A EROSÃO E SEDIMENTAÇÃO FLUVIAL NUMA ANÁLISE DE RISCO SOBRE A SEGURANÇA DE ESTRUTURAS MARGINAIS
Fluvial Erosion and Sedimentation in the Risk Analysis of the Safety of Near-River Bank Structures

BRUNO OLIVEIRA (1) e RODRIGO MAIA (2)

(1) *Mestre em Engenharia Civil, FEUP,*
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up200705513@fe.up.pt

(2) *Prof. Associado, FEUP,*
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, rmaia@fe.up.pt

Resumo

A morfodinâmica fluvial possui uma variabilidade muito grande, tanto em termos da sua magnitude como da sua distribuição espacial e temporal. O comportamento da morfodinâmica de um rio é afetado por múltiplos fatores, tanto naturais como antropogénicos. No entanto, as estruturas situadas nas margens de rios, com a exceção daquelas cujo propósito é a proteção de zonas fluviais, são geralmente dimensionadas sem que sejam tidas em conta quaisquer considerações sobre a variabilidade da morfologia fluvial. O objetivo deste estudo foi a avaliação do impacto, ainda que através de uma representação simplista, da variabilidade natural dos processos morfodinâmicos do rio na segurança estrutural. Os resultados apontam para um impacto significativo da evolução morfológica sobre as infraestruturas marginais. Com o presente estudo foram estabelecidas as bases para futuros estudos sobre o impacto e relevância dos processos morfodinâmicos fluviais no dimensionamento de estruturas marginais.

Palavras-chave: Modelação estocástica, segurança estrutural, erosão e sedimentação, estabilidade de margens.

Abstract

Fluvial morphodynamics is highly variable in nature, both in terms of the magnitude and of its spatial and temporal distribution. The behaviour of a river's morphodynamics is affected by multiple factors, both natural and anthropogenic. However, near-bank infrastructures are often designed without considering the variability of fluvial geomorphology, with the exception perhaps of the structures whose purpose is the protection of fluvial areas. The objective of this study was the introduction and the assessment of the impact of the natural variability of the river's morphodynamic processes in structural safety, albeit through a simplistic representation of the variables involved. The results point to a significant impact of the morphological evolution over the near-bank infrastructures. With the present study, the basis for future studies on the impact and the relevance of the fluvial morphodynamical process in the design of the near-bank structures, were established.

Keywords: Stochastic modelling, structural safety, erosion and sedimentation, bank stability.

1. Introdução

Os rios representam um dos principais elementos formadores da morfologia terrestre. Dependendo das condições, e ao longo de muitos anos, o seu efeito sobre a forma do terreno pode ser muito elevado, alterando a estrutura e composição sedimentar do terreno envolvente.

A morfodinâmica fluvial (i.e., o fenómeno da evolução do leito de um rio ao longo do tempo) é um fenómeno altamente complexo, estando dependente de um grande número de variáveis.

A segurança estrutural de infraestruturas é sem dúvida um dos assuntos mais estudados em engenharia civil ao longo dos anos. No entanto, o foco tem sido desde sempre mantido, em geral, sobre a estrutura em questão, assumindo um conjunto de condições pré-definidas para o terreno e para as condições das fundações correspondentes.

Assim sendo, certos aspetos, como sejam o impacto que a morfodinâmica fluvial pode ter na estabilidade de uma estrutura, são frequentemente negligenciados.

A erosão fluvial pode, em especial, pôr em causa a segurança estrutural de uma infraestrutura através da remoção do terreno que a suporta e da alteração da composição do terreno e da posição dos níveis freáticos.

O presente estudo pretende analisar a relevância do fenómeno morfodinâmico na segurança de infraestruturas, nomeadamente estabelecendo as bases para a integração da variabilidade deste fenómeno numa análise de risco da estabilidade de estruturas marginais.

Estes objetivos foram concretizados utilizando um exemplo de aplicação teórico construído com base em conceitos de engenharia hidráulica, estrutural, geotécnica e de análise de risco.

A estrutura do trabalho resumiu-se à definição do sistema (incluindo todas as variáveis estatisticamente relevantes e os principais modos de falha a considerar), à aplicação do Método de Monte Carlo e à análise, com base em redes Bayesianas, dos riscos envolvidos no funcionamento da estrutura (incluindo o estudo de potenciais medidas de mitigação do risco).

1.1. Equilíbrio dinâmico

A evolução da forma de um rio está dependente de um conjunto de variáveis climatéricas, topográficas e sedimentológicas. Adicionalmente, esta evolução é fortemente afetada pelo comportamento hidrodinâmico do escoamento (e.g., por fenómenos do escoamento como sejam a turbulência e as correntes secundárias) e pela intervenção humana (e.g., pela construção de barragens). De uma forma geral, estas variáveis tendem a equilibrar-se no rio, produzindo o chamado equilíbrio dinâmico. Este equilíbrio encontra-se expresso na equação 1 e é definido pela relação entre o caudal (Q), a inclinação longitudinal do rio (i), o caudal sólido transportado no rio (Q_S) e o diâmetro das partículas que constituem o leito do rio (D).

$$Q * i \propto Q_s * D \qquad [1]$$

Este equilíbrio dinâmico no entanto não implica que as condições morfológicas não se alterem temporariamente durante o tempo de vida do rio, antes que estas oscilem em torno de uma determinada forma média. A variabilidade destas alterações poderá portanto introduzir impactos significativos na segurança estrutural de infraestruturas situadas nas proximidades de um rio. De forma a compreender, ainda que com base numa aproximação, a importância destes fatores, estas variáveis vão ser introduzidas numa análise de risco sobre uma potencial estrutura marginal.

1.2. Impacto sobre a segurança estrutural

De uma forma geral, o correto dimensionamento de estruturas e, principalmente, das fundações considera apropriadamente a qualidade do terreno envolvente no dimensionamento. No entanto, a morfodinâmica fluvial é um fator frequentemente descurado, apesar de poder ter um impacto significativo na estabilidade de estruturas marginais (frequentemente, este fator é negligenciado por não entrar na área de conhecimentos da maioria dos engenheiros). No entanto, a evolução da forma de um rio nas proximidades pode ameaçar infraestruturas através da alteração das respetivas condições de suporte (Figura 1).

