

Processos de Erosão Interna e Piping em Barragens - Revisão da Literatura

Breno Marques Ferreira da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil, brenomarquesfs@gmail.com

Fagner Alexandre Nunes de França

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, Brasil, fagneranfranca@gmail.com

RESUMO: O fenômeno *piping* pode ser descrito como o carreamento de partículas de solo no maciço de uma barragem ou pela sua fundação, por meio da percolação existente. Na Engenharia Geotécnica, é comum utilizar o termo genérico e abrangente *piping* para definir alguns processos como erosão interna, erosão regressiva, erosão em fugas concentradas e sufusão. Este trabalho apresenta definições importantes desses processos, melhorando assim, o entendimento do fenômeno. Como o processo de erosão ocorre no interior da barragem, torna-se difícil percebê-lo antes de acontecer o colapso da estrutura. A literatura mostra que cerca de 50% das rupturas de barragens de terra e enrocamento está associada com a ocorrência de *piping*. O rompimento de uma barragem é um evento que, dependendo do tamanho e localização da mesma, pode tomar proporções catastróficas, ocasionando perdas humanas, materiais e ambientais. Este artigo analisa o mecanismo de ruptura causados por *piping* pelo interior do maciço, através da fundação ou ainda por fraturas nas estruturas, em algumas barragens importantes ao redor do mundo, buscando assim, contribuir para o objetivo de identificar a ocorrência de *piping* em barragens e, com base na literatura, mostrar os principais aspectos conceituais do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão interna, *Piping*, Barragens, Ruptura de Barragens, Percolação.

1 INTRODUÇÃO

A erosão chamada de "*piping*" (por serem produzidos caminhos tubulares) é um importante processo para a Engenharia Geotécnica, o qual é atribuído à causa de aproximadamente metade de todas as rupturas de barragens (Foster et al., 2000 apud Richards e Reddy 2012). Através de dados coletados por Jones (1981) e Lane (1934) apud Richards e Reddy (2007), com adição de dados mais recentes retirados do Programa Nacional de Desempenho de Barragens, acumula-se um total de 267 rupturas de barragens causadas por *piping*.

Uma vez que o processo de erosão ocorre no interior da barragem, é difícil percebê-lo antes do colapso da estrutura. Adicionalmente, é um processo que ocorre, geralmente, de forma extremamente rápida. Estudos detalhados sobre rupturas por *piping* demonstraram que muitas

delas ocorreram em velocidades muito altas, num intervalo de tempo entre 6 e 12 horas após a primeira observação de vazamento concentrado e/ou surgimento de brecha (Sherard et al. 1972; Charles 1997; Foster 2000 a,b apud Fell et al., 2001).

Neste artigo, são descritos casos registrados na literatura internacional, e.g. na cidade de Balderhead, Inglaterra (década de 1960), Teton, EUA (1976), Gouhou, China (1993), San Juan Espanha (2001), e nacional (Pampulha/MG, 1954; Joana/PI, 2004; Camará/PB, 2004). Em alguns desses casos foi possível evitar o rompimento da barragem. Adicionalmente, este artigo traz um resumo das várias lições aprendidas através dessas rupturas e dos casos em que foram evitadas.

Na literatura existe um grande número de definições de processos relacionados ao *piping* e na Engenharia Geotécnica é comum utilizar esse termo genérico e abrangente para definir

e/ou relacionar outros processos. Portanto, se faz necessária apresentar definições importantes desses processos, de forma a promover o entendimento e a causa principal de ruptura de barragens por *piping* (Figura 1), bem como o mecanismo desse fenômeno até o rompimento do maciço.

