

PROBLEMÁTICA E ANÁLISE DA EROÇÃO DAS MARGENS DE UM CURSO DE ÁGUA. EXEMPLO DE APLICAÇÃO AO RIO NEIVA

Problematic and Analysis of Streambank Erosion. Case Study of Rio Neiva

HÉLDER MAGALHÃES ⁽¹⁾ e RODRIGO MAIA ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil,
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, hmaga@fe.up.pt

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

Resumo

A erosão das margens é um processo que ocorre naturalmente em todos os cursos de água. Este processo resulta do dinamismo natural que caracteriza todos os rios, traduzindo-se numa constante adaptação do rio à sua envolvente, e numa busca incessante por novos estados de equilíbrio. Durante este processo de adaptação, a interacção entre o escoamento e os seus elementos delimitadores, nomeadamente as margens, sofrem alterações. Estas alterações traduzem-se, na maioria dos casos, num incremento das tensões actuantes nas margens, ocorrendo a erosão das mesmas quando este incremento supera a tensão resistente do material.

Neste trabalho, procede-se a uma avaliação dos principais fenómenos responsáveis pela erosão das margens de um troço do rio Neiva junto à foz, efectuando-se uma estimativa da taxa de erosão das margens nos locais identificados e uma proposta de medidas de mitigação de erosão. A previsão da taxa de erosão foi realizada utilizando o método BANCS (*Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment*), Rosgen (2001a), tendo este método sido complementado pela determinação da categoria de rio segundo o sistema de classificação de rios naturais do mesmo autor (Rosgen, 1994), e pela avaliação da estabilidade lateral do canal através da classificação modificada de Pfankuch (Pfankuch, 1975 e Rosgen, 2001b). Essa avaliação permitiu validar e justificar as medidas de mitigação propostas.

Palavras-chave: Erosão das margens, taxa de erosão, tensão actuante, reabilitação de margens.

Abstract

Streambank erosion is a natural process that is present in all natural rivers. This process is a result of the river dynamics, which gives the river the ability to adapt to its surroundings and to achieve new equilibrium stages. During the adaptation process, the way in which the flow interacts with the streambank is altered and, in most cases, leads to an increase of the shear stress along those elements. The removal of the streambank material, and therefore the streambank erosion, occurs when the shear stress acting at the banks exceeds the resistance of the material.

The current work presents an assessment of the phenomenon behind streambank erosion in an estuarine reach of the river Neiva as well as an estimate of the streambank erosion rate in the identified problematic areas, and a proposal of mitigating measures, where necessary. Streambank erosion rate was determined using the BANCS (*Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment*) Rosgen (2001a), being complemented by means of the determination of the river category using the classification of natural rivers also proposed by Rosgen, as well as of the evaluation of the lateral stability of the river channel by the modified Pfankuch procedure (Pfankuch, 1975 and Rosgen, 2001b). That evaluation enabled to validate and justify the mitigation measures proposed.

Keywords: Streambank erosion, erosion rate, shear stress, streambank restoration.

1. Enquadramento Geral

O conhecimento dos factores que influenciam e propiciam o modo como se desenvolve a erosão das margens num determinado troço de rio é essencial para se conseguir compreender de forma conveniente a problemática da erosão das margens. A quantificação das solicitações nas margens e a determinação da taxa de erosão previsível para uma determinada margem, tem uma importância acrescida nessa problemática, pois permitirá aferir o grau de resistência do material da margem às acções do escoamento.

Só assim, conhecendo-se todos os fenómenos intervenientes no processo de erosão, é que se poderá adequar a melhor estrutura ou técnica de mitigação de erosão num determinado rio, ou troço em particular.

Este tipo de abordagem foi aplicada num troço estuarino do rio Neiva, situado no Litoral Norte de Portugal, que se desenvolve numa extensão de cerca de 46 km e cuja bacia hidrográfica tem uma área de 242 km². A zona estuarina, com uma extensão de cerca 2 km, inicia-se junto ao açude de S. Tecla, Figura 1, tem uma sinuosidade moderada, e está inserida numa extensa planície aluvial.

