

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS

JOSÉ PEDRO DOS SANTOS MONGE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Família

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho não seria possível sem o apoio, sugestões e críticas do Professor Doutor Rodrigo Maia, ao qual agradeço a oportunidade de me ter recebido como seu orientando.

Igualmente, ao Eng.^o António Pinto, agradeço não só as horas de revisão e guia, mas também a companhia na visita de campo aos locais de estudo.

À Sara Cardoso agradeço igualmente, pela assistência essencial na visita de campo, nomeadamente no auxílio da identificação das diferentes espécies de vegetação *in situ*.

À empresa Águas do Porto EM, na pessoa da Eng.^a Fernanda Lacerda e da Eng.^a Inês Alves, o meu muito obrigado pela disponibilização de documentos de interesse ao tema do trabalho.

RESUMO

A estabilidade das margens de um curso de rio é altamente influenciável pelo nível de erosão que este sofre. A elevada erosão de margens não protegidas conduz à degradação do solo e pode danificar infraestruturas como vias de comunicação ou mesmo edifícios de habitação.

Para travar ou controlar a erosão das margens de rios podem ser implementadas diversas técnicas de proteção, cada uma com as suas vantagens e desvantagens, dependendo da área a intervir. Estas técnicas podem ser de engenharia tradicional ou mais naturais, designando-se estas últimas como técnicas de bio-engenharia. A escolha da técnica perfeita pode ser uma tarefa difícil.

O objetivo deste trabalho foca-se no estudo da eficiência de soluções de proteção de margens já implementadas. Para o efeito, foram analisadas duas intervenções realizadas no estuário do rio Lima, nas freguesias de Cardielos e Portuzelo, concelho de Viana do Castelo. Analisada a informação de base que originou o desenvolvimento do projeto de intervenção nas margens, foram avaliadas as condições atuais das estruturas existentes e avaliado o seu comportamento face à ocorrência de eventos de cheia. A análise das condições de escoamento, devidas aos eventos de cheia, foi realizada por modelação hidráulica unidimensional, com o auxílio do programa HEC-RAS. Esta análise, conjuntamente com a confrontação dos dados levantados na visita de campo permitiram inferir sobre a eficiência das soluções de proteção escolhidas.

Neste trabalho foi possível perceber que, embora as estruturas possam estar bem dimensionadas, a ocorrência de eventuais problemas não deverá ser negligenciada. Estes problemas são principalmente devidos a falhas de construção ou manutenção inexistente.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, Proteção de margens, Modelação hidráulica, Técnicas de bio-engenharia.

ABSTRACT

River bank stability is highly influenced by the degree of erosion the river suffers. The high rate of unprotected river bank erosion leads to soil degradation and can damage infrastructures like routes or even buildings.

To stop or control river bank erosion, several protection technics can be implemented, each one with its advantages and disadvantages, depending on the area in which to intervene. These technics can be of a more traditional engineering technic or a more natural one like bioengineering technics. Choosing the perfect technic can be a difficult task.

This work's aim is to focus on studying the efficiency of river bank protection solutions already implemented. To do so, two already made interventions in Lima river will be analysed in the parishes of Cardielos and Portuzelo, in Viana do Castelo. After the analysis of the basic information that led to the development of the river bank intervention project, the current situation of the existent structure was evaluated and its behaviour in a flood event. The flow conditions analysis due to flood events was done by one dimensional steady flow modelling with the program HEC-RAS. This analysis along with the data gathered from a field visit will allow an evaluation of the chosen river bank protection technic's efficiency.

This work allowed to realize that although the structures may be well designed, the occurrence of possible problems should not be overlooked. These problems are mainly due to construction problems or the lack of maintenance.

KEYWORDS: Erosion, River bank protection, Hydraulic modelling, Bioengineering technics

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE	1
2 NOÇÕES BASE.....	3
2.1. CARACTERÍSTICAS DO CANAL.....	3
2.1.1. CANAL EM REGIME.....	3
2.1.2. CAUDAL MODELADOR OU DOMINANTE	3
2.2. CARACTERÍSTICAS DA MARGEM.....	3
2.2.1. SOLOS, COMPOSIÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO	3
2.2.2. GEOMETRIA, INCLINAÇÃO E ALTURA DA MARGEM	4
2.2.3. VEGETAÇÃO	5
2.3. CAUSAS DE INSTABILIDADE.....	5
2.4. TIPOS DE ROTURA	6
2.4.1. REMOÇÃO DO MATERIAL DA BASE.....	6
2.4.2. DESLIZAMENTO.....	6
2.4.3. DESLIZAMENTO ROTACIONAL.....	7
2.5. AÇÕES ATUANTES SOBRE A MARGEM	8
2.5.1. VELOCIDADE.....	8
2.5.2. TENSÃO DE ARRASTAMENTO	11
3 ESTADO DA ARTE.....	15
3.1. ÂMBITO.....	15
3.2. BIO-ENGENHARIA COMO ALTERNATIVA AOS MÉTODOS DE ENGENHARIA TRADICIONAL	15
3.3. REABILITAÇÃO DE MARGENS DE RIOS NO AEROPORTO TOWN, SHANGHAI, CHINA	16
3.4. A EFICIÊNCIA DE UMA SOLUÇÃO DE BIO-ENGENHARIA NA REABILITAÇÃO DE MARGENS DURANTE PERÍODOS DE CHEIAS E SECAS: DOIS CASOS DE ESTUDO DE ANGLIA ESTE.....	17
3.5. MONITORIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM PROJETO DE RESTAURAÇÃO FLUVIAL NO CENTRO DE NOVA IORQUE	18
4 ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS	21

4.1. INTRODUÇÃO	21
4.2. SOLUÇÕES DE ENGENHARIA TRADICIONAIS VS BIO-ENGENHARIA	21
4.3. ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS: ENGENHARIA TRADICIONAL	22
4.3.1. ENROCAMENTO OU RIP-RAP	22
4.3.2. GABIÕES / COLCHÃO RENO	24
4.3.3. GEOTÊXTEIS E GEOMALHAS.....	25
4.3.4. ESPORÕES/DEFLECTORES	27
4.4. ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS: BIO-ENGENHARIA.....	28
4.4.1. ESTACARIA VIVA	28
4.4.2. FAXINA	30
4.4.3. HIDROSSEMENTEIRA E SEMENTEIRA	31
4.4.4. BIOROLOS	33
5 METODOLOGIA DE ANÁLISE	35
5.1. INTRODUÇÃO	35
5.2. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO	36
5.2.1. PEDRA	37
5.2.2. MATERIAL VEGETAL VIVO	37
5.2.3. GEOTÊXTEIS OU GEOMALHAS	37
5.2.4. ARAME, GRAMPO DE FERRO E REDE METÁLICA	38
5.3. MODELAÇÃO HIDRÁULICA	38
6 CASOS DE ESTUDO	39
6.1. INTRODUÇÃO	39
6.2. DADOS DE BASE NECESSÁRIOS À MODELAÇÃO HIDRÁULICA.....	40
6.2.1. PERFIS TRANSVERSAIS	40
6.2.2. DISTÂNCIA ENTRE PERFIS	42
6.2.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA	42
6.2.4. CAUDAIS DE ESCOAMENTO	42
6.2.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS	42
6.2.6. OBTENÇÃO DE RESULTADOS	42
6.3. INTERVENÇÃO DE PORTUZELO, NO RIO LIMA	43
6.3.1. CARACTERIZAÇÃO E CAUSA DA INTERVENÇÃO	43
6.3.2. DEFINIÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS	44
6.3.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE PROTEÇÃO DE MARGEM.....	45

6.3.4. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO	47
6.3.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS	52
6.3.6. MODELAÇÃO E RESULTADOS.....	52
6.3.7. ANÁLISE DE RESULTADOS	53
6.4. INTERVENÇÃO DE CARDIELOS, NO RIO LIMA.....	54
6.4.1. CARACTERIZAÇÃO E CAUSA DA INTERVENÇÃO.....	54
6.4.2. DEFINIÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS	56
6.4.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE PROTEÇÃO DE MARGEM	57
6.4.4. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO	59
6.4.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS	63
6.4.6. MODELAÇÃO E RESULTADOS.....	64
6.4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS	65
7 CONCLUSÕES.....	67
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
7.2. TRABALHOS FUTUROS	68
8 BIBLIOGRAFIA	69
9 ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Modo de medição do ângulo de uma margem [Magalhães (2010) – Adaptado de Rosgen (2001)]	4
Figura 2 – Exemplo de instabilidade provocada por remoção do material em solos estratificados [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]	6
Figura 3 - Exemplo de instabilidade provocada [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]	7
Figura 4 - Exemplo de instabilidade provocada por deslizamento rotacional [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]	7
Figura 5 – Distribuição de velocidade em seções típicas de canais (Chow, 1973)	8
Figura 6 – Velocidade média crítica em função do diâmetro mediano de partículas de quartzo (Adaptado de Chang, 1988)	9
Figura 7 – Ábaco de Hjulström (adaptado de Lencastre, 1996)	10
Figura 8 - Distribuição de tensões (Chow, 1959)	11
Figura 9 - Curva de Shields, (adaptado de Cardoso, 1998)	12
Figura 10 – Enrocamento, (Zeh 2007)	23
Figura 11 – Gabiões (Zeh, 2007)	25
Figura 12 – Fibra de coco (Coquim, 2014)	26
Figura 13 – Esporão (Cardielos, 2014)	28
Figura 14 – Estacaria Viva (Zeh, 2007)	29
Figura 15 – Faxina (Zeh, 2007)	31
Figura 16 - Hidrossemeador (Zeh, 2007)	32
Figura 17 – Biorolo vegetado (Georgia Environmental Protection Division, 2011)	34
Figura 18 - Localização das intervenções em estudo no rio Lima (Google Earth, 2003)	39
Figura 19 – Perfis transversais VC1 a VC24 no rio Lima	41
Figura 20 - Fotografia área da zona intervencionada no troço de Portuzelo (Google Earth, 2003)	43
Figura 21 - Intervenção no troço de Portuzelo e sua envolvente (Junho de 2014)	44
Figura 22 – Instabilidade do talude marginal antes da intervenção de reabilitação no troço de Portuzelo (Cortes <i>et al</i> , 2011)	44
Figura 23 - Localização dos novos perfis transversais para modelação hidráulica no troço de Portuzelo	45
Figura 24 – Pormenor da Solução Geral Implementada no troço de Portuzelo (Cortes <i>et al</i> , 2011)	46
Figura 25 – Sapal-juncal perto da intervenção no troço de Portuzelo (Junho 2014)	47
Figura 26 – Fim do caminho de acesso à intervenção no troço de Portuzelo (Junho de 2014)	47
Figura 27 – Zona de remate da estrutura no troço de Portuzelo (Junho, 2014)	48
Figura 28 – Altura desnivelada dos blocos de enrocamento (Junho, 2014)	48
Figura 29 – Zona protegida da estrutura no troço de Portuzelo (Junho, 2014)	49
Figura 30 – Pormenor da estrutura de proteção evidenciando a evolução da vegetação (à esquerda – António Pinto, Novembro 2013; à direita – Monge, Junho 2014)	49
Figura 31 – Vegetação invasiva (Junho 2014)	50
Figura 32 – Comportamento ineficiente da rede metálica, geocélulas e seus constituintes (Junho 2014)	50
Figura 33 - Rede metálica exposta no troço de Portuzelo (Junho 2014)	51
Figura 34 – Fibra de coco, não presente no projeto (António Pinto, Novembro 2013)	51
Figura 35 - Zona de lazer e merendas no troço de Cardielos (2014)	54
Figura 36 - Afluente do rio Lima no troço de Cardielos (2014)	54
Figura 37 - Passagem Hidráulica do afluente do rio Lima no troço de Cardielos (2014)	55

Figura 38 - Instabilidade do talude marginal antes da reabilitação no troço de Cardielos (Cortes <i>et al</i> , 2010)	55
Figura 39 – Fotografia área da zona intervencionada em Cardielos (Google Earth, 2003)...	56
Figura 40 – Localização dos novos perfis transversais para modelação hidráulica no troço de Cardielos	57
Figura 41 - Pormenor geral com especificações dos materiais em do projeto no troço de Cardielos (Cortes <i>et al</i> , 2010)	58
Figura 42 – Excerto da planta geral do projeto no troço de Cardielos (Cortes <i>et al</i> , 2010) ...	59
Figura 43 – Intervenção no troço de Cardielos.....	59
Figura 44 – Estratificação do talude marginal no troço de Cardielos	60
Figura 45 – Esporão no troço de Cardielos	60
Figura 46 – Sedimentação entre esporões.....	60
Figura 47 – Hidrossementeria com falhas no troço de Cardielos (Junho, 2014).....	61
Figura 48 – Estado da vegetação no troço de Cardielos (Junho, 2014)	61
Figura 49 – Rede metálica exposta no troço de Cardielos (Junho, 2014)	62
Figura 50 – Danos no canal do afluente ao rio Lima no troço de Cardielos.....	62
Figura 51 – Rede metálica danificada na reabilitação de Cardielos	63
Figura 52 – Estratificação do solo e linha de árvores	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidades críticas para materiais não coerentes (m/s) (Neill,1973).....	9
Tabela 2 – Velocidades críticas para materiais coerentes (m/s) (Neill,1973)	10
Tabela 3 – Fator corretivo para altura de água $h \neq 1$ m.....	10
Tabela 4 – Fator corretivo para canais em curvas	10
Tabela 5 – Tensão crítica de arrastamento para materiais não coerentes finos (N/m^2), Lane, 1973)	13
Tabela 6 – Tensão critica de arrastamento em materiais coerentes (N/m^2), (Lane, 1973) ...	13
Tabela 7 – Diferentes tipos de material e aspetos a analisar numa monitorização de técnicas de estabilização de margens	36
Tabela 8 – Tensões e Velocidades em Portuzelo antes da reabilitação.....	52
Tabela 9 - Tensões e Velocidades em Portuzelo depois da reabilitação.....	52
Tabela 10 - Tensões e Velocidades em Portuzelo depois da reabilitação (perfis adicionados que modelam a estrutura de proteção)	53
Tabela 11 – Coeficientes de rugosidade, n , e coeficiente da fórmula de Manning-Strickle para Cardielos	64
Tabela 12 - Tensões e Velocidades em Cardielos antes da reabilitação nos perfis base.....	64
Tabela 13 - Tensões e Velocidades em Cardielos depois da reabilitação nos perfis base...	64
Tabela 14 - Tensões e Velocidades em Cardielos depois da reabilitação (perfis adicionados que modelam a estrutura de proteção)	65

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

U_{cr} - velocidade critica [m/s]

g - aceleração da gravidade [m/s^2]

h - profundidade do escoamento [m]

D - diâmetro [cm ou mm]

D_{50} - diâmetro médio característico [cm ou mm]

γ - peso volúmico [N/m^3]

τ - tensão média de arrastamento [Pa ou N/m^2]

R - raio hidráulico [m]

S - inclinação da superfície livre da água [%]

ASCE – American Society of Civil Engineers

DQA – Diretiva Quadro de Água

HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center - River Analysis System

MTEN – Manual Técnico de Engenharia Natural

MZISCMRL - Mapeamento de Zonas Inundáveis em Situação de Cheia nas Margens do Rio Lima

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A erosão das margens de um curso de água é um fenómeno intrínseco a qualquer rio, a que é dada, naturalmente, especial relevância no caso dos leitos aluvionares. A erosão advém das condições de escoamento e da capacidade das margens se adaptarem a ele.

No caso das margens não terem capacidade de suportar essas condições, é necessária a intervenção humana para prevenir o contínuo recuo das mesmas, podendo tal pôr em risco infraestruturas e vias de comunicação. Essa intervenção faz-se aumentando a capacidade de resistência a forças erosivas, na forma de estruturas de proteção de margens que podem ser de um carácter mais técnico e tradicional na engenharia civil ou podem utilizar métodos ambientalmente sustentáveis aplicando técnicas de bio-engenharia. Ambos os tipos de soluções têm de responder a uma série de solicitações para serem consideradas eficazes. Procurou-se, assim, estabelecer critérios que permitam testar a eficácia de uma estrutura de proteção de margens, aplicando e testando uma metodologia a dois casos de estudo.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi a análise de eficiência de estruturas de proteção de margens. Para o efeito, foi obtida informação de base que originou o desenvolvimento do projeto de intervenção em margens de dois casos de estudo específicos. Para tal, a verificação em campo, das condições atuais das estruturas foi um ponto essencial para o desenvolvimento do trabalho. A avaliação do comportamento das estruturas de proteção, tendo em conta, nomeadamente, os eventos de cheia ocorridos desde a sua construção, foi realizada recorrendo ao programa de modelação unidimensional HEC-RAS.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, complementados com diversos anexos.

O Capítulo 2, relativo a Noções Base, aborda todos os conhecimentos técnicos necessários para a boa compreensão deste trabalho. Serão brevemente descritos conceitos como caudal modelador, tipos de solos, tipos de roturas das margens, velocidade de escoamento e tensão de arrastamento.

O Capítulo 3, Estado da Arte, descreve a pesquisa bibliográfica sobre a matéria, abordando diferentes trabalhos sobre avaliação pós-intervenção, nomeadamente em intervenções de reabilitação de margens, aplicadas a casos de estudo em diferentes países.

No Capítulo 4, Estruturas de Proteção de Margens, é incluída uma descrição das estruturas de proteção de margens mais relevantes, analisando as suas vantagens, desvantagens e principais campos de aplicação com especial ênfase na diferenciação entre técnicas de engenharia tradicional e técnicas de bio-engenharia.

No Capítulo 5, Metodologia, são descritos todos os passos a seguir no cálculo de variáveis de caracterização que contribuem para a análise de eficiência de estruturas de proteção. Identificados os pontos-chave na caracterização das margens de um rio, sintetizados os dados intrínsecos a obter, os caudais de cálculo a utilizar e o “*modus operandi*” para a realização da inspeção visual a cada um dos seus componentes.

No Capítulo 6, Casos de Estudo, é aplicada a metodologia a dois casos de estudo, Cardielos e Portuzelo, localidades do concelho de Viana do Castelo. Estes casos correspondem a intervenções que foram alvo de um projeto de Requalificação das Margens do Rio Lima, no qual foram implementadas diferentes estruturas de proteção de margens.

O Capítulo 7, Conclusões, inclui algumas considerações finais sobre o trabalho realizado e sugestões de melhorias para um trabalho futuro.

2

NOÇÕES BASE

Neste subcapítulo irão ser descritas as características e os conceitos necessários à avaliação de eficiência de uma estrutura de proteção de margens, assim como da própria margem e canal em que se inclui. Algumas das diferentes características podem ser obtidas, como se irá perceber, por observação visual *in situ* ou por cálculo hidráulico seguindo a metodologia mais à frente proposta (Capítulo 5).

2.1. CARACTERÍSTICAS DO CANAL

2.1.1. CANAL EM REGIME

Em condições de equilíbrio, os cursos de rio são estáveis, sem elevada erosão ou sedimentação. Um canal encontra-se estável, ou em regime, estando sujeito a erosões e deposições naturais, que se anulam ao fim de um ciclo anual, mantendo, mais ou menos, o mesmo perfil longitudinal. As flutuações da forma do leito de equilíbrio denominam-se de mudanças autogénicas. Aos ajustes decorrentes de mudanças de regime de escoamento ou transporte de sedimentos correspondem as chamadas mudanças alogénicas (Cardoso, 1998).

2.1.2. CAUDAL MODELADOR OU DOMINANTE

Dá-se o nome de caudal dominante àquele que escoando-se permanentemente no leito em situação iminente de transbordo, produziria os mesmos efeitos de erosão e deposição que produz o caudal natural com as suas variações ao longo do ano. O período de retorno deste caudal foi definido pela Federal Highway Administration como sendo de 1,5 anos, baseado em estudos de caso dos Estados Unidos da América. Estudos semelhantes no Reino Unido suportam este valor, no entanto no Canadá o período de retorno é um pouco mais elevado, mantendo-se nos 2 anos. Para Portugal estima-se um período de retorno entre os dois valores apresentados (Cardoso, 1998).

2.2. CARACTERÍSTICAS DA MARGEM

2.2.1. SOLOS, COMPOSIÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO

O solo de uma margem pode ser constituído por materiais coesivos, granulares ou por uma combinação de ambos. Se a margem for constituída pelo mesmo material é designada homogénea. Se apresentar diferentes camadas, trata-se de um solo estratificado. A resistência erosiva do talude marginal à erosão depende diretamente da composição e disposição do solo.