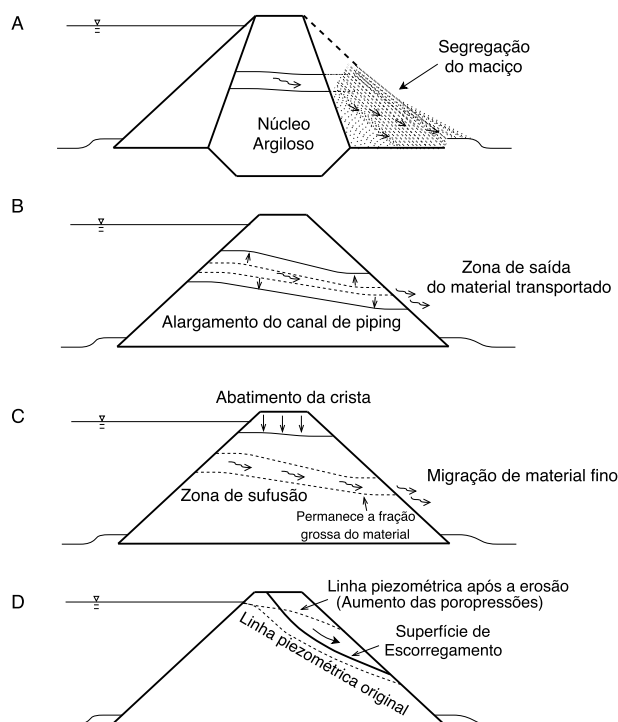


Figura 1. Mecanismos de ruptura - (A) Colapso causado por escoamento concentrado no espaldar de jusante e posterior desagregação do maciço; (B) Colapso causado por alargamento do canal de *piping*; (C) Colapso por abatimento da crista gerado por sufusão, e posterior galgamento da barragem; (D) Colapso por instabilização do talude após a erosão interna (Adaptado de Fell e Fry, 2007 apud Santos, R. e Caldeira, L., 2008).

2 DEFINIÇÕES

Terzaghi (1939), Lane (1934) e Sherard et al. (1963) apud Richards e Reddy (2007) apresentaram o modelo clássico de *piping*, definida erosão regressiva ("*Backwards Erosion*"). Nele, as partículas são desagrupadas do maciço de solo por meio de forças produzidas entre os grãos pela percolação da água. As forças erosivas serão maiores em um ponto de saída onde o fluxo é concentrado. Além disso, uma vez que as partículas são removidas pela erosão, a magnitude das forças erosivas aumenta, intensificando-se o fluxo. A

erosão regressiva geralmente é produzida onde um material permite a abertura de um caminho preferencial. Assim, a resistência à remoção dos grãos depende do estado de tensões próximo à abertura formada pela erosão do material, bem como o gradiente hidráulico através do solo, o qual deve ser suficientemente elevado para separar as partículas na fronteira de saída do escoamento. Em resumo, esse processo envolve a separação e o carreamento de partículas de solo para jusante de forma regressiva, ou seja, tem início em um ponto de saída e avança para montante, resultando na formação de um túnel de passagem.

Na erosão interna ("*Internal Erosion*"), tem-se um processo similar a erosão regressiva, pois as forças de tração que removem as partículas de solo. Contudo, ela ocorre devido ao fluxo na extensão de uma abertura pré-existente. A fissura normalmente ocorre em materiais coesivos ou vazios na estrutura do maciço (Lane 1934, apud Richards e Reddy 2007). Assim, no caso da erosão interna, o início do processo se dá por forças erosivas ao longo de uma abertura pré-existente, e não através de um ponto de saída progredindo em direção à montante, como na erosão regressiva.

A erosão em fugas concentradas ("*Concentrated Leak*") envolve a formação de uma fissura ou uma fuga concentrada do fluxo de água. A erosão se inicia na extensão das paredes em que ocorre o escoamento concentrado e tem como característica percorrer o caminho direto da fonte de água até a saída (Foster e Fell, 1999 apud Foster et al., 2002). Essas fissuras podem aparecer por diversos motivos, e.g. através de recalques diferenciais, erros construtivos, ciclos de secagem e molhagem, a elevada permeabilidade no aterro ou fundação ou ainda às fraturas hidráulicas (Santos, R. e Caldeira, L. 2008).

O termo sufusão ("*Suffosion*") foi criado para descrever o processo de migração gradual de partículas finas, contidas em uma matriz de partículas estruturais (partículas grossas) (Jones 1981; Burenkova 1993; Pavlov 1898; Kral 1975; Galarowski 1976, apud Richards e Reddy 2007). As partículas finas de solo percorrem os vazios existentes entre as partículas maiores, mantendo preservada uma estrutura formada por vazios e pelas partículas mais grosseiras

com um alto fluxo, conduzindo até a ruptura, em um mecanismo que pode ser descrito como um abatimento (Figura 1C), perceptível à superfície (McCook 2004). Segundo McCook (2004) e Kézdi (1979) apud Richards e Reddy (2007), a sufusão pode ser um processo mais lento, se comparado com o que normalmente ocorre em fugas concentradas. As condições de estabilidade de uma barragem de terra podem permanecer inalteradas durante muitos anos, mesmo com a atuação de sufusão.

