

Nome do artigo: Avaliação de Risco em Barragens de Aterro

Autor: Laura Caldeira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Avenida do Brasil, 101

1700-066 LISNOA

Telefone: +351 21 844 3335

Email: laurac@lnec.pt

Resumo: As análises de risco são uma das ferramentas disponíveis de controlo da segurança de estruturas a projecto ou em exploração. O presente artigo apresenta a aplicação de algumas metodologias de análise de risco a barragens de aterro em Portugal, designadamente, a avaliação do índice global de risco, a análise dos modos de rotura e dos seus efeitos e as árvores de eventos e de falhas. O primeiro dos métodos mencionados foi aplicado a um conjunto de barragens de pequena e média dimensão. A análise dos modos de falha a uma barragem de rejeitados e as árvores de eventos e de falhas à ensecadeira de Odelouca.

1- Introdução

Tradicionalmente, o dimensionamento de estruturas geotécnicas baseava-se na aplicação de métodos determinísticos, mediante a consideração para as acções de valores médios (para as acções geotécnicas) ou característicos (para as outras acções transmitidas ou da super-estruturas), de valores nominais para os dados geométricos e de estimativas cautelosas para as propriedades dos geomateriais, e mediante a adopção de coeficientes de segurança globais, estabelecidos de acordo com a experiência do meio técnico e/ou com o julgamento do projectista.

Visando a harmonização dos formatos de verificação da segurança entre as obras geotécnicas e as estruturas, os eurocódigos, em geral, e a norma europeia EN 1990 – Bases de Projecto e o Eurocódigo 7 – Projecto Geotécnico, em particular, vieram alterar significativamente o enquadramento do cálculo e os métodos de avaliação da segurança das estruturas geotécnicas.

No Eurocódigo 7 são explicitamente introduzidas formas alternativas (simples ou em combinação) aos métodos de cálculo de verificação dos estados limites, permitindo-se a adopção de medidas prescritas, a realização de modelos experimentais e de ensaios de carga e a aplicação de um método observacional.

O cálculo recorrendo ao conceito de estados limites baseia-se na utilização do método dos coeficientes parciais e de modelos (físicos ou matemáticos) de acções e estruturais para os estados limites relevantes, devendo-se verificar a não excedência de qualquer estado limite para todas as situações de

projecto e casos de carga pertinentes, quando nestes modelos se atribuem valores de cálculo apropriados para as variáveis de base. Alternativamente ao uso dos coeficientes parciais, a EN 1990 permite o recurso directo a métodos com base probabilística.

Os coeficientes parciais e as tolerâncias relativos aos valores característicos dos efeitos das acções e das resistências são estabelecidos nos Eurocódigos através da aplicação de métodos semi-probabilísticos, que têm em conta e distinguem as fontes de incerteza e a dispersão associadas à verificação da segurança, estando, por conseguinte, o método de dimensionamento relacionado, em certa medida, mas não directamente, com a probabilidade de rotura.

A evolução natural dos métodos de dimensionamento será no sentido da consideração conjunta das diversas incertezas de forma explícita e directa, bem como da adopção de métodos probabilísticos, que caracterizem matematicamente a possibilidade de rotura das estruturas e permitam deduzir os efeitos económicos e sociais provocados pela sua ocorrência. O benefício da utilização de métodos de base probabilística evidencia-se, de forma extrema, uma vez inseridos numa cadeia de análise de riscos.

Em Geotecnia as análises de riscos têm, progressivamente, ganho popularidade como um meio para tratar as incertezas associadas ao comportamento das estruturas geotécnicas, obrigando os investigadores a confrontarem-se directamente com as incertezas e a usar, na previsão do seu desempenho, as melhores estimativas das condições do terreno e dos parâmetros dos materiais. Refere-se o interesse da sua aplicação nas seguintes áreas científicas e/ou para as seguintes estruturas geotécnicas: sísmica, geotecnia ambiental, barragens de aterro, canais, vias de comunicação, condutas, túneis e escavações, bem como fundações em geral.

O conceito do risco é, em princípio, atractivo devido ao carácter racional, sistemático e transparente da sua quantificação e do diagnóstico dos assuntos que requerem atenção. Constitui, adicionalmente, uma base formal e consistente para apreciação da aceitabilidade do risco e uma base comum, em termos de custo-benefício, para avaliação de estratégias alternativas de mitigação do risco para otimizar o projecto, bem como um meio para comunicação ao público em geral e às autoridades. Poderá, ainda, ser utilizado em questões legais, relacionadas com a atribuição de responsabilidade civil individual ou às empresas. Uma vez o risco avaliado, o dono da obra assumirá responsabilidades acrescidas, dado que, conscientemente, aceitou o risco, não podendo alegar a sua ignorância, se ocorrer algum acontecimento desfavorável.