Solos mais coesivos apresentam poucos espaços vazios e uma variação do teor de água pequena em curtos espaços de tempo, o que lhes concede uma maior resistência a tensões de arrastamento. Se forem considerados longos espaços de tempo, a situação altera-se, uma vez que a diminuição do teor em água provoca a dissecação do material nos meses de Verão, em que o escoamento é mais reduzido.

Na presença de solos granulares, a resistência será ditada pela sua coesão e tamanho das partículas. Partículas maiores e melhor consolidadas serão mais dificilmente afetadas por processos de erosão.

A estratificação do solo introduz variações súbitas nas características mecânicas do mesmo. A remoção de material da base do talude levará inevitavelmente a uma situação de instabilidade de quaisquer camadas superiores.

Areias em solos granulares são partículas maiores e mais pesadas do que argilas em solos coesivos, o que à partida lhes proporcionaria uma maior resistência. No entanto, como sofrem de um arranjo mais aleatório, são mais facilmente erodidas.

Pelo contrário, as argilas apresentam uma resistência elevada a eventos de cheia moderados, devido à sua permeabilidade reduzida.

Já em estratos superficiais, em que solos granulares não são tão compactos, nem argilas tão coesas, as argilas são quem mais facilmente se degrada.

2.2.2. GEOMETRIA, INCLINAÇÃO E ALTURA DA MARGEM

A estabilidade de uma margem pode ser influenciada pela geometria da própria margem, nomeadamente a altura da margem e sua inclinação.

Segundo Magalhães (2010), ilustra-se na Figura 1 o modo de medição do ângulo de uma margem fluvial.

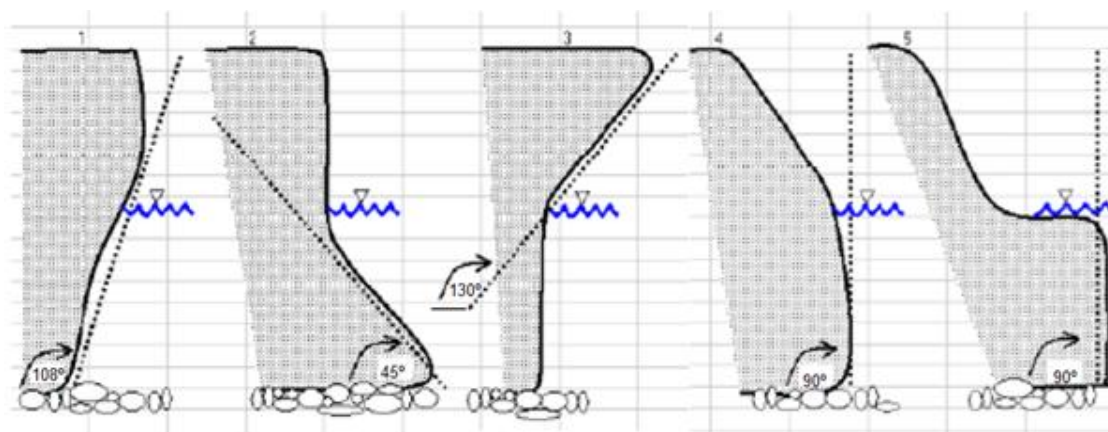


Figura 1 – Modo de medição do ângulo de uma margem [Magalhães (2010) – Adaptado de Rosgen (2001)]

Argilas, devido à sua coesão, formam margens quase verticais ou até ligeiramente superiores a 90°.

Pelo contrário, solos granulares como areias, tendem a manter-se abaixo dos 90°. Em alguns casos em que a presença vegetal, em solos arenosos, apresente elevada densidade de raízes, é possível que a inclinação destes se aproxime dos 90°. Sucessivos eventos de cheia, e consequente erosão dos taludes

devido às elevadas tensões de arrastamento, tendem a verticalizar a margem. É perceptível que esta verticalização acontece porque as tensões máximas são exercidas no pé do talude (Cardoso, 1998).

Os declives de taludes de margens de cerca de 30° são os mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal, permitindo a acumulação de água no solo. O topo do talude deverá ser arredondado, em vez de apresentar uma aresta para permitir o desenvolvimento de vegetação.

Em qualquer tipo de solo pode haver alturas de margem elevadas, sendo este fator independente do tipo de material. No entanto, alturas elevadas são mais comuns em solos argilosos ou mistos do que em granulares, devido ao seu ângulo de atrito interno.

Uma margem alta, juntamente com a vegetação, contribui bastante para a proteção da zona envolvente e das suas infraestruturas. No entanto, uma margem alta com elevada inclinação terá um fator de segurança inferior a uma margem baixa e de inclinação suave.

2.2.3. VEGETAÇÃO

A presença de vegetação contribui bastante para a estabilidade de uma margem. A redução da velocidade da água, juntamente com a estrutura que as raízes criam nos solos, aumentam significativamente a estabilidade da margem. O tipo de vegetação e sua localização altera a sua eficiência. Quando não existe material inerte na base da margem, a vegetação a usar deverá suportar as flutuações do escoamento (emersão e submersão) e tensões de arrastamento decorrentes de eventos de cheias. A vegetação do topo da margem bastará ser suficiente para que consiga reduzir o escoamento superficial, não necessitando da mesma resistência a tensões de arrastamento das anteriores.

A estabilidade proporcionada pela vegetação é afetada por diferentes fatores. Entre eles, tipo e vigor da vegetação, densidade e profundidade das raízes e localização. Em geral, plantas de médio e pequeno porte suportam de forma mais eficaz as margens, aumentando a sua estabilidade.

2.3. CAUSAS DE INSTABILIDADE

Os solos são constituídos por partículas sólidas, água e/ou gás. A água, além de estar presente de forma líquida, pode estar presente como gás, na forma de vapor de água, ou pode fazer parte das partículas sólidas, quando absorvida.

A pressão da água nos poros das partículas sólidas desempenha um papel importante na resistência do solo, uma vez que, a substituição de vazios por água reduz o contato entre as partículas do solo. Um aumento na pressão da água nos poros diminui a resistência do solo e vice-versa (Escameia, 1998).

As margens de cursos de rios podem sofrer instabilidade por vários motivos, que a seguir se enumeram (Magalhães, 2010):

- Aumento da carga sobre a margem;
- Perda de água do material da margem;
- Perda de confinamento do material;
- Saturação do material;
- Perda de estrutura radicular;
- Pontos de passagem (Pontes/Passadiços);
- Obstruções (resíduos/árvores)

2.4. TIPOS DE ROTURA

As causas de instabilidades podem gerar consequências que se manifestam segundo determinados tipos de rotura:

- Remoção do material da base;
- Deslizamento
- Deslizamento Rotacional

2.4.1. REMOÇÃO DO MATERIAL DA BASE

Em margens de material estratificado, o solo é constituído por diferentes camadas alternando entre argilosas e granulares. As camadas granulares, não apresentando coesão, são caracterizadas por uma menor resistência ao escoamento do que as camadas argilosas. Como os fenómenos de erosão são mais intensos na base do talude, poderá dar-se maior remoção de material na base do que no topo do talude, levando à instabilidade da margem, como se mostra na Figura 2.

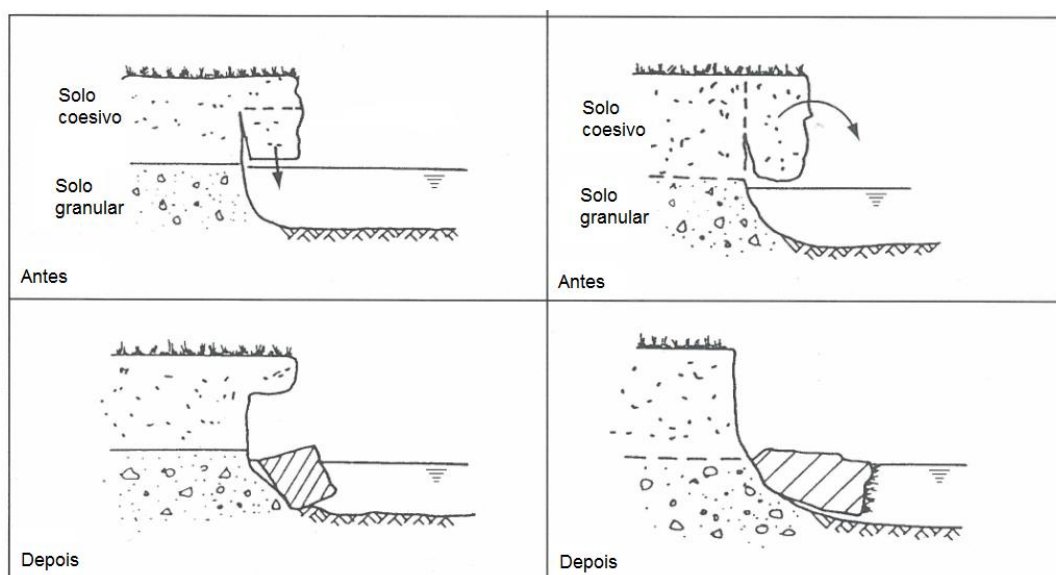


Figura 2 – Exemplo de instabilidade provocada por remoção do material em solos estratificados [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]

Nesta situação, as camadas superiores de material coesivo formam uma consola de material que eventualmente sofrerá ruptura, depositando material na base do talude. Este material irá reforçar a resistência ao arrastamento nessa zona, que só voltará a expor a camada granular quando erodido. O período deste ciclo de remoção e deposição de material dependerá da intensidade dos processos erosivos e da resistência do material da superfície (Magalhães, 2010).

2.4.2. DESLIZAMENTO

No caso de taludes verticais, as superfícies de ruptura são planas, em que o bloco acaba por cair, deslizando sobre um plano ou rodando em torno de uma aresta na base (Figura 3). Este tipo de rotura acontece menos vezes, mas dá-se mais facilmente quando a falha é preenchida com água.

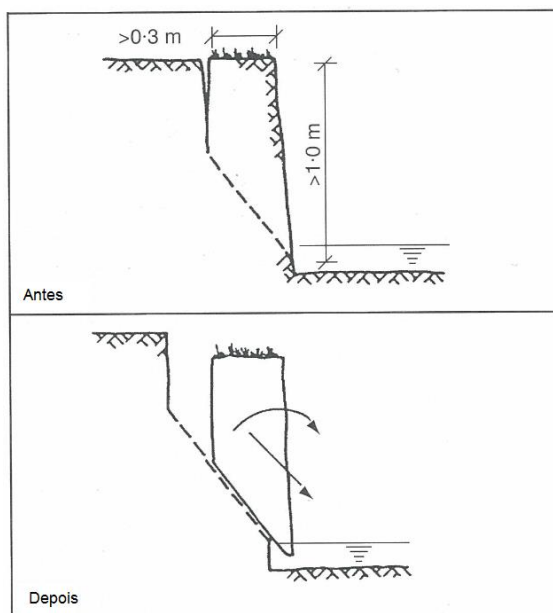


Figura 3 - Exemplo de instabilidade provocada [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]

2.4.3. DESLIZAMENTO ROTACIONAL

Em taludes de margens com alturas moderadas a elevadas ($h > 5\text{m}$), a ruptura por deslizamento rotacional, dá-se em solos homogêneos, e usualmente em materiais coesivos. Esta ruptura é provocada pela remoção de material na base do talude e acontece quando as forças desestabilizadoras são maiores que as resistentes, formando uma curva com ângulo na base do talude maior que o ângulo de repouso do material do solo. O material removido segundo a superfície de corte circular, será introduzido no canal do rio como se ilustra na Figura 4.

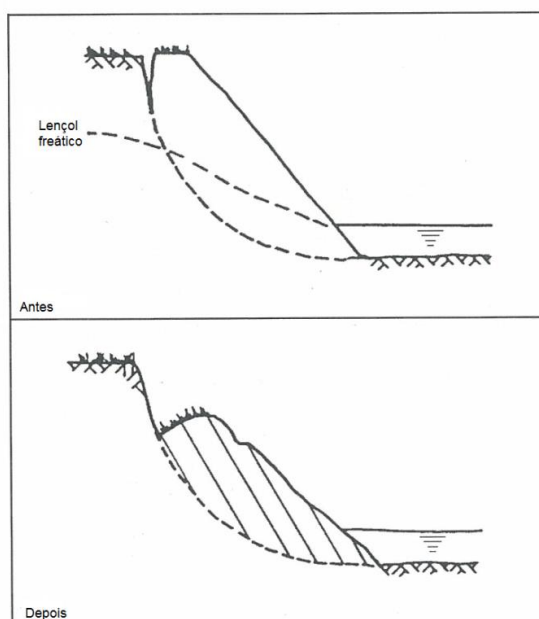


Figura 4 - Exemplo de instabilidade provocada por deslizamento rotacional [Escameia, 1998 (adaptado de Hemphill and Bramley, 1989)]

2.5. AÇÕES ATUANTES SOBRE A MARGEM

2.5.1. VELOCIDADE

A conservação das margens está diretamente relacionado com a distribuição de velocidades na secção transversal, sendo de interesse o cálculo da velocidade crítica.

A velocidade média de um troço é diretamente proporcional à tensão de arrastamento, mas é no entanto, independentemente um bom indicador de erosão. Medindo a velocidade em diferentes alturas num ponto do canal, é possível obter a velocidade média. Na Figura 5 mostra-se a distribuição de velocidade em secções típicas de canais.

A medição da velocidade média em eventos hidrológicos de cheia é aquela que teria mais interesse medir e a que permitia inferir sobre as tensões atuantes. No entanto, por razões de segurança, a obtenção destes dados *in situ* é um processo difícil e portanto evitado. Sendo assim, o cálculo das tensões de arrastamento acaba por ter um papel decisivo no cálculo das forças erosivas.

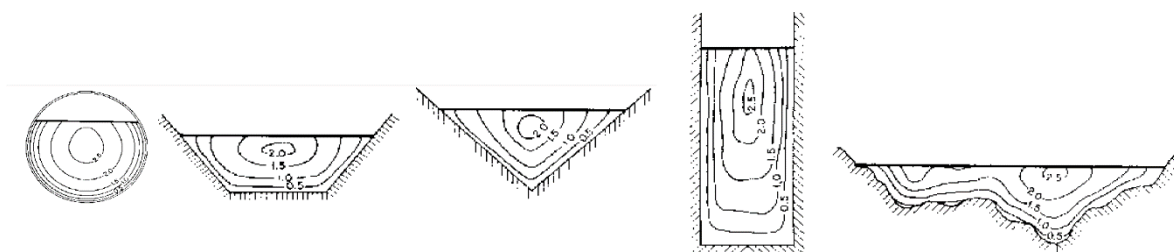


Figura 5 – Distribuição de velocidade em secções típicas de canais (Chow, 1973)

2.5.1.1. Velocidade Crítica

A velocidade crítica é a velocidade máxima até à qual não haverá erosão no leito do canal ou suas margens. Esta velocidade está assim ligada ao tipo de material e traçado do canal, assim como à profundidade do escoamento. Até à data foram propostos muitos critérios e fórmulas para determinar a velocidade crítica, que serão descritos em seguida.

Para escoamentos turbulentos, Goncharov (1964) sugeriu:

$$U_{cr} = \log(8,8 Z) \sqrt{\frac{2g (\gamma_s - \gamma) D}{3,5 \gamma}} \text{ onde } Z = \frac{h}{D} \text{ (Submersão relativa)} \quad (1)$$

Em que:

U_{cr} é a velocidade crítica,

g é a aceleração da gravidade,

h é a profundidade do escoamento,

D é o diâmetro, usando-se usualmente o diâmetro médio característico (D_{50}),

γ é o peso volúmico.

Em 1967, a ASCE (American Society of Civil Engineers – Sociedade Americana de Engenheiros Civis) propôs um critério que relaciona a velocidade crítica com o diâmetro médio característico, aplicável a escoamentos superiores a um metro de profundidade (Cardoso, 1998). Com este critério, sabendo o diâmetro médio das partículas do solo, é possível pela análise do gráfico (Figura 6) obter um intervalo da velocidade média crítica expectável.

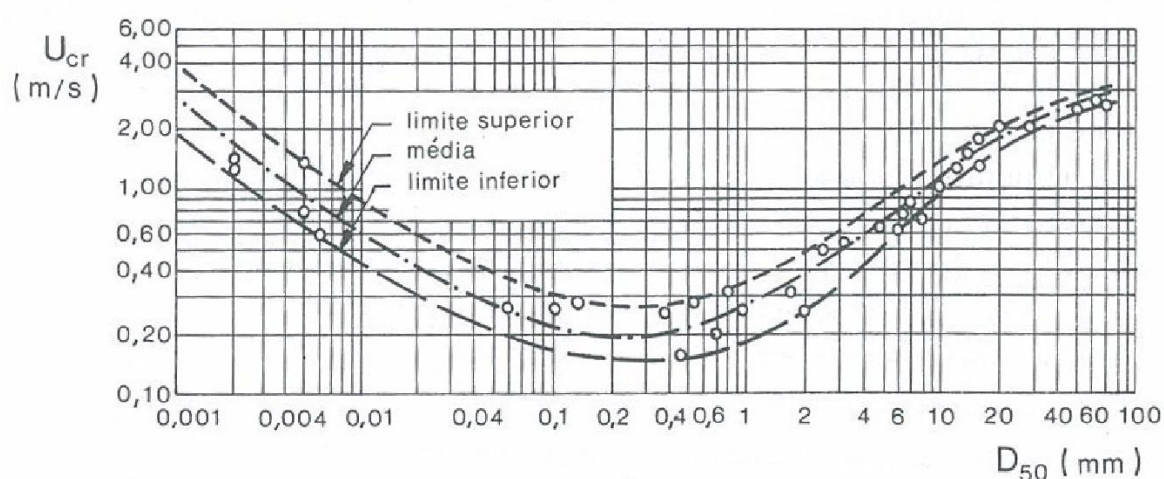


Figura 6 – Velocidade média crítica em função do diâmetro mediano de partículas de quartzo (Adaptado de Chang, 1988)

Neill (1973) elaborou tabelas de obtenção de velocidade crítica para materiais coerentes e não coerentes para diferentes índices de compactação e percentagem de vazios apresentados na Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 (adaptado de Lencastre, 1996).

Tabela 1 – Velocidades críticas para materiais não coerentes (m/s) (Neill, 1973)

Material	Diâmetro (mm)	Velocidade média (m/s)	Material	Diâmetro (mm)	Velocidade média (m/s)
	0,005	0,15		15,0	1,20
Lodo	0,05	0,20	Cascalho fino	25,0	1,40
Areia fina	0,25	0,30	Cascalho médio	40,0	1,80
Areia média	1,00	0,55	Cascalho grosso	75,0	2,4
Areia grossa	2,50	0,65	Cascalho grosso	100,0	2,7
Godo fino	5,00	0,8	Cascalho grosso	150,0	3,5
Godo médio	10,00	1,00	Cascalho grosso	200,0	3,9
Godo grosso	15,00	1,20			

Tabela 2 – Velocidades críticas para materiais coerentes (m/s) (Neill,1973)

Natureza do leito	Muito pouco compactado com uma relação de vazios de	Pouco compactado com uma relação de vazios de	Compactado com uma relação de vazios de	Muito compactado com uma relação de vazios de
Material coerente do leito	2,0 a 1,2	1,2 a 0,6	0,6 a 0,3	0,3 a 0,2
Argilas arenosas (percentagem de area inferior a 50%)	0,45	0,90	1,30	1,80
Solos com grandes quantidades de argilas	0,4	0,85	1,25	1,70
Argilas	0,35	0,80	1,20	1,65
Argilas muito finas	0,32	0,70	1,05	1,35

Tabela 3 – Fator corretivo para altura de água $h \neq 1$ m

Altura média em m	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Fator corretivo	0,8	0,9	0,95	1,0	1,1	$\cong 1,1$	1,2	$\cong 1,2$

Tabela 4 – Fator corretivo para canais em curvas

Grau de sinuosidade	Retilíneo	Pouco sinuoso	Moderadamente sinuoso	Muito sinuoso
Fator corretivo	1,00	0,95	0,87	0,78

Por fim, Hjulström (1935) elaborou um ábaco relacionando diâmetros de partículas e velocidades de médias de escoamento (Figura 7).

