pela impossibilidade de ocorrer rebaixamento do nível do reservatório.

O sistema de drenagem interna da barragem é constituído de um filtro chaminé de areia grossa, que se desloca em degraus para jusante, conforme é mostrado na figura 1. Junto à fundação o sistema de drenagem continua com um tapete drenante, do tipo sanduíche, com duas camadas externas de areia, duas de pedra britada miúda e uma interna de pedra britada graúda. Nas primeiras etapas o filtro chaminé vertical ficou posicionado mais a jusante, para que não resultasse muito próximo ao talude de montante nas seções das barragens correspondentes às etapas posteriores. Este expediente procurou minimizar a percolação de água através do barramento nas etapas iniciais, quando ainda não se conhecia, com segurança, o comportamento quanto à sua estanqueidade.

Nas etapas seguintes, à medida que se constatou que as vazões de percolação não cresciam linearmente com a carga do reservatório, em decorrência da deposição dos rejeitos sobre o talude de montante, não se preocupou com a aproximação do filtro chaminé em relação a este talude. Para avaliar o efeito da deposição do rejeito foi também desenvolvido um estudo de percolação, com utilização do método dos elementos finitos (Amorim, 1993) e com base no comportamento do rejeito, determinado através de ensaios em consolidômetros de lama (Mello et al., 1991).

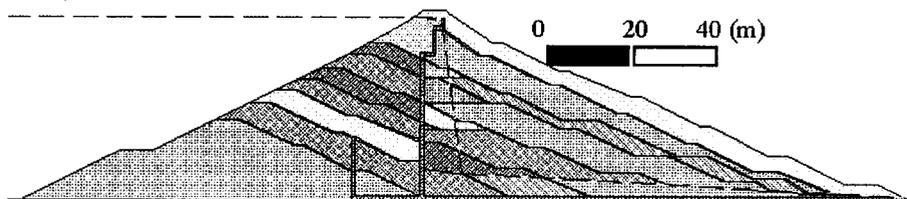


Figura 1 - Perfil típico utilizado nas análises

Nas quatro primeiras etapas, o aterro da barragem foi construído com solo coluvionar, argiloso, vermelho, encontrado com espessura da ordem de quatro metros em ambas as margens. Dadas as características argilosas deste material (limite de liquidez da ordem de 60% e teor de argila entre 30 e 70%) e as condições climáticas da região, bastante severas no período de estiagem, grande número de trincas de retração ocorreram na crista e no talude de jusante, o que requereu um rigoroso tratamento para remoção da camada fissurada, antes do lançamento do novo aterro. Mesmo assim, em algumas seções verificou-se percolação preferencial ao longo das juntas, detectadas através de piezômetros aí instalados. A partir da 5ª etapa, passou-se também a utilizar o solo siltoso, residual, amarelo, subjacente ao coluvionar, a jusante do filtro chaminé. Na 7ª etapa, com o esgotamento do solo argiloso nas jazidas próximas à barragem, o solo siltoso passou a ser utilizado em toda a seção. Esta modificação trouxe como benefício o desaparecimento das trincas de ressecamento que, aliado à maior proximidade do filtro chaminé em relação ao talude de montante, resolveu os problemas de percolação preferencial nas zonas das juntas de construção. Por outro lado, por ser menos coesivo, o solo siltoso é mais susceptível a problemas de erosão, provocada pelas águas de chuva, o que vem requerendo serviços mais intensos de reparos, principalmente no talude de jusante, pois a sua proteção superficial somente será construída na última etapa.

Além dos piezômetros instalados nas juntas de construção entre etapas, em várias seções da barragem, outros foram instalados na fundação, para monitoramento das sub-pressões (Borges et al., 1996). Foram também instalados medidores de vazão, nos poços de saída do sistema de drenagem interna e marcos superficiais, para medidas de recalques e deslocamentos horizontais da barragem.

A montante do filtro chaminé, os piezômetros estão indicando perda de carga da ordem de 90%, através das juntas mais profundas, já bloqueadas a montante pela deposição do rejeito e, de 40 a 80%, nas juntas superiores. Os piezômetros de fundação estão indicando um gradiente hidráulico de 7%, sob o tapete drenante da barragem. A vazão total de percolação, medida na saída do sistema de drenagem interna, corresponde a 1,1 l/min por metro de barragem, valor este pouco inferior ao valor médio observado em outras barragens construídas no Brasil. Na etapa 7, a crista da barragem está com cerca de 1800 m de comprimento.