Outro fenômeno é descrito como resultado de altas pressões neutras na fundação a jusante da barragem, causando condições de tensões efetivas nulas ("*Heave*" / "*Blowout* ou *Blowup*") (Foster e Fell 1999). Segundo Terzaghi (1922, 1943) apud Richards e Reddy (2007), o *Heave* ocorre quando uma barreira semipermeável se sobrepõe a uma zona mais permeável, onde está sob pressão de fluido relativamente alta. O mecanismo de ruptura ocorre com um fluxo hidráulico limite, o qual a migração de água através da barreira semipermeável acontece a uma taxa mais baixa do que o aumento de pressão devido a algum evento transitório. Assim, esse modo de ruptura é diferente do que ocorre nos casos de erosão interna ou erosão regressiva, pois nesses dois casos é necessária uma velocidade de percolação alta o suficiente para remover as partículas de solo mais finas e essa forma não é tão dependente da estabilidade ou do estado de tensões efetivas da massa de solo.

Causado pela erosão das chuvas esse fenômeno ("*Tunneling*" / "*Jugging*"), é efetivo somente, em solos dispersivos (Sherard, Dunnigan e Decker 1976, apud Richards e Reddy 2007). Ocorre na zona vadosa, região mais superficial dos solos e é causado pela dispersão química de solos argilosos, devido à ação das águas pluviais que atravessam fissuras abertas ou caminhos naturais. O "*Tunneling*" se inicia com a percolação de água em fissuras superficiais com velocidades medidas em cm/s e dificilmente em m/s, enquanto que outros modos de *piping* ocorrem em zonas mais profundas e o fluxo é avaliado em mm/s (Jones 1981, apud Richards e Reddy 2007).

Como resultado de um processo de erosão interna ou erosão regressiva, pode se formar uma cavidade ("*Sinkhole*") no núcleo de uma

barragem, geralmente na direção subvertical (Fell et al., 2005 apud Pimenta Filho 2013).

A fratura hidráulica ("*Hydraulic Fracture*") ocorre quando se tem altos valores de pressões neutras, excedendo o valor da tensão principal menor e a tensão efetiva no interior do maciço, atingindo o valor nulo. A pressão da percolação da água pode ser maior do que as tensões compressivas do maciço, levando a formação de fissuras (Fell et al., 2008 apud Pimenta Filho 2013).

Segundo Foster e Fell (1998) apud Pimenta Filho 2013, de maneira geral existem quatro fases nos processos de *piping*: início, continuação, progressão e fratura. O início é marcado pela deflagração do processo, o qual pode ter sua causa relacionada a fugas concentradas (escoamentos concentrados), erosão regressiva, erosão de contato (erosão seletiva de partículas finas, em contato com uma camada de material mais grosseiro, geralmente ocorrendo numa interface entre materiais de granulometria distintas), sufusão, ou ainda por mais de um desses simultaneamente. Na etapa seguinte ao início do fenômeno, a erosão não foi bloqueada pela ação de um filtro ou as partículas não foram retidas por nenhum outro material. A progressão é caracterizada pela formação do "tubo" propriamente dito, notando-se que a percolação e/ou as pressões neutras à jusante da barragem ou fundação aumentam de intensidade ou se estabilizam. Nos casos de sufusões, nesta fase do processo, a permeabilidade do maciço aumenta consideravelmente. Na fase final (ruptura), ocorre a formação da brecha, na qual escoam uma vazão muito alta do reservatório e não se tem mais controle sobre o processo.

Richards e Reddy (2012) comprovaram que a quantidade e o tipo de solos finos influenciam significativamente o início e o modo de *piping*. A presença de finos do tipo não plástico, por exemplo, reduz significativamente a velocidade do fluxo requerida para iniciar o processo, ao passo que a presença de finos plásticos aumenta o gradiente hidráulico necessário para o início da erosão. Segundo estudos de casos (Richards e Reddy 2007), o modo de ruptura por *piping* mais comum, dentre os vários mecanismos diferentes, é proporcionado por erosão em fugas concentradas (Figura 1.A). No entanto, um

terço das rupturas por *piping* são atribuídas à erosão regressiva.