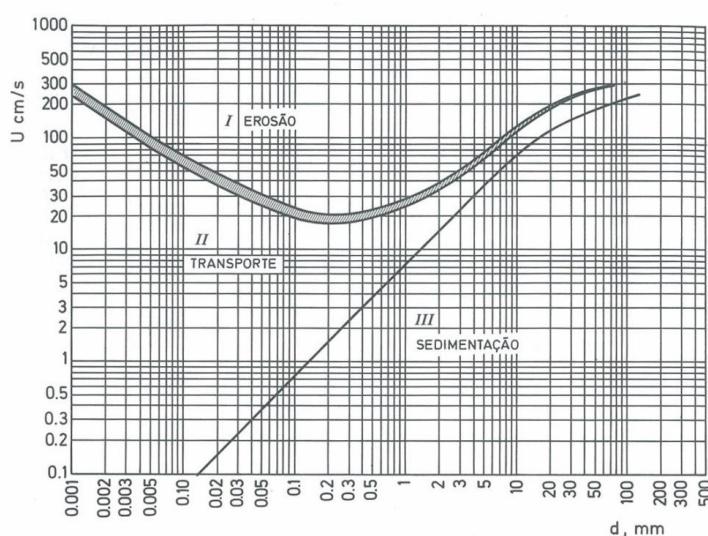


Figura 7 – Ábaco de Hjulström (adaptado de Lencastre, 1996)

Na zona I – Erosão, as partículas mais facilmente erodíveis terão diâmetros variando entre 1,0 e 0,1 mm. Para valores inferiores, estabelece-se uma certa coesão que dificulta a erosão; para valores superiores, o peso da partícula assegura a estabilidade.

Na zona II – Transporte, as partículas postas em suspensão são transportadas.

Na zona III – Sedimentação, para velocidades inferiores à linha de separação das zonas II e III, as partículas em suspensão começam a depositar-se.

Tome-se como exemplo uma partícula de 0,2mm de diâmetro. Esta começará a ser erodida para $U = 18\text{cm/s}$ e começará a ser depositada para a velocidade $U = 1,5\text{cm/s}$.

2.5.2. TENSÃO DE ARRASTAMENTO

As tensões tangenciais representam a força por unidade de área que é exercida numa partícula sobre o efeito do escoamento. Esta tensão pode ser calculada pela fórmula de Chow (1959):

$$\tau = \gamma R S \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2)$$

Em que,

τ é a tensão média de arrastamento, expresso em N/m^2 ,

γ é o peso volúmico da água, em N/m^3 ,

R é o raio hidráulico em m,

S é a inclinação da superfície livre da água expressa em m/m.

Através do estudo em modelos matemáticos, foi possível obter uma distribuição da tensão de arrastamento, para canais trapezoidais, em função da largura sobre altura do escoamento. Nestes canais, a tensão nas margens tende para 75% da tensão no canal, como se mostra na Figura 8 (Chow, 1959).

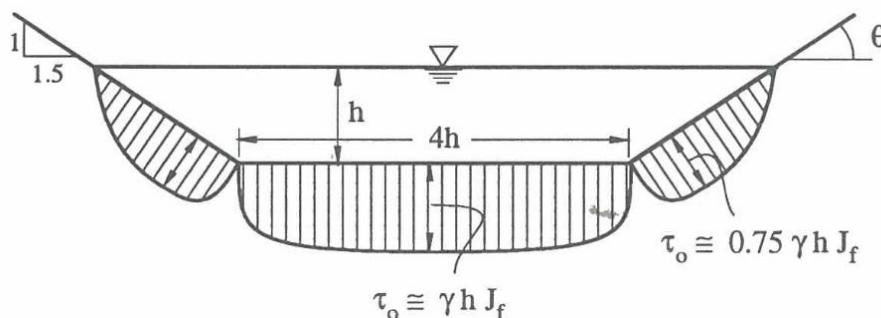


Figura 8 - Distribuição de tensões (Chow, 1959)

2.5.2.1. Tensão Crítica de Arrastamento

Entende-se por tensão crítica de arrastamento, a tensão que, tal como na velocidade crítica, inicia o movimento da partícula.

A curva de Shields (1936) foi estabelecida para escoamento em leitos de areia, com grãos de dimensão uniforme de modo a estimar a tensão crítica de arrastamento.

$$Y_{cr} = f(X_c) \quad (3)$$

$$X_c = Re = \frac{u_{cr} D}{\nu} \quad \text{e} \quad Y_{cr} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (4)$$

Em que:

u_{cr} é a velocidade crítica de arrastamento,

D é o diâmetro,

ν é o coeficiente de viscosidade cinemática da água,

τ_c é a tensão de arrastamento crítica.

Estas variáveis X_c e Y_{cr} são interdependentes, obrigando a cálculos iterativos, o que levou à definição de um parâmetro adimensional, que toma a seguinte forma:

$$\frac{d}{\nu} \sqrt{0.1(s-1)gd} \quad \text{em que,} \quad s = \rho_s/\rho \quad (5)$$

No diagrama de Shields este parâmetro traduz-se por um conjunto de linhas oblíquas e paralelas (ver Figura 9). Determinado este parâmetro, a tensão crítica obtém-se intercetando a linha correspondente a esse valor com a curva de Shields (Cardoso, 1998).

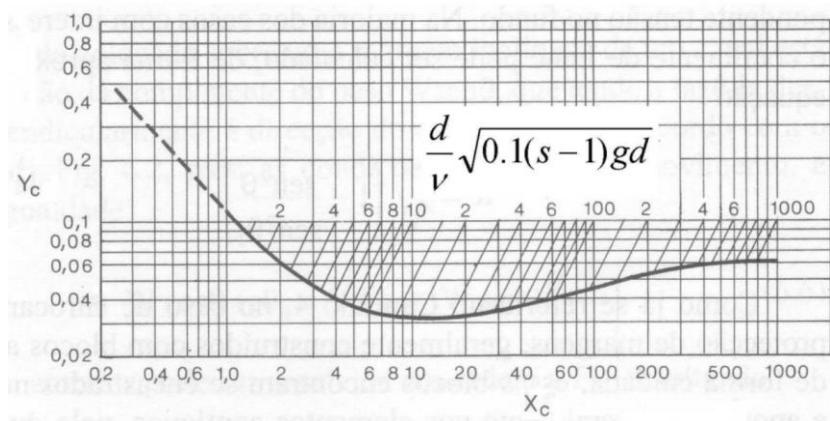


Figura 9 - Curva de Shields, (adaptado de Cardoso, 1998)

Em alternativa, Lane (1953) propõe alguns valores para tensões de arraste em diferentes materiais (Tabela 5 e Tabela 6).

Os valores indicados referem-se a canais retilíneos. Para canais com poucas curvas (terreno ligeiramente acidentado) tome-se 0,90 dos valores indicados; para uma quantidade média de curvas (terreno medianamente acidentado) tome-se 0,75; para canais com muitas curvas (terreno muito acidentado) tome-se 0,60 (Lencastre, 1996).

Em materiais não coerentes grosseiros, no fundo do leito toma-se como valor do projeto $\tau_0 = 8 * d_{75}(cm)$ (sendo d_{75} o diâmetro ao qual, na curva de compactação granulométrica, correspondem 75%, em peso, de materiais de diâmetro inferior), enquanto que nos taludes toma-se $\tau_0^* = K * \tau_0(cm)$ (sendo K função do ângulo de repouso do material e do ângulo dos lados com a horizontal)

Tabela 5 – Tensão crítica de arrastamento para materiais não coerentes finos (N/m^2), Lane, 1973)

D ₅₀ (mm)	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
Água clara	1,2	1,3	1,5	2,0	2,9	6,0
Água com sedimentos finos em pequena quantidade	2,4	2,5	2,7	2,9	3,9	8,1
Água com sedimentos finos em grande quantidade	3,8	3,8	4,1	4,4	5,4	9,0

Tabela 6 – Tensão crítica de arrastamento em materiais coerentes (N/m^2), (Lane, 1973)

Natureza do leito	Muito pouco compactado com uma relação de vazios de	Pouco compactado com uma relação de vazios de	Compactado com uma relação de vazios de	Muito compactado com uma relação de vazios de
Material coerente do leito	2,0 a 1,2	1,2 a 0,6	0,6 a 0,3	0,3 a 0,2
Argilas arenosas (percentagem de areia inferior a 50%)	2,0	7,7	16,0	30,8
Solos com grandes quantidades de argilas	1,5	6,9	14,9	27,5
Argilas	1,2	6,1	13,7	25,9
Argilas muito finas	1,0	4,7	10,4	17,3

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ÂMBITO

A análise de eficiência de estruturas de proteção de margens ajuda a perceber se os objetivos definidos em projeto para a estrutura de proteção proposta foram atingidos. Esta avaliação pode ser feita relativamente a atributos físicos ou características biológicas. Para efeitos deste trabalho, a análise irá focar os atributos físicos dos canais e zona ribeirinha envolvente que foi alterada com a implantação do projeto. O período de análise de eficiência de uma estrutura de proteção de margens pode variar de meses a anos, dependendo muito da velocidade de resposta do sistema fluvial à reabilitação aplicada. Normalmente, técnicas de engenharia tradicional atingem a sua capacidade máxima de proteção logo após a sua construção, enquanto técnicas de bio-engenharia podem demorar alguns meses até atingir este ponto. Este fator impõe assim um compromisso de análise depois de a estrutura estar finalizada. Embora haja cada vez mais uma dedicação à proteção de margens fluviais, a sua avaliação a longo prazo tem sido negligenciada. O tempo e custo que uma avaliação acarreta, levam a que muitas vezes seja visto como dispensável numa proposta de reabilitação fluvial. No entanto, se uma estrutura de proteção falhar, é possível que venha a acarretar ainda mais custos e perdas financeiras. A monitorização é essencial para a deteção preventiva de problemas antes de se tornarem demasiado complexos ou dispendiosos de corrigir. Não havendo este processo de avaliação de eficiência, torna-se difícil melhorar o desenvolvimento de estruturas de proteção de margens fluviais.

Embora se encontrem registos de esforços de manutenção e monitorização das estruturas de proteção de margens, a avaliação da eficiência das mesmas é na maior parte das vezes inexistente.

Em seguida apresentam-se alguns trabalhos já realizados na área de monitorização e avaliação de intervenções de reabilitação de margens.

3.2. BIO-ENGENHARIA COMO ALTERNATIVA AOS MÉTODOS DE ENGENHARIA TRADICIONAL

LI e Eddleman (2002) investigaram diferentes métodos de bioengenharia como alternativa aos métodos de engenharia tradicional. Este estudo analisou e organizou diferentes abordagens a estabilização de margens de rios de um ponto de vista de engenharia tradicional, de geomorfologia fluvial, e de técnicas de bioengenharia, discutindo prós e contras, apresentando alternativas e elaborando uma matriz custo-resistência para as mesmas.

Nos Estados Unidos da América, os métodos tradicionais de proteção de margens têm sido utilizados como prática comum. Estes métodos eram escolhidos pela sua ação imediata de proteção de infraestruturas e terrenos logo após construção. No entanto, devido a um crescimento de consciência ambiental, estes feitos têm sido repensados. De facto, nem sempre estas estruturas são a melhor

escolha. A canalização de leitos, por exemplo, aumenta velocidades e remove vegetação do local, o que dificulta a existência de um ambiente ecológico ideal. Além da perda dos benefícios ecológicos, os métodos tradicionais podem transferir a erosão para outra área do escoamento em vez de solucionar completamente o problema. O equilíbrio dinâmico de um escoamento é assim afetado quando métodos tradicionais são usados para forçar condições não naturais.

No estudo desenvolvido por Li e Eddleman (2002), foi usada uma matriz custo-resistência para indicar, de forma concisa, o custo e a resistência atingida por um determinado método num determinado intervalo de custo.

Kondolf e Micheli (1995) apresentaram a importância na avaliação de critérios para diferentes objetivos de projetos. Para efeitos de proteção de margens, eles sugeriram recolher dados, durante pelo menos 10 anos para monitorização de um projeto, sobre:

- secção transversal do canal;
- elevação da superfície da água;
- rácio entre a largura e altura do canal;
- taxa de erosão do leito e margens;
- perfil longitudinal;
- fotos aéreas.

Além disso, num projeto de bio-engenharia, também devem ser obtidos cortes de material vivo para monitorizar o crescimento da vegetação, essencial ao sucesso da intervenção. De facto, dados sobre a sobrevivência de plantas e o seu crescimento têm sido os parâmetros mais usados nesta avaliação (Manci, 1989).

No contexto de estruturas de proteção de margens tradicionais, o sucesso é atingido unicamente por controlo das ações atuantes do escoamento, sem conhecimento das causas que estão provocar o desequilíbrio. Foi chegado à conclusão, por estes autores, que a análise da geomorfologia fluvial mostra um melhoramento promissor incorporando informações importantes no dimensionamento da estrutura de proteção. Através do conhecimento desenvolvido nesta área, nos últimos anos, estes autores concluem que as técnicas de bio-engenharia oferecem alternativas viáveis às tradicionais, com melhor comportamento físico e ecológico.

3.3. REABILITAÇÃO DE MARGENS DE RIOS NO AEROPORTO TOWN, SHANGHAI, CHINA

Li *et al* (2006) utilizaram técnicas de bio-engenharia em conjunto com técnicas tradicionais de modo a obter uma estrutura forte, sustentável economicamente e benéfica de um ponto de vista socioeconómico para reabilitar as margens do rio, junto ao Aeroporto Town em Shanghai (China).

Após a reabilitação das margens com métodos de bioengenharia no Aeroporto Town, o seu sucesso tinha de ser avaliado. Esta avaliação foi feita através da caracterização de parâmetros ecológicos incluindo características das raízes e a sua biomassa, espécies e diversidade de habitat, humidade do solo e tensão de corte. A vegetação é essencial para a reabilitação da margem e proporciona cobertura que previne erosão superficial enquanto garante a ligação do solo com as suas raízes. Fibras nas raízes aumentam a força de corte do solo, transferindo tensões de corte para resistência à tração aumentado a interface de fricção. O aumento da força de corte está diretamente relacionado com o aumento de biomassa nas raízes (Ziemer, 1981). Foi feita uma comparação entre o comprimento original de estacas e o comprimento e biomassa de novas raízes das estacas, 10 meses após a implementação do projeto. Comparando as técnicas, relativamente à biomassa total das raízes, foi obtida a seguinte

classificação, por ordem decrescente: faixa de vegetação com ramos (brush layer), estacaria + faxinas vivas, faxinas vivas, estacaria viva.

Para a medição da força de corte, o melhor método é ensaio de corte rotativo *in situ* (vane test). O ensaio consiste em introduzir no terreno um conjunto de quatro lâminas retangulares soldadas a uma vara central, esta última ligada à superfície do terreno. Posicionado o aparelho à profundidade desejada é-lhe comunicado um momento torsor que o obriga a rodar, produzindo um cilindro de solo que se destaca do terreno envolvente (Matos Fernandes, 2006).

A força de torsão é relacionada com a força de corte do solo não drenada através de um fator dependente de dimensões e forma do cilindro. A humidade no solo também foi avaliada *in situ*. Estes parâmetros foram também analisados num local de controlo, ou seja, uma margem sem reabilitação, antes e depois da obra a fim de determinar o efeito da água na força dos solos e as diferenças após aplicação da estrutura da proteção.

Os resultados demonstraram uma proporção inversa entre humidade no solo e força de corte para o tipo de solo nas margens do rio. Os resultados mostraram também que não havia diferenças óbvias em humidade no solo entre o local de controlo e o local de pós-reabilitação. No entanto, o local pós-reabilitação mostrou significativamente maior força de corte comparado com o controlo, evidenciando claramente uma melhoria na proteção da margem (Li *et al*, 2006).

Em suma, embora os autores mencionem que será necessário adquirir mais experiência relativamente a técnicas de bio-engenharia, foi possível concluir que: uma matriz de raízes no solo melhora a sua estabilidade estrutural ao longo do tempo; a integridade ecológica e biodiversidade dos sistemas aquáticos são restauradas e protegidas; a utilização de vegetação viva tem a habilidade de se auto-regenerar e melhorar o seu desempenho autonomamente; um ambiente natural, é radicalmente alterado em termos visuais, com o uso de técnicas tradicionais.

3.4. A EFICIÊNCIA DE UMA SOLUÇÃO DE BIO-ENGENHARIA NA REABILITAÇÃO DE MARGENS DURANTE PERÍODOS DE CHEIAS E SECAS: DOIS CASOS DE ESTUDO DE ANGLIA ESTE

O aumento de eventos de cheia extremos como consequência de mudanças climáticas pode ter impacto na estabilidade dos leitos de argila em Anglia de Leste no Reino Unido. Estes leitos foram aprofundados e retificados, o que provoca instabilidade marginal. Anstead *et al* (2012) desenvolveram um estudo de avaliação da eficiência da estrutura de proteção - entrançados vivos de salgueiro - que foram implantados para solucionar este problema em Março de 2009.

Como alternativa a métodos tradicionais de proteção de margens, foi escolhido entrançado vivo de salgueiro para ser aplicado em dois locais do rio Stour, um assente em base de cascalho e o outro assente em base de argila. Como este é um local de pastagem animal e passeios públicos, esta solução é esteticamente agradável e ecologicamente sustentável.

Para avaliação da instalação, um ano depois, foi estudada a performance biológica da estrutura de proteção adotada. Esta performance foi medida pela sobrevivência de estacas e extensão e aumento de números dos rebentos. Jarvis and Richards (2008) e Anstead and Boar (2010) referem que a sobrevivência do entrançado vivo de salgueiro e seu crescimento na fase inicial é essencial para a eficiência a longo termo do revestimento vivo. Para este efeito, foram retiradas amostras biológicas seis vezes por mês, entre Maio e Outubro de 2009, e ensaios geomorfológicos, em Novembro de 2009, e depois dos eventos de cheias, em Março de 2010.

Em ambos os locais foi verificado que as estacas brotaram entre 4 a 8 semanas depois da instalação e todas estavam vivas um mês depois. Em Setembro de 2009 só cerca de 17% das estacas estavam vivas, localizando-se estas nas camadas mais inferiores da margem. Em Outubro de 2009, o comprimento dos rebentos tinha aumentado, nas camadas inferiores, cerca de 35%. No geral, foi concluído que o local em cascalho portou-se inicialmente melhor que o de argila, no entanto, devido a uma maior taxa de mortalidade no final da época, os seus comprimentos eram 45 vezes menores na camadas superiores (em relação ao local com argila) e 2 vezes menores nas camadas inferiores.

Em termos geomorfológicos foi notada mais erosão e sedimentação no local de base em cascalho. Em ambos, a erosão manteve-se nas camadas superiores do entrançado vivo e foi diminuído para jusante. No local de cascalho foi verificada mais deposição do que erosão.

A seca durante as primeiras semanas após a implementação da estrutura dificultou a formação de raízes e sua estabilização ao solo. No final, a tendência de crescimento biológico mostrou-se ineficaz sem o desenvolvimento de um sistema de raízes, não garantindo sobrevivência a longo termo.

Os autores deste artigo referem que o entrançado vivo, se implementado com a devida precaução, pode ser eficaz na proteção de margens de rios em Anglia Este. Esta técnica tem o potencial para produzir uma proteção duradoura e eficaz contra a instabilidade marginal, provocado por intervenção humana e elevadas mudanças climáticas, mas necessita de manutenção redobrada nas suas fases de crescimento iniciais. Os autores referem também alguns fatores críticos a ter em atenção para uma boa eficácia desta técnica: o material do solo da margem é importante, nomeadamente no que se refere à sua capacidade de retenção de água e em solos granulares; a plantação terá de ser feita mais profundamente do que noutros solos. Com estas recomendações, é possível aferir que à aplicação de entrançado vivo deverá, assim como outras técnicas à base de vegetação, ser dada prioridade em relação a técnicas tradicionais.

3.5. MONITORIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM PROJETO DE RESTAURAÇÃO FLUVIAL NO CENTRO DE NOVA IORQUE

Buchanan *et al* (2012) produziram um estudo considerando um projeto implementado em 2005 num rio em Nova Iorque. O principal objetivo do projeto é a proteção de áreas com erosão acentuada. No projeto foi utilizada uma abordagem de bio-engenharia, acreditando que a mesma poderia estabilizar eficazmente a margem, além de permitir restabelecer o habitat aquático e dissipar o efeito de futuras cheias. Neste caso, a monitorização incidiu sobre 10 secções transversais de modo periódico.

A ausência de um sistema de avaliação *standard*, causou algum debate relativamente ao sucesso ou falha do projeto implementado, o que originou este trabalho, que tenta aplicar uma avaliação multifacetada de avaliação da eficiência da estrutura de proteção.