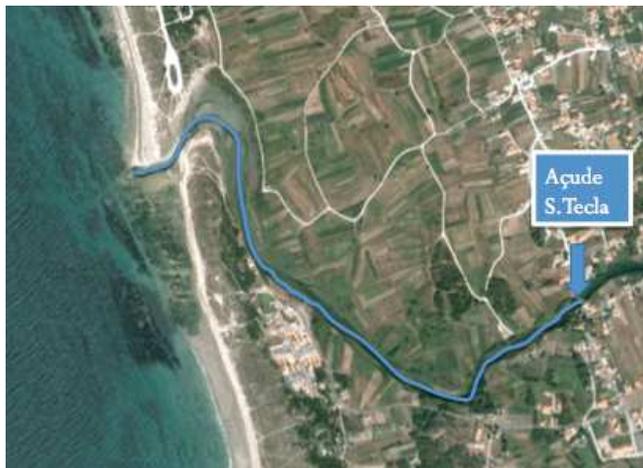


Figura 1. Identificação da zona estuarina do rio Neiva (linha a azul).

2. Local de Estudo

O estudo da erosão das margens incidiu sobre um troço final da zona estuarina, com cerca de 600 m de extensão, onde são mais visíveis sinais de erosão das margens, e que são assinalados na Figura 2. A zona murada da margem esquerda (M.E.) corresponde a um local onde já anteriormente tinha ocorrido uma intervenção.



Figura 2. Troço estudado, com a identificação dos diferentes tipos de situações encontrados.

Analisando ainda a Figura 2, pode aferir-se que existe um nítido contraste ao nível da utilização do solo em cada uma das margens.

Na margem direita (M.D.), desenvolvem-se exclusivamente actividades agrícolas, enquanto a margem esquerda (M.E.), é bastante urbanizada, havendo mesmo habitações muito próximas da linha de água. Nesta margem, desenvolvem-se também, mas com menor importância, actividades agrícolas que se estendem mesmo até à margem.

A M.E. é também utilizada para o desenvolvimento de actividades desportivas, nomeadamente pesca e canoagem, esta última potenciada pela existência do Clube Fluvial.

3. Caracterização do Troço Analisado

A caracterização do troço analisado incidirá essencialmente sobre o canal de escoamento e as margens.

No canal de escoamento existem vários locais onde existe a acumulação de sedimentos na zona central do canal (barras). Essas formações, no entanto, só estão emersas nos períodos de caudal mais reduzido, Figura 3.



Figura 3. Acumulação de sedimentos na zona central do canal de escoamento.

Relativamente ao material do leito do canal, pode constatar-se que, genericamente, a granulometria diminui de tamanho de montante para jusante, sendo maioritariamente composto por areia grossa em profundidade, enquanto que à superfície o material varia entre gravilha média e areia contendo também seixos, Figura 4.



Figura 4. Granulometria e tipo de material do leito.

A cobertura vegetal das margens é abundante tanto na camada superficial como no talude, podendo ser constituída tanto por plantas herbáceas de várias espécies (Figura 5), como por árvores, algumas de grande porte. A vegetação ripícola também é abundante nas margens e apresenta grande vigor e altura cobrindo uma grande extensão do troço (Figura 5).

Porém, a faixa de vegetação ripícola junto às margens varia consideravelmente de largura, podendo ser de apenas algumas dezenas de centímetros ou de alguns metros.

A geometria e o material das margens são praticamente constantes ao longo de toda a zona percorrida: as margens apresentam uma altura média entre 2 e 2,5 m e ângulos de talude elevados (Figura 6), por vezes próximos dos 90°. O material das margens é composto por uma elevada percentagem de argila e silte, sendo a camada superficial composta por terra vegetal, Figura 7.



Figura 5. Vegetação característica do trecho estudado.



Figura 6. Geometria das margens.



Figura 7. Material constituinte das margens.

4. Problemática

Os diferentes tipos de actividades que se desenvolvem nos terrenos marginais ao rio criam pressões distintas sobre as margens, o que requererá abordagens diferenciadas ao problema. O facto de existirem actividades agrícolas junto às margens tem um impacto negativo sobre a cobertura vegetal da margem, o que leva a um aumento no risco de erosão da mesma. Também a existência de habitações ou de equipamentos desportivos muito próximos da linha de água, a escassos metros, aumenta consideravelmente o risco de erosão e condiciona à partida o tipo de intervenção a utilizar numa futura reabilitação da margem.

Todas estas actividades interferem com o equilíbrio do rio, pois destabilizam os elementos delimitadores do canal de escoamento, o que desencadeia uma resposta do rio para encontrar um novo estado de equilíbrio.