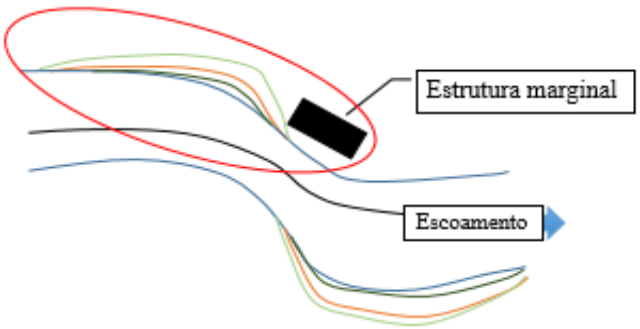

Figura 1. Representação esquemática de uma estrutura vulnerável à variabilidade da morfodinâmica fluvial.

2. Sistema em Estudo

O foco deste estudo foi uma infraestrutura situada nas proximidades de um rio, morfologicamente ativo e em equilíbrio dinâmico, mais especificamente sobre as condições de suporte das suas estruturas de fundação.

2.1. Variáveis do sistema

O sistema é constituído pelas fundações da estrutura e pelo terreno circundante, assim como pelo terreno entre a estrutura e o rio. O sistema encontra-se representado esquematicamente na Figura 2. Assim sendo, as diferentes componentes do sistema são:

- O nível de água no rio;
- O nível de água no solo, que está dependente do nível da água no rio e da precipitação;
- A evolução futura da morfologia do rio;
- O terreno, nomeadamente, em termos da resistência do solo e da estrutura e distribuição das partículas;
- A infraestrutura a analisar, com peso próprio variável;
- A fundação da estrutura, assumida como sendo constituída por:
  - Uma única laje de betão armado (em ensoleiramento generalizado);
  - As estacas, utilizados como elementos de suporte do maciço de encabeçamento correspondente ao ensoleiramento da estrutura, estendendo-se até ao fundo rochoso. As estacas foram consideradas como oferecendo resistência unicamente por compressão.

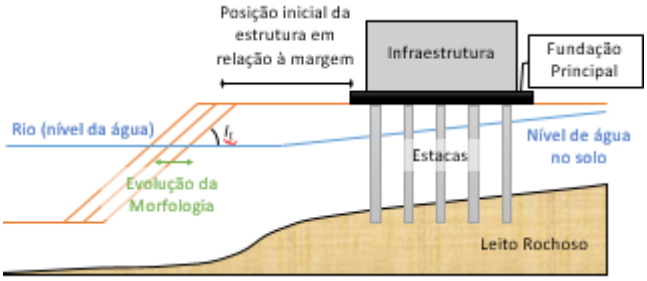

Figura 2. Representação esquemática das diferentes componentes e fontes de incerteza no sistema (no estudo foram consideradas 6 estacas por metro de margem, apesar de a figura só apresentar 5 estacas).

A estrutura em questão pode ter uma variedade de funcionalidades. Neste estudo, foi assumido que se trata de um reservatório de água, uma vez que este tipo de infraestrutura tem um grande peso próprio e tem custos consideráveis associados à interrupção do seu funcionamento.

A Figura 2 resume as características do sistema. Tratando-se de uma estrutura nas proximidades de um rio, e por uma questão de simplicidade, o problema será estudado em duas dimensões, considerando tanto o rio como a estrutura, como sendo virtualmente infinitos na direção perpendicular ao plano representado na Figura 2.

Para a presente aplicação foram consideradas duas camadas de solo, sendo a camada mais superficial constituída de partículas finas, com coesão, e a segunda camada, mais profunda, de areia não-coesiva.

As componentes que podem ter um impacto ativo/direto no colapso da estrutura são o terreno na envolvente da estrutura, as estacas (aqui considerados como uma única componente com diversos níveis de falha) e uma laje de suporte corrida correspondente à fundação principal da estrutura. Tendo em consideração todos estes elementos, são possíveis tanto falhas repentinas como progressivas (ou seja, que ocorrem, respetivamente, num curto e num longo espaço de tempo) uma vez que um colapso parcial dos pilares de apoio, do terreno ou da laje de suporte pode não resultar num colapso estrutural repentino. Algumas consequências da ação das variáveis envolvidas podem envolver o assentamento das fundações ou a exposição à vista da estrutura de suporte.

2.2. Modos de falha

De forma a realizar uma análise de risco sobre a estrutura em estudo, é primeiro necessário estabelecer os modos de falha a analisar. Estes modos de falha representam as potenciais formas pelas quais se poderá dar uma falha de uma parte do sistema. Os modos de falha que foram considerados são aqueles que estão relacionados com as variáveis a estudar e que de alguma forma podem conduzir à interrupção do normal funcionamento da infraestrutura, nomeadamente através da deterioração das condições de suporte desta.

Os tipos de falha que foram considerados para esta infraestrutura (e que foram estudados na análise de risco), são as falhas do terreno, as falhas parciais e as falhas totais das estacas e as falhas estruturais.

Os tipos de falhas do terreno considerados (por deslize, em bloco ou por rotação) estão representados, pelos seus respetivos planos de corte, na Figura 3.

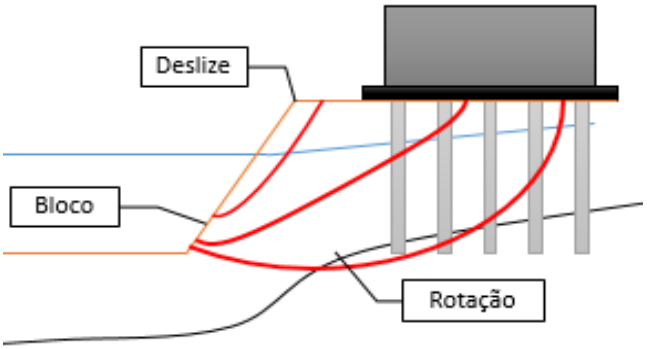

Figura 3. Representação esquemática dos tipos de falhas do terreno considerados.

