

LIÇÕES APRENDIDAS DA RUPTURA DE ALGUNS TALUDES.

Prof. Dr. Milton Assis Kanji

Escola Politécnica, USP. Consultor Independente.

INTRODUÇÃO

O Autor atuou como consultor no estudo de rupturas de taludes que haviam ocorrido, para o entendimento dos fatores que os levaram à ruptura, seja para companhias seguradoras, seja para construtores ou entidades públicas. Nesse mister, buscando sempre a maior isenção de julgamento, a atitude constante foi a de ter em mente a seguinte questão: “Se eu estivesse envolvido no projeto e construção da obra, teria antevisto a possibilidade de ruptura?”.

Cada caso estudado proporcionou uma série de ensinamentos, os quais procuramos transmitir na presente conferência. Alguns dos ensinamentos podem até parecer elementares e muito simples, mas é interessante observar que frequentemente na prática profissional são esquecidos. A causa disso pode ser pouco tempo disponível para o estudo do caso, restrições orçamentárias para investigação ou para horas de projeto, pouca ou ausência de acompanhamento de campo, exclusiva preocupação com o gerenciamento da construção, e outros inúmeros fatores.

Selecionamos alguns casos ocorridos nos últimos 4 anos, cujas naturezas são diferentes, envolvendo taludes em PCH's, hidroelétricas, estradas e obras urbanas.

Sua ilustração mais completa é feita na apresentação na 5ª Sessão Técnica, apresentando-se neste texto as figuras mais representativas, esperando que contribuam na oportunidade da concepção, projeto e acompanhamento de futuros casos.

CASO 1: ESCAVAÇÃO DE CASA DE FORÇA EM ARENITO ERODÍVEL.

Trata-se da escavação para Casa de Força de uma PCH, onde ocorre arenito Botucatu sob derrames basálticos. A escavação da Casa de Força, situada junto ao rio e distante cerca de 20m do mesmo, tem 12m de profundidade, envolvendo apenas camada aluvionar com poucos metros de espessura, sobrejacente ao arenito. A borda da escavação situa-se a aproximadamente 20m do rio (Figura 1). O gradiente hidráulico médio é da ordem de 0,6, que pode ser considerado potencialmente gerador de “piping” em solos erodíveis.



Figura 1: Vista da escavação da Casa de Força.

Surgiram túneis de erosão bastante extensos no arenito na base dos taludes escavados (Figura 2). O construtor lançou filtro invertido sobre a boca dos túneis, na tentativa de interromper o processo de erosão, mas alguns túneis retroagiram, alcançando o rio, provocando o colapso do teto do túnel com a formação de canal, e total inundação da cava (Figura 3). Foi necessário construir um extenso “cut off” para separar a cava do rio e esgotar a cava, para poder prosseguir com a construção da Casa de Força.



Figura 2: Túneis formados por “piping”



Figura 3: Inundação da Casa de Força

Portanto, a causa foi o alto gradiente hidráulico, conjugado com a erodibilidade do arenito. Curiosamente, os túneis de erosão iniciaram-se ao longo de fraturas do arenito, a partir das quais se alargaram formando os túneis em plena matriz rochosa.

Nas sondagens rotativas realizadas anteriormente à construção, o arenito não foi recuperado, por seu desgaste no processo da sondagem. Portanto, as características geomecânicas do arenito não eram conhecidas, mas suas propriedades foram presumidas em comparação com o comportamento dessa rocha em outros locais. Dada a sua pouca profundidade sob o aluvião, teria sido praticável realizar poços de inspeção para inspecionar diretamente essa rocha, quando teria sido possível constatar sua potencial erodibilidade. O lançamento de filtro invertido na boca dos túneis era totalmente ineficaz, porquanto o processo ocorre na extremidade interna do túnel. Pensamos que falta maior preparo geotécnico aos engenheiros de obra que atuam em obras de terra e escavações.

CASO 2: RUPTURA DE ENCOSTA ADJACENTE A ETE

Em região acidentada, foi construída uma lagoa aeróbica para ETE, que requereu corte e aterro para sua implantação, em solos residuais de gnaiss. A encosta adjacente tinha cerca de 25° de inclinação, terminando em um córrego. Em período de fortes chuvas, a encosta sofreu ruptura, atingindo os diques laterais de contenção da lagoa (Fig 4). O processo de ruptura, desde seus primeiros sinais até seu término, levou aproximadamente 1 dia para ocorrer.