5. Mecanismos de Erosão

O mecanismo típico de erosão das margens presente no troço de estudo corresponde à remoção do material da base da margem devido à concentração das acções do escoamento. A contínua remoção do material tende a formar cavidades ao longo da parte inferior da margem que, sob a acção contínua do escoamento, se unem e formam consolas, Figura 8. A rotura da margem dar-se-á quando o peso do material suspenso exceder a capacidade resistente do material da margem, levando à sua queda, normalmente, em blocos com cerca de 0,5 a 1 m de extensão, Thorne e Tovey (1981).

No troço estudado, a erosão das margens, em determinados trechos, é potenciada e amplificada pela inexistência de revestimento vegetal junto à base da margem. Na realidade, a presença dessa vegetação contribui efectivamente para aumentar a resistência do material às acções do escoamento, pois o coberto vegetal altera a região de interface entre o escoamento e o material da margem, diminuindo a velocidade do escoamento, o que por sua vez conduz a uma diminuição das tensões actuantes sobre esse material, Gray e MacDonald (1989).

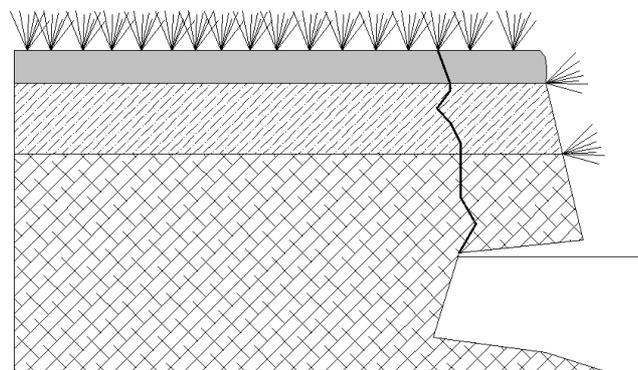


Figura 8. Esquema característico de rotura das margens devido à remoção do material da base. A linha vertical mais escura representa a superfície de rotura do material suspenso, adaptado de Thorne e Tovey (1981).

6. Determinação da Taxa de Erosão

A determinação da taxa de erosão das margens será efectuada utilizando o método BANCS (*Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment*), desenvolvido por Rosgen (2001a).

6.1. Método BANCS

O método BANCS é um método empírico constituído por duas componentes de avaliação, o Bank Erosion Hazard Index (BEHI) e o Near Bank Stress (NBS), que analisam as características da margem e do escoamento respectivamente, e que, com base nas mesmas, permitem atribuir uma de seis categorias de risco possíveis à margem (*Muito Baixo, Baixo, Moderado, Elevado, Muito Elevado e Extremo*).

Com base nas categorias de risco atribuídas a cada uma dessas duas componentes, é possível, através de ábacos adequados, determinar a taxa de erosão da margem.

6.1.1. BEHI (Bank Erosion Hazard Index)

A determinação da categoria de risco do BEHI começa com a recolha de vários dados in-situ sobre as características das margens do rio. Os dados recolhidos são: a altura (do talude) da margem, a distância (do pé do talude ao nível de água correspondente) ao leito dominante - $P_{bkf\ nb}$, a profundidade de penetração das raízes, a densidade de raízes, a percentagem da superfície do talude revestida e o ângulo (do talude) da margem, Rosgen (2001a), Figura 9.

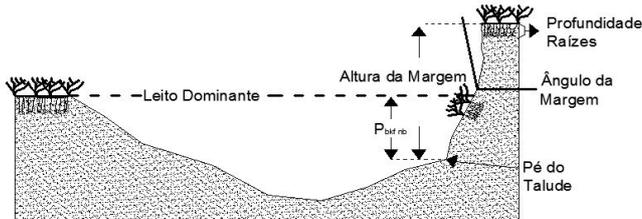


Figura 9. Esquema exemplificativo das características das margens utilizadas pela componente BEHI na elaboração das categorias de risco, adaptado de Rosgen (2001a).

Após a recolha dos dados relativos às características da margem, é possível determinar os diversos parâmetros que permitirão atribuir a categoria de risco à margem. Esses parâmetros são: a relação entre a altura da margem e a distância ao leito dominante; a relação entre a densidade de raízes e a altura da margem; e a densidade ponderada de raízes. Os valores da percentagem de protecção da superfície do talude e o ângulo da margem são também incluídos na determinação da categoria de risco.