A falha das estacas foi considerada como podendo ser parciais ou totais, sendo que a ocorrência de falhas parciais pode aumentar a probabilidade de uma falha total das estacas. A probabilidade de falha das estacas está também associada às falhas (ou não) do terreno envolvente, as quais podem reduzir o apoio que o terreno lhes oferece.

No que diz respeito à falha estrutural/colapso estrutural da infraestrutura, esta foi considerada apenas como podendo resultar de um cálculo errado das ações/resistência estrutural aquando do dimensionamento estrutural da superestrutura, não ficando pois dependente de fatores externos (ficando assim ligado às probabilidades de falha consideradas como aceitáveis nos principais regulamentos para dimensionamento de estruturas).

3. Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo (Rubinstein e Kroese, 2008) tem o objetivo de obter uma representação da distribuição de probabilidades de uma variável, tendo por base o conhecimento da distribuição das variáveis que a definem e de um modelo que permita a geração de valores da variável desejada com base nos valores das outras variáveis. O método em si consiste simplesmente na geração de valores das variáveis independentes, na sua aplicação ao modelo correspondente e na análise dos resultados.

A primeira distinção a estabelecer é entre as variáveis quantificáveis de forma qualitativa e as variáveis quantificáveis de forma quantitativa. Esta classificação está dependente das características das variáveis e do nível de conhecimento disponível sobre estas mesmas variáveis.

O único modo de falha aqui considerado como de natureza qualitativa foi o colapso estrutural. Esse colapso foi considerado como sendo qualitativo porque (1) a sua quantificação exata é muito complexa e (2) porque é razoável assumir que o projetista da estrutura definiu a estrutura segundo os regulamentos vigentes, os quais têm associados uma probabilidade de falha em função do tipo de estrutura. Assim sendo, foi atribuída uma probabilidade de falha da infraestrutura por colapso estrutural igual a 10^{-4}, um valor comum nos regulamentos que assentam em métodos semi-probabilísticos. Relativamente aos restantes modos de falha, estes foram definidos quantitativamente, com base em equações (i.e., funções limite) representativas de conceitos sobre estabilidade estrutural ou de aproximações semi-empíricas baseadas em conceitos práticos. Dada a complexidade e a não linearidade das funções limite utilizadas, é necessário utilizar o Método de Monte Carlo para definir as probabilidades de falha de cada modo de falha. Mais concretamente, as variáveis responsáveis pela incerteza no sistema são:

- A magnitude da alteração do leito do rio (i.e., a evolução, em metros, da erosão na direção perpendicular à margem);
- A velocidade da alteração do leito do rio (o ritmo, em metros por ano, ao qual a erosão ocorre);
- A inclinação dos taludes da margem do rio (resulta de diversos fatores como a velocidade de alteração do leito e as características do solo);
- O ângulo de atrito crítico do solo (valor característico dos sedimentos);
- Peso próprio da estrutura;
- Tensão tangencial de corte do solo, uma característica do solo de definição complexa, geralmente dependente do ângulo de atrito crítico do solo, da estratificação do terreno entre outros fatores;
- Capacidade compressiva das estacas (consideradas aqui como sendo feitas de madeira);
- Área transversal efetiva das estacas.

Adicionalmente, os pesos das zonas ativas (P_a) e passivas (P_p) do terreno relativamente à falha por rotação foram assumidas como sendo valores determinísticos, uma vez que são dependentes apenas das características geométricas do sistema.

As restantes variáveis utilizadas no método de Monte Carlo foram definidas (em termos das respetivas distribuições de probabilidades) com base em valores comuns, presentes em casos de aplicação práticas ou em valores característicos dos materiais correspondentes. As variáveis que foram consideradas no processo de definição das probabilidades, assim como a respetiva simbologia e características estatísticas de falha estão apresentadas no Quadro 1. A seleção das distribuições de probabilidades (e dos respetivos parâmetros) para cada uma das variáveis foi feita com base nas características estatísticas

Quadro 1. Simbologia e características estatísticas que definem as variáveis do sistema relevantes para os problemas a estudar.

Variável	Símbolo	Tipos e parâmetros das distribuições	Definida entre:	
Magnitude da alteração do leito	M	Normal (4, 2); em metros	-∞	+∞
Velocidade da alteração do leito	V	Lognormal (0.5, 3); em metros por ano	0	+∞
Inclinação do talude	I_t	Beta (2, 5); em graus	26.57º	33.69º
Ângulo de atrito crítico do solo	φ_R	Beta (5, 2); em graus	36	41
Peso próprio da estrutura	W	Normal (600, 180); em kN/m	0*	+∞
Tensão tangencial de corte do solo	τ_R	Gamma (28, 15); em kN/m²	0	+∞
Capacidade de resistência à compressão das estacas	σ_R	Normal (30, 3); em MN/m²	0	+∞
Área transversal efetiva das estacas	A	Normal (400, 2); em cm²	0	+∞

* Apenas foram considerados valores positivos do peso da estrutura.

Todas as variáveis e modos de falha, assim como as suas respetivas distribuições de probabilidades, foram considerados como sendo independentes entre si. Foram realizadas 100000 simulações de forma a analisar a probabilidade de falha de cada modo de falha. A análise dos resultados foi realizada com base na linguagem de programação R, através do programa RStudio.

3.1. Falha do sistema pelo terreno

Os 3 tipos de falha do terreno considerados, esquematizados antes (Figura 3), são por deslize, em bloco e por rotação. O terreno foi definido como sendo constituído por um núcleo de areia sobreposta com uma camada de sedimento fino com coesão (uma disposição comum em muitos rios, principalmente junto à foz destes).

A principal distinção entre as falhas por deslize e em bloco relaciona-se com a camada que é afetada/erodida: a coesão da camada superficial, composta de sedimento fino, implica que a erosão dessa camada só possa ocorrer a um ritmo relativamente lento.

Assim sendo, falhas por deslize só podem ocorrer para baixas velocidades de alteração do leito (baixo V), uma vez que afetam apenas as camadas superiores do terreno. Consequentemente, as falhas em bloco só ocorrem quando a velocidade de alteração do leito for comparativamente grande.