As abordagens observacionais, já presentes no Eurocódigo 7, decorrem dos conceitos associados à avaliação de riscos. Este tipo de abordagem constitui uma ferramenta útil para que os engenheiros com menor experiência desenvolvam uma maior sensibilidade sobre os potenciais problemas, sua probabilidade e suas consequências, e acerca do modo como os acontecimentos adversos podem interagir. Pode, igualmente, constituir um enquadramento conveniente para a transferência de conhecimentos dos técnicos mais experientes para os de menor experiência.

Nos últimos anos as análises de riscos têm sido aplicadas de forma crescente. Assim, embora a prática tradicional seja adequada, verifica-se que esta pode não fornecer uma perspectiva integrada de todos os riscos.

O presente artigo incide sobre a temática das análises de riscos. Dada a complexidade e a extensão dos temas envolvidos, referem-se apenas os aspectos puramente geotécnicos ou de fronteira com outras áreas científicas. Não são abordados os temas relacionados com a análise das consequências, sendo estas apenas referidas num contexto de apresentação global, centrando-se na avaliação da verosimilhança e da probabilidade de rotura das barragens de aterro.

São, no presente artigo descritas as metodologias de análise de riscos mais utilizadas em Geotecnia, como o recurso a índices ou a matrizes de risco, a análises dos modos de falha, dos seus efeitos e da sua criticalidade (FMEA e FMECA), a árvores de eventos (ETA) e a árvores de falhas (FTA).

2 – Índices de risco

A avaliação de riscos através do cálculo do índice de risco consiste na determinação de um valor numérico (designado por índice de risco) com base numa regra de agregação, aplicada aos valores resultantes de uma classificação atribuída a factores devidamente seleccionados, que permitem apreciar a segurança da estrutura geotécnica e do meio envolvente potencialmente afectado pela sua rotura (1).

A sua aplicação implica a adopção do seguinte conjunto de procedimentos:

- definição dos objectivos da análise;
- selecção de um conjunto de descritores, geralmente, agrupados por classes, que tenham em conta as condições externas, as características da estrutura e as consequências potenciais associadas ao risco;
- para cada descritor escolhido, atribuição de uma classificação, considerando uma mesma escala de valores para todos os descritores (por exemplo de 1 a 5);
- definição de pesos (iguais ou diferentes) para cada descritor de cada uma das classes, de acordo com a respectiva importância relativa;
- definição da regra de agregação, a ser utilizada em cada classe, para o cálculo do índice de risco parcial de cada uma das classes;
- definição da expressão de cálculo do índice de risco com base nos índices parciais de cada classe.

A primeira aplicação das metodologias de análise de risco em barragens de aterro em Portugal foi a relativa a índices globais de risco na área das barragens (Figura 1).

O Instituto da Água (INAG) considerou premente a obtenção de informações fiáveis sobre a segurança das barragens de pequenas e médias dimensões, para possibilitar o estabelecimento de prioridades para o melhoramento das respectivas condições de segurança. Pretendia-se igualmente, sempre que detectados problemas especiais de segurança, decidir sobre a continuação ou a suspensão da exploração, e deliberar acerca do possível abandono ou demolição de barragens que apresentassem excessivos perigos para as pessoas e bens no vale a jusante.

Foi lançado um plano de inspecção a mais de quinhentas barragens, sendo as inspecções levadas a efeito de acordo com regras que, embora previstas nas Normas de Inspecção e Observação de

Barragens, foram modificadas de modo a minimizar o grau de subjectividade envolvido na determinação de certos factores. Esta abordagem consistiu na primeira apreciação de segurança em portfolio, envolvendo centenas de barragens, até agora realizada em Portugal. Apesar de se reconhecer que estes procedimentos devem ser melhorados, tendo em conta as análises críticas realizadas pelas empresas de consultadoria e os resultados de inspecções a executar, por um só grupo de peritos, sobre uma amostra significativa de barragens incluídas no referido plano de inspecção, os resultados revelaram-se consistentes e de grande utilidade para o INAG.

3 – Análise dos Modos de Rotura e dos seus efeitos

A análise dos modos e dos efeitos das falhas (FMEA) é uma técnica que considera os diversos modos de falha (ou de rotura) de um dado elemento e determina os seus efeitos noutras componentes e no sistema global. Foi pela primeira vez utilizada na indústria aeronáutica, nos anos 1960.