6.1.2. NBS (Near Bank Stress)

A formulação proposta por Rosgen para a atribuição da categoria de risco do NBS usa a relação entre tensões de arrastamento e também o valor do gradiente de velocidades.

Para a determinação da relação entre as tensões é necessário calcular as tensões de arrastamento em duas zonas distintas do canal: na zona do talude da margem (τ_{nb}) e na zona do leito restante (τ_{bkf}), referenciadas (em extensão transversal) relativamente à largura de escoamento correspondente ao caudal dominante. Assim, à primeira corresponde um terço da largura do leito dominante, e à segunda a zona do leito restante, Figura 10.

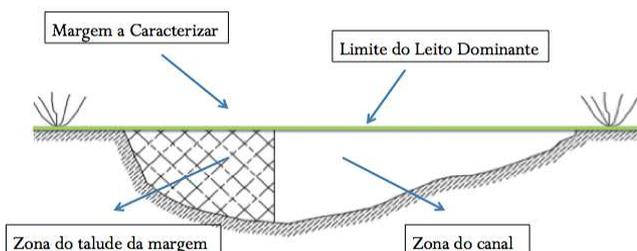


Figura 10. Esquema exemplificativo da localização das zonas onde são avaliadas as tensões de arrastamento para a determinação da categoria de risco da componente NBS, adaptado de Rosgen (2001a).

As tensões de arrastamento, (τ) são genericamente determinadas através da seguinte fórmula, Chow (1964) :

$$\tau = \gamma RS \quad [1]$$

em que:

γ representa o peso volúmico da água, R o raio hidráulico da secção do rio, que, frequentemente, pode ser identificado com a profundidade do escoamento, em metros e S é a inclinação da superfície livre da água, em m/m.

Assim, a tensão de arrastamento junto à zona do talude da margem, τ_{nb} , é obtida por,

$$\tau_{nb} = \gamma d_{nb} S_{nb} \quad [2]$$

E a tensão de arrastamento na zona do leito dominante, τ_{bkf} , é obtida por,

$$\tau_{bkf} = \gamma d_{bkf} S \quad [3]$$

Assim, o cálculo das tensões requer o conhecimento de:

- d_{nb} , profundidade do rio junto ao pé do talude da margem, em metros,
- S_{nb} , inclinação do leito do rio junto ao talude, em m/m,
- d_{bkf} , profundidade média do leito dominante, em metros,
- S , inclinação da linha de energia do rio, (pode ser entendida como a inclinação da superfície livre da água), em m/m.

Para a caracterização do gradiente de velocidades é necessário determinar o perfil de velocidades em várias verticais em diferentes secções ao longo do trecho do rio em estudo, a várias profundidades.

No caso de estudo, em cada secção transversal considerada, foram caracterizados os perfis de velocidade com espaçamento de 0,5 m, tendo sido realizadas medições de velocidade em cada vertical com espaçamento de 10 cm.

6.2. Sistema de classificação de rios naturais

Tal como foi referido no ponto 6.1. a taxa de erosão é determinada utilizando ábacos. A escolha do ábaco adequado está dependente do prévio conhecimento da categoria de rio segundo o sistema de classificação de rios naturais de Rosgen (1994), pelo que se faz aqui uma breve descrição do mesmo.

O sistema de classificação proposto por Rosgen (1994) baseia-se nas características morfológicas do rio para determinar a categoria do mesmo. Essas características são utilizadas para determinar 5 parâmetros: (i) o grau de encaixe do rio no vale (ou *entrenchment*, designação inglesa que é frequentemente utilizada), (ii) a relação entre a profundidade do canal e a largura, para a secção correspondente ao caudal dominante (W/D), (iii) a sinuosidade, (iv) a inclinação da superfície livre da água e (v) a granulometria do material do leito (representado através do D_{50}), que permitem a classificação dos rios nos diferentes níveis de detalhe.

O sistema contempla 4 níveis; contudo, para os objectivos do trabalho apenas foram considerados o nível I e o nível II.

Na Figura 11 está identificada a matriz de classificação utilizada para determinar a categoria de rio para esses dois primeiros níveis.