A performance deste projeto foi avaliada segundo objetivos definidos, usando tanto avaliações qualitativas como quantitativas. Onde havia informação pré-construção, as mudanças foram analisadas por comparação com as condições pós-construção. Onde não havia essa informação pré-construção, foram avaliados indicadores geomorfológicos, hidrológicos e ecológicos, segundo: comparação com a zona referência do rio usado no dimensionamento original; comparação entre os indicadores pós-construção ao longo do tempo e à medida que o canal se ajusta às medidas de proteção. Esta análise tomou lugar aproximadamente 2 anos após a construção.

A análise feita, mostrou que se manifestou instabilidade da margem. Embora estes resultados não fossem esperados, também se verificaram alguns resultados positivos a curto prazo como: criação de

um habitat aquático viável; estabilização do canal nas zonas envolventes à intervenção; estabilidade em cerca de 80% da vegetação.

O diagnóstico das razões que não permitiram a eficácia total da proteção não foi claro por causa dos resultados disparem obtidos, pela falta de dados pré-construção e pelo facto de que a estratégia de monitorização foi formulada *à posteriori*.

Num esforço para mitigar os mesmos efeitos negativos em futuros projetos de restauração, as seguintes recomendações foram sugeridas pelos autores:

- Porque os projetos de índole natural podem demorar alguns anos a atingir o seu papel de proteção e estabilização, deverá ser tida especial atenção à estabilização da margem logo a seguir à sua construção. Neste sentido, a aplicação de geotêxteis tem oferecido soluções promissoras.
- Em solos granulares de leitos dinâmicos, a simples análise de tensões de arrastamento pode ser insuficiente para estimar a estabilidade do canal. Deverão ser aplicados métodos mais robustos de análise de transporte de sedimentos para compreender se a formação de novos pontos de erosão ou sedimentação não porão em risco outras áreas.
- Critérios de objetivos de sucesso deverão ser projetados juntamente com o dimensionamento da estrutura de proteção, que não deixem dúvidas para a avaliação do sucesso ou falha da reabilitação.

Por fim, cada projeto de reabilitação de margens deverá ser tomado com uma experiência cujos resultados irão contribuir para uma crescente base de dados de conhecimento relativo a medidas de proteção, permitindo melhorar a sua eficácia a cada repetição.

4

ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS**4.1. INTRODUÇÃO**

Erosão de margens é o processo de remoção de partículas de solo que, em escoamentos fluviais em equilíbrio, seria potencial e temporalmente compensado pela deposição de solo. Um quadro de erosão agravada pode provocar degradação do terreno, instabilidade fluvial, deslizamentos de solo e, nas piores circunstâncias, pôr em risco a estabilidade de edifícios ou vias de comunicação.

Fenómenos de instabilidade marginal agravados podem levar à necessidade da proteção das margens. As estruturas de proteção de margens devem garantir proteção da erosão por ação do escoamento, permitindo controlar onde se dá a erosão e a deposição de sedimentos. O controlo de modificações no canal permite estabilizar as margens e quaisquer regressões da frente marginal. Garantindo a capacidade de suportar cheias, é garantida a proteção de quaisquer áreas de habitação, recreação ou comunicação na zona envolvente.

Estas estruturas podem ser divididas em dois grandes grupos, soluções de engenharia tradicional ou soluções de bio-engenharia.

4.2. SOLUÇÕES DE ENGENHARIA TRADICIONAIS VS BIO-ENGENHARIA

Perante a necessidade de escolha de uma estrutura de proteção de margens, a escolha da solução mais adequada deverá ser uma decisão bem ponderada. Durante muitos anos verificou-se pouca sensibilidade para avaliar as questões ambientais em intervenções fluviais, sendo maioritariamente utilizadas soluções de engenharia tradicional. Estas são constituídas principalmente por enrocamento, betão e outros materiais correntes em engenharia civil. Embora se destaquem por oferecer uma maior resistência às ações do escoamento, imediatamente após a sua aplicação, e pela sua facilidade de implementação, o impacto ambiental criado é muito elevado em relação às soluções de bio-engenharia.

As soluções de bio-engenharia surgem, assim, como resultado da maior sensibilidade para os fatores ambientais e cumprimento da DQA (Diretiva Quadro da Água). Embora necessitem de mais manutenção, através do uso de vegetação e componentes naturais, o correspondente impacto ambiental é drasticamente reduzido. No entanto, a resistência às ações do escoamento em eventos de cheia é menor, podendo até decorrer alguns anos até que seja atingida a resistência projetada (através do crescimento da vegetação). Aliado a estes aspetos, são técnicas mais económicas. Por norma, soluções de bio-engenharia desempenham o seu papel de proteção, melhorando também a biodiversidade local, o que permitiu que estas soluções tenham tomado, nos dias que correm, uma grande importância.

Descrevem-se, em seguida algumas estruturas de proteção de margens com interesse para o trabalho desenvolvido nesta tese, nomeadamente as implementadas nos casos de estudo mais à frente abordados. Embora as técnicas sejam mencionadas individualmente, adequando-se a diferentes tipologias de uso e intervenções, isso não impede que em projeto de reabilitação se use uma combinação de técnicas de modo a maximizar a eficácia de proteção e obtenção de objetivos.

Para cada técnica foi realizada uma caracterização que engloba os seguintes pontos:

- Descrição
- Campo de Aplicação
- Material Necessário
- Vantagens
- Desvantagens
- Período de Execução
- Tensões e Velocidades Resistentes
- Manutenção

4.3. ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS: ENGENHARIA TRADICIONAL

4.3.1. ENROCAMENTO OU RIP-RAP

4.3.1.1. Descrição

O enrocamento é uma estrutura de proteção de margens fluviais, consistindo na colocação de pedras nas margens (Figura 10). Rip-rap, é um tipo de enrocamento, em que as pedras são colocadas de maneira aleatória. A colocação do rip-rap segue um procedimento, começando por pedras de menores dimensões, que funcionam como camada de filtro entre solo e camada superior. Esta camada de filtro pode ser substituída por um filtro geotêxtil.

4.3.1.2. Campo de aplicação

Margens de rios com elevado transporte sólido e velocidade de corrente. Em taludes com grande inclinação, é possível a cobertura com pedras de grandes dimensões, construindo numa inclinação ligeiramente superior ao declive do talude, não sendo, no entanto, aconselhável a aplicação em taludes superiores a 65°. Quando as pedras são de grandes dimensões, a colocação é feita uma a uma, obtendo uma superfície o mais rugosa possível. A altura da obra fica assim limitada à extensão das máquinas. Em caso de condições difíceis, as pedras podem fixar-se com cabos ou estacas colocadas previamente.

4.3.1.3. Material Necessário

Nas estruturas de proteção de margens com enrocamento são usadas pedras compactas de dimensões que podem variar entre os 10 e 100 cm. O seu peso e dimensões obrigam a existência de maquinaria pesada que as consiga movimentar. Na utilização da camada filtrante, deverá também ser necessário um geotêxtil ou material fino.

4.3.1.4. Vantagens

O enrocamento oferece um efeito protetor imediato após colocação e caracterizam-se por uma necessidade de manutenção reduzida.

4.3.1.5. Desvantagens

Em zona de difícil acesso com máquinas, essenciais à sua execução, a técnica torna-se de difícil aplicabilidade.

Nos cursos de rio em que o regime do escoamento seja acentuado, a base está sujeita a escavação.

4.3.1.6. Período de execução

Esta proteção de margens pode ser realizada em qualquer período do ano.

4.3.1.7. Tensões e Velocidade Resistentes

O enrocamento apresenta diferentes valores de tensões resistentes, dependendo do seu diâmetro médio. Assim, para diâmetros de pedras de 15 cm teremos uma resistência a tensões de arrastamento até 125 Pa e velocidades até 3 m/s. Com 45 cm de diâmetro esses valores podem chegar até 380 Pa e 4,8 m/s. (Fischenich, 2000)

4.3.1.8. Manutenção

O controle periódico para fins de manutenção deverá ser feito anualmente após período de cheias.

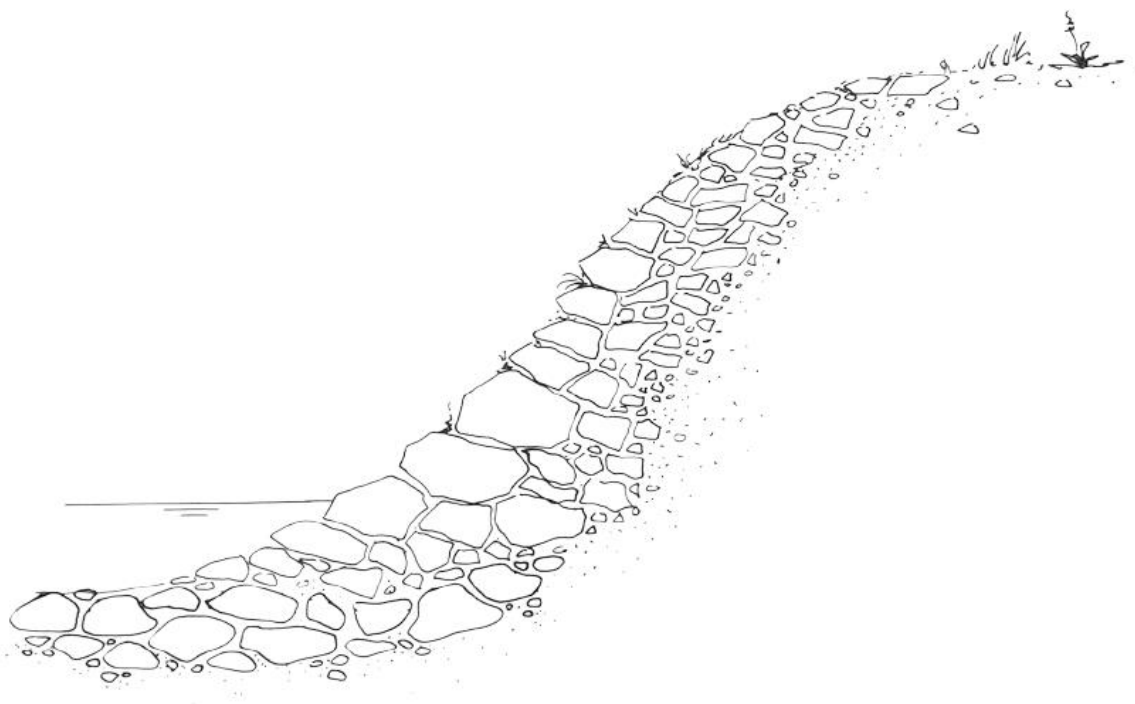


Figura 10 – Enrocamento, (Zeh 2007)

4.3.2. GABIÕES / COLCHÃO RENO

4.3.2.1. Descrição

Bloco retangular, com rede em arame galvanizado reforçado de malha hexagonal (Figura 11). O peso destes blocos é conseguido pelo enchimento com material inerte, geralmente pedra de pedreira ou seixo. A estrutura monolítica garante integridade enquanto mantém flexibilidade e permeabilidade. Esta solução pode ser assente diretamente sobre o terreno, não necessitando de fundações e pode ser usada como estrutura de suporte de taludes com declive muito acentuados ou na proteção longitudinal de margens fluviais. Os gabiões além de poderem adquirir a forma de caixa ou saco, podem também ser usados como tapete no fundo do leito ou na margem, formando um colchão reno. Estes colchões podem ser constituídos também por vegetação e protegidos por um geotêxtil.

4.3.2.2. Campo de aplicação

O seu campo de aplicação passa pela defesa longitudinal e/ou transversal de curso de água e taludes em erosão. Os gabiões podem ser aplicados em taludes praticamente verticais.

4.3.2.3. Material Necessário

São necessários à sua aplicação, gabiões pré-fabricados com espessura de 15-30cm de arame galvanizado ou plastificado com largura da malha inferior a 10 cm. São usadas pedras com diâmetro ligeiramente superior ao da malha, normalmente seixos de rio, e podem ser usados sistemas de fixação ou ancoragem.

4.3.2.4. Vantagens

Esta solução permite uma execução rápida e simples, podendo utilizar material disponível no local da obra, tem efeito de contenção imediato. Os gabiões são estruturas flexíveis e permeáveis e permitem a sistematização de margens muito íngremes ou em zonas com limitado espaço de intervenção

4.3.2.5. Desvantagens

A de material rochoso não característico do local pode vir a tornar-se uma solução cara. O impacto visual da zona é afetado pela carácter artificial da estrutura.

4.3.2.6. Período de execução

Esta proteção de margens pode ser realizada em qualquer período do ano

4.3.2.7. Tensões e Velocidade Resistentes

A rede metálica permite que esta estrutura resista a elevados esforços de tensão, mantendo o material inerte no interior. A capacidade de resistência a tensões de arrastamento dos gabiões pode chegar até aos 500Pa (Fischenich, 2000).

4.3.2.8. Manutenção

A manutenção pode ser dispensada, sendo necessária só em caso de dano da estrutura.

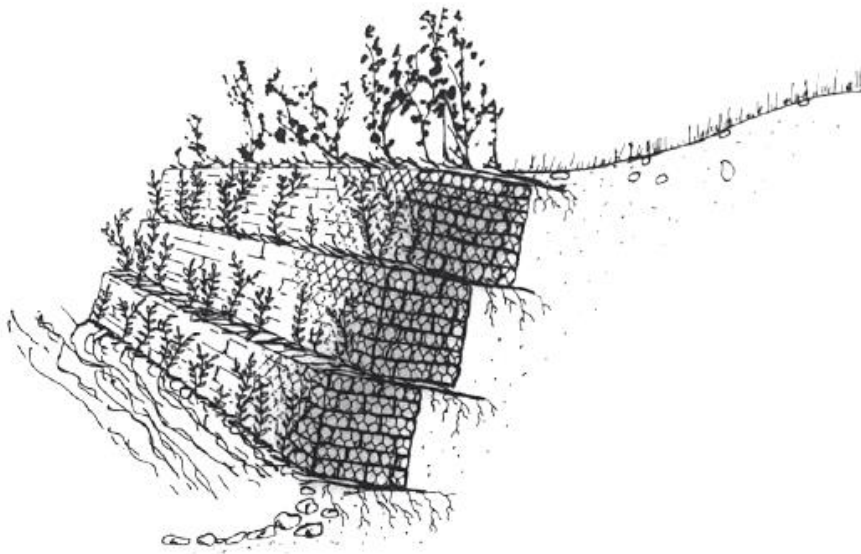


Figura 11 – Gabiões (Zeh, 2007)

4.3.3. GEOTÊXTEIS E GEOMALHAS

4.3.3.1. Descrição

Os geotêxteis e mantas orgânicas, quando utilizadas como sistema de cobertura superficial do solo que permitem o desenvolvimento de uma sementeira, plantações de plantas enraizadas ou estacaria, podem-se incluir no mesmo grupo. Estes facilitam a colonização vegetal, reduzindo a perda de água do solo por exposição solar e evitar a ação de fenômenos erosivos. A escolha da manta ideal para um determinado problema, e uma pregagem eficaz entre malhas, com boa fixação nos seus limites, criará um micro clima propício ao desenvolvimento das espécies vegetais.

4.3.3.2. Campo de aplicação

A sua aplicação pode ser incluída em taludes de declive moderado (25° - 45°), onde houver erosão laminar, na correção de ravinamento e na consolidação de linhas de drenagem.

4.3.3.3. Material Necessário

Os geotêxtis podem variar em biomantas, biotecidos e bioredes.

Nas biomantas as fibras estão desagregadas mas acondicionadas por um material estruturante de tal forma que formam um material homogêneo, mesmo sem invólucro.

Os biotecidos são caracterizados pelas suas fibras entrançadas.

Nas bioredes, as fibras individuais estão ligadas nos pontos de contacto por nós.

É possível obter mantas de bastante diversificadas como de fibra de coco (Figura 12), cânhamo, cana, palha, juta, de diversas espessuras e diferentes resistências, combinadas ou não com redes ou malhas sintéticas ou metálicas.

4.3.3.4. Vantagens

A sua execução simples e rápida é um ponto forte que aliado à ação protetora imediata, ação filtrante eficaz, elasticidade e permeabilidade constituem as principais vantagens desta técnica de proteção de margens.

4.3.3.5. Desvantagens

A principal desvantagem deste tipo de proteção de margens é a durabilidade reduzida e limitada de grande parte dos materiais constituintes.

4.3.3.6. Período de execução

A execução desta técnica pode ser feita durante o ano inteiro, mas preferencialmente antes do Inverno.

4.3.3.7. Tensões e Velocidade Resistentes

Os geotêxtis, embora sujeitos a alterações devido ao tipo de matérias, tem uma capacidade resistente para velocidades de escoamento entre 0.55 m/s e 2.5 m/s e dependendo do seu sistema de fixação, podem resistir a tensões de arrastamento até aos 290 Pa.

4.3.3.8. Manutenção

A monitorização deverá incidir principalmente no primeiro ano após aplicação, a fim de controlar a estabilidade da estrutura e das suas pregagens.



Figura 12 – Fibra de coco (Coquim, 2014)

4.3.4. ESPORÕES/DEFLECTORES

4.3.4.1. Descrição

Esporões são obras colocadas perpendicularmente à margem, com altura e largura crescente, à medida que se aproximam dela. As estruturas deste género aplicadas na proteção de margens fluviais são ancoradas na margem, garantindo a perfeita fusão entre obra-margem para evitar a sua destruição em eventos de cheia. Podem ser constituídos por madeira ou pedra eliminando eficazmente fenómenos de erosão, e facilitando a deposição (Figura 13).

4.3.4.2. Campo de aplicação

Estas estruturas podem ser usadas em rios onde seja necessário aumentar a razão entre escoamentos rápidos e lentos, aprofundar poças já existentes, remover ou criar bancos de desovação, aprofundar ou estreitar o canal e, finalmente, para criar um caminho sinuoso de curso de rio reabilitado.

4.3.4.3. Material Necessário

O material de enchimento é principalmente constituído por enrocamento, podendo em certas instâncias, ser complementado com troncos de madeira, ramagem morta ou viva e estacaria. O tamanho dos blocos de pedra depende muito da velocidade da corrente e do nível de cheia, podendo ser utilizados blocos de pedra de peso entre 500 kg e 3 toneladas.

4.3.4.4. Vantagens

Estas estruturas de proteção de margens tornam-se parte integrante da margem fluvial. A presença de vegetação consolida esta estrutura, reduzindo a velocidade da água e providenciando melhores capacidades de resistência.

4.3.4.5. Desvantagens

Caso não estejam bem dimensionadas, os esporões e deflectores podem causar erosão excessiva na zona da margem a jusante.

4.3.4.6. Período de execução

A execução desta técnica pode ser feita durante o ano inteiro.

4.3.4.7. Tensões e Velocidade Resistentes

A resistência dos esporões e deflectores será a mesma do enrocamento.

4.3.4.8. Manutenção

Após eventos de cheia, poderá ser importante a avaliação da estrutura, havendo a possibilidade de ter de se recolocar algum enrocamento no seu lugar original.



Figura 13 – Esporão (Cardielos, 2014)

4.4. ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS: BIO-ENGENHARIA

4.4.1. ESTACARIA VIVA

4.4.1.1. Descrição

Esta técnica de proteção de margens utiliza troços de troncos ou ramos de plantas lenhosas, sem estrias nem ramagem lateral, cravadas no solo de modo a fortalecer o talude. A densidade, comprimento e diâmetro a utilizar depende da resistência pretendida, aumentando o efeito estabilizador da técnica com o comprimento em profundidade a que se desenvolverão as raízes. Quando é necessário instalar vegetação em enrocamento, as estacas adaptam-se muito bem, permitindo o desenvolvimento vegetal. (Figura 14)

4.4.1.2. Campo de aplicação

A estacaria, sendo a sua principal função a fixação de mantas, fascinas ou entrançados, podem ser aplicadas em taludes e margens de curso de rios com inclinação recomendável até 20°. Em locais sem problemas graves de instabilidade e com demasiada humidade no solo, as estacas podem ser usadas para prevenir ou estabilizar pequenos deslizamentos de terra. As estacas controlam a erosão das margens, estabelecendo uma cobertura vegetal capaz estabilizar taludes.

4.4.1.3. Material Necessário

As estacas vivas são, normalmente, de salgueiro, tamargueira ou freixo com capacidade de propagação da vegetação. Os comprimentos variam entre os 30 a 100 cm, com diâmetros de 1 a 5 cm.