Sem necessidade de recorrer a conceitos matemáticos ou estatísticos, procura assegurar que qualquer rotura potencial plausível foi considerada e estudada, em termos de o que pode correr mal, como e em que extensão e o que fazer para prevenir ou mitigar as roturas.

É um método indutivo que permite: (i) avaliar os efeitos e a sequência de acontecimentos provocada por cada modo de rotura das componentes de um sistema relativamente às diversas funções e/ou requisitos operacionais, de manutenção ou ambientais do sistema; (ii) determinar a importância de cada modo de rotura sobre as condições normais de desempenho do sistema; (iii) avaliar o impacto sobre a fiabilidade e a segurança do sistema considerado; (iv) e hierarquizar os modos de rotura estudados, de acordo com a facilidade associada à sua detecção e ao seu controlo.

A análise dos modos e efeitos das falhas (FMEA) baseia-se nos seguintes conceitos e definições:

- rotura ou falha é a cessação da aptidão de um elemento ou do sistema para cumprir uma das funções para a qual foi projectado;
- modo de rotura ou de falha é a forma como a rotura é observada num elemento do sistema;
- causa(s) da rotura ou da falha é(são) o(s) acontecimento(s) que conduz(em) aos modos de rotura ou de falha;
- efeito de um modo de rotura ou de um modo de falha consiste no conjunto de consequências associadas à perda de aptidão de um elemento para cumprir a função requerida.

Para aplicação do método escolheu-se a Barragem de Cerro do Lobo – barragem de aterro zonada, construída para a retenção de rejeitados. Refere-se que o método, conceptualmente muito simples e aparentemente de aplicação muito directa, se reveste de complexidade crescente à medida que aumentam o número de componentes e a interacção entre os diversos elementos constituintes do sistema. Na Figura 2 apresenta-se o sistema global considerado (2). A Figura 3 esquematiza os efeitos imediatos e finais correspondentes à falha da componente básica constituída pelo tapete drenante.

4 – Análise por Árvores de Eventos e de Falhas

Por definição, a análise por árvore de eventos não é mais do que um esquema lógico arborescente, que permite ligar, por um método indutivo, os acontecimentos iniciadores às consequências que podem provocar (diagramas causa-efeito), e se requerido calcular as probabilidades associadas. Permite ilustrar os efeitos e/ou estados, intermédios e finais, susceptíveis de ocorrer após o surgimento de um acontecimento inicialmente seleccionado.

A construção de uma árvore de eventos é sequencial, sendo a convenção usual ser da esquerda para a direita. O processo de construção inicia-se com um evento iniciador e as sequências de todos os eventos subsequentes são produzidas de acordo com a ordem das respectivas ocorrências, seguindo as linhas de raciocínio do(s) analista(s). Cada trajecto, que parte do evento iniciador, é designado por ramo, os quais não são mais do que ligações gráficas desde o evento iniciador através das sequências dos eventos ou dos estados intermédios do sistema até ao ponto terminal. Cada ramo dá uma sequência de respostas únicas e todos os ramos têm um nó de possibilidades comum – o evento iniciador.

Os pontos terminais de cada ramo da árvore de eventos são chamados de folhas, e definem um estado final único (condicionado por todos os eventos precedentes) de consequências adversas, de rotura (sequência de acidente) ou sem consequências. A soma da probabilidade conjunta de todas as sequências de eventos que emanam a partir de um evento iniciador particular é igual à probabilidade do evento iniciador.

Deste modo, a árvore de eventos constitui uma estrutura em expansão, que se inicia por um ou mais eventos iniciadores e se alarga combinatoriamente à medida que são considerados os eventos subsequentes. A cada ramo da árvore de eventos podem estar associados diferentes graus ou tipos de funcionamento do sistema, designadamente, respostas que levam à rotura da estrutura (modelação de mecanismos de rotura). Nas análises de riscos interessa sobretudo caracterizar as ocorrências de rotura, pelo que os trajectos ou ramos em que as respostas não são indutoras deste tipo de fenómeno poderão ser suprimidas ou não avaliadas.

As árvores de eventos podem ser representações gráficas de modelos de sistemas físicos, construídas a partir de diagramas de influências, mediante a consideração de eventos que ocorram, no tempo ou no espaço, ao sistema ou no seu interior (os quais constituem os nós da árvore de eventos), e a sua ordenação de acordo com o modo como as trajectórias estão direccionadas no diagrama de influências.