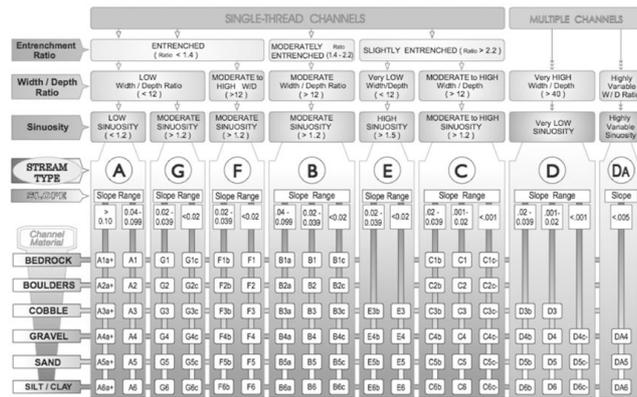


Figura 11. Matriz de classificação utilizada na determinação da categoria de rio dos dois primeiros níveis.

O nível I da classificação envolve os parâmetros (i) a (iii), e permite classificar o tipo de rio em 8 classes principais (A a G); o nível II envolve os parâmetros (iv) e (v), e permite classificar as classes principais em 92 sub-classes.

6.3. Classificação modificada de Pfankuch

A classificação modificada de Pfankuch, elaborada por Rosgen (2001b), tem por base a classificação elaborada por Pfankuch (1975), e associa o grau de estabilidade das margens ao tipo de rio, determinado através do sistema de classificação de rios naturais de Rosgen (1994).

O grau de estabilidade das margens é determinado analisando as 15 características em três zonas distintas da margem: a zona superior da margem, situada acima do nível do leito correspondente ao caudal dominante; a zona inferior da margem, situada abaixo do mesmo nível do leito; e, a zona correspondente ao leito do canal de escoamento, sendo atribuída a cada uma delas uma determinada pontuação. Essa pontuação é depois comparada com a pontuação de uma secção-tipo estável de um rio com características semelhantes às do rio analisado.

O método é designado por classificação modificada de Pfankuch, pelo facto de Rosgen ter utilizado a formulação original de Pfankuch para determinar a pontuação da secção de controlo estável para cada tipo de rio.

A classificação modificada de Pfankuch tem grande interesse no caso de estudo, pois, face às limitações que existem em informação específica sobre a regressão das margens em causa, e avaliada a correspondente taxa de erosão das mesmas, essa classificação permitirá averiguar a existência de relação plausível entre a taxa de erosão e a estabilidade de cada margem. Tal fornecerá informações relativas à adequação do método BANCS para a determinação da taxa de erosão nas margens do rio em estudo e para a escolha das metodologias de estabilização das margens a aplicar.

7. Trechos Considerados

No ponto 2 foi feita uma descrição do troço de rio estudado, onde se identificaram três locais onde existia erosão das margens.

A cada trecho do rio associado a cada um desses três locais (Figura 12) foi aplicada, de forma isolada, a metodologia de determinação da taxa de erosão descrita no ponto 6.



Figura 12. Localização no troço de estudo dos três trechos considerados.

8. Tratamento de Dados e Análise de Resultados

8.1. Sistema de classificação de rios

A recolha das características morfológicas necessárias e o seu posterior tratamento permitiu determinar os 5 parâmetros que permitem a determinação da categoria de rio, Quadro 1.

Com base no sistema de classificação de Rosgen, os trechos de rio podem, assim, ser descritos como tendo uma pequena inclinação, apresentando um traçado meandrizado, situado em canais aluviais com planícies de cheia largas e bem definidas onde o material do leito predominante é de pequeno diâmetro.

Quadro 1. Parâmetros calculados para cada trecho para a determinação da categoria de rio.

	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
<i>Entrenchment</i>	6,61	6,44	7,32
<i>W/D</i>	25,51	29,77	24,23
<i>Sinuosidade</i>		1,1	
<i>Inclinação (%)</i>		0,05	
<i>D₅₀ (mm)</i>	1,35 (Areia)	2,1 (Gravilha)	1,95 (Areia)
<i>Categoria</i>	C5c-	C4c-	C5c-

8.2. Determinação da taxa de erosão

Sabendo a categoria de cada um dos trechos analisados, segundo o sistema de classificação de rios naturais de Rosgen e as categorias de cada um dos componentes do método BANCS, é possível, com recurso ao ábaco adequado, determinar a taxa de erosão esperada para cada um dos trechos.

Assim, para a determinação dessa taxa de erosão, deverá ser feita a introdução da categoria de NBS no eixo das abcissas.