O gradiente hidráulico através do núcleo, no nível em que ocorre o *piping*, pode ser descrito segundo a Equação (1) e Figura 2.

$$i_{core} = h_w/w \quad (1)$$

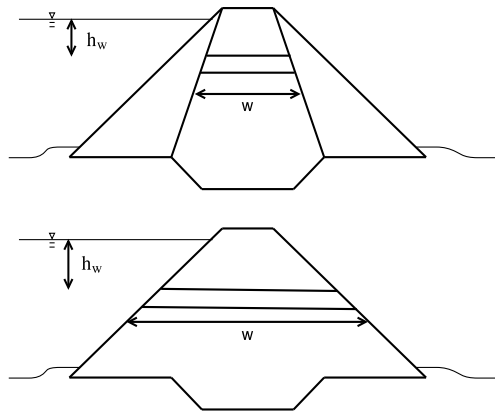


Figura 2. Gradiente hidráulico através do núcleo - Onde i_{core} é o gradiente hidráulico através do núcleo, h_w é a carga hidráulica e w é a largura do núcleo, todos esses no nível de ocorrência de *piping* (Adaptado de Foster et al. 2002).

O bom desempenho de uma barragem de terra com filtro depende diretamente do projeto do mesmo, e para isso é fundamental que ele propicie a livre drenagem de água enquanto o material mais fino é retido. Foram realizados ensaios para determinar o tamanho das partículas do filtro, relativo ao solo base, o qual o filtro protegerá. O resultado mostra condições limites (Figura 3), onde a erosão pode ser: pequena, excessiva ou de continuação (Sherard e Dunnigan 1989 apud Foster e Fell 2001).

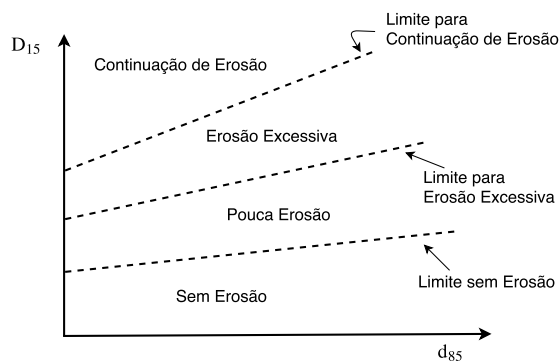


Figura 3. Limites de erosão - Comportamento do filtro onde: d_{85} é o diâmetro para o qual 85% das partículas passam referente ao solo base; D_{15} é o diâmetro para o qual 15% das partículas passam referente ao solo do filtro (Adaptado de Foster e Fell 2001).

Casos estudados com ocorrência de *piping* foram analisados para avaliar os mecanismos de iniciação, continuação e progressão do fenômeno, bem como o tempo para cada fase do processo. É muito difícil identificar o tempo de iniciação, dado que a erosão ocorre no interior do maciço. Assim, os primeiros sinais de *piping* ocorrem já na fase de progressão, com vazamento concentrado, geralmente enlameado. Somente em poucos casos, em que foi possível verificar uma alta percolação, o tempo de iniciação foi registrado. Segundo Fell et al. (2001), com base nos mecanismos e os casos estudados, pode-se resumir o tempo esperado para a iniciação e continuação do processo (dependendo de algumas condições, e.g. ausência de fugas concentradas, nível do reservatório e amplitude da fratura aberta): lento (semanas, meses ou até anos), rápido (menos de 12 horas ou dias) e muito rápido (menos de 3 horas).

3 ESTUDO DE CASOS NO MUNDO

3.1 Barragem de Balderhead, Inglaterra (1960)

Segundo Vaughan et al. (1979 e 1982) apud Pimenta Filho 2013, a barragem de Balderhead foi implantada no Rio Balder, no norte da Inglaterra e sua construção foi iniciada entre março de 1961 e outubro de 1965. Na fase de elaboração do projeto, não havia um método efetivo para dimensionamento de filtros para materiais argilosos, portanto para tal definição, utilizaram-se as granulometrias dos materiais empregados para a Barragem de Selset (1955 - 1960), situada 3km a norte do reservatório de Balderhead.