Figura 4: Ruptura da encosta, atingindo o dique de contenção

A análise do projeto geotécnico indicou que o mesmo era adequado, com parâmetros do solo e análises de estabilidade realísticas. Entretanto, constatou-se que a instabilidade foi deflagrada pela erosão do pé do talude pelo córrego (Figura 5). Trata-se de região de vales estreitos, onde as chuvas podem causar súbitos aumentos de vazão e de altura dos rios. As análises de estabilidade sem erosão do talude mostram estabilidade satisfatória, e as realizadas com erosão do pé indicam ruptura.



Figura 5: Vista geral do escorregamento e do córrego ao pé da encosta

Apesar de bom projeto, não se atentou para a possibilidade de erosão do pé da encosta pelo córrego.

CASO 3: ATERRO EM SOLO REFORÇADO EM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

O aterro, de até 12m de altura, com parede vertical de blocos de concreto (Fig 6) , foi construído com solo compactado (residual de gnaiss e mica-xisto), camadas intercaladas de mantas de geossintético.



Figura 6: Aspecto do muro de blocos do aterro reforçado

Após cerca de um ano de operação, e sob fortes chuvas, o aterro sofreu ruptura, cujas evidências foram embarrigamento do muro de blocos, trincas na pista asfaltada no topo do aterro (Figuras 7 e 8), inclinação de torneiras, etc., o que obrigou à interdição da pista.



Figura 7: Embarrigamento do muro



Figura 8: Trincas no pavimento acima do aterro

As trincas da pista se iniciaram junto a uma caixa enterrada de concreto de distribuição de rede elétrica no meio da pista, numa seção de 8m de altura, propagando-se depois para a seção de maior altura. Foram então realizados vários testes de CPT, indicando que os 3 a 4m superiores apresentavam muito baixa resistência. A análise do projeto indicou que o mesmo foi elaborado adequadamente em termos de seu dimensionamento; as análises de estabilidade realizadas após o evento indicam FS satisfatório.

Na escavação do aterro para sua reconstrução, pode-se observar que: a) efetivamente, o solo das camadas superiores era mal compactado; b) verificou-se que as camadas superiores foram executadas depois de uma paralisação da construção, após o que a equipe de controle de qualidade não mais esteve na obra; c) a ruptura iniciou-se junto à caixa de concreto enterrada, prosseguindo abaixo da mesma de forma circular (Fig 9 e 10).



Figura 9: Trecho escavado, vendo-se o muro de blocos, as camadas de geossintético e a caixa de concreto



Figura 10: Detalhe da superfície de ruptura

A análise deste caso mostrou que o forte contraste de compressibilidade entre a caixa enterrada de concreto e o aterro, permitiu a formação de trinca vertical, que com a saturação pelas chuvas, também gerou pressões hidrostáticas na trinca. Embora a caixa de concreto não estivesse na seção de maior altura, esses fatores causaram a ruptura do aterro.

As chuvas que incidiram no período foram da ordem de 60mm em 1 dia, 250mm em 15 dias e 400 em 1 mês, sendo que ultrapassaram a “curva crítica” de chuvas acumuladas que podem deflagrar escorregamentos (Kanji et al, 1997, 2003). Constatou-se também que na parte posterior do aterro reforçado existia uma bacia topográfica com drenagem altamente deficiente, que provocou infiltrações no aterro (Figura 11)).



Figura 11: Bacia de acumulação de águas pluviais

Portanto, três fatores básicos foram os responsáveis pela ruptura: má compactação (por ausência de fiscalização), má drenagem superficial, e a existência da caixa enterrada de concreto.

CASO 4: ESCORREGAMENTO EM ESTRADA

O km 39 da rodovia Curitiba – Paranaguá no trecho da Serra do Mar, apresentou danos de abaulamento e trincas na pista, bem como escorregamentos no talude externo, adjacente a uma cortina atirantada existente há cerca de 20 anos para conter o aterro (Figuras 12 e 13). Trincas importantes e cristas de escorregamentos com mais de 1m de

deslocamento foram observadas até uma distância de 20m do talude de montante da pista.



Figura 12: Cortina atirantada existente



Figura 13: Ruptura adjacente à cortina atirantada

Os movimentos foram causados por período chuvoso. O gráfico de chuvas acumuladas , de 3 estações da região (Figura 14) mostra que a cada intensificação das chuvas os danos sofreram agravamento. As chuvas acumuladas ultrapassaram a “curva crítica” que indica a grande probabilidade de deflagração de escorregamentos (Kanji et al, 1997, 2003).