A ensecadeira de Odelouca foi objecto de aplicação da análise por árvore de eventos e de falhas (3). Os eventos iniciais, os modos de rotura e dos estados limites foram analisados com base num diagrama de influência (figura 4), assim como realizados estudos de ondas de rotura e de identificação de consequências. Os valores de risco obtidos foram representados num diagrama FN (figura 5), conjuntamente com os limites de aceitabilidade e de tolerabilidade propostos para as barragens Portuguesas (3).

Os métodos de análise por árvores de falhas (FTA) são dedutivos (que partem do geral para o específico), úteis para apresentar as combinações lógicas de estados do sistema e das possíveis causas

que contribuem para um evento específico (evento de topo), relacionado com a rotura ou a perda de funcionalidade do sistema. Este método foi também aplicado à ensecadeira de Odelouca (3) no estudo do subsistema corpo da barragem e na avaliação das sequências de eventos que podem conduzir ao estado limite último erosão externa por galgamento, na sequência do qual ocorra a formação de uma brecha e a libertação do volume armazenado na albufeira (figura 6).

5 – Conclusões

A análise de riscos, debruçando-se sobre todas as fases da vida da obra e sobre o respectivo estado de conservação, pode desempenhar um papel muito importante na integração de todas as actividades de segurança das obras.

A nossa sociedade está-se a tornar cada vez menos tolerante a roturas de estruturas de engenharia, incluindo acidentes provocados por fenómenos naturais que afectam as áreas desenvolvidas. Os engenheiros tendem a ser considerados culpados pelas suas acções ou pelas suas omissões, existindo uma pressão crescente pela sua responsabilização e por mais transparência. Esta transparência impõe a necessidade de comunicação com os donos de obra e a utilização de linguagem e do vocabulário de risco que possam ser compreendidos pelos técnicos, pelos decisores, pelos legisladores e pelo público em geral. Para este fim, exige-se a ampla cooperação dos engenheiros geotécnicos com os técnicos de outras disciplinas, designadamente das ciências sociais, e com consultores para a comunicação social.

A utilização do enquadramento baseado no risco para integrar a consideração das consequências potenciais e a identificação das medidas de prevenção ou de mitigação, nas diferentes fases do processo de avaliação geotécnica, ajudará fortemente a caracterizar as áreas que necessitam de maior atenção e a evitar surpresas, embaraços ou desastres.

Referências

- (1) Caldeira, Laura, “Análise de Riscos em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro”, Programas de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica de Solos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 248 páginas, 2005.
- (2) Santos, Ricardo, “Enquadramento das Análises de Risco em Geotecnia”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 257 páginas, 2006.
- (3) Pimenta, Lurdes, “Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 534 páginas, 2008.