3 - ESTABILIDADE AO LONGO DAS JUNTAS DE CONSTRUÇÃO

Atualmente está em construção a 8ª etapa da barragem. As juntas de construção vêm merecendo atenção especial, desde as primeiras etapas, nos seguintes aspectos:

- a) Intercalação de bermas, de diferentes larguras, no talude de jusante, a fim de evitar a formação de superfícies contínuas, que seriam favoráveis a um escorregamento a elas condicionado.
- b) Remoção de todo o solo não adequadamente compactado, junto ao talude de jusante, à medida que o novo aterro vai sendo lançado.
- c) Remoção do aterro afetado pelas fissuras de ressecamento, nos taludes, bermas e cristas, antes do lançamento do novo aterro.
- d) Irrigação e escarificação intensa da superfície das juntas, antes do lançamento de cada nova camada do aterro.

Além desses cuidados, foram processadas análises de estabilidade, levando-se em consideração a eventual diminuição da resistência ao cisalhamento nas zonas do aterro afetadas pelas juntas de construção. Para tal, foi programada a retirada de blocos indeformados em duas seções do aterro, amostrando-se os materiais a montante, a jusante e na própria junta de construção. O exame dos blocos retirados das juntas de construção indicam

que os solos situados acima da superfície de contato, entre as etapas 6 e 7, apresentaram-se menos resistentes que os solos subjacentes, ao serem manipulados para a preparação de corpos de prova. Os resultados dos ensaios de compressão triaxial, do tipo adensado rápido, confirmaram as expectativas do exame visual e táctil. As envoltórias de resistência, obtidas nos ensaios já realizados, são apresentadas na tabela I.

Tabela I -Envoltórias de resistência

SOLO	ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA (kPa)
Argiloso, não saturado	$s' = 90 + \sigma \operatorname{tg} 27^\circ$
Argiloso, saturado	$s' = 60 + \sigma \operatorname{tg} 29^\circ$
Siltoso, não saturado	$s' = \sigma \operatorname{tg} 33^\circ$
Siltoso, saturado	$s' = 10 + \sigma \operatorname{tg} 31^\circ$
Siltoso, não saturado - junta	$s' = \sigma \operatorname{tg} 28^\circ$

Não foi amostrado o solo argiloso das juntas de construção, por este se encontrar em grande profundidade, onde não mais condicionam os resultados das análises de estabilidade, como será visto adiante. Para efeito das análises de estabilidade, as juntas de construção foram assumidas com 1 metro de largura, adjacentes aos taludes, não se considerando como juntas as superfícies horizontais das bermas e cristas.

As análises de estabilidade foram processadas para a seção transversal máxima da barragem na etapa 8 (figura 1), utilizando-se os programas Slope/W (1995) e Sigma/W (1995). O aplicativo Slope/W permite o cálculo de estabilidade de taludes empregando-se desde os métodos mais simplificados de equilíbrio limite até métodos mais elaborados, como o GLE (“General Limit Equilibrium method”), diversos critérios de ruptura, formas variadas de superfície de ruptura e diferentes modos de consideração da água no solo. Para as análises de estabilidade por equilíbrio limite utilizou-se o método de Spencer e superfícies de ruptura de projeções poligonais e circulares. Análises de estabilidade foram também realizadas, utilizando-se os resultados obtidos e empregando-se o aplicativo Sigma/W. O aplicativo Sigma/W permite análises por elementos finitos, utilizando-se diversos tipos de elementos, aplicação de cargas ou condições de contorno de forma incremental e o uso de diversos modelos constitutivos, desde modelos mais simples, como o elástico-linear, até modelos altamente não lineares, como o Cam-clay. Foram utilizados elementos quadriláteros de oito nós e triangulares de 6 nós. O modelo constitutivo adotado para os solos foi o elastoplástico perfeito, com o módulo de elasticidade (E) definido de modo a compensar as áreas S_1 e S_2 , apresentadas na figura 2.

O coeficiente de Poisson (ν) foi adotado a partir do coeficiente de empuxo em repouso, $K_0 = 1 - \operatorname{sen}(\phi') = \nu / (1 - \nu)$, onde ϕ' é o ângulo de atrito interno do solo. A tabela II apresenta os módulos de elasticidade obtidos para cada solo. A figura 3 apresenta a malha mutilizada na análise por elementos finitos. A análise foi realizada considerando-se o método construtivo, ou seja, os cálculos efetuados levaram em conta as oito etapas construtivas da barragem, sendo realizados de forma incremental, a cada etapa de construção.