Com base nesse valor, e traçando uma recta paralela ao eixo das ordenadas, obtém-se o ponto figurativo correspondente ao trecho em questão, por intersecção dessa recta com a relativa à categoria de risco de BEHI identificada para esse trecho (Figura 13).

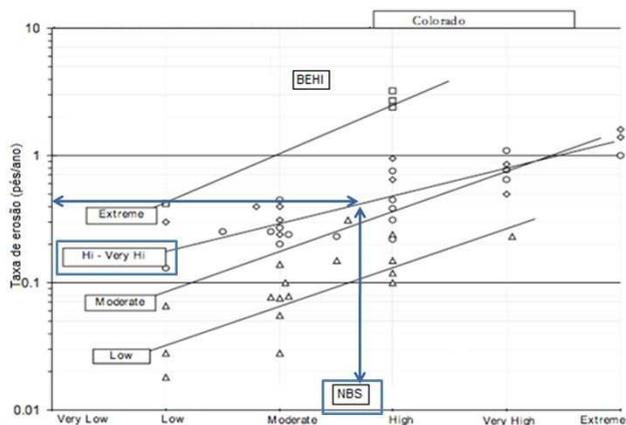


Figura 13. Esquema explicativo da determinação da taxa de erosão.

A ordenada do ábaco correspondente a esse ponto traduzirá o valor da taxa de erosão esperada para a margem (o valor, em pés/ano, deve ser multiplicado pelo factor de 30,48, para conversão em cm/ano). No Quadro 2 estão representadas as categorias de risco de BEHI e de NBS assim como as taxas de erosão previsíveis para cada um dos trechos analisados.

Quadro 2. Categorias de risco BEHI e NBS e taxas de erosão das margens, determinadas para cada um dos trechos do rio considerados.

Trechos	Categoria BEHI	Categoria NBS	Taxa de erosão (cm/ano)
1	Baixo	Elevado	5
2	Elevado/Muito Elevado	Elevado	12
3	Moderado	Elevado	9

8.3. Classificação modificada de Pfankuch

A classificação modificada de Pfankuch tem como objectivo avaliar e relacionar a estabilidade lateral da margem com o tipo de rio. O Quadro 3 resume o somatório obtido na classificação de Pfankuch e a correspondente avaliação da estabilidade da margem, para cada trecho.

Quadro 3. Resultados da classificação modificada de Pfankuch para cada um dos trechos.

Trechos	Somatório	Estabilidade lateral
1	75	Boa
2	84	Boa
3	72	Boa

A aplicação da classificação de Pfankuch permite classificar as margens dos trechos considerados como tendo *Boa* estabilidade lateral (Quadro 3). Na realidade, apesar das categorias de risco do BEHI e de NBS variarem entre *Baixo* e *Muito Elevado*, as taxas de erosão previsíveis para os trechos analisados são relativamente baixas (Quadro 2). Assim, o cruzamento do método BANCS com a classificação modificada de Pfankuch permite concluir que no caso em estudo para as taxas de erosão obtidas (variáveis entre 5 e 12 cm por ano) a estabilidade das margens é boa.

9. Propostas de Protecção das Margens

A protecção e o reforço das margens de um rio tem como objectivo impedir a erosão das margens devido à acção do escoamento. As correspondentes soluções a adoptar devem estar de acordo com o tipo de acções actuantes, com os mecanismos de instabilidade e de rotura presentes no talude da margem, e, ao mesmo tempo, assegurar uma boa integração paisagística e o bom funcionamento do ecossistema ribeirinho.

De um modo geral, o troço analisado apresenta bons sinais de estabilidade, para o que seguramente contribuirá o tipo de material das margens e a existência de uma abundante e variada cobertura vegetal, constituída por plantas herbáceas e por vegetação ripícola. A erosão das margens incide especialmente nos locais onde não existe essa vegetação ripícola, associado a uma má cobertura do talude por plantas herbáceas.

Para a elaboração das soluções a implementar nos trechos de estudos foram adoptadas as recomendações fornecidas por Hoag e Fripp (2002) e por Rosgen (1994).