4.4.1.4. Vantagens

O baixo custo, a facilidade de recolha de material, quando presente na zona, a execução simples e ação eficaz de estabilização favorecem a evolução de ecossistemas.

4.4.1.5. Desvantagens

O enraizamento das estacas nem sempre é garantido e um adequado desenvolvimento do sistema radicular das estacas limita a consolidação e estabilidade das margens de cursos de rio.

4.4.1.6. Período de execução

A execução deverá limitar-se ao período de repouso vegetativo, exceto em períodos de temperaturas negativas.

4.4.1.7. Tensões e Velocidade Resistentes

A capacidade resistente máxima da estacaria é atingida rapidamente e pode chegar até velocidades de escoamento entre 2 m/s (NRCS, 1996) e 3 m/s (Fischenich, 2000). A sua resistência às forças de arrastamento pode atingir entre 300 Pa (Cortes, 2004) e os 400 Pa (Fischenich, 2000)

4.4.1.8. Manutenção

Esta técnica de proteção de margens necessita de uma poda nos tempos iniciais para favorecer o desenvolvimento das suas raízes e de desbastes caso seja necessário controlar crescimentos exagerados.

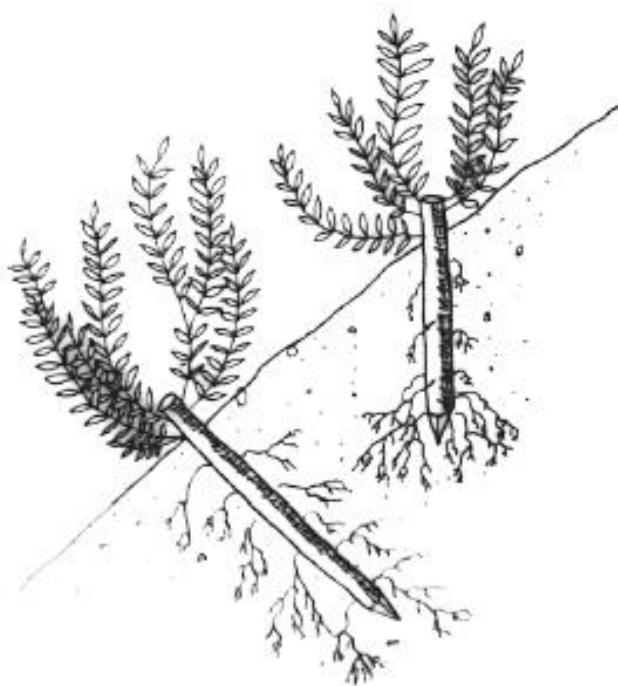


Figura 14 – Estacaria Viva (Zeh, 2007)

4.4.2. FAXINA

4.4.2.1. Descrição

As faxinas são feixes de ramos vivos e mortos que consistem na elaboração de feixes, ligados por corda ou arame e fixadas ao solo por troncos de madeira (Figura 15). A sua aplicação no terreno garante o máximo de contacto com o solo húmido de forma a garantir o desenvolvimento vegetativo. Solo deverá cobrir a faxina de modo a evitar a perda de água por evaporação. Dão-se preferência a ramos lenhosos de espécies com grande potencial de enraizamento, flexíveis e compridas. O sol e a água são portanto essenciais ao desenvolvimento e sobrevivência desta técnica de proteção de margens, pelo que deverá ter-se em conta o clima do local.

4.4.2.2. Campo de aplicação

As fascinas podem assumir um papel, não só de estrutura de proteção de margens, mas também de drenagem e segmentação de taludes. Com uma colocação rápida e simples, esta técnica é aconselhada para a criação de faixas de vegetação nas margens de cursos de rio.

Nos casos em que a inclinação do talude se demonstre elevado, pode aplicar-se muros de faxinas empilhados e suportados por estacas cravadas do lado do escoamento.

Margens com inclinações inferiores a 35° aumentam o êxito das plantações lenhosas com a aplicação das faxinas.

A colocação de faxinas em valas escavadas no talude, atinge um eficiente sistema de prevenção de erosão e diminui o risco de ravinamento. Esta situação deve-se à quebra de linhas de linhas de escoamento, reduzindo a sua energia e, por consequente, a sua capacidade de erosão.

4.4.2.3. Material Necessário

As estacas são constituídas principalmente por espécies lenhosas (salgueiros e tamargueiras), com capacidade de desenvolvimento vegetativo. Os diâmetros poderão variar de 15 a 50 cm e de 2 a 4 m de comprimento. As amarrações de arame deverão dar-se a cada 50/100 cm.

4.4.2.4. Vantagens

A realização desta técnica é simples, de baixo custo, e de notável eficácia estabilizadora. Estes materiais potenciam o desenvolvimento do habitat biológico e permitem direccionar o sentido do escoamento. O fornecimento de material vivo potencia também o desenvolvimento biológico.

4.4.2.5. Desvantagens

As podas regulares juntamente com a elevada quantidade de material necessária e mão-de-obra para a aplicar consistem nas principais desvantagens desta técnica de proteção de margens.

4.4.2.6. Período de execução

A execução desta técnica deverá incidir no período de repouso vegetativo, exceto em períodos de temperaturas negativas.

4.4.2.7. Tensões e Velocidade Resistentes

A sua resistência está limitada entre 2 m/s a 4m/s, dependendo do tipo de faxinas, mas pode ser fortificado recorrendo a muros de faxinas empilhadas e suportadas por estacas fortemente enterradas do lado da corrente. A capacidade de resistência das faxinas a tensões de arrastamento, dependendo dos autores, pode chegar até 50 Mpa (Cortes, 2004) ou 100 Pa (Fischenich, 2000).

4.4.2.8. Manutenção

Os processos de manutenção passam exclusivamente pela poda de material vegetal.

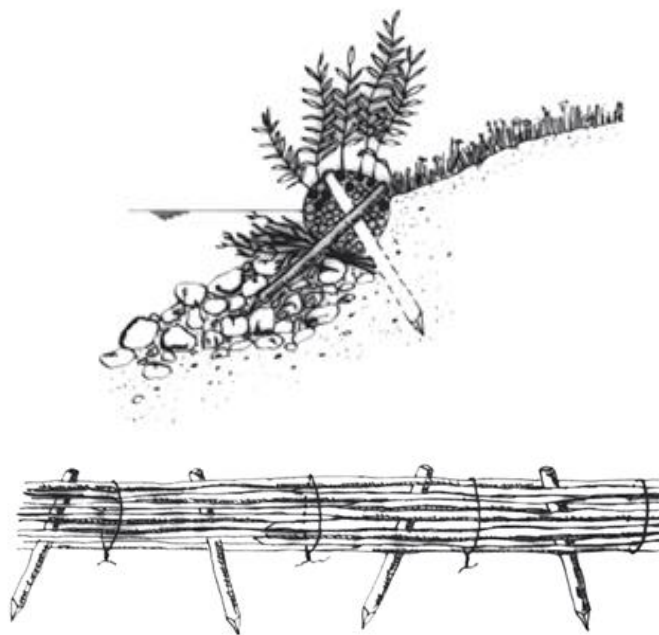


Figura 15 – Faxina (Zeh, 2007)

4.4.3. HIDROSSEMENTEIRA E SEMENTEIRA

4.4.3.1. Descrição

A técnica de proteção de margens hidrossementeira consiste na projeção de uma mistura de água com fibras de madeira, sementes, fertilizante e aditivos biológicos. Através do hidrossemeador (Figura 16), é aplicada sob a superfície do solo. Deverá usar sementes de pequenas dimensões para que caibam no tubo de aspersor.

4.4.3.2. Campo de aplicação

A aplicação desta técnica dá-se, principalmente, em margens fluviais onde seja necessária uma rápida proteção no solo contra os fenómenos de erosão onde não é possível realizar plantações devido a inclinações elevadas ou terrenos rochosos.

4.4.3.3. Material Necessário

Os materiais a utilizar passam por sementes de plantas lenhosas de pequena dimensão enriquecidas com sementes herbáceas, água, fertilizantes e estimuladores de crescimento.

4.4.3.4. Vantagens

A elevada taxa de germinação e cobertura homogênea, transmitem a esta técnica uma elevada força de tensão com poder de absorção da água. Sendo um processo rápido e eficaz, a mão-de-obra é reduzida e permite a execução em zonas de difícil acesso.

4.4.3.5. Desvantagens

Em períodos secos e zonas áridas, esta técnica não encontra as condições necessárias para funcionar eficazmente.

4.4.3.6. Período de execução

A execução desta técnica de proteção de margens deverá realizar-se no início do período vegetativo.

4.4.3.7. Tensões e Velocidade Resistentes

As tensões e velocidades resistentes são semelhantes às da faxina.

4.4.3.8. Manutenção

A manutenção deverá incluir rega, poda e cortes quando se verificar necessário.

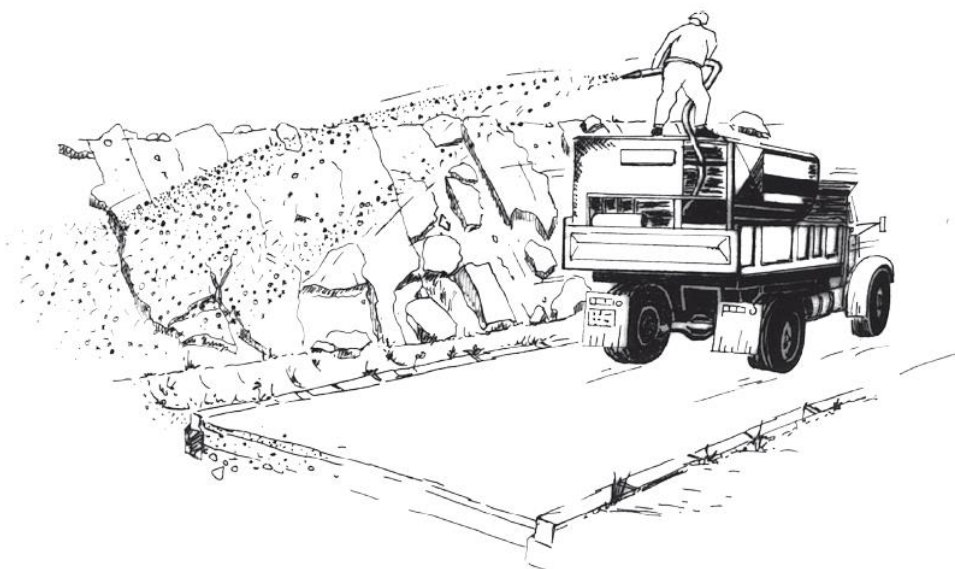


Figura 16 - Hidrossemeador (Zeh, 2007)

4.4.4. BIOROLOS

4.4.4.1. Descrição

Os biorolos, constituídos por fibra de coco, arame, troncos de madeira, varas de ferro e ramagens, permitem a sedimentação de materiais e a estabilização de margens fluviais. São usados normalmente na base das margens de taludes, para, em conjunto com vegetação nativa, aumentar a sedimentação e melhorar o desenvolvimento vegetal (Figura 17).

4.4.4.2. Campo de aplicação

Esta técnica pode ser aplicada em margens fluviais com pequena inclinação e pouca oscilação do nível da água e transporte sólido fino. Outras aplicações incluem margens de lagos.

4.4.4.3. Material Necessário

Fibra de coco é utilizada na construção do próprio biorolo, arame e varas de ferro são utilizados para manter a sua forma e ramagens ou estacas para a imobilizar no local de implantação.

4.4.4.4. Vantagens

Esta técnica tem uma execução simples e rápida, de ação protetora imediata e com ação filtrante muito eficaz. A sua elasticidade e permeabilidade são também dois pontos fortes.

4.4.4.5. Desvantagens

A limitada durabilidade temporal restringe a sua utilização.

4.4.4.6. Período de execução

A execução desta técnica deverá focar-se no período de estiagem.

4.4.4.7. Tensões e Velocidade Resistentes

A resistência do biorolo dependerá do seu diâmetro, podendo resistir a tensões de arrastamento até 50-150 Pa e velocidades até 2.5 m/s.

4.4.4.8. Manutenção

A manutenção, sobretudo no primeiro ano, deverá focar-se na verificação de estabilidade da estrutura.

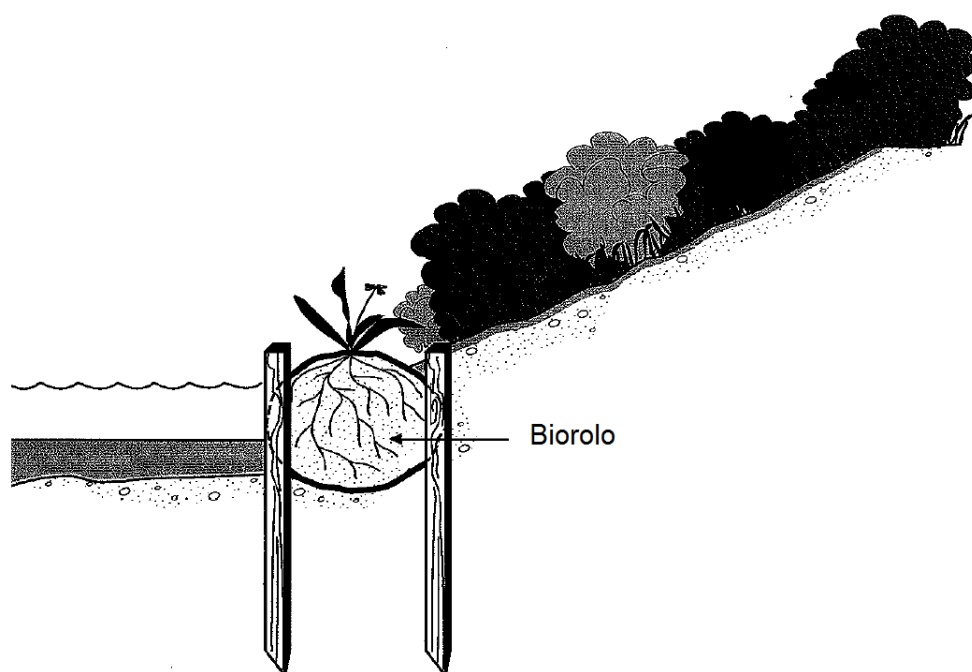


Figura 17 – Biorolo vegetado (Georgia Environmental Protection Division, 2011).

5

METODOLOGIA DE ANÁLISE

5.1. INTRODUÇÃO

A monitorização de uma obra de reabilitação de margens é um processo essencial na análise da sua eficiência e deverá constar, sempre que possível no projeto de reabilitação. Esta monitorização deverá ter em conta alguns objetivos.

Em primeiro lugar, deverá servir para determinar o estado de conservação e evolução das diferentes estruturas de proteção de margens incluídas no projeto e para acumular conhecimento e experiência para intervenções futuras (Woolsey *et al.*, 2007). Para tal, a monitorização deverá, detetar as modificações no espaço e no tempo que as técnicas implementadas produziram, determinando quais os procedimentos mais adequados ao nível de projeto para um determinado caso específico. O aumento de conhecimento na análise de projetos de reabilitação de margens, decorrente das ações de monitorização, permite identificar projetos com potencial de reabilitação elevado e, deste modo possibilitar uma gestão dos investimentos a realizar (Magdaleno, 2011).

Em segundo lugar, sem uma avaliação de eficiência, não é possível perceber se o projeto de reabilitação da margem cumpriu, ou não, os seus objetivos. É por isso cada vez mais reconhecida a importância da monitorização de estruturas de proteção de margens, embora sejam escassas as iniciativas nesse sentido (Woolsey *et al.*, 2007). Esta escassez poderá dever-se a vários fatores dos quais se destacam: o intervalo de monitorização poderá expandir-se durante vários anos para a obtenção de dados para uma boa avaliação; a falta de critérios ou metodologias a aplicar a cada caso por falta de experiência na matéria; a possível interpretação diferente dos mesmos resultados segundo objetivos definidos no projeto (Magdaleno, 2011)

Neste capítulo são descritas as etapas envolvidas no processo de avaliação de eficiência de estruturas de proteção de margens. Com esse fim, são usados dois tipos de processos. Um processo de avaliação visual em campo complementado por um estudo hidráulico.

A avaliação visual em campo permitirá definir o estado atual da estrutura de proteção, ajudando a perceber que tipo de comportamento a estrutura desenvolveu em resposta às ações atuantes do escoamento e aos seus fenómenos erosivos. Para tal, serão descritos pontos-chave a avaliar em campo para cada uma das técnicas de proteção de margens descritas no capítulo anterior (Capítulo 4).

Relativamente ao estudo hidráulico, terá importância relevar o cálculo de valores das tensões de arrastamento e velocidades de escoamento, atuantes nas zonas em estudo, que poderão posteriormente ser comparados com os valores máximos resistentes da cada técnica. Para produzir este cálculo, será usado o *software* de modelação hidráulica HEC-RAS. Este *software* necessita de dados informativos que descrevam, de forma pormenorizada o curso do rio a modelar e as suas margens. A definição de

perfis transversais, coeficientes de rugosidade e determinação dos caudais de escoamento serão pontos essenciais na modelação hidráulica.

Por fim, é relevante referir que cada uma das técnicas de proteção envolvidas deverá ser alvo de um planeamento de monitorização, no seu projeto de reabilitação de margens, que deverá pelo menos conter uma avaliação anual após o período de Inverno.

A metodologia pode, assim, ser dividida em:

- Caracterização de campo;
- Modelação Hidráulica;
- Análise de Resultados.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO

Como já supracitado, a avaliação de eficiência de uma estrutura de proteção de margens passa inicialmente pela caracterização do seu estado atual, através da avaliação visual. Neste trabalho, tentará desenvolver-se uma lista de pontos, a analisar *in situ*, diferente para cada tipo de material utilizado numa estrutura de proteção. Esta lista será o mais genérica possível, a fim de poder ser aplicada a qualquer caso de estudo. Isto não implica, no entanto, que pontos adicionais possam ser acrescentados de acordo com a especificidade de cada caso e objetivos de cada projeto.

Os diferentes materiais considerados podem separar-se em (Tabela 5):

- Pedra;
- Material vegetal vivo;
- Geotêxteis e geomalhas;
- Arame; Grampo em ferro; Rede metálica.

Tabela 7 – Diferentes tipos de material e aspetos a analisar numa monitorização de técnicas de estabilização de margens

Tipo de Material	Aspetos a analisar
Pedra	• Tamanho dos blocos (D_{50})
	• Despreendimento de pedras
Material vegetal vivo	• Taxa de sucesso de cada tipo de espécie plantada
	• Presença de vegetação exótica
Geossintéticos e Geotêxteis	• Integridade das telas;
	• Sistema de fixação;
Arame; Grampos em ferro; Rede Metálica	• Pontos de corrosão e/ou degradação;
	• Sistema de fixação;

5.2.1. PEDRA

Na avaliação de eficiência de estruturas de proteção de margens que incluam pedra deve ser analisado o tamanho de blocos, uma vez que tem diretamente a ver com a suscetibilidade de transporte por ação do escoamento. Blocos maiores resistem a maiores velocidades e tensões de arrastamento.

O número de blocos removidos do lugar inicial será um bom indicador do comportamento geral da estrutura. Muitos blocos fora do seu local de implantação inicial é indício de uma de duas hipóteses: dimensionamento inadequado da estrutura ou eventos de cheias significativas imprevisíveis.

5.2.2. MATERIAL VEGETAL VIVO

Na presença de vegetação, em estruturas de proteção de margens, dependendo do tipo de vegetação, poderá haver diversos pontos a avaliar.

A densidade de plantação poderá ser um fator importante por exemplo na presença de hidrossementeira. Na avaliação deste ponto, tem importância a obtenção de uma taxa de sobrevivência relativamente à densidade plantada. Uma taxa baixa poderá levar a estrutura a não funcionar como projetado e poderá dever-se a diferentes fatores como: mão-de-obra ineficiente, manutenção inexistente ou clima inadequado. Tal como a densidade, o desenvolvimento foliar, o desenvolvimento das raízes e o crescimento em altura serão um atestado à eficiência da vegetação na estrutura de proteção de margens e quaisquer problemas identificados poderão dever-se aos mesmos fatores já citados.

Podendo pôr em risco o bom desenvolvimento da vegetação plantada, sugando nutrientes e água do solo envolvente, as espécies invasoras diminuem a eficácia da vegetação nas estruturas de proteção de margens. As espécies invasoras detetadas mais frequentes são as canas (*Arundo donax*), acácias (*acacia dealbata*) e as silvas (*rubus* sp.).