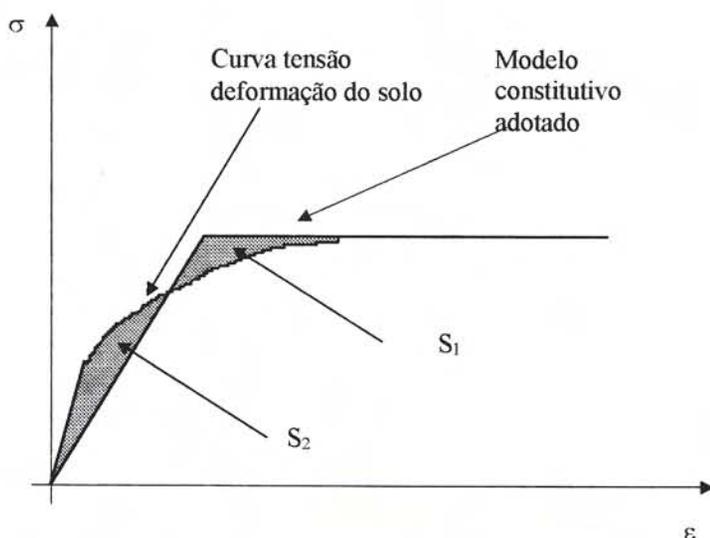


Figura 2 - Critério utilizado na definição do módulo de elasticidade dos solos

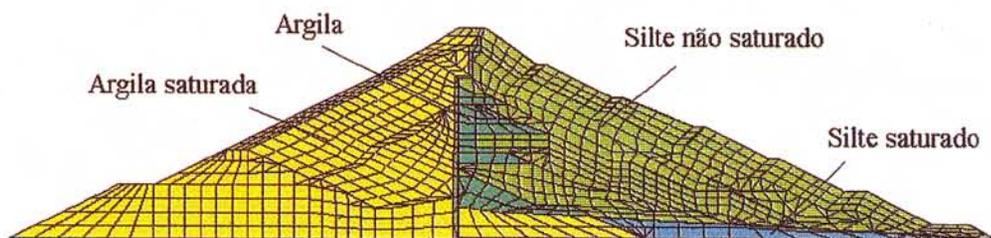


Figura 3 - Malha utilizada na análise por elementos finitos

Com os resultados de σ_x , σ_y e τ_{xy} , obtidos com o uso do Sigma/W para o perfil apresentado na figura 1, foram processadas análises de estabilidade utilizando-se o aplicativo Slope/W. Neste caso, o fator de segurança de uma dada superfície de ruptura é definido conforme a equação 1.

Tabela II - Módulos de elasticidade adotados para os diferentes solos

SOLO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (kPa)
Argiloso, não saturado	23.000
Argiloso, saturado	10.000
Siltoso, não saturado	18.000
Siltoso, saturado	10.000
Siltoso, não saturado - junta	15.000

$$FS = \frac{\sum Sr}{\sum Sm} \quad (1)$$

Vale ressaltar que neste caso o fator de segurança é de natureza pontual, variando ao longo da superfície de ruptura, o que não ocorre no caso dos métodos de equilíbrio limite tradicionais.

Os valores de Sr (força cisalhante resistente) e Sm (força cisalhante mobilizada) em cada ponto, são calculados conforme as equações 2 e 3, respectivamente.

$$Sr = (c' + \sigma' \cdot \tan \phi') \beta \quad (2)$$

$$Sm = \tau_m \cdot \beta \quad (3)$$

Onde: β é o comprimento da base da fatia. e σ' a tensão normal no centro da base da fatia, calculada a partir dos valores de σ_x , σ_y e τ_{xy} , obtidos por interpolação dos valores fornecidos pela análise realizada com o uso do programa Sigma/W e da inclinação do centro da base da fatia considerada. O valor de Sm é calculado de forma similar. O fator de segurança local (FS_{local}) em cada ponto da superfície de ruptura (centro da base da fatia considerada), é calculado conforme a equação 4.