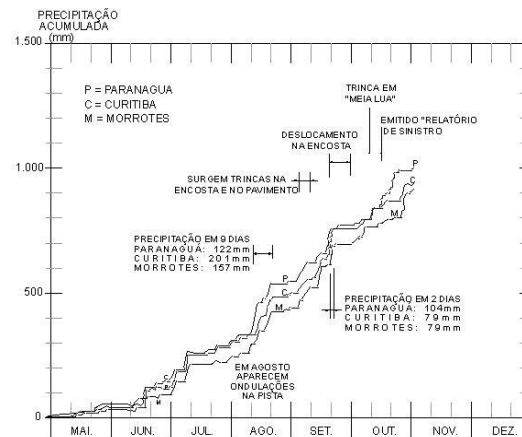


Figura 14: Chuvas acumuladas no período da ruptura

A interpretação de fotos aéreas mostrou diversos corpos coluvionares ao longo da estrada, sendo que um deles coincidia com a área instável. Constatou-se que a largura do colúvio (Figura 15) ultrapassava o trecho abrangido pela cortina atirantada (Figura 16), justamente onde ocorreu o escorregamento no talude externo.

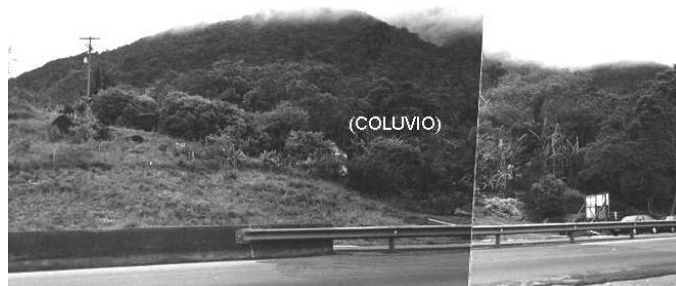


Figura 15: Vista do corpo coluvial



Figura 16: Interpretação de fotos aéreas indicando a existência de colúvios

Constatou-se também que há dois bueiros enterrados atravessando a estrada no trecho afetado, os quais se encontravam entulhados e obstruídos.

Portanto, pode-se concluir que: a) o colúvio apresenta características facilmente identificáveis por geólogo de engenharia; b) apesar que o trecho conter cortina atirantada indicando ter sido instável, o local não foi objeto de observação periódica; b) o entupimento dos bueiros causou acumulação de água no talude de montante, permitindo a subida do nível d'água dentro no maciço (Kanji e Zoppa, 2000).

CASO 5: DESLIZAMENTO DE GRANDE MASSA ROCHOSA EM ESCAVAÇÃO PARA VERTEADOR

Este caso é bastante complexo (Brito e Kanji, 2001) e será grandemente sumarizado neste texto, reduzindo-se aos aspectos absolutamente essenciais para a ilustração dos aspectos desejados. Trata-se das escavações para a implantação do vertedor da Hidroelétrica Itapebi. Trata-se de obra executada contando com projeto bem elaborado e com abundante investigação.

O vertedor foi escavado em gnaisses, contendo camadas de biotita-xisto. Essas camadas foram devidamente reconhecidas pelas sondagens realizadas (Figura 17) e consideradas nos estudos. Alguns pequenos trechos se revelaram alterados, mas não foram considerados contínuos.



Figura 17: Testemunhos de sondagem com ocorrência de biotita-xistos (escuro)

As camadas que afloravam na parede direita da escavação do vertedor, apresentavam mergulhos da ordem de 12° para a escavação. Ensaio de laboratório de cisalhamento direto em amostras indeformadas, indicaram ângulos de atrito mínimo de 17° , condição que permitiu considerar existir suficiente segurança na estabilidade dessa camada. Entretanto, para evitar deslizamento de blocos rochosos individuais, decidiu-se executar diversas linhas de chumbadores verticais e inclinados, em malha apertada, com até 3 barras de $1\frac{1}{4}$ " em mesmo furo. Adicionalmente, recuou-se de 8m o corte, para implantar muro de gravidade, para conter eventuais blocos de rocha.