Tendo em conta as variáveis anteriormente definidas (nomeadamente, a magnitude e velocidade de alteração do leito do rio e os ângulos de talude do rio e críticos do solo), a função limite de funcionamento (g, a função que determina a ocorrência de uma falha) para a falha por deslize fica assim definida como sendo correspondente a $M < 1$ (ou seja, é necessário ocorrer um mínimo de 1 metro de erosão lateral no rio para que a erosão não atinja o núcleo arenoso do terreno) e $V < \sigma_R / I_t$ (ou seja, a velocidade de alteração do leito tem que ser lenta o suficiente para que a coesão dos sedimentos finos se dissipe).

A distribuição de probabilidades da função limite de funcionamento resultante (definida como um fator de segurança relativamente à falha e sendo a falha definida pelas equações apresentadas anteriormente) está representada na Figura 4.

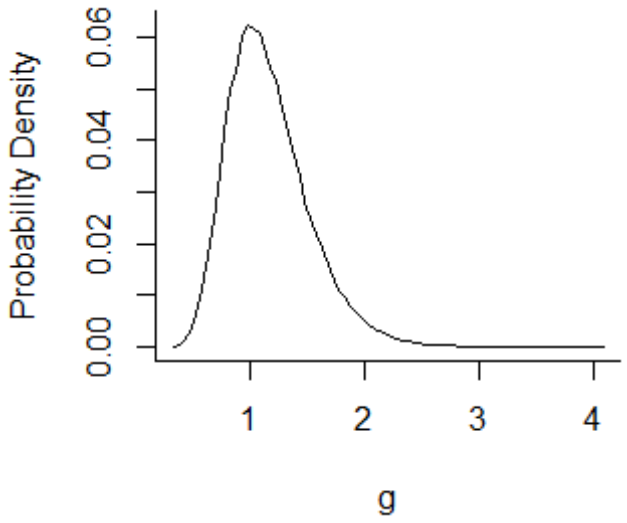

Figura 4. Função densidade de probabilidade para a função limite de funcionamento do modo de falha por deslize (valores abaixo de 1 representam uma falha do terreno por deslize).

A razão σ_R / I_t permite ter em consideração a relação entre o ângulo de atrito crítico e o ângulo do talude, a qual tem um impacto significativo na estabilidade do talude.

Por outro lado, a falha em bloco foi considerada como o resultado das ações sobre o terreno excederem a tensão crítica resistente do solo no núcleo arenoso do talude. Embora esta camada do terreno seja geralmente constituída por partículas de maior dimensão, a inexistência de coesão reduz a sua robustez relativamente aos processos morfodinâmicos (e, mais especificamente, erosivos) do rio.

Assim sendo, a função limite da falha em bloco é dada por $M > 1$ (ou seja, é necessário ocorrer mais do que 1 metro de erosão lateral no rio para que o solo perca estabilidade, nomeadamente para que seja atingido o núcleo arenoso do terreno) e $V > \sigma_R / I_t$ (ou seja, a velocidade de alteração do leito tem que ser suficientemente rápida para que a coesão dos sedimentos finos não se chegue a dissipar).

A distribuição de probabilidades da função limite de funcionamento (definida como um fator de segurança relativamente à falha) está representada na Figura 5.

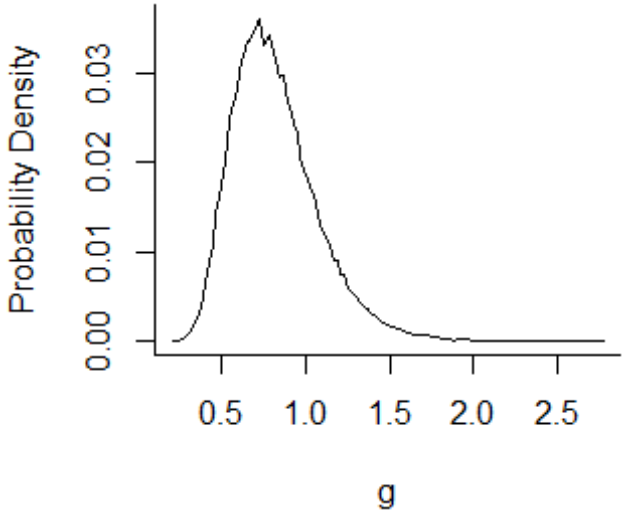

Figura 5. Função densidade de probabilidade para a função limite de funcionamento do modo de falha em bloco (valores abaixo de 1 representam uma falha do terreno em bloco).

A falha por rotação do terreno é um fenómeno relativamente raro que surge como resultado da formação de um mecanismo de rotação no terreno (Figura 6).

O mecanismo de rotação do terreno ocorre quando o momento de rotação relativamente a um dado ponto (centro de rotação) do peso do terreno (P_a) e da(s) infraestrutura(s) presente(s) (com peso W) é superior ao momento estabilizador devido ao peso do terreno exterior ao plano (P_R) somado à resistência à rotação do volume de terra em questão (i.e., resultante da tensão tangencial máxima que o terreno consegue mobilizar – τ_R).

A probabilidade de falha passa assim a ser definida com base na condição de equilíbrio apresentada na equação 2.

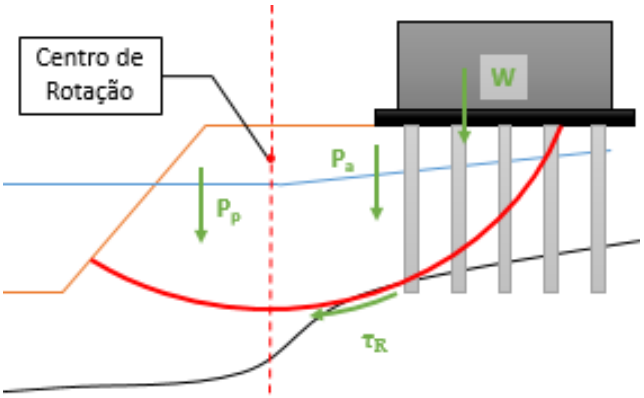

Figura 6. Representação esquemática do mecanismo de rotação no terreno.

$$g_{|p} = \frac{P_R + \tau_R \times (W + P_a + P_R)}{W + P_a} < 1 \qquad [2]$$

O peso específico do solo foi assumido como sendo de aproximadamente 24,5 kN/m³ e, com base nas caraterísticas médias da geometria do terreno e da estrutura, apresentadas no Quadro 1, as áreas de terreno responsáveis pelo peso ativo (P_a) e passivo (P_R) são 50 m² e 10 m² (respetivamente, os pesos que contribuem e que contrariam a ocorrência da rotação do terreno).