$$FS_{(local)} = \frac{Sr}{Sm} \quad (4)$$

Como será visto adiante, as superfícies de ruptura formadas nos contatos das etapas construtivas da barragem serão consideradas como planos preferenciais de ruptura. Estes planos possuem mudanças bruscas de inclinação, sugerindo um mecanismo, o qual, à primeira vista, pode ser considerado como cinematicamente inadmissível. Segundo Atkinson (1981), contudo, um mecanismo como o ilustrado na figura 4a, pode ser encarado como cinematicamente possível se, quando pequenas cavidades são imaginadas nas junções entre os blocos (figura 4b), um incremento de colapso plástico pode ocorrer como ilustrado na figura 4c. Melo e Neves (1975), citando Prager (1958), definem, como campo de velocidades cinematicamente admissível para um sistema, aquele no qual a distribuição de velocidades é uma função contínua das coordenadas dos pontos. Ainda segundo Melo e Neves (1975), o próprio Prager (1958) generaliza o conceito de campos cinematicamente admissíveis, de modo a abranger também os campos com descontinuidades, utilizando uma técnica em que considera as descontinuidades como casos limite de zonas, nas quais as tensões e deslocamentos variam continuamente, ainda que a uma taxa elevada.

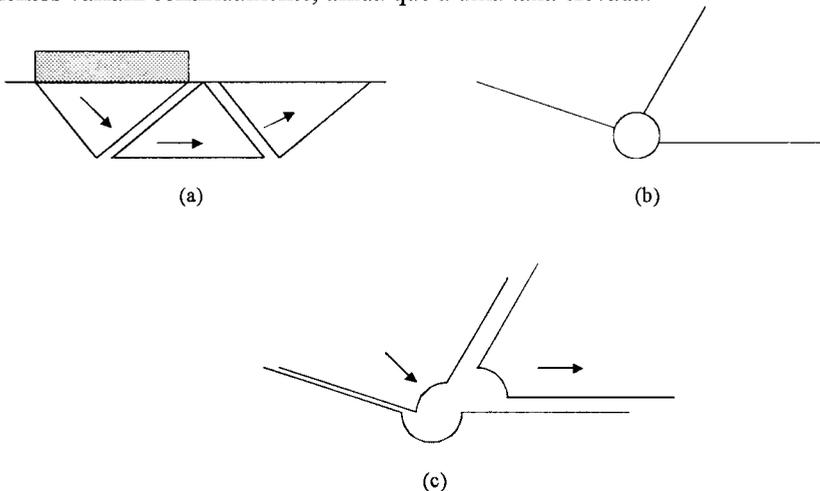


Figura 4 - Considerações sobre mecanismos cinematicamente possíveis de ruptura

As análises foram processadas com o reservatório no nível máximo maximorum. A rede de fluxo através da barragem foi considerada em regime permanente, com equipotenciais verticais (a favor da segurança). O trecho da linha freática, a montante do filtro em chaminé, com menos de 9 metros de extensão, foi considerado horizontal e, a jusante do filtro, com gradiente de 7% (de acordo com os dados dos piezómetros instalados imediatamente abaixo e acima do tapete drenante).

4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES.

4.1 - Análises realizadas com o uso de elementos finitos

A figura 5 apresenta as regiões plastificadas no maciço após a execução da 8ª etapa de construção da barragem. A figura 6 apresenta contornos de igual deformação cisalhante máxima após a conclusão da mesma etapa.