Hoag e Fripp (2002) propõem algumas estratégias de tratamento, fornecendo também elementos sobre boas práticas de intervenção baseadas na classificação de Rosgen de Nível I, no estado de erosão presente na margem e na altura da margem. Assim, para a categoria de rio do tipo C, presente em todos os trechos analisados (de acordo com o Quadro 1), para um rio que apresenta um alargamento do canal em resultado da erosão junto à base do talude, Hoag e Fripp sugerem que se deve restabelecer ou melhorar a vegetação ripícola existente, considerar uma eventual intervenção para aumento da largura do canal, proceder a um reperfilamento do talude das margens, de modo a introduzir a protecção junto ao pé do talude, e utilizar técnicas de bioengenharia, onde necessário, de modo a aumentar a resistência da margem.

Rosgen, por sua vez, avalia os diversos tipos de rio de acordo com a capacidade de resistência às alterações morfológicas no canal, à potencial recuperação de equilíbrio do canal, à introdução de sedimentos no escoamento, ao potencial de erosão da margem e à influência da vegetação no controlo da erosão.

O aspecto mais importante avaliado para a implementação de uma solução de estabilidade das margens é, sem dúvida, a influência da vegetação no controlo da erosão, que, segundo Rosgen (1994), contribui activamente para a protecção da margem.

Assim, cruzando as informações obtidas em Hoag & Fripp (2002) e em Rosgen (1994), observa-se que ambos referem a importância da vegetação no incremento da estabilidade da margem e no aumento da resistência contra as acções do escoamento.

Deste modo, e com base nas observações realizadas e nos fundamentos teóricos fornecidos por Hoag e Fripp (2002), propõe-se a utilização de vegetação ripícola para estabilizar os trechos 2 e 3, respectivamente na margem esquerda e direita, Figura 14.

No trecho 1, as condições da margem esquerda, nomeadamente a presença de rochas e a relativa profundidade do escoamento verificada, aliadas à proximidade das casas à margem, impedem um reperfilamento da margem assim como a utilização de vegetação ripícola.



Figura 14. Localização no troço estudado das intervenções propostas.

Neste caso, a melhor solução consiste na aplicação de um muro de contenção de troncos de madeira com interposição de estacaria viva. A protecção de margens recorrendo a esta técnica de bioengenharia, é bastante comum, quer seja com ou sem interposição de estacaria viva. Estes muros de contenção são constituídos por troncos de madeira perpendiculares e paralelos à margem, sendo introduzidos entre os espaços dos troncos ramos de árvores, tais como salgueiros ou ulmeiros, juntamente com algum substrato. Como os ramos estão vivos, facilmente ganham raízes.

Os troncos de madeira, com o tempo e devido a estarem em contacto com a água, vão-se decompondo, adicionando mais substrato para a vegetação aí existente, Figura 15.



Figura 15. Aspecto final de um talude protegido com troncos de madeira com interposição de estacaria viva.

A par das intervenções referidas, será também de prever a criação de um corredor vegetal ao longo das margens através da plantação de arbustos ou de árvores de pequeno porte, Figura 16. Esta medida visa, nomeadamente, evitar que as máquinas agrícolas, que trabalham nas explorações adjacentes ao rio, se aproximem demasiado das margens, especialmente da margem direita. O peso das máquinas introduz sobrecargas importantes no talude, que caso já tenha sido instabilizado pode entrar em rotura. A rotura, além de introduzir quantidades importantes de material, também expõe o material do talude que não tem cobertura vegetal e, como anteriormente referido, apresenta menor resistência ao escoamento.



Figura 16. Localização no troço de estudo do corredor vegetal proposto.

9.1. Avaliação do comportamento das soluções Propostas

Esta avaliação tem como objectivo determinar se as soluções propostas conseguem resistir às acções impostas nas margens por diferentes caudais. A escolha destes caudais foi feita tendo em atenção a importância de cada um deles no ciclo fluvial. Assim foram escolhidos o caudal dominante (período de retorno de 2,33 anos), que contribui activamente para a definição da morfologia do rio, e o caudal com um período de 10 anos, que permitirá aferir a resistência das soluções propostas para caudais mais recorrentes. As tensões de arrastamento que se desenvolvem nas margens ($\tau_{m,2,33}$ para o caudal dominante e $\tau_{m,10}$ para o caudal com um período de retorno de 10 anos), serão quantificadas recorrendo à seguinte equação, Chow (1964):

$$\tau = 0,76\gamma R \left(\frac{Un}{R^2} \right)^2 \quad [4]$$

em que,

γ representa o peso volúmico da água expresso em N/m^3 , R o raio hidráulico, obtido dividindo a área da secção molhada (A_m) pelo perímetro molhado (P), n a rugosidade do material, U a velocidade do escoamento em m/s .