Na parte mais a jusante do vertedor, onde se executavam escavações, foram implantados 4 pinos para medida de deslocamentos. Após algumas semanas os pinos indicaram deslocamentos da ordem de 3 cm, interrompendo os movimentos. No 4º mês de instalados, os movimentos ressurgiram e progrediram por mais cerca de 3 cm. Poucas semanas depois passaram a intensificar-se, quando se notaram algumas fissuras no concreto projetado que revestia a parede da escavação, ocorrendo a ruptura do maciço da parede direita poucos dias depois. A ruptura ocorreu em cerca de 1 hora, e envolveu volume da ordem de 180.000 m^3 (Figura 18). Surpreendentemente, o movimento principal ocorreu para jusante, e não lateralmente para a escavação, como previsto e tratado preventivamente.

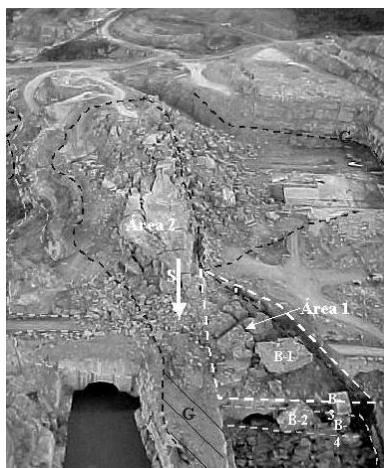


Figura 18: Vista aérea da ruptura (foto cedida pela CNO)

Após a remoção total do material, verificou-se que a camada de biotita-xisto, por onde ocorreu o deslizamento, apresentava-se dobrada de forma convexa, com mergulho do eixo (“plunge”) para jusante, paralelamente ao eixo do vertedor (Figura 19), esclarecendo o sentido do movimento ocorrido.



Figura 19: Vista da superfície de ruptura após sua limpeza

Retroanálises da estabilidade do deslizamento indicaram ângulo de atrito de cerca de 12° , coincidentemente com os ângulos de atrito residuais dos ensaios de cisalhamento direto em laboratório (Figura 20).

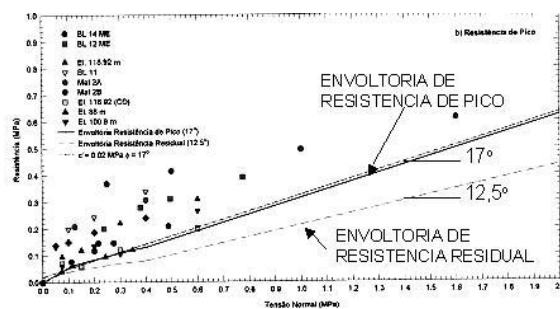


Figura 20: Ensaios CD em amostras indeformadas no biotita-xisto (cedido pela CNO)

Portanto, alguns planos dessa camada já haviam sofrido cisalhamento pretérito por esforços tectônicos, o que não podia ter sido julgado no exame das fraturas, embora a característica escalonada da geomorfologia, que representa um “ensaio da natureza”, poderia ter levantado essa suspeita. Aparentemente, não havia necessidade para o projeto de ter sido feita sondagem no maciço deslizado mas, caso tive sido feita, teria sido possível prever a direção do deslizamento.

CASO 6: RUPTURA DO TALUDE DA MARGEM DIREITA A JUSANTE DA BARRAGEM CAMARA

A barragem Câmara teve seu término de construção em fevereiro de 2002, mas devido a falta de chuvas, o reservatório permaneceu até janeiro de 2004 com nível muito baixo. A partir desta data as chuvas aumentaram o nível do reservatório, atingindo cerca de 40m de altura, quase alcançando a soleira fixa do vertedor, vindo a barragem a romper em sua margem esquerda em meados de junho de 2004. As investigações que realizamos para o Ministério Público indicaram que o evento foi deflagrado pela ruptura do talude rochoso imediatamente a jusante da barragem na sua ombreira esquerda, que será aqui tratada.

Após a ruptura, verificou-se que o talude de jusante da margem esquerda ocorreu ao longo de um plano de cisalhamento com preenchimento de 0,2 a 0,3m de solo predominantemente siltoso e altamente micáceo, situado a cerca de 4 a 5m de profundidade (Figura 21). A laje de rocha remanescente era contínua (Figura 22), o mesmo podendo-se interpretar quanto à laje superior, pelos grandes blocos no rio, rompidos com superfícies frescas e pela inspeção local da mesma. Tal situação inibia a drenagem do solo saturado, criando subpressões atuantes na laje superior (como representado no esquema da Figura 23).