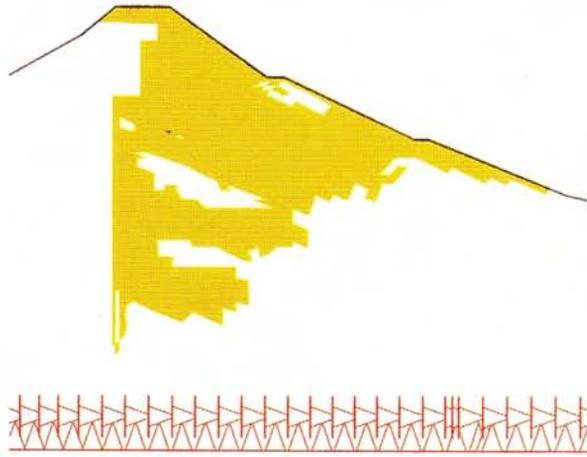


Figura 5 - Regiões plastificadas após o término da 8ª etapa

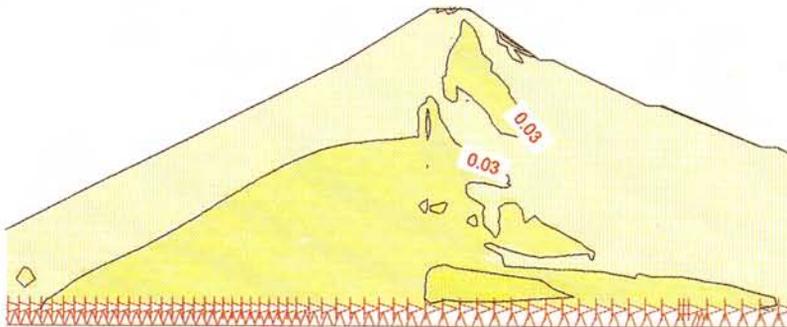


Figura 6 - Contornos de igual deformação cisalhante máxima

Conforme pode-se observar destas figuras, a zona de argila não saturada (vide figura 3), a jusante do filtro chaminé, induz o aparecimento de zonas plastificadas no talude de jusante da barragem, bem como influencia no aparecimento de altas deformações cisalhantes máximas a baixas profundidades.

4.2 - Análises realizadas pelo método do equilíbrio limite

4.2.1 - Superfícies de deslizamento cilíndricas

Para esta condição de deslizamento o fator de segurança obtido foi $FS = 1,683$. Na Figura 7, estão apresentados, para a seção transversal máxima, os valores dos fatores de segurança obtidos para os centros analisados, o círculo crítico e o respectivo valor mínimo pesquisado.

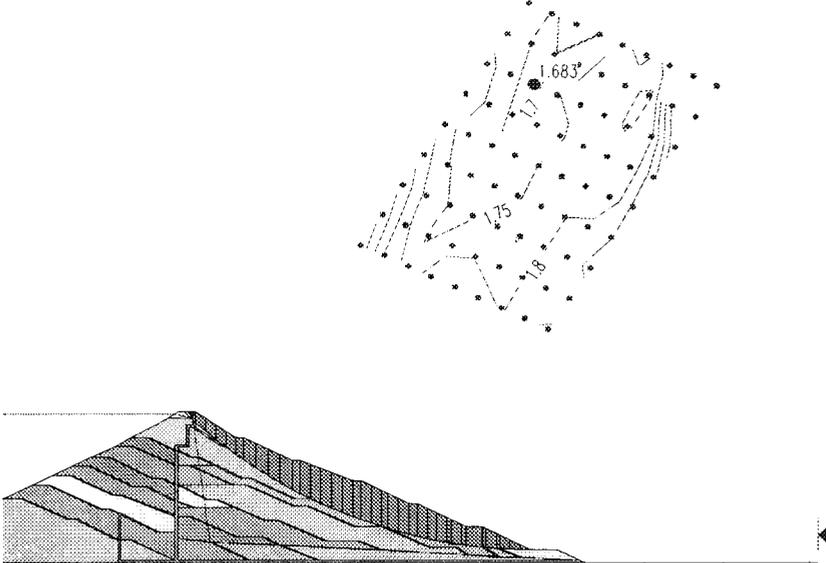


Figura 7 - Resultado das análises de estabilidade considerando-se superfícies cilíndricas de ruptura.

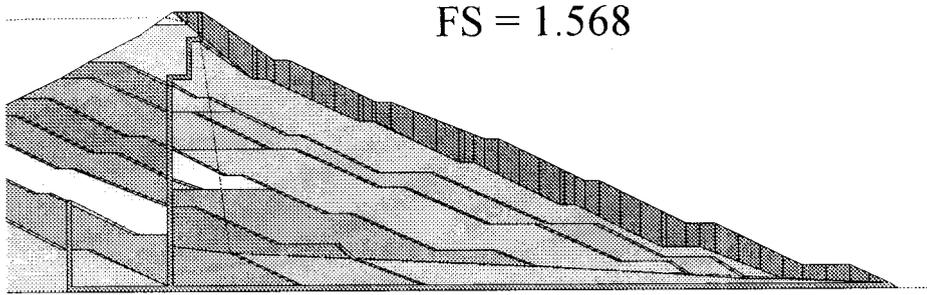
4.2.2 - Superfícies de escorregamento coincidentes com as juntas de construção

Os resultados destas análises estão resumidos na tabela III, apresentada a seguir. As figuras 8 a 11 ilustram estes resultados.