5.2.3. GEOTÊXTEIS OU GEOMALHAS

Quando as estruturas de proteção de margens incluem geotêxteis ou geomalhas, serão dois os pontos principais a analisar *in situ*: a integridade das telas (preenchimento) e os sistemas de fixação.

O ponto de avaliação relativo ao preenchimento será utilizado na existência de geocélulas. As geocélulas são, usualmente, preenchidas por uma mistura de brita e terra vegetal. Com o passar do tempo, e devido a fenómenos de erosão e transporte de sólidos pelo escoamento, o preenchimento de cada célula irá sendo removido. Uma remoção repentina de grande parte indicará, tal como no enrocamento, um mau dimensionamento ou eventos de cheia imprevisíveis. A melhor forma de descrever o preenchimento será através de uma percentagem.

Na presença de, por exemplo, fibra de coco, poderá interessar a quantificação do material remanescente. A fibra de coco e materiais semelhantes têm uma durabilidade reduzida e são usados principalmente para auxiliar na germinação da vegetação. Para este efeito, deverá ser tomada especial atenção, aumentando o período de monitorização anual para, no mínimo, uma monitorização semestral. Tal como no preenchimento, a percentagem deverá ser usada para descrever a quantidade de material existente. Outro aspeto importante analisar tem a ver com o sistema de fixação deste tipo de estruturas, na medida em que caso seja executado de forma inadequada poderá levar ao colapso da técnica.

5.2.4. ARAME, GRAMPO DE FERRO E REDE METÁLICA

As estruturas de proteção de margens podem ser estruturas compostas por diferentes técnicas. Para garantir o funcionamento conjunto das diferentes técnicas, é por vezes necessário recorrer a sistemas de fixação.

Redes metálicas, geralmente cobertas a polivinil de cor verde, são muito usadas para proteção da hidrossementeira contra efeitos erosivos. As uniões de redes ou geotêxteis adjacentes é, geralmente feito através de agramos metálicos ou grampos de ferro. A eficácia destes sistemas na proteção das diferentes técnicas contribuirá para atingir os objetivos propostos no projeto de reabilitação de margens.

Se na zona envolvente à zona de intervenção houver muita atividade humana, todos os materiais envolvidos numa técnica de proteção de margens poderão ser danificados. Embora seja comum a existência de avisos para os transeuntes terem atenção e não pisarem a estrutura de proteção, o contrário é o que se verifica na maior parte das vezes.

O dano desta estrutura deverá ser avaliado, tendo em atenção se a estrutura se mantém ou não no seu sítio original, se mantém a sua integridade, se as uniões se mantêm funcionais e se as colmatações nas extremidades da estrutura não foram expostas, tornando-as inúteis.

5.3. MODELAÇÃO HIDRÁULICA

O HEC-RAS, Sistema de Análise de Rios (*River Analysis System – RAS*) desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center - HEC*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.U.A., é um *software* que permite realizar cálculos hidráulicos unidimensionais de fluxo constante ou variável.

Este programa permite a obtenção de valores de velocidade de escoamento e tensões de arrastamento atuantes em todo o curso do rio, incluindo margens e leito. Sendo o foco deste trabalho, a análise de eficiência das estruturas de proteção de margens, a análise feita focará exclusivamente a obtenção de resultados na própria estrutura.

Para o efeito, será necessário inserir no programa diferentes tipo de informações como:

- Perfis transversais;
- Condições de fronteira e caudais de escoamento;
- Coeficientes de rugosidade;
- Coeficiente de expansão e de contração.

Os resultados obtidos deverão ser comparados com as tensões e velocidades máximas resistentes descritas no Capítulo 4. Resultados abaixo dos limites máximos admissíveis indicarão uma proteção de margens eficaz.

6 CASOS DE ESTUDO

6.1. INTRODUÇÃO

Os dois casos de reabilitação de margens em estudo nesta tese são localizados em Portuzelo e Cardielos, no concelho de Viana do Castelo (Figura 18). O rio em estudo é o rio Lima, rio luso-espanhol que atravessa em cerca de 62km a zona do Minho, iniciando o seu percurso em território português entre a serra do Gerês e da Peneda. A sua bacia portuguesa perfaz cerca de 1100km², produzindo um escoamento anual que ronda os 1600hm³. Os dois locais de intervenção em estudo encontram-se na zona estuarina do rio Lima onde, pela sua proximidade à foz, se encontram alguns aluviões e ilhotas.

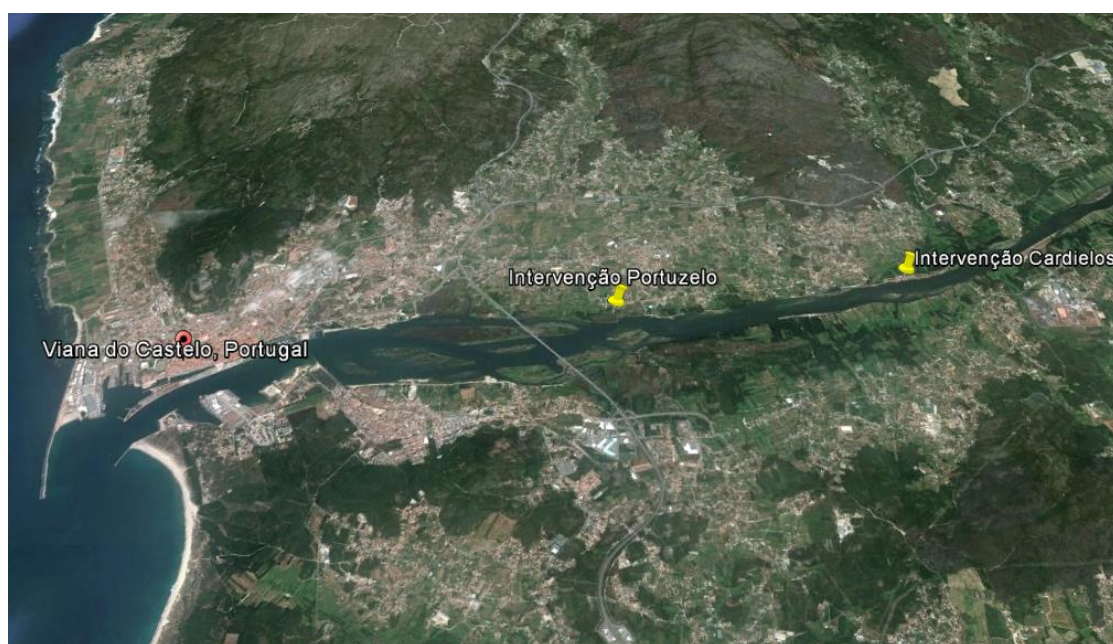


Figura 18 - Localização das intervenções em estudo no rio Lima (Google Earth, 2003)

Estes casos de estudo foram avaliados através do seu projeto de licenciamento, de nome “Requalificação das Margens do Rio Lima”, datados de Dezembro de 2010 para Cardielos e Fevereiro de 2011 para Portuzelo. A execução das obras de reabilitação em Cardielos durou desde Abril a Julho de 2012 e em Portuzelo, desde Maio de 2012 a Janeiro de 2013.

6.2. DADOS DE BASE NECESSÁRIOS À MODELAÇÃO HIDRÁULICA

O método de modelação hidráulico a usar, necessita em termos geométricos de uma boa caracterização do rio a analisar. Uma boa caracterização baseia-se em cartas topográficas atualizadas e levantamentos topográficos que descrevam pormenorizadamente qualquer secção de interesse à modelação. Uma secção de interesse poderá incluir, por exemplo, pontes, ilhotas, ou alterações bruscas de geometria. Para a modelação hidráulica, quantos mais dados existirem, mais preciso será o escoamento modelado.

Neste método de cálculo através do HEC-RAS, são então necessários saber:

- Perfis transversais do vale com o maior detalhe possível na zona da intervenção;
- Distâncias entre perfis;
- Altura do nível da água (Condições de fronteira);
- Caudal de escoamento para diferentes tempos de retorno
- Rugosidade dos materiais

6.2.1. PERFIS TRANSVERSAIS

A caracterização dos perfis transversais para os casos de estudo desta tese tomou como base, os dados existentes no documento “Mapeamento de Zonas Inundáveis em Situação de Cheia nas Margens do Rio Lima em Viana do Castelo” (Pinheiro e Cruz, 2007). Os dados que permitiram, originalmente, esta caracterização foram obtidos através de:

- Cartografia municipal de Viana do Castelo à escala 1:10000;
- Levantamento hidrográfico do trecho do rio Lima que abrange a barra, canal de acesso ao porto comercial e canal entre pontes, em Viana do Castelo, à escala 1:2000, datado de Dezembro de 2003;
- Levantamento hidrográfico do trecho do rio Lima compreendido entre a fronteira com o concelho de Ponte de Lima e a ponte Eiffel, efetuado pela DGRN em 1990, segundo especificações da empresa de consultadoria - Hidroprojecto.

Com a informação cartográfica e os levantamentos hidrográficos, foram definidos (no Mapeamento de Zonas Inundáveis em Situação de Cheia nas Margens do Rio Lima em Viana do Castelo) 24 perfis transversais, equitativamente espaçados. Estes perfis foram denominados de VC1 a VC24, crescendo de montante para jusante. Os perfis VC1 a VC10 são baseados nos dados do ano de 2003 e os restantes (VC11 a VC24) no ano de 1990.

Estes perfis transversais, embora abranjam as zonas de requalificação de margens em análise, ainda não contêm o detalhe das margens alteradas (Figura 19). Foram adaptados novos perfis transversais, a inserir entre os existentes que serão melhor detalhados em cada caso de estudo.



Figura 19 – Perfis transversais VC1 a VC24 no rio Lima

Numa segunda instância, foi necessário adicionar aos perfis existentes no trabalho “Mapeamento de Zonas Inundáveis em Situação de Cheia nas Margens do Rio Lima em Viana do Castelo” novos perfis, de modo a integrar as intervenções de reabilitação da margem direita do rio Lima, nos troços de Cardielos e Portuzelo e portanto as suas diferenças geométricas. Idealmente, esta informação constaria do projeto da estrutura. No entanto, no âmbito do projeto de reabilitação não foram efetuados levantamentos topográficos das zonas abrangentes, uma vez que, devido à dinâmica fluvial do rio Lima, as alterações no leito eram significativas de semana para semana. Como não é possível começar a construção imediatamente a seguir ao levantamento, este estaria desatualizado na hora da construção.

Embora não tenham sido contemplados em projeto, para o efeito deste trabalho, os perfis transversais são essenciais. Foram então selecionados alguns perfis da estrutura do projeto de Reabilitação das Margens do Rio Lima (Cortes *et al*, 2010; Cortes *et al*, 2011) para ambos os casos de estudo. O processo de inclusão dos perfis transversais reabilitados no ficheiro de modelação inicial é em seguida descrito pormenorizadamente para cada caso. Em ambos foi escolhido um dos perfis já existentes (mais perto e que mais se assemelha em termos topográficos ao novo perfil a ser adicionado), para ser tomado como perfil base e alterado de acordo com as alterações então realizadas. Ou seja, nos perfis base foi introduzida a geometria do novo talude de margem reabilitado, ajustando posteriormente o seu coeficiente de rugosidade e distância ao perfil seguinte. A margem oposta à da reabilitação foi mantida como a do perfil-base, por falta de dados topográficos atuais.

Para adaptação dos perfis do projeto (apenas disponíveis em papel) aos perfis base, e por sua vez ao programa de cálculo hidráulico, foi utilizado um passo intermédio com o auxílio da ferramenta de cálculo Microsoft Excel. Os perfis desenhados estão à escala no projeto de reabilitação, o que permitiu através de medições, fazer a transmissão das cotas e distâncias para uma tabela de coordenadas. Sabendo onde se inicia a margem, já existente no perfil base foi possível inserir as coordenadas correspondentes a cada perfil reabilitado, alterando a sua geometria e obtendo uma secção transversal pós-reabilitação.

Mais informação sobre os perfis reabilitados selecionados para cada caso será encontrada em seguida, na caracterização de cada caso de estudo (Capítulos 6.3.1 e 6.4.1). Os desenhos intermédios de localização dos perfis reabilitados/perfis base podem ser encontrados nos Anexos A1 a A7.

6.2.2. DISTÂNCIA ENTRE PERFIS

A distância entre cada secção transversal e sua adjacente terá de ser indicada em três pontos, talvegue, margem esquerda e margem direita. Depois de introduzidas as secções transversais em planta, será necessário definir o sentido de escoamento. Com o HEC-RAS, a numeração dos perfis é feita de modo ascendente de jusante para montante. As secções podem ser tão largas quanto desejado, podendo incluir planícies de inundação.

6.2.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA

Além dos dados geométricos é necessário definir as condições fronteiras. Neste caso, sendo o escoamento lento e portanto controlado por jusante, foi definido, no trabalho desenvolvido por Pinheiro e Cruz (2007), como condição fronteira, o nível de maré na zona da foz do rio ($h = 2.14\text{m}$), onde se localiza o marégrafo do Porto de Viana.

6.2.4. CAUDAIS DE ESCOAMENTO

Saber os caudais de cálculo é essencial para caracterizar eficazmente o escoamento. Para esta análise foram utilizados os valores apresentados no Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Lima (INAG, 1999) para um período de retorno de 2,33; 5 e 100 anos, $1321\text{ m}^3/\text{s}$, $1790\text{ m}^3/\text{s}$ e $4180\text{ m}^3/\text{s}$ respetivamente. O período de retorno de 2,33 anos corresponde ao caudal modelador.

6.2.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS

Para a caracterização hidráulica no HEC-RAS são necessários três parâmetros: o coeficiente de rugosidade (n) dos materiais e coeficiente de contração e o de expansão do escoamento devido a alterações na secção. A seleção de um coeficiente de rugosidade próxima da realidade é essencial na obtenção de resultados fiáveis. Quantidade e tipo de vegetação, constituição do material do leito e margens e temperatura são alguns dos fatores que podem alterar o valor de n , que será definido separadamente para cada caso de estudo.

Na aplicação da metodologia aos casos de estudo, irão ser usados os coeficientes de contração e de expansão de 0,100 e 0,300, respetivamente, sendo estes os normalmente usados em transições graduais.

6.2.6. OBTENÇÃO DE RESULTADOS

Os valores da velocidade de escoamento e da tensão de arrastamento foram calculados através do programa HEC-RAS.

Usualmente, o HEC-RAS fornece as tensões atuantes em três zonas distintas: o canal, margem esquerda e margem direita. No entanto, as margens usualmente contempladas incluem zonas de inundação em caso de cheia, que não têm interesse avaliar para a finalidade deste trabalho. Neste caso, interessa especificamente a tensão no talude da margem, pois esse foi o alvo da intervenção para

reabilitação. Assim sendo, por manipulação da localização das *Bank Stations* (estações que indicam a localização das margens) no programa, define-se a área a avaliar, como somente a área relativa à intervenção. Deste modo, o valor que o HEC-RAS calcula para *Shear Channel* (Tensão no canal) é de facto a tensão no talude, não sendo necessários cálculos adicionais. O mesmo acontece com os valores de velocidade de escoamento produzidos.

Estes valores foram comparados com os valores calculados antes da intervenção, podendo-se posteriormente inferir sobre a expectável melhoria da situação. O aumento da rugosidade introduzido pela intervenção deverá baixar globalmente tanto os valores de tensões atuantes como de velocidades de escoamento. Depois de feita a caracterização de campo, descrita no Capítulo 5 (Metodologia), e sabendo os valores de velocidade e tensão resistente máximos de cada técnica, foi também possível concluir se as estruturas escolhidas no projeto foram, ou não, as ideais.

6.3. INTERVENÇÃO DE PORTUZELO, NO RIO LIMA

6.3.1. CARACTERIZAÇÃO E CAUSA DA INTERVENÇÃO

Portuzelo situa-se numa zona pouco afetado pela pegada humana, rodeada de campos agrícolas e com um pequeno porto de embarcações de recreação (Figura 20 e Figura 21). Esta zona é essencialmente usada para a prática piscatória.

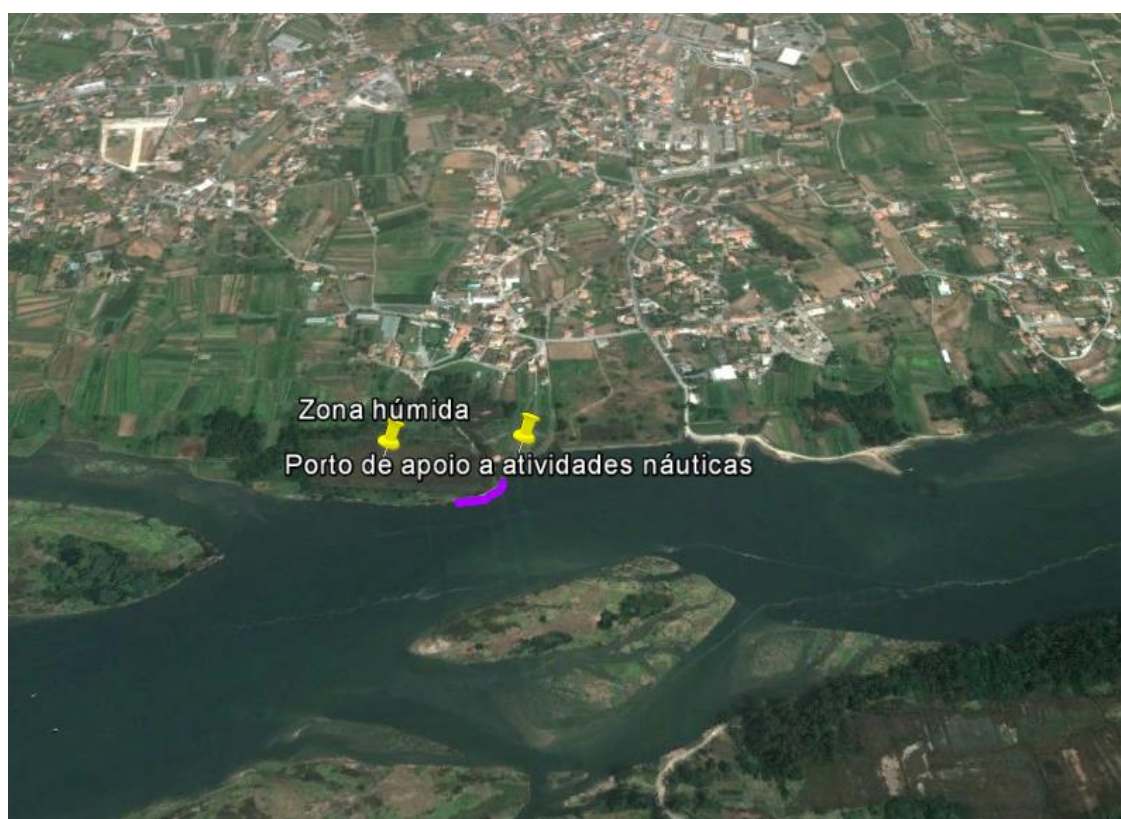


Figura 20 - Fotografia área da zona intervencionada no troço de Portuzelo (Google Earth, 2003)



Figura 21 - Intervenção no troço de Portuzelo e sua envolvente (Junho de 2014)

A requalificação das margens do rio Lima em Portuzelo estende-se por aproximadamente 100 m e deve-se à instabilidade resultante à extração de inertes que se verificou nesta zona, na década de 90. A este fator, adiciona-se o aparecimento das albufeiras do sistema Lindoso-Touvedo, que reduziu para cerca de metade a transferência de sedimentos a jusante das albufeiras. A necessidade de requalificação, na margem direita do rio, resulta de uma erosão na zona de Portuzelo de $571\text{m}^3/\text{m}$ em 37 anos (1967 a 2004). O estado da margem direita como resultado dos processos de erosão podem ser verificados na Figura 22.



Figura 22 – Instabilidade do talude marginal antes da intervenção de reabilitação no troço de Portuzelo (Cortes *et al*, 2011)

6.3.2. DEFINIÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS

A consulta do projeto (Cortes *et al*, 2011)) correspondente à área de intervenção da margem do Rio Lima em Portuzelo, correspondente ao trecho do rio entre os perfis VC11 e VC12, permitiu a definição de novos perfis transversais, onde as margens sofreram alterações. As coordenadas

retangulares do sistema de projeção cartográfico Hayford-Gauss Melriça (Datum 73) presente na Planta Geral do projeto de reabilitação, permitiram a inserção dos perfis reabilitados na carta topográfica e levantamento hidrográfico existentes.