O solo colhido da superfície remanescente da ruptura em amostras deformadas foi submetido a ensaios saturados de cisalhamento direto no Laboratório de Solos da Escola Politécnica da USP, tendo resultado em ângulos de atrito de pico de 34° e residual de 21° . Levando em consideração que a amostra era deformada e que a laje era estável antes do enchimento da represa, pode-se calcular que para um ângulo de atrito de 37° o FS era da ordem de 1,1 em condição seca. Com a aplicação da subpressão calculada, o FS baixa a 0,9, aproximadamente, justificando a ruptura após o enchimento.



Figura 21: Detalhe do plano com preenchimento de solo

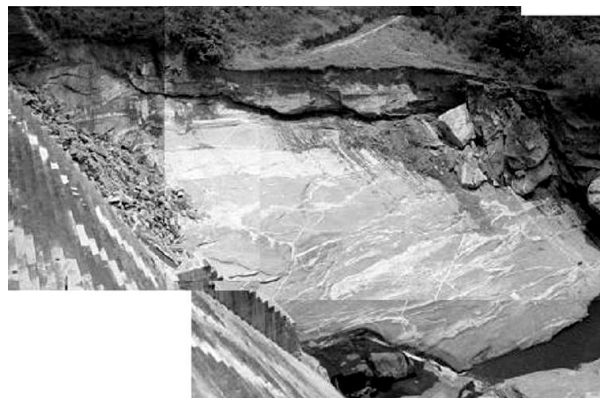


Figura 22: Aspecto do talude da margem esquerda após ruptura

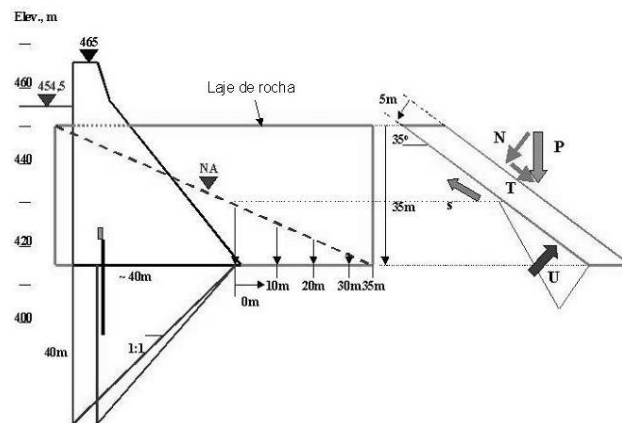


Figura 23: Esquema das forças atuantes na laje superior deslizada

Verifica-se que a integridade da laje superior, aparentando excelente condição geológica, na verdade inibiu a drenagem, dando margem a elevadas subpressões. Verificou-se também, nas análises posteriores, que a superfície de ruptura ocorreu coincidentemente com trechos de recuperação algo diminuída, com falta de 10 a 30cm de testemunhos. Portanto, deve-se destinar a máxima atenção a perdas de testemunhos, pois o que falta é sempre muito mais importante do que o que é recuperado, por representar zonas de fraqueza.

REFERÊNCIAS.

- BRITO, S. N. A. e KANJI, M. A. – Diagnóstico do Escorregamento da Lateral Direita do Vertedouro da UHE Itapebi, Relatório ao Consórcio Construtor Civil de Itapebi, 2001.
- KANJI, M. A. – Parecer Técnico sobre as Causas da Ruptura da Barragem Camará, Relatório ao Ministério Público, Paraíba, 2004.
- KANJI, M. A. e ZOPPA, C. R. – “Estudo Geológico-Geotécnico do Sinistro do Km 39 da Rodovia BR-27 (Curitiba-Paranaguá)”, 1º Workshop sobre Seguros na Engenharia, ABGE e Instituto de Engenharia de S. Paulo, 2000.
- KANJI, M. A., CRUZ, P. T., MASSAD, F. e ARAUJO FILHO, H. A. - “Basic and Common Characteristics of Debris Flows”, 2o. Simp. Panam. Deslizamentos / 2o. Congr. Bras. Estab. Encostas, R. Janeiro, 1997, V.1, p.223-231.
- KANJI, M. A., CRUZ, P. T., MASSAD, F. e ARAÚJO Fo., A. A. – “Triggering Conditions and Assessment of Susceptibility of Debris Flow Occurrence”, Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Boston 2003 , 2:2503-2508.