Tabela III - Fatores de segurança para deslizamento nas juntas de construção

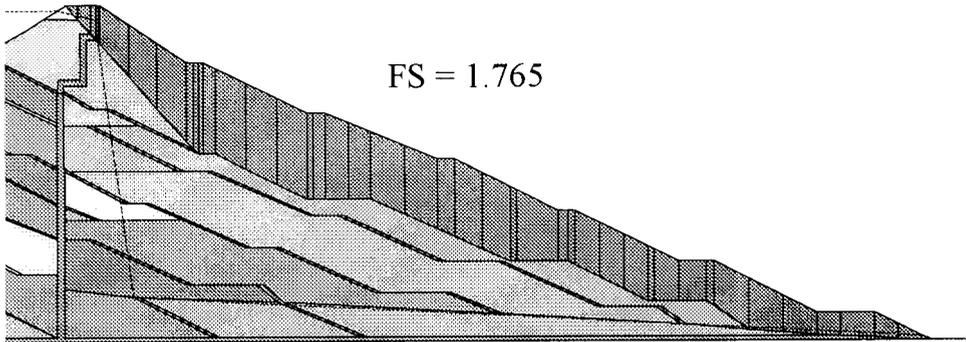
JUNTA ENTRE ETAPAS	FIGURA	FATOR DE SEGURANÇA
7/8	3	1,568
6/7	4	1,765
5/6	5	1,990
4A/5	6	2,083

Para superfície de deslizamento em juntas mais profundas, os fatores de segurança foram bem mais elevados, admitindo-se que o solo argiloso da junta presente uma redução de resistência idêntica ao do solo siltoso.



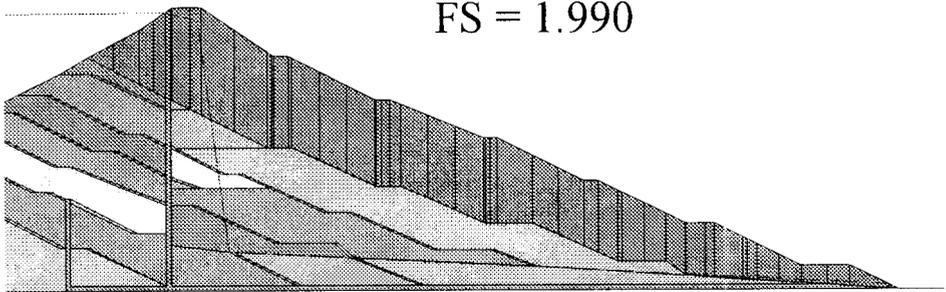
FS = 1.568

Figura 8 - Fator de segurança obtido para superfície de ruptura situada na junta entre as etapas 7/8.



FS = 1.765

Figura 9 - Fator de segurança obtido para superfície de ruptura situada na junta entre as etapas 6/7.



FS = 1.990

Figura 10 - Fator de segurança obtido para superfície de ruptura situada na junta entre as etapas 5/6.

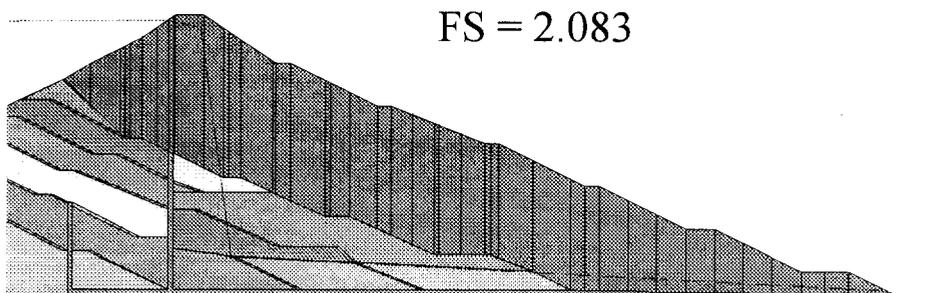


Figura 11 - Fator de segurança obtido para superfície de ruptura situada na junta entre as etapas 4A/5.

Além destas superfícies verificou-se a possibilidade de ruptura localizada por influência das juntas de construção entre as etapas 7/8. A figura 12 apresenta o menor fator de segurança obtido a partir das análises efetuadas. Conforme apresentado na figura 12, o estudo da possibilidade de rupturas localizadas levou a um fator de segurança cerca de 5% menor do que aquele obtido para o caso de ruptura geral.