A distribuição de probabilidades da função-limite de funcionamento (definida como um fator de segurança relativamente à falha, definido nas equações anteriores) está representada na Figura 7.

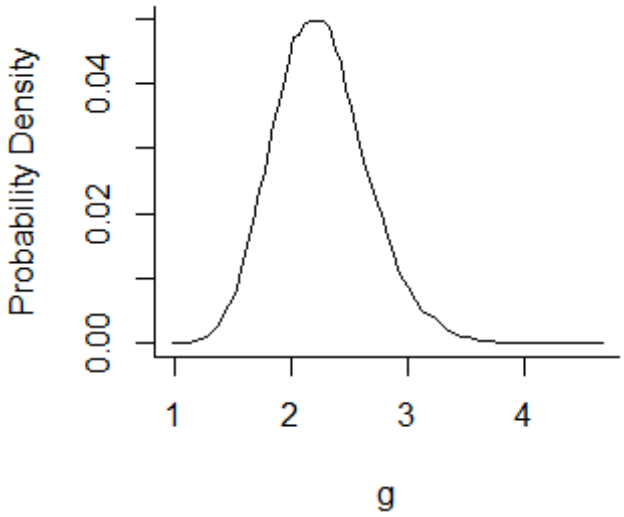

Figura 7. Função densidade de probabilidade para a função limite de funcionamento do modo de falha por rotação (valores abaixo de 1 representam uma falha do terreno por rotação).

3.2. Falha do sistema pelas fundações

No que diz respeito às estacas/pilares de suporte, os mecanismos de falha considerados devem-se apenas ao efeito das condições de suporte das estacas e da força compressiva exercida pelo peso do edifício.

A função-limite de cada estaca (assumindo que todas as estacas são independentes entre si) foi definida através de uma relação entre a capacidade resistente do material do leito rochoso e a força decorrente do peso do edifício associado (desprezando o efeito de outras solicitações sobre a estrutura, como por exemplo, do vento), tal como está definido na equação 3.

Aplicando a distribuição de probabilidades definida anteriormente para cada uma das variáveis associadas, obteve-se a distribuição de probabilidades do fator de segurança para cada estaca ($g_{|p}$) (a distribuição de probabilidades resultante está representada na Figura 8). Para efeitos de definição da função-limite de funcionamento relativa às estacas, o peso da estrutura foi assumido como estando igualmente distribuído entre as estacas (ou seja, optou-se por desprezar a capacidade de suporte do terreno imediatamente por baixo da infraestrutura). Adicionalmente, as probabilidades de falha de cada pilar foram consideradas como sendo independentes entre si.

$$g_{|p} = \frac{\sigma_p \times A}{F_{|p}} < 1 \Leftrightarrow g_{|p} = \frac{\sigma_p \times A}{W/_6} < 1 \quad [3]$$

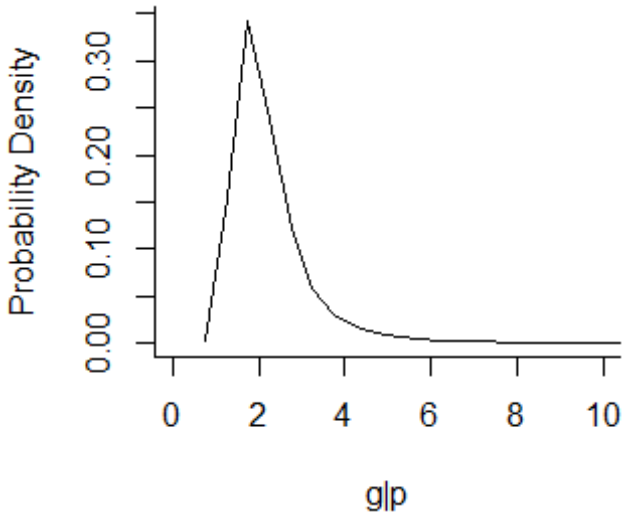

Figura 8. Função densidade de probabilidade para a função-limite de funcionamento do modo de falha para cada estaca (valores abaixo de 1 representam uma falha da estaca).

Adicionalmente, também foi considerado um modo de falha total das estacas que consiste no colapso instantâneo de todas as estacas que suportam a estrutura. Foi assumido ainda que uma ou mais estacas poderão colapsar primeiro, aumentando a probabilidade do colapso conjunto das restantes estacas. A função-limite correspondente foi definida em função do número de estacas previamente colapsadas, de acordo com o que está definido no Quadro 2.

Quadro 2. Probabilidade de falha total das estacas tendo em conta o número de estacas que já falharam anteriormente.

Número de estacas previamente colapsadas	Probabilidade de colapso total das estacas (%)
0	0
1	1
2	10
3	100
4	100
5	100
6	100

4. Análise de Risco

4.1. Metodologia geral

De forma a analisar e interligar os diferentes modos de falha e as respetivas probabilidades e custos associados a cada uma destas falhas, foi aplicada uma rede Bayesiana (Pearl, 1988).

As redes Bayesianas são ferramentas que permitem descrever relações de causa-efeito dentro de um sistema e contabilizar os custos estimados em função das probabilidades de ocorrência respetivas.

A aplicação das redes Bayesianas foi concretizada com base no programa GeNIe. A análise global dos custos (e.g., por danos e eventuais medidas de reparação) e probabilidades/frequência de ocorrência associados a cada modo de falha do sistema constitui a análise de risco.