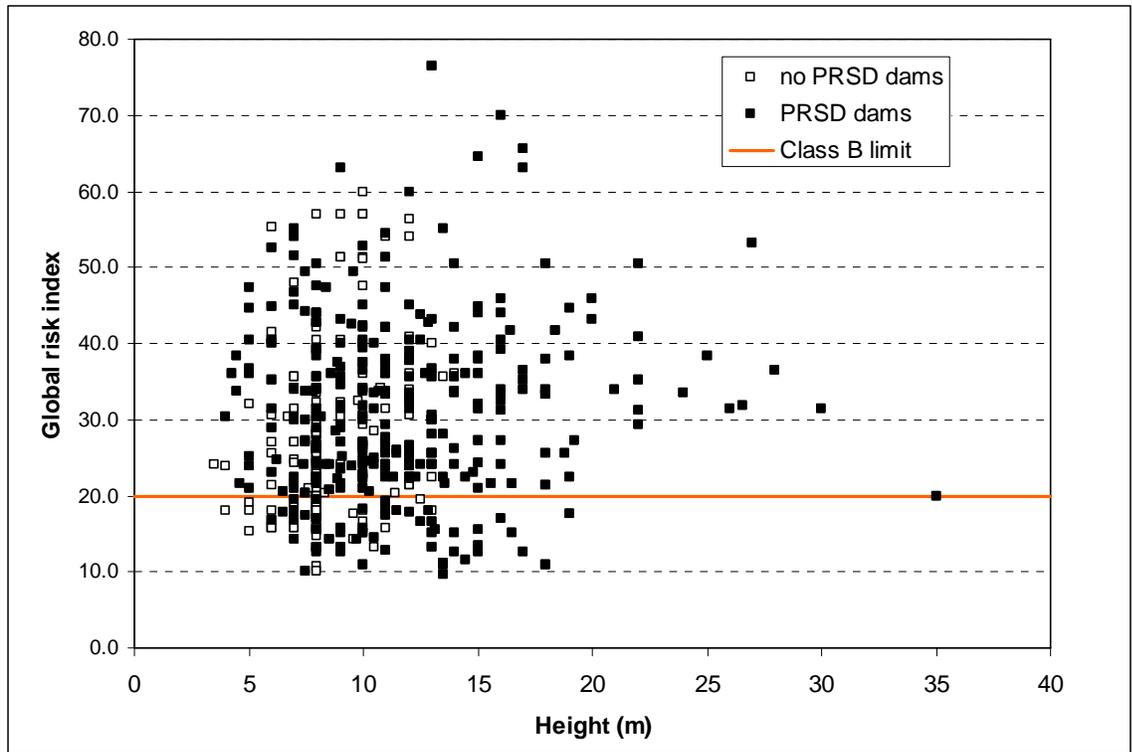


figura 1 • Índice global de risco em função da altura das barragens inspeccionadas (1)

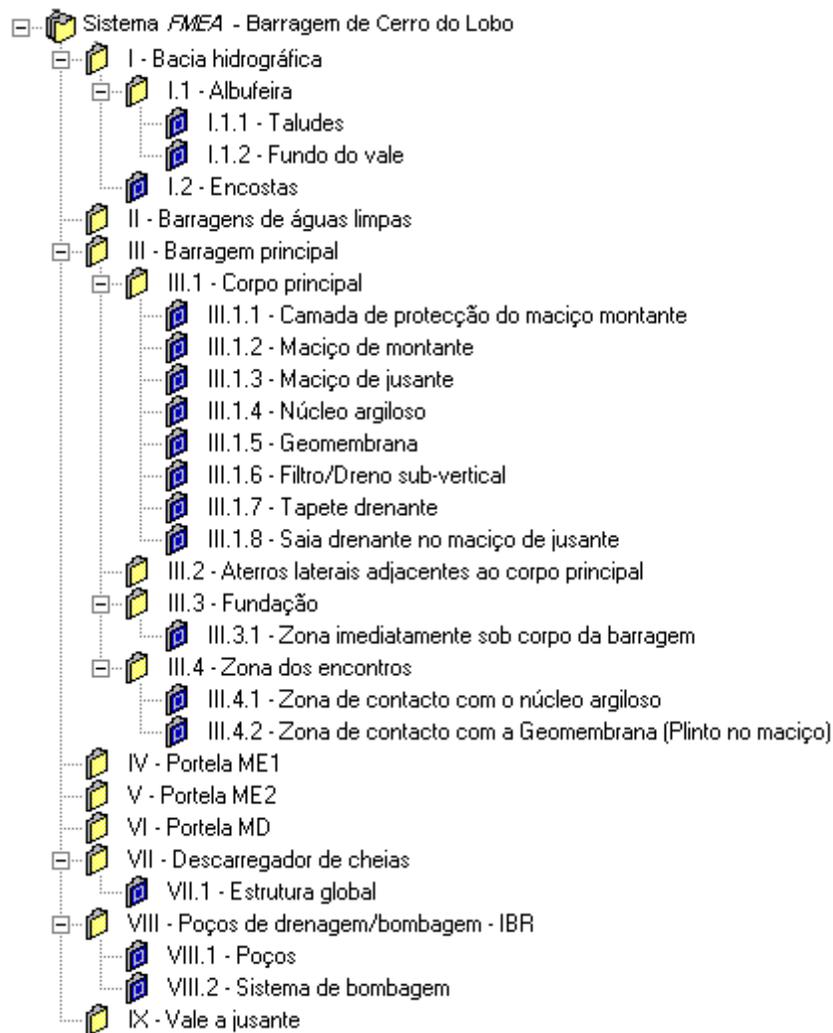


figura 2 • Estrutura hierárquica do sistema associado à barragem de Cerro do Lobo (2)