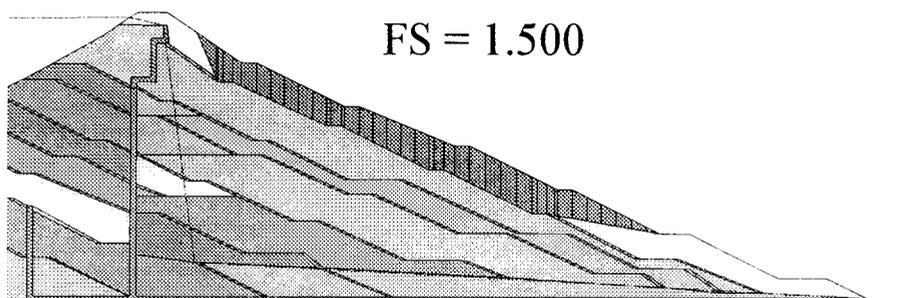


Figura 12 - Fator de segurança mínimo obtido para o caso de ruptura poligonal local

4.3 - Análises de estabilidade realizadas com base nos dados gerados pelo aplicativo Sigma/W

Conforme relatado anteriormente, com os valores de σ_x , σ_y e τ_{xy} gerados pela análise realizada com o uso do Sigma/W, foram realizadas diversas análises de estabilidade, utilizando o aplicativo Slope/W. A figura 13 apresenta os valores de fatores de segurança obtidos a partir das análises efetuadas. O fator de segurança mínimo obtido foi de 1,668, para o círculo crítico mostrado na figura. A figura 14 apresenta a variação do fator de segurança pontual, definido pela equação 4, ao longo da superfície crítica de ruptura.

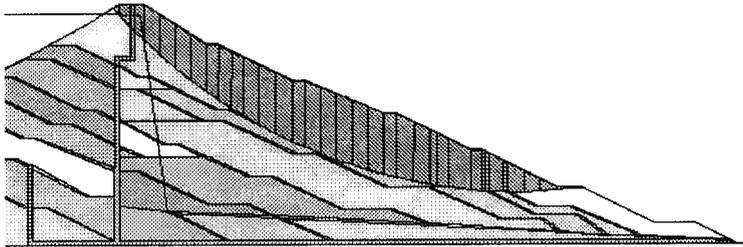


Figura 13 - Fatores de segurança obtidos para o caso de ruptura circular, considerando-se fatores de segurança locais ao longo da superfície de ruptura.

Conforme pode-se observar da figura 13, embora o valor do fator de segurança mínimo encontrado seja praticamente o mesmo daquele calculado por Spencer, os centros de rotação da superfície crítica se encontram bastante afastados. Comparando-se os resultados apresentados nas figuras 5, 6 e 13, nota-se que a superfície circular crítica passa pela zona mais solicitada do maciço (zona plastificada). A influência da zona plastificada do maciço no fator de segurança calculado pode ser melhor entendido pela análise da figura 14. Nesta figura, estão plotados os valores de fatores de segurança locais ao longo da superfície circular crítica de escorregamento, em função da distância horizontal contada a partir do início da superfície. Conforme pode-se observar, são computados altos valores de FS no início da superfície de escorregamento, correspondentes à camada de argila saturada. À medida em que a superfície de ruptura entra na zona plastificada do maciço, os fatores de segurança locais são reduzidos para valores próximos à unidade, voltando a crescer para valores próximos a 2, continuando assim até o fim do círculo crítico.