Uma vez que esta ferramenta permite modelar sistemas complexos, torna-se possível definir um maior nível de interação entre as diversas componentes e desta forma é possível obter uma descrição mais completa das probabilidades de falha de cada uma das componentes do sistema. A alternativa seria considerar as diferentes variáveis do sistema como sendo independentes, uma hipótese que pode alterar muito significativamente a qualidade dos resultados obtidos na análise de risco.

Para além das relações entre os modos de falha já referidos, para aplicação do programa com tipos de modos de falha diferentes, as probabilidades de falha das estacas foram consideradas como sendo dependentes da ocorrência de falhas do terreno (na medida em que reduzem o apoio oferecido lateralmente pelo terreno às estacas). Nomeadamente, considerou-se que as probabilidades de falha das estacas subiriam aproximadamente 10% se ocorrer uma falha por deslize (devido à redução do solo mobilizável para compressão das estacas) e de 100% se ocorrer uma falha em bloco do terreno (mais gravosa devido à remoção de solo em torno das estacas).

Cada um dos modos de falha origina diferentes tipos de custos, nomeadamente relacionados com a reabilitação fluvial (quando ocorre uma falha do terreno), reabilitação das fundações (quando ocorre uma falha das estacas) e com a reconstrução da estrutura em si. Os custos arbitrados para aplicação das redes Bayesianas foram os seguintes:

- Reabilitação fluvial, que inclui custos de 3000 e 12500€ para falhas por deslize e em bloco, respetivamente. Estes custos são o resultado, maioritariamente, da necessidade de recuperar e proteger o talude do terreno;
- Os custos de reconstrução/recuperação das estacas foram estimados como sendo 400€ por estaca.

Adicionalmente, os custos associados ao colapso da estrutura foram arbitrados tendo em consideração os potenciais danos à estrutura somados aos custos potenciais associados à perda de vidas na estrutura.

A estrutura foi assumida como sendo de funcionamento independente, exigindo apenas a presença de uma pessoa para manutenção. De forma a atribuir um valor ao custo da vida aquando do potencial colapso estrutural, foi utilizado o Índice de Qualidade da Vida (LQI, a partir do nome em inglês – Rackwitz *et al.*, 2005) e o Custo de Evitar uma Morte (CAF, a partir do nome em inglês). O custo total estimado associado ao colapso estrutural foi de 30000€.

O CAF (Olanrewaju, 2013) pode ser calculado com base na fórmula apresentada na equação 4. Para o cálculo do CAF, foi assumido um parâmetro w de 0,125 e os restantes parâmetros, g e e, foram obtidos a partir das bases de dados do Banco Mundial (World Bank, 2015) e da OCDE (OECD, 2013), respetivamente.

$$CAF_{aceitável} = \frac{g \cdot e}{4} \cdot \frac{(1-w)}{w} \qquad [4]$$

em que g e e representam, respetivamente, o produto interno bruto per capita e a esperança média de vida em Portugal e w a parte da vida dedicada à atividade económica.

Os modos de falha que conduzem ao colapso da estrutura da estrutura (colapso estrutural, colapso total das estacas e falha do terreno por rotação) foram considerados como sendo independentes e mutuamente exclusivos. A estrutura da rede Bayesiana está apresentada na Figura 9.

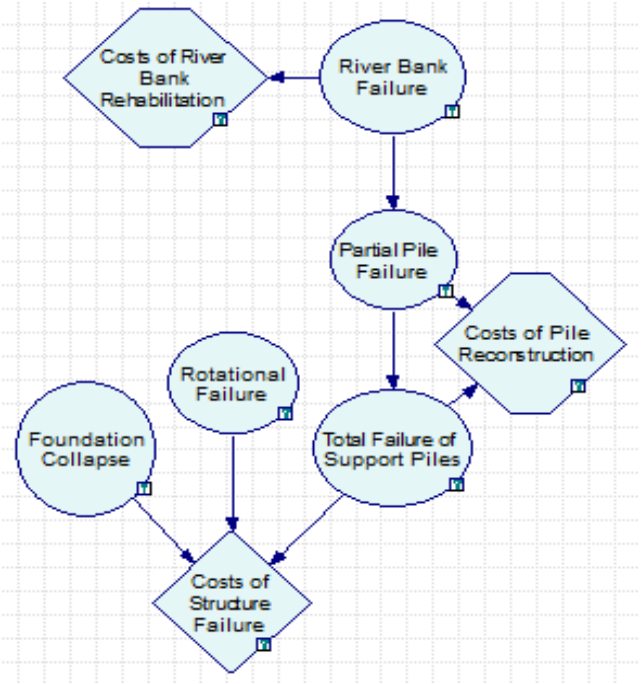

Figura 9. Rede Bayesiana representativa dos diferentes modos de falha e respetivas interligações e custos.

Todos os custos aqui apresentados foram definidos em € por metro longitudinal de estrutura, com a exceção da perda de vidas humanas que é representada como um custo total.

Dentro da representação da rede Bayesiana apresentada acima, as elipses/circunferências representam fontes de incerteza do sistema (frequentemente correspondentes aos potenciais modos de falha) e os losangos representam os custos associados a cada um dos eventuais eventos que podem resultar das diferentes fontes de incerteza.

4.2. Análise de medidas de mitigação do risco

Para além de permitir o estudo da probabilidade de falha de um sistema significativamente complexo, as redes Bayesianas aplicadas à análise de risco permitem ainda analisar eventuais soluções para os modos de falha apresentados, produzindo uma avaliação custo-benefício entre as diversas soluções e a "alternativa zero" (a não implementação de quaisquer soluções), em termos de custos estimados. Assim sendo, e tendo em conta que os modos de falha com os maiores custos associados são os do terreno, optou-se por implementar e avaliar uma solução de mitigação de risco por reforço da estabilidade do terreno em torno da estrutura. Este reforço do terreno foi executado através de ancoragens passivas instaladas ao longo da superfície da margem do rio (representadas na Figura 10).