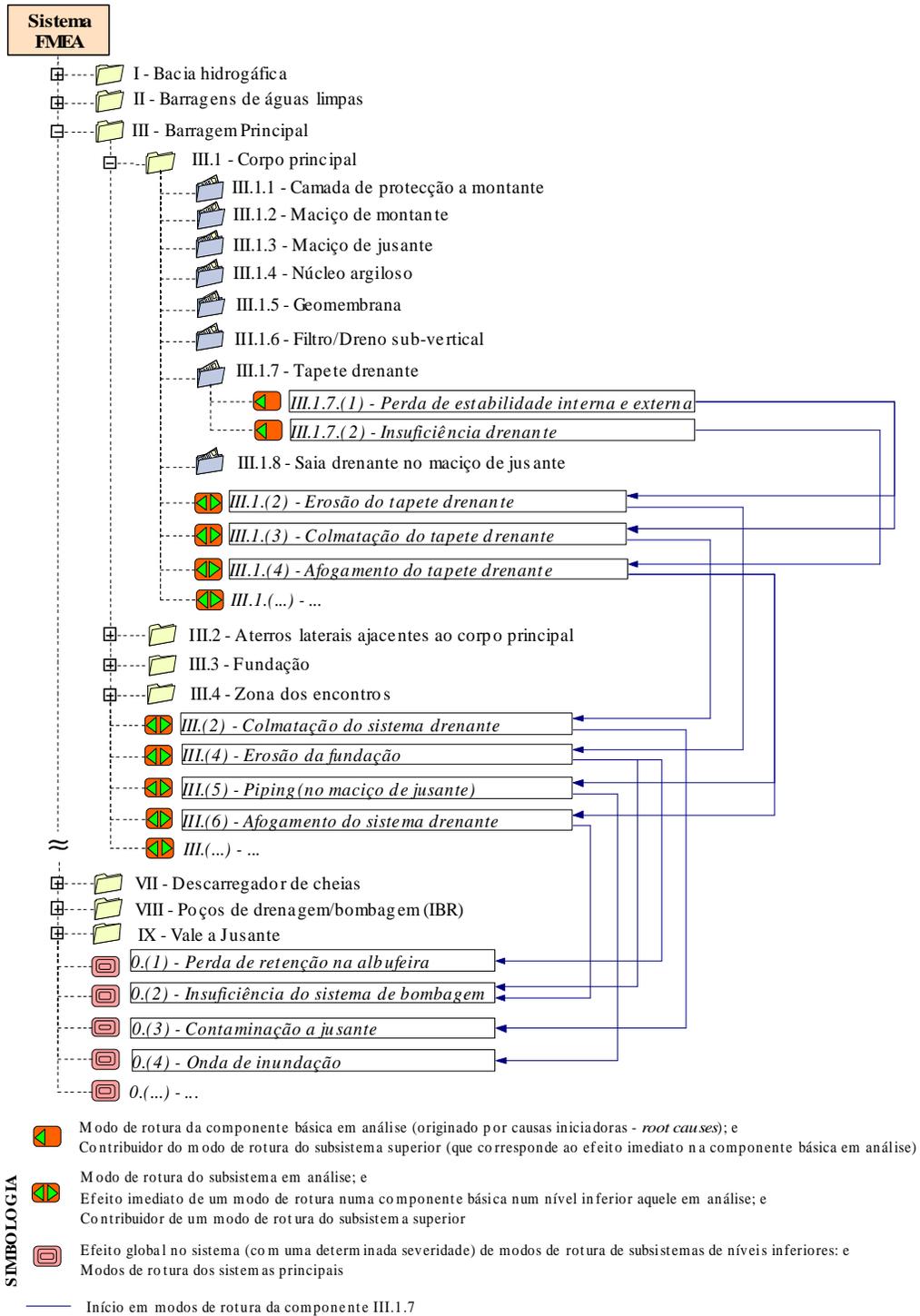


figura 3. Modos de rotura/efeitos em subsistemas de nível sucessivamente superior (2)