Sua fundação era composta por xisto carbonífero com presença de depósito de argila, no fundo do vale. Possuía ainda, um núcleo esbelto e bem graduado, contendo desde frações de argila a seixos e pedregulhos, onde a jusante do mesmo foi implantado um filtro granular, composto por calcário duro britado. Os espaldares de jusante e montante são compostos basicamente por solo residual de xisto escarificado. O primeiro enchimento do reservatório da barragem ocorreu entre 1964 e

1966, um ano depois foi verificado o surgimento de uma fratura (*sinkhole*) de grandes proporções (3m de largura por 2,5m de altura), na crista da barragem. A área que se desenvolveu a fratura, foi preenchida por diferentes camadas de materiais, indicando segregação do material do núcleo (Vaughan e Soares, 1982 apud Pimenta Filho 2013). Outro indício dessa segregação são as amostras de areia encontradas em áreas fora da influência do processo de *piping*.

Concluiu-se que o rompimento do núcleo da barragem ocorreu por fratura hidráulica, pouco antes do completo preenchimento do reservatório, onde a perda do material fino do núcleo aconteceu durante os 14 meses do enchimento, por erosão interna, com a principal influência da ineficiência do filtro, o qual permitiu o carregamento de partículas. Outro fator que contribuiu para o desenvolvimento de fraturas no núcleo de várias barragens de terra (e.g. Dale Dyke, Hyttejuvet e Balderhead), é a largura do núcleo ser consideravelmente estreita se comparado com outros casos. Balderhead possui i_{core} variando de 2,5 a 3,1 (Figura 2), diferentemente de outros casos onde esse fator varia de 0,1 a 1,0 (maior largura do núcleo).

3.2 Barragem de Teton EUA, (1976)

A ruptura da barragem de Teton no dia 5 de junho de 1976 (Figura 4), durante o primeiro enchimento do reservatório, é considerado um dos maiores e significantes eventos para a Engenharia Geotécnica (Sherard 1987). Localizada em Idaho, mais precisamente no Rio Teton (EUA), num vale estreito fortemente fraturado (aberturas variando de 0,625cm a 7,5cm), a barragem foi projetada com um núcleo extenso composto principalmente por silte com um pouco de argila (material fino e extremamente erodível), areia e cascalho. Nas zonas em que haveria um contato maior do maciço com o vale, as fraturas do mesmo foram preenchidas com *grout*. O núcleo impermeável se estende até a fundação, onde foi inserido uma trincheira de vedação. O projeto final da barragem não contava com instrumentação para monitorar o seu desempenho, assim o enchimento do reservatório que foi planejado para ocorrer lentamente, não foi efetivado.



Figura 4. Vista da Ruptura - Barragem de Teton, EUA. (Seed e Duncan, 1987).

Depois de muitos estudos feitos sobre o evento, algumas hipóteses foram levantadas para explicar a causa da ruptura da barragem, onde os mecanismos acionadores mais prováveis são: Desenvolvimento de escoamento concentrado na interface solo-rocha, o qual erodiu o material do núcleo e carregou as partículas para as fissuras na fundação da rocha, progredindo até a ruptura total do maciço em pouco tempo depois do início da erosão; O alto fluxo de água contra o solo erodível, sem proteção na zona de contato com o vale (através das fissuras) e o consequente desenvolvimento de erosão interna (Sherard 1987); Fissuras causadas por recalques diferenciais ou por fratura hidráulica do material do núcleo que preenche a zona de contato, permitindo uma rápida erosão interna (Seed e Duncan 1987).

3.3 Barragem de Gouhou, China (1993)

A barragem de Gouhou estava localizada no Distrito de Gonghe, Província de Qinghai, China, contava com uma face de concreto e 71m de altura, sua crista tinha 265m de extensão, 7m de largura numa elevação de 3.281m e nível de água normal em 3.278m. De acordo com o projeto, o topo da barragem possuiria um parapente, em uma elevação de 3.277,30m (na base do parapente), o qual não foi obtido devido a recalques diferenciais,

atingindo a elevação de 3.277,0m. O enrocamento da barragem foi dividido em 4 zonas distintas, com funções e granulometrias distintas, o qual estava diretamente sobre uma areia grossa, de aproximadamente 10m de espessura.