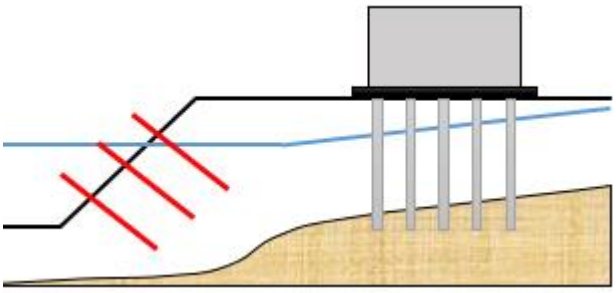

Figura 10. Representação esquemática das ancoragens consideradas no presente estudo.

A parte final deste estudo consiste na análise de risco de um exemplo teórico, em relação a uma medida de mitigação, na qual se pretendem avaliar os ganhos (em termos de segurança, aumentos de eficiência ou redução de custos) introduzidos pela sua aplicação.

De forma a avaliar a utilidade desta medida de mitigação do risco, a rede Bayesiana foi adaptada de forma a introduzir uma componente de decisão (representado por um retângulo na Figura 11).

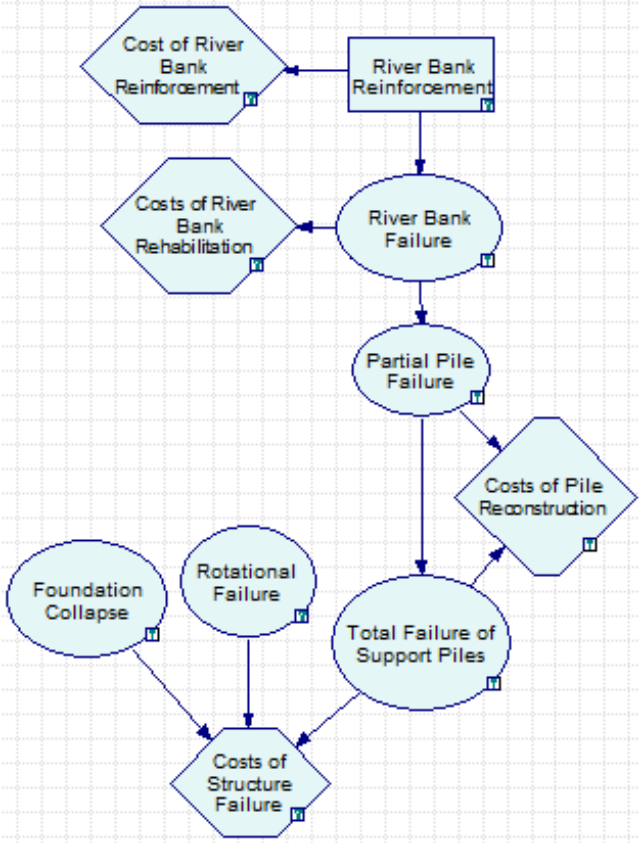

Figura 11. Rede Bayesiana para avaliação da medida de mitigação de risco, nomeadamente pelo reforço da estabilidade do terreno.

Foram assumidas as seguintes considerações relativamente ao reforço da margem do rio:

- O reforço da estabilidade estrutural por meio de ancoragens passivas terá um custo estimado de 600€ por metro de rio tratado;
- A falha do terreno por deslize torna-se impossível;
- A magnitude da alteração do leito do rio (M) terá que ser superior a 5 m para que uma falha do terreno em bloco possa ocorrer.

A rede Bayesiana correspondente está apresentada na Figura 11, em conjunto com as dependências e ligações aos custos e incertezas do sistema correspondentes.

5. Resultados

O primeiro aspeto a analisar dentro de uma análise de risco são as probabilidades de ocorrência dos eventos. Utilizando as distribuições de probabilidades das variáveis relevantes para os diferentes modos de falha (assim como as relações de dependência entre estas) definidas na seção 3, foi possível obter uma primeira estimativa das probabilidades de ocorrência dos diferentes modos de falha. Esta estimativa preliminar assenta na premissa de que os modos de falha são independentes entre si, o que pode ou não ser uma premissa realista dependendo de cada situação. As probabilidades de ocorrência estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3. Probabilidades de ocorrência dos diferentes modos de falha, assumidos como independentes.

Modo de Falha	Probabilidade (%)
Falha do terreno por deslize	26,34
Falha do terreno em bloco	66,94
Falha do terreno por rotação	0,006
Falha parcial das estacas	0,30
Falha total das estacas	0,09
Colapso estrutural	0,01

A maioria dos modos de falha aqui definidos são independentes entre si. No entanto, como é referido na seção 4, os modos de falha podem ter dependências entre si, as quais alteram a importância e custos relativos de cada um dos modos de falha.

No Quadro 4 estão apresentadas as probabilidades de ocorrência obtidas tendo em conta a interdependência entre os modos de falha, tal como obtidas através do programa GeNIe.

Quadro 4. Probabilidades de ocorrência dos diferentes modos de falha, considerando as suas interdependências.

Modo de Falha	Probabilidade (%)
Falha do terreno por deslize	26,34
Falha do terreno em bloco	66,94
Falha do terreno por rotação	0,006
Falha parcial de 1 estaca de suporte	0,52
Falha parcial de 2 estacas de suporte	0,003
Falha parcial de 3 estacas de suporte	$1,62\times10^{-5}$
Falha parcial de 4 estacas de suporte	$9,56\times10^{-8}$
Falha parcial de 5 estacas de suporte	$5,69\times10^{-10}$
Falha parcial de 6 estacas de suporte	$3,42\times10^{-12}$
Falha total dos estacas de suporte	0,005
Colapso estrutural	0,1

A introdução da medida de mitigação de risco anteriormente referida (nomeadamente, o reforço, por aplicação de ancoragens passivas, da estabilidade das margens) produz novas alterações nas probabilidades de ocorrência, as quais se encontram apresentadas no Quadro 5. Estas foram avaliadas com base no programa GeNIe.

Quadro 5. Probabilidades de ocorrência dos diferentes modos de falha, considerando as suas interdependências.