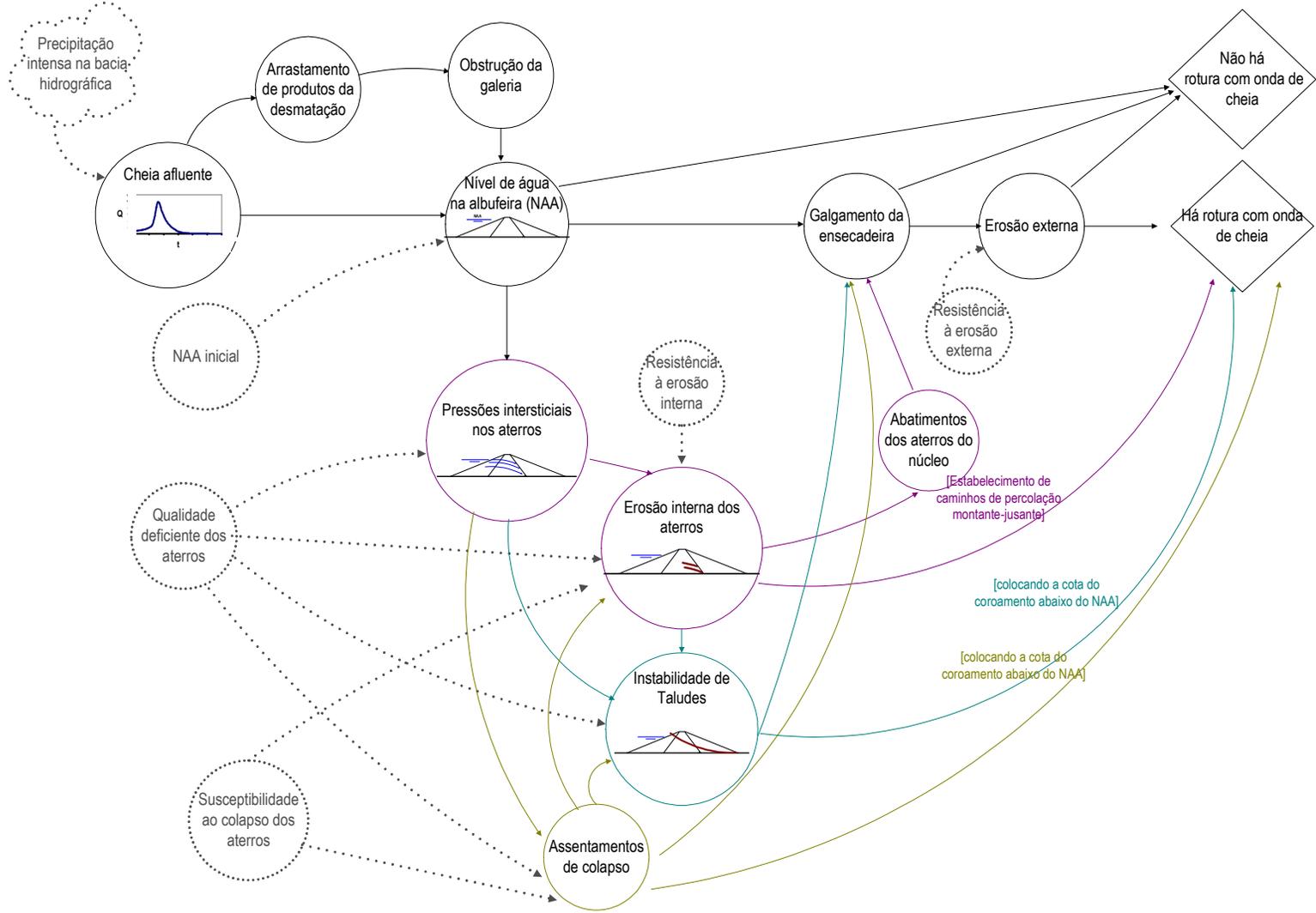


figura 4. Diagrama de influências da ensecadeira de Odelouca (3).

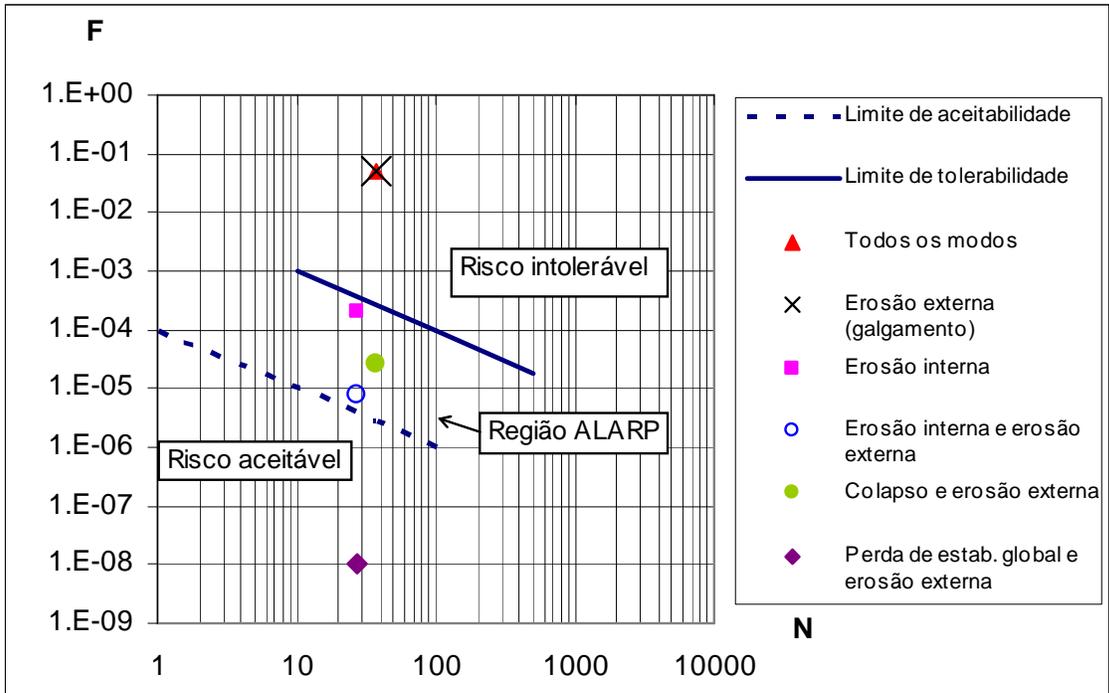


figura 5. Representação no gráfico FN dos riscos da ensecadeira de Odelouca que conduzem à libertação do volume armazenado (3)