O primeiro enchimento do reservatório se iniciou antes do término da construção (setembro de 1989) e assim que a construção terminou em outubro de 1990 o nível de água estava quase no seu máximo, com um fluxo de saída a uma elevação de 3.223,0m. O fluxo de percolação desapareceu em 1991, onde o nível de água estava entre 3.260,70m e 3.262,60m, indicando assim, vazamento entre os dois níveis. Do dia 14 de julho de 1993 a 27 de agosto do mesmo ano, o nível de água subiu continuamente de 3.261,0m a 3.277,0m. Investigações posteriores revelaram que a água infiltrou na junção entre a base do parapente (3.277,0m) e a face de concreto, a partir do meio dia de 27 de agosto. No mesmo dia às 20 horas foi observado, água escoando a jusante (3.260,00 m) e às 21 horas foi testemunhado seixos de proteção descendo o talude de jusante (Figura 5). Uma hora e quarenta depois uma ruptura catastrófica ocorreu (Zhang, L. M. e Chen, Q., 2006).

Segundo o grupo de Investigação da Ruptura da Barragem Gouhou (1996), a barragem tinha vários problemas estruturais, como por exemplo, a água estava em contato às juntas da face de concreto, a conexão entre o parapente e a face de concreto não era adequada e houve segregação de partículas de enrocamento

durante a construção, resultando assim em erosão interna, a qual foi a causa principal da ruptura (Liu et al. 1996 e 1998; Chen e Zhao 1996 e 2006 apud Zhang, L. M. e Chen, Q. 2006).

3.4 Barragem de San Juan, Espanha (2001)

Localizada na Vila de Altorricón (Província de Huesca), Espanha, a barragem de San Juan foi construída sobre uma superfície rochosa plana de depósitos gipsíferos sobrejacentes a sedimentos terciários aluvionares de argilas dispersivas. A barragem tem um núcleo de argila compactada resultante da escavação, que avançou 1m no xisto Terciário do leito rochoso, cortando o manto aluvial altamente permeável. Durante o primeiro enchimento da barragem (2001), ocorreu uma ruptura de grandes proporções, onde do volume total de 850.000m³, Batalla e Balasch (2001) apud Gutiérrez et al., estimaram que 300.000m³ de água foi escoado, transportando cerca de 3.350 toneladas de material sólido. Um ano antes do rompimento, notaram-se vazamentos e fissuras geradas por recalques diferenciais, na área próxima ao local da ruptura (Batalla e Balasch 2001 apud Gutiérrez et al.). De acordo com as evidências de campo e análises, a ruptura está relacionada principalmente a carstificação causada pela circulação de água por toda a extensão do depósito aluvionar, conduzindo ao desenvolvimento de sufusão seguido do abatimento da estrutura e surgimento de fraturas (Gutiérrez et al.).