Os valores da velocidade média do escoamento na secção, para cada trecho, foram determinados recorrendo ao *software* HEC-RAS, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*.

A determinação da resistência das soluções propostas é uma tarefa difícil, pois cada componente que integra a solução tem uma resistência específica e a resistência total da solução resulta da contribuição de todos os componentes.

Na proposta composta por um muro de contenção de madeira com estacaria viva, a resistência da estrutura depende do material de enchimento, rochas ou terra, e da idade da vegetação.

O Quadro 4 apresenta os valores das tensões actuantes nas margens para cada trecho, para cada um dos caudais considerados, e as tensões resistentes das soluções propostas, de acordo com NRCS (2007).

Quadro 4. Tensões actuantes e resistentes para cada trecho.

Trechos	$T_m 2,33$	$T_m 2,33$	Tensão Resistente (N/m ²)
	(N/m ²)	(N/m ²)	
1	18,09	33,4	Inicial (enchimento rocha) - 190 N/m ²
			Inicial (enchimento terra) - 95 N/m ²
			Final (enchimento rocha) - 287 N/m ²
			Final (enchimento terra) - 240 N/m ²
2	23,53	59,2	Inicial - 60 N/m ²
3	11,40	56,7	Final - 80 a 100 N/m ²

Tal como se pode verificar após a análise do Quadro 4, as propostas são capazes de suportar, e em geral por excesso, as acções correspondentes a escoamentos de caudais com um período de retorno de 2,33 e de 10 anos.

10. Conclusões

O principal objectivo deste estudo consistia em proceder à avaliação e caracterização dos fenómenos de erosão presentes num troço do rio Neiva situado na zona estuarina. Conclui-se que as diferentes actividades que se desenvolvem nas margens da zona estudada criam pressões sobre as margens que aumentam o risco de erosão. Verificou-se que os fenómenos erosivos se concentram junto à base do talude e nos locais onde a margem tem uma deficiente cobertura vegetal, sendo que esta desempenha um papel fundamental na protecção da margem contra os fenómenos erosivos.

A resistência das soluções propostas para os trechos 1 e 3 ultrapassa consideravelmente as tensões actuantes impostas pelo caudal dominante; também para o caso do caudal com um período de retorno de 10 anos, as tensões resistentes das soluções propostas continuam largamente acima das tensões actuantes.

No trecho 2, a resistência da solução proposta assegura, para o caudal dominante, uma resistência cerca de 3 vezes superior à tensão actuante; já para o caudal com um período de retorno de 10 anos, a tensão actuante é próxima da resistência, antevendo-se problemas de resistência para caudais superiores.

Referências

- Chow, V.T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Inc, New York.
- Gray, D. H., MacDonald, A. (1989). *The role of vegetation in river bank erosion*. Páginas 218-223 in M. A. Ports, editor. *Hydraulic Engineering*. Proceedings of the 1989 national conference on hydraulic engineering.
- Hoag, C., Fripp, J. (2002). *Streambank Soil Bioengineering Field Guide for Low Precipitation Areas*. United States Department of Agriculture, National Design, Construction, and Soil Mechanics Center, (USDA-NRCS), Plant Material Center, Aberdeen, Idaho.
- National Resources Conservation Service, (NRCS) (2007), *Technical Supplement 14I, Streambank Soil Bioengineering, Part 654 National Engineering Handbook*.
- Pfankuch, D.J. (1975). *Stream Reach Inventory and Channel Stability Evaluation*. United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, report R1-75-002. Government printing office, No. 696-260/200, Washington. D.C.
- Rosgen, D.L. (1994). *A Classification of natural Rivers*. CATENA Vol. 22, No. 3, Junho 1994, páginas 169-199. Elsevier ScienceDirect.
- Rosgen, D.L. (2001a). *A Practical Method of Computing Streambank Erosion Rate*. 7th Federal Interagency Sediment Conference, Março 24-29, Reno, Nevada.
- Rosgen, D.L. (2001b). *A Stream Channel Stability Assessment Methodology*. 7th Federal Interagency Sedimentation Conference. Março 24-29. Reno, Nevada.
- Thorne, C. R., Tovey, N.K. (1981). *Stability of composite river banks*. *Earth Surface Processes and Landforms* Vol. 6, No. 5, Setembro/Outubro 1981, páginas 469-484, Wiley InterScience.