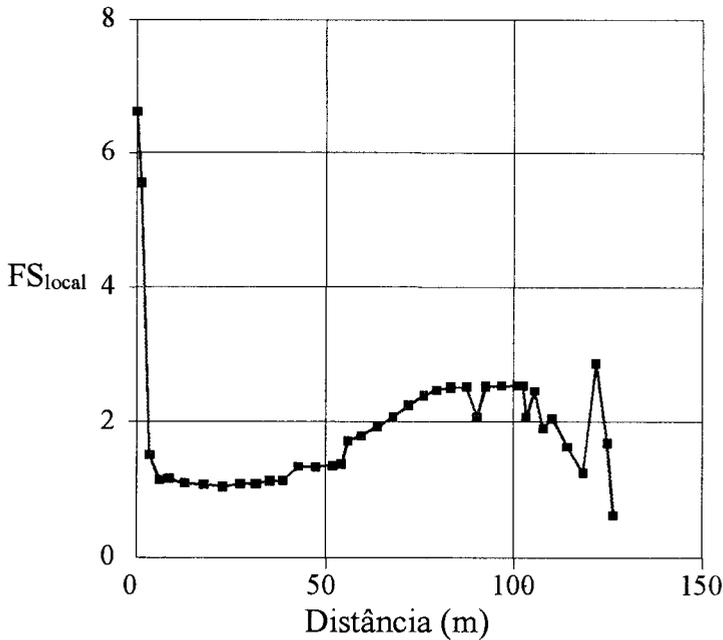


Figura 14 - Variação do fator de segurança local ao longo do círculo crítico de ruptura

5 - CONCLUSÃO

5.1 - Os resultados dos primeiros ensaios com blocos indeformados retirados da junta de construção estão indicando uma diminuição da resistência ao cisalhamento da ordem de 18%.

5.2 - As análises de estabilidade processadas, considerando superfície de deslizamento cilíndrica, são muito pouco afetadas pela resistência das juntas de construção. A superfície global mais crítica passa por pequenos trechos das juntas entre as etapas 7/8 e 6/7, com fator de segurança $FS = 1,683$. Além disto, para o caso das análises realizadas com o auxílio do MEF, foi possível identificar mecanismos de ruptura localizados, os quais conduziram a superfícies de ruptura com menores fatores de segurança (vide figuras 13 e 14).

5.3 - A condição de estabilidade mais crítica (levando-se em consideração o comentário anterior) corresponde à superfície de deslizamento contida quase que integralmente na junta de construção entre as etapas 7/8, com fator de segurança de 1,568. Nesta mesma junta, considerando-se superfície de ruptura localizada, o fator de segurança caiu ainda mais, chegando ao valor de 1,5.

5.4 - As análises de estabilidade realizadas utilizando-se os resultados gerados pelo aplicativo Sigma/W conduziram quase que aos mesmos fatores de segurança obtidos pelo método de Spencer. Os resultados obtidos, contudo, permitem analisar certos aspectos, como zonas plastificadas no maciço e tendências de deslocamento ou ruptura, dentre outros.

5.5 - À medida que as superfícies de deslizamento passam por juntas mais profundas o fator de segurança cresce significativamente, de 1,568 na junta entre etapas 7/8, para 2,083 na junta 4A/5.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rio Paracatu Mineração S.A., a possibilidade de divulgação dos dados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, N. R. - *Barragem para contenção de rejeitos - Avaliação do efeito da deposição dos rejeitos na percolação de água do aterro e da sua fundação* - Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.
- ATKINSON, J. H. - *Foundations and slopes - An introduction to applications of critical state soil mechanics*. New York, McGraw - Hill, 1981.
- BORGES, A. L.; CONTE, A. E.; PAIVA, P. R.; GAIOTO, N. - *Barragem Morro do Ouro - Um exemplo de projeto otimizado das etapas de construção*. II REGEO'91 - Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- BORGES, A. L.; PAIVA, P. R.; GAIOTO, N.; SILVEIRA, J. F. A. - *O comportamento da barragem do Morro do Ouro nas várias etapas de alteamento*. II Simpósio sobre Instrumentação de barragens. Belo Horizonte, MG, 1996.
- GAIOTO, N. - *Barragem Morro do Ouro - Projeto concebido para construção em etapas com a finalidade de contenção de rejeito e recuperação de água*. XVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, PR, 1989.
- MELLO, L. G. F. S.; AMORIM, N. R.; MELLER, F. C.; QUARESMA, A. R. - *Desenvolvimento e ensaios iniciais em consolidômetro da lama em condições de deformação controlada*. II REGEO'91 - Rio de Janeiro, 1991.
- MELO, G. & NEVES, M. - *Mecânica dos solos - Equilíbrio limite e estados críticos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1975.
- PRAGER, W. - *Problèmes de plasticité theorique*. Dunoc. Apud, 1958..
- SIGMA/W - *Sigma/w - for finite element analysis* - Version 3.0, Calgary, Alberta, Canadá, 1950.
- SLOPE/W - *Slope/w - for Slope Stability Analysis* - Version 3.0, Calgary, Alberta Canadá, 1995.