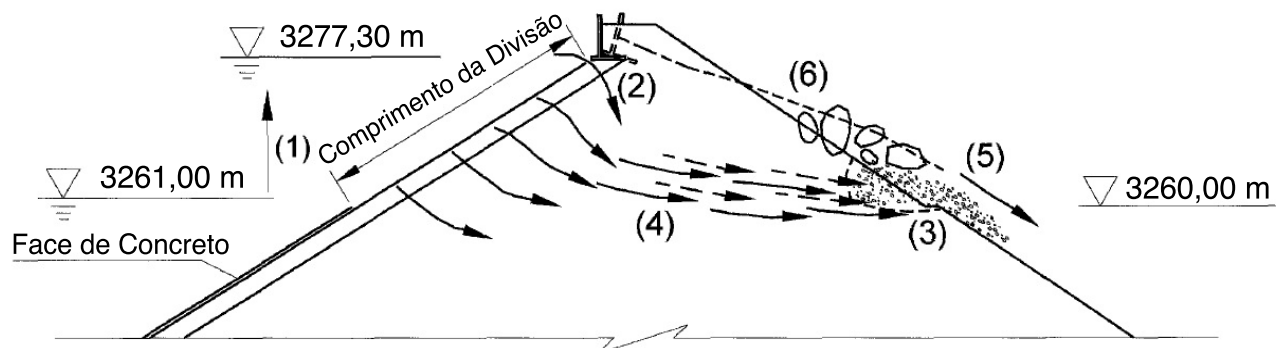


Figura 5. Provável Modo de Ruptura da Barragem Gouhou - (1) Elevação do Nível d'água; (2) Infiltração pelo Enrocamento; (3) Iniciação de Erosão Interna; (4) Desenvolvimento Progressivo da Erosão; (5) Lavagem do Talude de Jusante e Queda de Seixos; (6) Ruptura da Barragem (Adaptado de Zhang, L. M. e Chen, Q. 2006).

4 ESTUDOS DE CASOS NO BRASIL

4.1 Barragem de Pampulha (1954)

Inaugurada em 1938, a barragem de Pampulha (Minas Gerais), contava com duas fases de projeto, ao final a barragem apresentava 805m (na seção mais alta) e 19m de altura. Segundo a Comissão Técnica de Estudos, em 20 de abril de 1954 ocorreu a ruptura do maciço em virtude de erosão interna através do corpo da barragem.

O talude de montante da barragem contava com uma face de concreto armado, entretanto após 16 anos de sua construção, segundo Vargas (1954, 1977) apud Braz (2003), a placa de concreto se rompeu devido a recalques das fundações do maciço. Foi estabelecido um fluxo de água, entre a fenda da face de concreto e alguns drenos, carreando cada vez mais material até a formação de um túnel ao longo dos drenos. No momento em que esse canal alcançou grandes dimensões, o topo desabou, escoando toda a água do reservatório.

A barragem de Pampulha foi então reconstruída, sendo reinaugurada no dia 31 de Janeiro de 1958. Em novembro de 1997, foram detectados alguns sinais de instabilidade no maciço em uma inspeção rotineira da barragem, com isso uma série de inspeções criteriosas foi realizada. Foram identificadas juntas de deformação na estrutura do maciço, além de abatimentos no aterro, indicando mais uma vez iniciação de erosão interna, esse processo poderia ter evoluído para mais uma ruptura se não houvesse a intervenção local (Braz, 2003).

4.2 Barragem de Joana (2004)

A barragem de Joana, tem como principal finalidade o abastecimento do município de Pedro II (Piauí). Foi inaugurada em agosto de 1996, quando em junho de 2004 foi observado por moradores que a água de surgência no pé do talude estava "barrenta", em busca de explicações, os moradores encontraram uma pequena área (com 1m de diâmetro) que estava saturada e apresentava fluxo na superfície. Essa região situava-se aproximadamente 5m acima do pé da barragem e acima do alinhamento da tubulação da tomada d'água. A zona saturada rompeu, formando-se um poço, o qual dias

depois transbordou água turva pela superfície do enrocamento. Formou-se assim, uma cava de grandes proporções (aproximadamente 3m de altura por 4m de largura), prolongando-se para o interior do maciço.

Posteriormente foi confirmada a ocorrência de fuga concentrado devido à falha na tubulação de tomada d'água no interior do maciço. Considerando a gravidade da situação, foram tomadas várias providências imediatas, e.g. informar a Defesa Civil e construção de um reforço (geotêxtil e sacos de aniagem com brita) no enrocamento do dreno de pé para reduzir a capacidade erosiva. As medidas preventivas foram suficientes para evitar a ruptura do maciço (Miranda et al., 2005).

4.3 Barragem de Camará (2004)

O caso da barragem de Camará é peculiar, pois a barragem era de gravidade em concreto compactado a rolo (CCR) e mesmo assim um processo de *piping* foi desenvolvido, contribuindo com o seu colapso. Durante o período construtivo, foi encontrada uma falha na rocha situada na ombreira esquerda da barragem, entretanto houve um julgamento inadequado na interpretação geológica da extensão da falha, onde considerou-se que ela se estendia por apenas 3m para o interior do maciço, sendo constatado após a ruptura, a presença de ondulações ("amêndoas"), mascarando a sua real proporção.