Numa análise inicial, selecionaram-se os Perfis nº 3, 4 e 5 (ver Anexo A2, A3 e A4), de 9 perfis existentes no projeto, assumindo que esses seriam os mais expostos a erosão e, portanto, mais relevantes para uma análise de avaliação de eficiência das técnicas de proteção de margens projetadas. Estes foram assim incluídos entre VC11 e VC12, com o nome VC11.1, VC11.2 e VC11.3, respetivamente. Para a criação destes novos perfis transversais, foi tomada como secção inicial a que mais próximo se encontrava do local intervencionado, tentando assim que qualquer erro de levantamento hidrográfico fosse minimizado. Neste caso essa secção foi VC11.

Em visita de campo a Portuzelo, a inspeção visual ao local viria a permitir concluir que o Perfil nº 1 deveria também ser incluído devido ao seu estado de degradação atual, passando a existir uma nova secção, de novo baseada em VC11, com o nome VC11.05 (ver Anexo A1). Os perfis transversais e a sua localização estão ilustrados na Figura 23, onde se encontram entre VC11 e VC12 por ordem crescente e da esquerda para a direita.

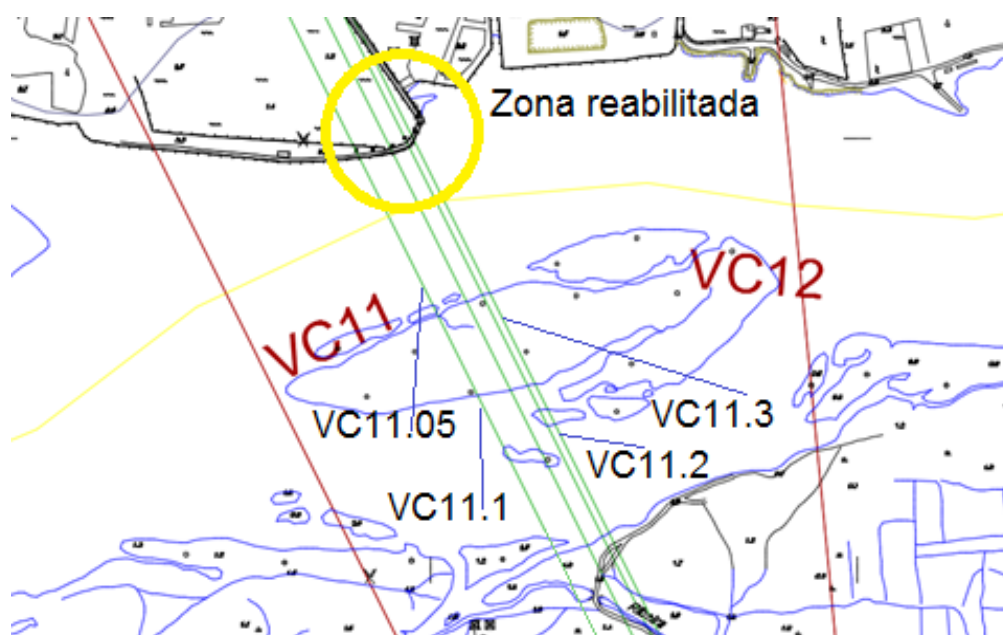


Figura 23 - Localização dos novos perfis transversais para modelação hidráulica no troço de Portuzelo

6.3.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE PROTEÇÃO DE MARGEM

Esta estrutura de proteção da margem em Portuzelo estende-se por aproximadamente 100 m, e deverá diminuir o efeito dos fenómenos erosivos, devidos a períodos de cheia ou a efeitos das marés.

Segundo o projeto, esta proteção inclui uma camada de enrocamento, com inclinação 1/1 (H/V) e constituído por blocos angulosos de granito de 60-80 cm, sobre geotêxtil sintético não tecido, ao longo do talude na zona mais próxima do estuário. Uma manta de geocélulas (cujas células estão preenchidas por uma mistura de brita e terra vegetal), formada por polietileno de alta densidade e assente igualmente sobre tela sintética faz também parte do projetado.

As mantas de geocélulas assentam diretamente no geotêxtil sintético, sendo agrafadas entre si, segundo um declive de 1,5/1 (H/V), o que implicou a modelação do talude. Este material tem como função propiciar uma boa drenagem e compactação do terreno, promover a sedimentação de finos transportados pela massa de água devido à elevada rugosidade, o que acaba por facilitar a colonização vegetal das próprias mantas, diminuindo o impacto visual. Uma rede metálica revestida a polivinil verde foi colocada ao longo de toda a superfície, a fim de evitar a lavagem da brita por influência das marés.

A faixa superior foi instalada com estacas de tamargueira (*Tamarix tamarix*) e o topo da margem é definido pela plantação de caducifólias com elevado índice de área foliar, colocadas em linha. O pormenor geral é apresentado na Figura 24.

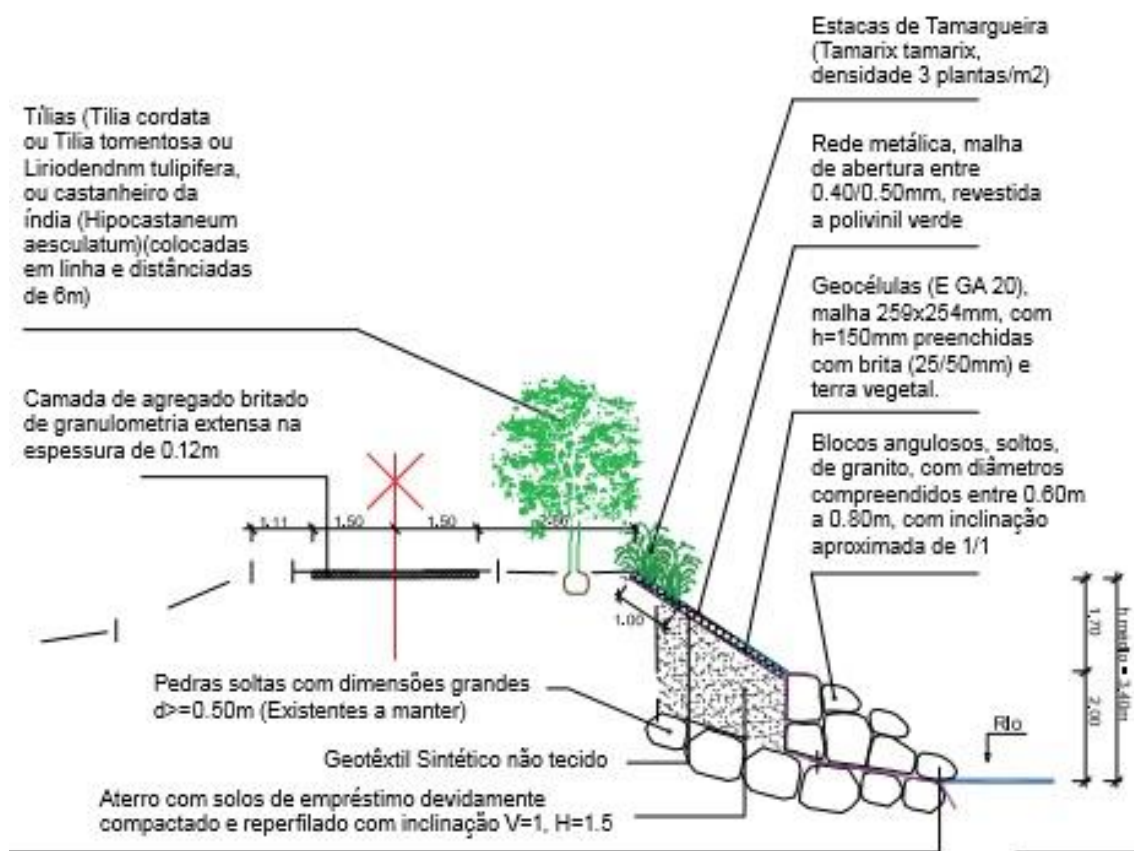


Figura 24 – Pormenor da Solução Geral Implementada no troço de Portuzelo (Cortes *et al*, 2011)

Esta solução traz estabilidade ao talude marginal, que estava em situação prévia de ruptura (Figura 22), protegendo uma área pertencente à rede Natura 2000 - sapal-juncal - (Figura 25), um caminho de acesso existente e um poste de distribuição de eletricidade (Figura 26). A utilização de técnicas de engenharia naturais permitiu manter os impactes visuais baixos e melhorar o habitat marginal.



Figura 25 – Sapal-juncal perto da intervenção no troço de Portuzelo (Junho 2014)



Figura 26 – Fim do caminho de acesso à intervenção no troço de Portuzelo (Junho de 2014)

6.3.4. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO

Para avaliar o estado atual da intervenção realizada em Portuzelo, foi realizada uma visita de campo em Junho de 2014. Numa primeira avaliação visual, a estrutura parecia intacta embora sem manutenção. A inspeção viria, no entanto, a revelar que, principalmente o remate da estrutura do lado jusante sofreu bastante erosão o que levou à sua ruptura parcial como é passível de verificar na Figura 27.



Figura 27 – Zona de remate da estrutura no troço de Portuzelo (Junho, 2014)

Na zona da curva do talude (zona assinalada a amarelo), localização exata dos perfis VC11.1, VC11.2 e VC11.3 verifica-se que começou a ocorrer remoção dos blocos de enrocamento (Figura 28) devido à ação do escoamento. Esta remoção do material não se verifica na parte interior da estrutura (lado direito da Figura 28), uma vez que esta é uma zona mais protegida, criando até uma pequena baía (Figura 29).



Figura 28 – Altura desnivelada dos blocos de enrocamento (Junho, 2014)



Figura 29 – Zona protegida da estrutura no troço de Portuzelo (Junho, 2014)

Entretanto, é notável o crescimento da vegetação, nomeadamente da tamargueira (Figura 30), apresentando-se desenvolvida e aparentemente capaz de desempenhar as suas funções.



Figura 30 – Pormenor da estrutura de proteção evidenciando a evolução da vegetação (à esquerda – António Pinto, Novembro 2013; à direita – Monge, Junho 2014)

Além do desenvolvimento expectável da vegetação projetada, encontrou-se também espécies invasoras como é o caso da erva-das-pampas (*Cortaderia selloana*) entre a vegetação aplicada.



Figura 31 – Vegetação invasiva (Junho 2014)

A manta de geocélulas, além de ter perdido bastante do seu material de enchimento, encontra-se descoberta, e em risco de ser removida parcialmente, num dos seus limites, no lado jusante da estrutura (Figura 32).



Figura 32 – Comportamento ineficiente da rede metálica, geocélulas e seus constituintes (Junho 2014)

A rede de metálica, cuja função era garantir um funcionamento conjunto da manta de geocélulas com a brita e terra vegetal, está completamente descoberta, evidenciando sinais de fenómenos de erosão, potencialmente devido ao efeito das marés (Figura 33).



Figura 33 - Rede metálica exposta no troço de Portuzelo (Junho 2014)

Embora não esteja presente no projeto, foi colocada uma tela de fibra de coco por cima da camada vegetal, para contribuir para a colonização vegetal (Figura 34), no entanto, a fibra de coco já não se encontra no local (Figura 34). Usualmente a fibra de coco tem uma durabilidade de cerca de três anos, no entanto devido à elevada salinidade da água desta zona estuarina, esta fibra foi erodida em cerca de dois anos após colocação.



Figura 34 – Fibra de coco, não presente no projeto (António Pinto, Novembro 2013)

Como a fibra de coco foi erodida, verifica-se que a vegetação não se desenvolveu de modo adequado tanto como era suposto, o que pode ter contribuído para a fácil remoção do material de enchimento das geocélulas.

6.3.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS

No trabalho desenvolvido por Pinheiro e Cruz (2007) foi considerado que a margem direita do rio Lima, na zona de Portuzelo, poderia ser caracterizada por um coeficiente de rugosidade hidráulica, “n”, igual a $0,04 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ ($K_s=25$). Tendo em conta as características da solução de proteção de margens implementada, e com auxílio do próprio programa de cálculo HEC-RAS e mais especificamente o seu “Reference Manual” foi possível selecionar um coeficiente de rugosidade de valor $n=0,033 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ ($K_s=30,30$). Este valor situa-se entre o valor mínimo para canais principais naturais, com alguns bancos de areia, ervas e enrocamento e o valor considerado normal para planícies de inundação com erva curta.

6.3.6. MODELAÇÃO E RESULTADOS

O projeto inicial continha 9 perfis distribuídos ao longo de 100m. Para a modelação foram usados os perfis 1, 3, 4 e 5. O perfil 1 foi escolhido após verificação do estado da estrutura *in situ* e os perfis 3, 4 e 5 foram selecionados por se considerar que caracterizam bem a zona intervencionada

Como referido anteriormente, para Portuzelo foram criados quatro perfis transversais que caracterizam a zona da intervenção, VC11.05, VC11.1, VC11.2 e VC11.3.

A modelação da situação pré-reabilitação produziu os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Tensões e Velocidades em Portuzelo antes da reabilitação

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m²)	Velocidade (m/s)
VC12	2.33	10.66	0.68
VC12	5	14.05	0.79
VC12	100	25.51	1.1
VC11	2.33	7.38	0.73
VC11	5	6.82	0.67
VC 11	100	12.55	1.01

Os novos perfis produziram os resultados a seguir apresentados (Tabela 9 e Tabela 10), com o recurso do programa HEC-RAS.

Tabela 9 - Tensões e Velocidades em Portuzelo depois da reabilitação

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m²)	Velocidade (m/s)
VC 12	2.33	10.83	0.69
VC 12	5	14.46	0.8
VC 12	100	26.66	1.12
VC 11	2.33	7.38	0.73
VC 11	5	6.82	0.67
VC 11	100	12.55	1.01

Tabela 10 - Tensões e Velocidades em Portuzelo depois da reabilitação (perfis adicionados que modelam a estrutura de proteção)

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m²)	Velocidade (m/s)
VC 11.3	2.33	3.93	0.61
VC 11.3	5	5.19	0.72
VC 11.3	100	10.39	1.12
VC 11.2	2.33	5.2	0.74
VC 11.2	5	5.27	0.72
VC 11.2	100	10.5	1.13
VC 11.1	2.33	3.57	0.57
VC 11.1	5	5.13	0.71
VC 11.1	100	10.37	1.12
VC 11.05	2.33	3.7	0.58
VC 11.05	5	5.3	0.72
VC 11.05	100	10.61	1.13

Quando comparados os valores de tensão atuantes antes da reabilitação com a tensão atuante nos perfis reabilitados, verifica-se uma redução até 65% das tensões de arrastamento e velocidades de escoamento atuantes. Uma vez que a reabilitação das margens tem como objetivo a proteção contra os fenómenos erosivos, a diminuição dos valores é esperada, uma vez que o aumento do coeficiente de rugosidade (n) conduz à diminuição das tensões de arrastamento e velocidades de escoamento existentes.

6.3.7. ANÁLISE DE RESULTADOS

A solução aqui implementada consiste principalmente na conjugação da técnica de enrocamento e geocélulas com brita e terra vegetal. O enrocamento, capaz de resistir a tensões de pelo menos 380Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) e velocidades que rondam os 5m/s não deveria apresentar problemas, pois todos os valores de tensões e velocidades atuantes se situam abaixo dos correspondentes valores críticos.

Quanto às geocélulas, podendo resistir até 290Pa, e na presença de valores de velocidade reduzidos comparados com a média de velocidades resistentes (cerca de 1.5m/s), seria esperado que este material tivesse um comportamento eficaz nas condições de escoamento estudadas. A vegetação, com uma velocidade resistente média de 2,5 m/s e uma tensão resistente média de 350Pa está também muito bem preparada para quaisquer das condições de escoamento modeladas.

Como foi verificado anteriormente, os resultados da modelação não são espelhados em campo, tendo sido identificados problemas onde a modelação não os permite antever. Os problemas encontrados poderão dever-se principalmente a problemas construtivos e falta de manutenção.

6.4. INTERVENÇÃO DE CARDIELOS, NO RIO LIMA

6.4.1. CARACTERIZAÇÃO E CAUSA DA INTERVENÇÃO

A zona ribeirinha em Cardielos é abrangida por um local de merendas e lazer (Figura 35), existindo também um pequeno café com esplanada e um campo de futebol. Todos estes elementos indicam que, principalmente, ao fim de semana, esta seja uma zona muito frequentada.



Figura 35 - Zona de lazer e merendas no troço de Cardielos (2014)

Na zona a jusante de intervenção em Cardielos desagua um afluente do rio Lima (Figura 36) entre o café e a zona de lazer o que obrigou à construção de uma passagem hidráulica já antes da intervenção avaliada neste estudo (Figura 37).



Figura 36 - Afluente do rio Lima no troço de Cardielos (2014)



Figura 37 - Passagem Hidráulica do afluente do rio Lima no troço de Cardielos (2014)

A zona de requalificação localizada em Cardielos, situando-se numa zona mais a montante do Lima do que Portuzelo, sofre de problemas similares de erosão (Figura 38). A extração decorrida nos anos 90 afetou igualmente esta zona e o sistema Lindoso-Touvedo impedem a reposição sedimentológica em cerca de 50%. Em 37 anos (1967-2004), as cotas do talvegue sofreram uma diminuição de 7,2m. Uma diferença a salientar em relação a Portuzelo. A diminuição de áreas agrícolas tem afetado a ocupação do solo, contribuindo também para a diminuição de sedimentos. A zona envolvente à requalificação de Cardielos é uma zona de lazer, tendo sido dada preferência a uma conjugação de técnicas tradicionais com naturais.



Figura 38 - Instabilidade do talude marginal antes da reabilitação no troço de Cardielos (Cortes *et al*, 2010)

Na Figura 39, encontra-se assinalada numa foto aérea a área toda da intervenção prevista realizar no projeto, que se desenvolve ao longo de cerca de 900 metros, onde o recuo da margem era mais avançado. Uma intervenção de emergência foi efetuada em primeiro lugar, que consistiu na construção de esporões devidamente espaçados pelo comprimento total. Por falta de financiamento, apenas no trecho correspondente aos 300 metros finais (linha a roxo) estão construídos a totalidade da estrutura de proteção dimensionada, como se irá abordar mais à frente na descrição da solução implementada.



Figura 39 – Fotografia área da zona intervencionada em Cardielos (Google Earth, 2003)

6.4.2. DEFINIÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS

No caso da intervenção em Cardielos não existem dados de geolocalização, foi então necessário usar um método alternativo ao usado em Portuzelo. Assim, por sobreposição digital da Planta Geral com a carta topográfica, foram localizados os perfis transversais nos locais de intervenção. A margem direita do rio Lima no troço de Cardielos situa-se assim entre as secções originais VC15 e VC17.

De modo a representar de boa forma a solução geral, foram escolhidos três perfis. O Perfil 5 (deflector), o Perfil 11 e o Perfil 20A (esporão). Estes perfis situam-se totalmente entre VC15 e VC16. Tal como anteriormente referido (subcapítulo 6.3.2), estes perfis tomaram como base VC15 e VC16 para criar novas secções entre eles. O Perfil 5, estando mais perto de VC15, tomou este como base tornando-se em VC15.1. A adaptação dos Perfis 11 e 20A, de nome VC15.2 e VC15.3, foi feita tendo por base VC16 (ver Figura 40).