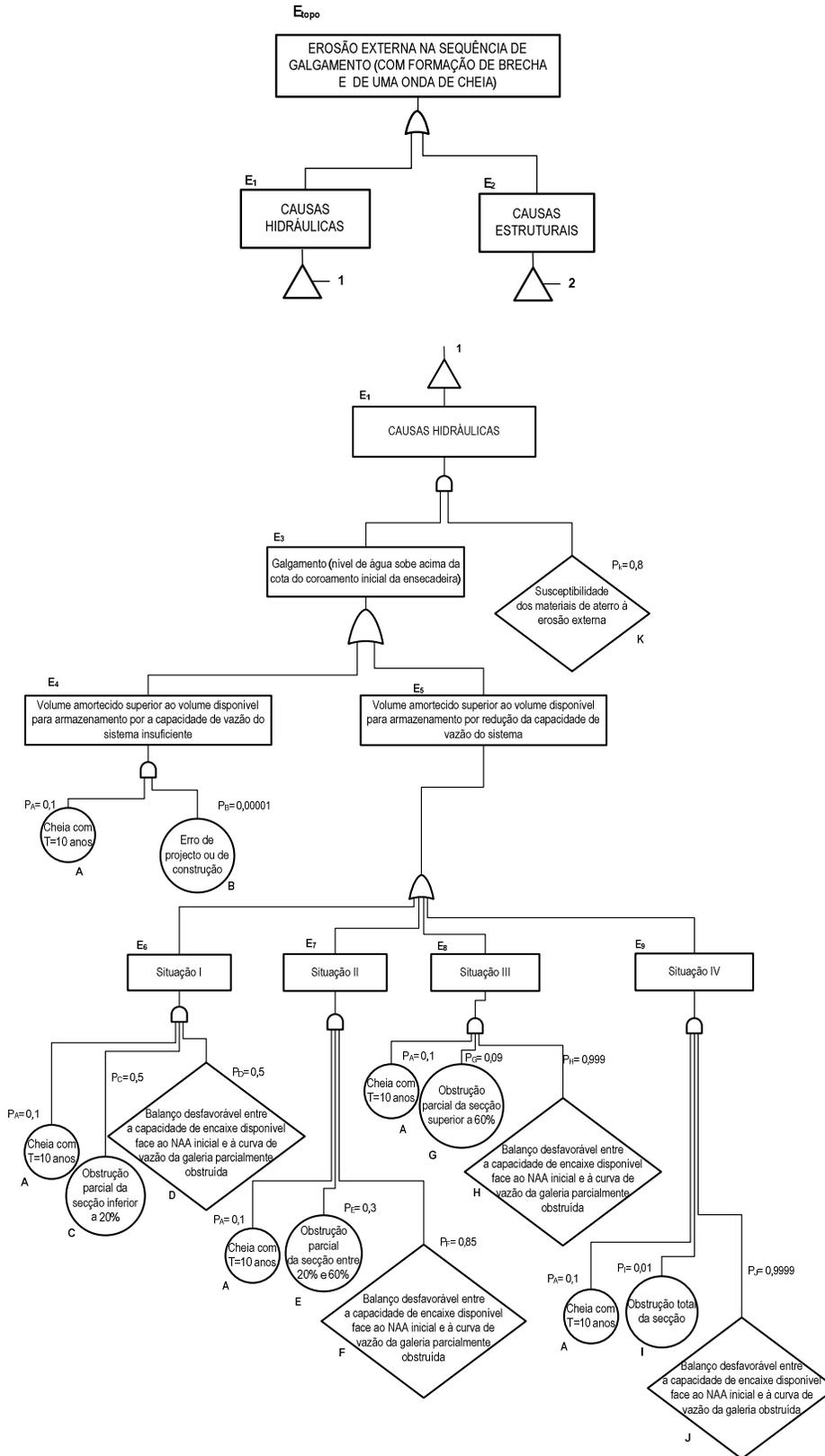


figura 6. Árvore de falhas da ensecadeira de Odelouca (3)