Dessa forma, o tratamento executado na falha por meio de remoção de solo e substituição por concreto não foi suficiente para sanar esse problema. Em fevereiro de 2004, foi detectado carregamento de material pelos drenos da galeria, havendo lavagem do solo de preenchimento da fratura e consequentemente aumento do gradiente hidráulico. Com o desenvolvimento da erosão interna, surgiram tensões cisalhantes na base do bloco e alta carga hidráulica, conduzindo a ruptura da barragem (Kanji 2004).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho diferencia as várias causas e mecanismos de *piping*, procurando tornar a linguagem e o entendimento, entre Engenheiros Geotécnicos, algo mais universal. Apesar de ser

um fenômeno conhecido, muitas vezes os cuidados para evitá-lo são negligenciados, havendo com isso uma alta taxa de incidentes envolvendo-o. Através dos casos estudados, algumas lições e recomendações podem ser estabelecidas para evitar e/ou prevenir que mais eventos dessa natureza ocorram futuramente:

- No dimensionamento do filtro, deve-se considerar vários aspectos e critérios, e.g. a disponibilidade dos materiais, características mineralógicas, granulometria;
- O enchimento do reservatório deve ser realizado de forma lenta e controlada;
- Revisões e o envolvimento de diversos profissionais são altamente necessários, nas fases de projeto, execução e operação das barragens;
- Outras soluções (e.g. geossintéticos) podem ser empregadas nos casos em que a região da barragem não possua materiais adequados (depósitos permeáveis de aluvião na fundação, argilas dispersivas) para sua construção;
- O monitoramento da barragem, sobretudo do fluxo, por meio de instrumentação e inspeções de rotina, são as formas mais indicadas de identificar a ocorrência de *piping*;
- A maioria dos casos de *piping* pelo maciço, ocorrem no primeiro enchimento do reservatório ou em períodos de cheias;
- É importante o tratamento de juntas e fraturas em zonas de contato com o maciço, seja na face de concreto ou em rochas adjacentes;
- Intervenções devem ser tomadas em caso de deflagração do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo apoio técnico e acadêmico a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Braz, M. G. (2003). *A Relação do Fenômeno de Ruptura Hidráulica em Maciços de Barragem de Terra e Mau Funcionamento de Vertedores do Tipo Poço*. Tese de Doutorado da Universidade Federal de Minas Gerais;
- Fell, R.; Wan, C. F.; Cyganiewicz, J.; Foster, M. (2001). *Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 4, April 1, 2003;
- Foster, M. e Fell, R. (2001). *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(5): 398–407;
- Foster M., Fell R, Spannagle M. (2002). *A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping: reply*. Canadian Geotechnical Journal J39:497–500;
- Gutiérrez, F., Desir, G., Gutiérrez, M. (2003). *Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays (Altorrico'n, Huesca Province, NE Spain)*. Environmental Geology 43:842-851;
- Kanji, M. A. (2004). *Parecer Técnico Sobre as Causas da Ruptura da Barragem Camará*;
- Miranda, A. N.; Menescal, R. A.; Perini, D. S.; Soares, F. R. (2005). *Barragem Joana – Uma Intervenção Emergencial de Segurança*. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia - GO;
- Pimenta Filho, M. A. (2013). *Análise da Erosão Interna de Solos em Barragens com Base na Distribuição de Vazios*. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais;
- Richards, K. S., Reddy, K. R. (2007). *Critical appraisal of piping phenomena in earth dams*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 66:381– 402;
- Richards, K. S., Reddy, K. R. (2012). *Experimental Investigation of Initiation of Backward Erosion Piping in Soils*. Géotechnique 62, No. 10, 933-942;
- Santos, R. e Caldeira, L. (2008). *Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações*. Conferência: XI Congresso Nacional de Geotecnia, em Coimbra, Portugal;
- Seed, H. B. e Duncan, J. M., (1987). *The Failure of Teton Dam*. Engineering Geology, 24: 173-205;
- Sherard, J. L. (1987). *Lessons From the Teton Dam Failure*. Engineering Geology, 24: 239-256;
- Wan, C. F., e Fell, R. (2004). *Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4): 373-380;
- Zhang, L. M. e Chen, Q. (2006). *Seepage Failure Mechanism of the Gouhou Rockfill Dam During Reservoir Water Infiltration*. Japanese Geotechnical Society Vol. 46, No. 5, 557-568.