Modo de Falha	Probabilidade (%)
Falha do terreno em bloco	30,95
Falha do terreno por rotação	0,006
Falha parcial de 1 estaca	0,40
Falha parcial de 2 estacas	0,002
Falha parcial de 3 estacas	$8,90\times10^{-6}$
Falha parcial de 4 estacas	$4,83\times10^{-8}$
Falha parcial de 5 estacas	$2,75\times10^{-10}$
Falha parcial de 6 estacas	$1,62\times10^{-12}$
Falha total dos pilares de suporte	0,004
Colapso estrutural	0,1

O outro fator a analisar na análise de risco são os custos resultantes de cada modo de falha (i.e., de cada evento definido na rede Bayesiana), os quais foram apresentados na seção 4. A combinação dos custos com as probabilidades respetivas permite calcular os custos esperados/médios associados a cada um dos modos de falha, os quais foram utilizados como unidade de medição do risco.

Os custos esperados totais associados aos modos de falha do sistema, sem a introdução de medidas de mitigação, são de 9158€, 2.06€ e 6.44€ para os custos com a reabilitação de margens, reabilitação da estrutura de suporte e com o colapso estrutural, respetivamente. Note-se que, apesar de os custos associados ao colapso estrutural serem os mais elevados, dada a baixa probabilidade de ocorrência deste modo de falha a escolha de medidas de mitigação dever-se-á focar nos modos de falha relacionados com o terreno, dado esta ser a principal origem dos custos potenciais esperados durante a vida útil da estrutura.

Com a introdução do reforço das margens, os custos alteram-se muito significativamente, para 3868€, 1.59€ e 6.05€, respetivamente para os custos com a reabilitação de margens, reabilitação da estrutura de suporte e com o colapso estrutural. Tendo em conta que o custo do reforço das margens é de 600€ por metro da estrutura, o custo médio esperado associado aos modos de falha do terreno por metro de margem ao longo da vida útil da estrutura é de 4475€. Este valor deve ser comparado com o custo estimado de 9166€ relativo aos mesmos modos de falha mas sem a execução do reforço das margens.

6. Conclusões

O estudo efetuado apresenta uma análise de risco sobre o caso de estudo de uma infraestrutura situada nas margens de um rio morfologicamente ativo e em equilíbrio dinâmico. Ao longo deste trabalho procurou-se integrar na análise de risco a variabilidade inerente a outras componentes de incerteza no sistema que frequentemente não são consideradas, nomeadamente a variabilidade da morfodinâmica do rio propriamente dita.

Para além da análise de risco, efetuou-se ainda uma análise sobre uma potencial medida de mitigação de risco relativo à infraestrutura, nomeadamente por via do reforço da estabilidade das margens.

A análise de risco foi efetuada por meio de uma representação do sistema, ainda que simplificada, por via de redes Bayesianas e do conhecimento das diferentes variáveis relevantes para o estudo. A implementação de redes Bayesianas foi efetuada com base no programa GeNIe. Os resultados salientam a importância de se considerar a dependência entre modos de falha na análise das probabilidades de cada evento, uma vez que estas podem ter um grande impacto no valor final das probabilidades respetivas. As redes Bayesianas revelaram serem uma ferramenta muito útil para esta função. Adicionalmente, estas redes permitiram ainda uma quantificação apropriada do risco associado aos modos de falha estudados (representado em termos de custo estimado).

No que diz respeito a medidas de quantificação de risco, as redes Bayesianas permitem quantificar os ganhos/benefícios que poderão ser obtidos através da sua introdução no sistema, nomeadamente através do cálculo dos custos estimados com e sem a aplicação dessas medidas. Neste trabalho, a implementação de uma medida de reforço das margens permitiu reduzir os custos associados aos modos de falha de 9166€ para 4475€, com um lucro potencial de 4691€. Note-se que a escolha entre a implantação ou não dessa solução em particular, teria de ter em conta outras possibilidades, entre as quais a designada "alternativa zero" (a não construção da infraestrutura). Adicionalmente, apesar de a quantificação dos custos em euros ser uma parte integral da análise de risco, deveria também ser feita uma análise sobre os diferentes tipos de consequências das falhas. Por exemplo, embora se tenha atribuído um valor a uma vida humana, a sua perda pode não ser aceitável (mesmo que se trate de um evento altamente improvável), pelo que o foco preferencial em termos de medidas de mitigação do risco poderá ser outro.

Por último, um aspeto que é relevante analisar é a probabilidade de falha/colapso estrutural. Os códigos utilizados no dimensionamento de estruturas consideram geralmente uma determinada probabilidade de falha e são baseados numa relação entre as consequências expectáveis versus a probabilidade da sua ocorrência.

Um valor de probabilidade frequentemente utilizado é de 0,01% de probabilidade de colapso (valor que foi adotado neste estudo mas que poderia ser inferior para estruturas de maior importância). No entanto, como se pôde verificar, a probabilidade de haver uma paragem total de funcionamento da estrutura (nomeadamente, se houver uma falha por rotação do terreno, uma falha total dos pilares de suporte ou um colapso estrutural) pode aumentar significativamente (assim como as consequências correspondentes) se estiverem presentes fontes de incerteza que não tenham sido tidas em consideração no dimensionamento. Embora este estudo tenha sido feito apenas com base num caso teórico, é importante notar que, para o sistema considerado, a estimativa da probabilidade de colapso estrutural tendo em conta as variáveis geotécnicas e hidrológicas é cerca de 10% superior à probabilidade de colapso estrutural geralmente considerada em estudos estruturais.

Referências

OECD. (2013). *Health status - Life expectancy at birth - OECD Data*. Obtido em 01 de 2016, de https://data.oecd.org/healthstat/life-expectancy-at-birth.htm

Olanrewaju, O. S. (2013). *Apply Safety Risk and Reliability Analysis of Marine System*. Xlibris Corporation.

Pearl, J. (1988). *Probabilistic inference in intelligent systems*. Morgan Kaufmann Publishers.

Rackwitz, R., Lentz, A., & Faber, M. (2005). Socio-economically sustainable civil engineering infrastructures by optimization. *Structural safety*, 187-229.

Rubinstein, R. Y., e Kroese, D. P. (2008). *Simulation and the Monte Carlo Method, 2nd Edition*. Wiley.

World Bank. (2015). GDP per capita, PPP (current international $), World Development Indicators database.