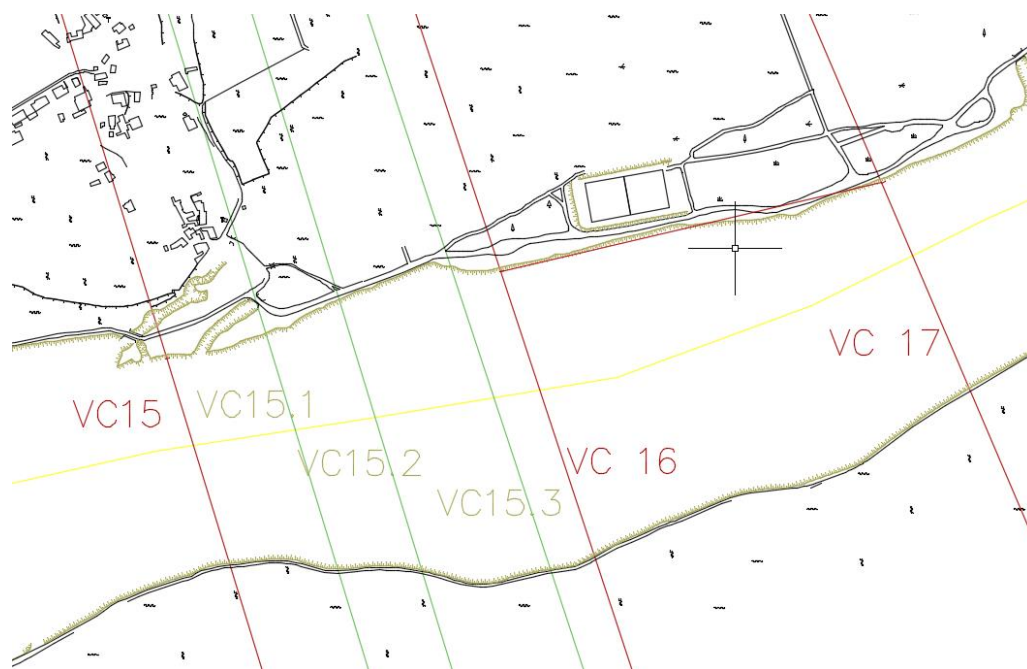


Figura 40 – Localização dos novos perfis transversais para modelação hidráulica no troço de Cardielos

6.4.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE PROTEÇÃO DE MARGEM

Segundo o projeto, foram definidos um conjunto de esporões e deflectores, bem como processos de recuperação biofísica e consolidação da margem, os quais se desenvolvem ao longo de uma extensão de aproximadamente 900 metros. Está também incluída a colocação de uma camada de enrocamento, na zona mais próxima do rio, seguida da colocação de colchões Reno sobre camada de enchimento com inertes e sob camada em solo com hidrossementeira posterior.

O enrocamento estende-se ao longo de 3 m da margem e é constituído por blocos de granito angulosos de 50-80 cm. O colchão Reno ocupará um comprimento da margem de cerca de 8 m, consistindo numa dupla malha hexagonal de dupla torção.

A hidrossementeira englobará quer espécies gramíneas como leguminosas, com baixa densidade. Para assegurar a manutenção das espécies, será necessário assegurar a fertilização inicial com auxílio ao sistema de rega por aspersão, entre outros. A hidrossementeira assenta numa camada de terra vegetal e contribui para a redução do impacto visual do colchão Reno. Tal como em Portuzelo, uma rede de malha metálica protegerá a hidrossementeira dos fenómenos erosivos, agrafada com agrafos metálicos.

A zona de encastramento com o terreno existente será realizada com uma camada de terra vegetal, semeada com uma mistura de espécies herbáceas idênticas às da hidrossementeira, dispondo superiormente e sucessivamente, dum geotêxtil. A interface desta zona com a dos colchões Reno, disporá de estacaria viva com biorolo de helófitos e faxina viva de salgueiros.

A geomalha é do tipo permanente e tridimensional, apresentando elevada durabilidade, desenvolvendo o meio ideal para a vegetação. Esta geomalha é coberta pelo mesmo tipo de rede de malha metálica, mencionado antes, e integrará uma estacaria viva de salgueiros.

O biorolo é constituído por um rolo de fibra de coco de elevada densidade, estruturado numa rede de polipropileno. A faxina, com o objetivo de suportar o biorolo, necessita de estar em contacto com terra vegetal na camada inferior e será composta por ramos de salgueiros, com núcleo central de terra,

enrolados por fio metálico, produzindo rolos com 30/40 cm de diâmetro e seguros por estacaria vertical viva de salgueiro.

Os esporões, de forma triangular, são colocadas na zona onde o recuo da margem é maior e onde a sua inserção é fácil. Estas estruturas atingem até 29 m e são constituídas por blocos de granito angular, em 2 ou 3 camadas e encaixados na margem com incisões de 2 m.

É igualmente contemplada a colocação de pequenos esporões, designados de deflectores, convenientemente espaçados e constituídos por blocos de granito angular com núcleo de menor granulometria. Os deflectores encaixam no enrocamento e assentam sob geotêxtil não tecido.

Os limites de intervenção estão protegidos por enrocamento vegetados, os quais têm a função de evitar o desgaste pelas extremidades, podendo fragilizar parte crucias da estrutura, nomeadamente junto à linha de água no sector de jusante.

Um pormenor geral pode ser encontrado na Figura 41 e um excerto da planta na Figura 42, na zona de implantação de um esporão.

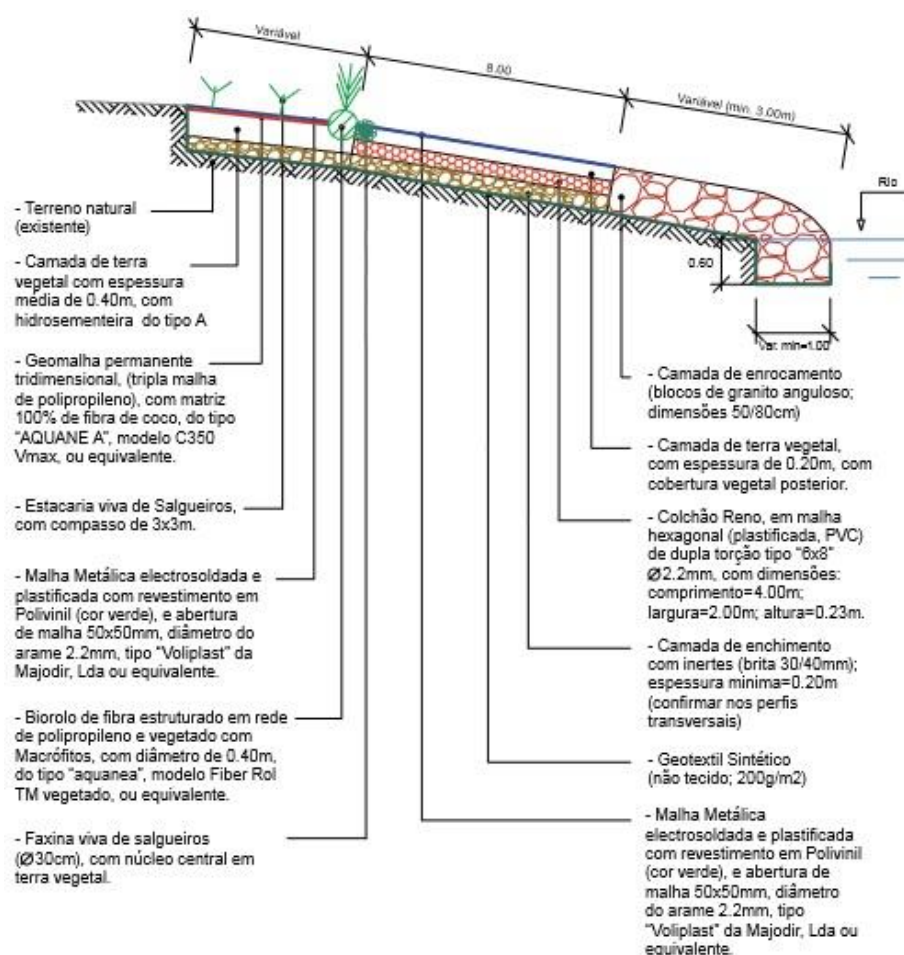


Figura 41 - Pormenor geral com especificações dos materiais em do projeto no troço de Cardielos (Cortes *et al*, 2010)

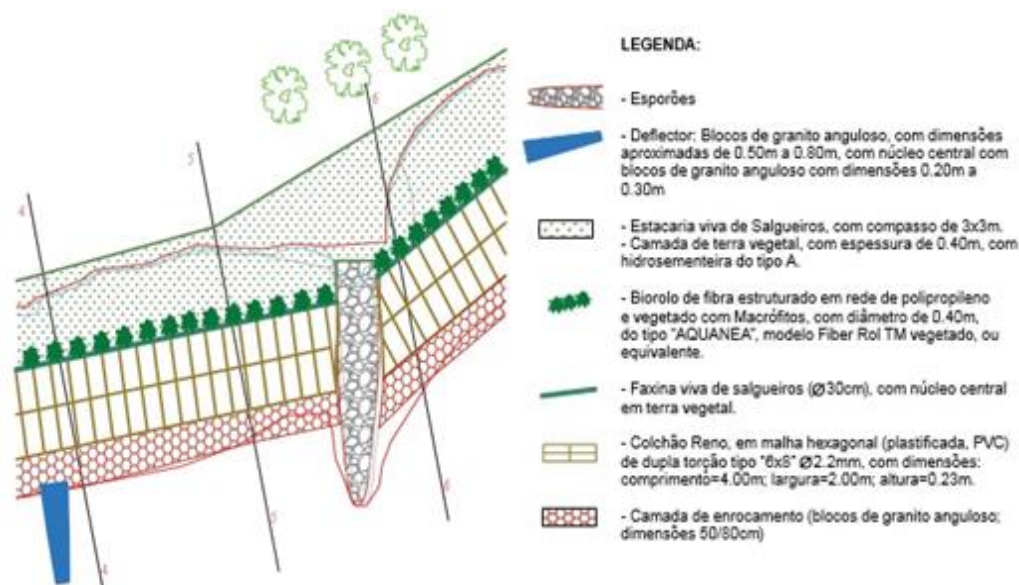


Figura 42 – Excerto da planta geral do projeto no troço de Cardielos (Cortes *et al*, 2010)

Embora o projeto de Requalificação das Margens do Rio Lima – Cardielos descreva a execução de 24 defletores e 6 esporões ao longo dos seus 900 metros, até ao momento só estão concluídos na íntegra cerca de 300 metros, ou seja, até ao segundo esporão (de jusante para montante). Nos restantes 600m apenas estão realizados os esporões. Na Figura 43 vê-se parte da obra já construída.



Figura 43 – Intervenção no troço de Cardielos

6.4.4. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO

Como referido anteriormente, Cardielos tem uma zona ainda por completar. Nesta zona é possível ter uma ideia do estado de conservação em que estava todo o local antes de qualquer intervenção. Na Figura 44, facilmente se identifica um tipo de solo estratificado, sofrendo erosões na sua base, vindo inevitavelmente a colapsar.



Figura 44 – Estratificação do talude marginal no troço de Cardielos

A estrutura composta por esporões e deflectores parece estar completa e funcional como se verifica, como exemplo, na Figura 45, onde, entre as obras transversais se verifica deposição de sedimentos (Figura 46) e não há indícios de remoção dos blocos do seu local original.



Figura 45 – Esporão no troço de Cardielos



Figura 46 – Sedimentação entre esporões

Verifica-se que há zonas em que a hidrossementeira não vingou (Figura 47). Esta situação pode-se dever à má aplicação na altura da intervenção, ou ao mau abuso por parte pedonal, que ignorando os sinais de aviso, vagueia por cima de toda a intervenção afetando o crescimento vegetacional.



Figura 47 – Hidrossementeria com falhas no troço de Cardielos (Junho, 2014)

Embora toda a vegetação apresente um bom desenvolvimento, é de referir que as estacas de salgueiro plantadas não foram as projetadas (projetaram-se estacas de 50/60 cm e foram colocadas estacas de 20/30 cm - ver Figura 48). A altura não atingiu, mesmo assim, a projetada, muito possivelmente por ação erosiva provocada por transeuntes que afluem a esta zona em massa, sobretudo nos fins de massa. Tal como em Portuzelo, foram também identificadas algumas zonas com predominância de espécies invasoras (erva-das-pampas).



Figura 48 – Estado da vegetação no troço de Cardeiros (Junho, 2014)

A rede metálica exposta (Figura 49), na zona onde os colchões Reno estão enterrados, que deveria conter e proteger a camada de terra vegetal é um indicador dos fenómenos de erosão já sofridos por uma ocasião de cheia ou eventos de maré que sobem o nível da água.



Figura 49 – Rede metálica exposta no troço de Cardielos (Junho, 2014)

Junto ao afluente, onde este conjunto de técnicas de proteção de margens se encontra, é possível verificar a um agravado estado de degradação das estruturas de proteção na extremidade final da intervenção, devido às forças erosivas do escoamento do afluente. Neste local verifica-se a falta de uma intervenção de remate junto ao afluente (Figura 50). Na Figura 51 é possível ver a rede de malha e o geotêxtil de proteção da hidrossementeira, que perdendo ancoragem deixa de cumprir a sua função eficazmente.



Figura 50 – Danos no canal do afluente ao rio Lima no troço de Cardielos



Figura 51 – Rede metálica danificada na reabilitação de Cardielos

Nos 600 metros que ainda só estão protegidos pelos esporões, verifica-se bastante erosão, o que aliado à estratificação do solo, põe em risco a zona de lazer e uma linha de árvores de grande porte (Figura 52).



Figura 52 – Estratificação do solo e linha de árvores

6.4.5. RUGOSIDADE DOS MATERIAIS

A margem direita do rio Lima em Cardielos está caracterizada com um coeficiente de rugosidade igual a $0,06 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ ($K_s=16,67$) no trabalho desenvolvido por Pinheiro e Cruz (2007). Tal como para Portuzelo, o valor usado para o novo coeficiente de rugosidade foi obtido através do “*Reference Manual*”. Três valores diferentes para este coeficiente irão espelhar a diferente natureza entre eles (Tabela 11). Alterando a geometria e características de rugosidade foi possível obter três novas estações entre VC15 e VC16.

Tabela 11 – Coeficientes de rugosidade, n , e coeficiente da fórmula de Manning-Strickle para Cardielos

Perfil	n ($m^{-1/3}/s$)	K_s
Perfil 5 (Deflector)	0,05	20
Perfil 11	0,055	18,18
Perfil 20A (Esporão)	0,045	22,22

6.4.6. MODELAÇÃO E RESULTADOS

Os novos perfis em Cardielos dão pelo nome de VC15.1, VC15.2 e VC15.3. A introdução destes novos perfis transversais no programa HEC-RAS permitiu o cálculo dos seguintes resultados:

Tabela 12 - Tensões e Velocidades em Cardielos antes da reabilitação nos perfis base

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m^2)	Velocidade (m/s)
VC 16	2.33	6.13	0.5
VC 16	5	7.56	0.57
VC 16	100	14.58	0.84
VC 15	2.33	13.28	0.71
VC 15	5	16.49	0.82
VC 15	100	32.74	1.23

Tabela 13 - Tensões e Velocidades em Cardielos depois da reabilitação nos perfis base

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m^2)	Velocidade (m/s)
VC 16	2.33	4.35	0.43
VC 16	5	5.47	0.49
VC 16	100	10.85	0.74
VC 15	2.33	13.32	0.71
VC 15	5	16.56	0.82
VC 15	100	32.97	1.24

Neste caso, o perfil VC15 (a jusante da reabilitação) manteve-se praticamente sem alterações tanto de velocidades como de tensões de arrastamento, mesmo com a introdução da reabilitação de margens em Cardielos. No que respeita ao perfil VC16, verifica-se uma ligeira diminuição de tensões em todo o espectro do período de retorno, rondando globalmente os 27,5%.

Tabela 14 - Tensões e Velocidades em Cardielos depois da reabilitação (perfis adicionados que modelam a estrutura de proteção)

Perfil	Período de Retorno	Tensão (N/m ²)	Velocidade (m/s)
VC 15.3	2.33	4.34	0.58
VC 15.3	5	5.45	0.66
VC 15.3	100	10.76	0.98
VC 15.2	2.33	4.98	0.51
VC 15.2	5	6.21	0.58
VC 15.2	100	12.11	0.86
VC 15.1	2.33	9.59	0.76
VC 15.1	5	12.12	0.87
VC 15.1	100	24.6	1.32

Relativamente às secções reabilitadas, nos três perfis VC15.1, VC15.2 e VC15.3 houve uma descida das tensões de arrastamento atuantes chegando, no máximo, a uma diminuição de cerca de 30%.

6.4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste caso, os resultados obtidos caracterizam relativamente bem a situação verificada em campo. Os valores obtidos situam-se abaixo da resistência dos esporões/deflectores (com uma resistência máxima semelhante ao enrocamento). Dos restantes constituintes do conjunto de técnicas apresentadas, os que poderiam apresentar uma resistência mais débil são: a camada de terra vegetal, a faxina viva e a estacaria viva. É difícil caracterizar a resistência da camada vegetal sem um teste *in situ*, mas será razoável afirmar que será inferior às resistências equivalentes das faxinas e estacaria que rondam, pelo menos, os 50Pa e 1,5m/s (valores que não são ultrapassados nos resultados obtidos). De facto, e de encontro com a observação feita em campo, a camada vegetal (que expõe a rede metálica), com uma resistência estimada de cerca de 15-18Pa será a única a sofrer alterações devido a processos erosivos (ver Figura 49).

7

CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prevenção e mitigação dos fenómenos de erosão provocada por eventos de cheias são de elevada importância e é conseguida através da implementação de estruturas de proteção de margens. Uma boa seleção de estruturas de proteção de margens de rios inclui, como visto anteriormente, diversos critérios com diferentes exigências estruturais e ambientais. Para haver dados que ajudem à seleção adequada de uma estrutura de proteção é necessário haver uma análise de eficiência e monitorização constante de estruturas já implementadas, se possível em condições similares. Esta monitorização e análise de eficiência não é, geralmente, incluída nos projetos de reabilitação de margens, o que dificulta a elaboração de uma base de dados de eficiência de cada estrutura de proteção.

A quase total ausência de trabalhos neste âmbito de avaliação da eficiência, reflete a dificuldade, sensibilidade e conhecimento profundo necessários para atribuir uma classificação em termos técnicos, ambientais e económicos, quando cada caso de estudo apresenta características bastante específicas e diversificadas. Daí, a inexistência da validação dos resultados por meio de comparação com outras intervenções. A análise *in situ* das diferentes variáveis de caracterização apresenta-se como uma forma fundamental para aferir o cumprimento dos objetivos propostos, com a avaliação do estado de conservação. Há, no entanto, outros fatores (por exemplo problemas construtivos e dano provocado por transeuntes) que condicionam a eficácia das estruturas de proteção de margens.

A metodologia mostrou-se exequível na produção de resultados expectáveis, pese embora não explique todos os problemas encontrados, os quais poderão dever-se a problemas construtivos de aplicação da técnica ou à falta de consideração dos efeitos de maré. Devido à falta de ações de monitorização a fim de avaliar a evolução do estado de conservação das margens do rio Lima, algumas das técnicas aplicadas (hidrossementeira, redes metálicas, sistemas de fixação e remate da estrutura) não produziram o comportamento expectável. A realização de ações de monitorização poderia, porventura, ter identificado estas falhas numa fase inicial, levando à sua retificação imediata e contribuindo para a maior eficácia das mesmas.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de um trabalho que sirva de base de dados e referência futura a quem precisar de analisar a eficiência de estruturas de proteção de margens, englobando as técnicas de proteção de margens, incluindo técnicas tradicionais de engenharia e de bioengenharia, indicando todos os parâmetros a avaliar, os seus valores admissíveis e periodicidade aconselhada da monitorização em campo completando assim o trabalho aqui iniciado.

Na criação da base de dados, sugere-se a aplicação de um sistema de pontuação qualitativo ou quantitativo, que facilite a avaliação da eficiência de uma estrutura de proteção ou falta dela. Como é compreensível, numa estrutura de proteção, diferentes técnicas poderão contribuir de maneira diferente para o resultado da proteção. Como exemplo, na presença de enrocamento numa estrutura de proteção, será esperado que esta técnica desempenhe um papel fulcral na resistência a efeitos erosivos, acabando assim por ser mais importante na proteção da margem do que outras técnicas, contribuindo assim maioritariamente para evitar a ruptura da margem.

Sugere-se portanto, a definição de coeficientes de ponderação que permitam espelhar a importância de cada técnica na estrutura final. Neste trabalho esse sistema era para ser implementado, mas os entraves prendidos com a dificuldade na definição de coeficientes de ponderação justos não o permitiu, acabando por se abandonar essa abordagem.

Para ajudar futuras análises de eficiência, também se aconselha a criação de mais estações de obtenção de dados de precipitação e caudal, assim como levantamentos topográficos mais atualizados. Estes fatores ajudarão na produção de resultados de modelação mais fiáveis.

Este trabalho deve ser entendido, portanto, como um protótipo que aponta as primeiras bases a seguir na avaliação da eficiência de estruturas de proteção de margens implementadas.

8

BIBLIOGRAFIA

- Aleixo, Rui. (2006). *Estudos de Sedimentos e Transporte Empregando Novas Técnicas Analíticas e Experimentais*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- Anstead, L. and Boar, R. R. (2010). *Willow Spilling: Review of Streambank Stabilisation Projects in the UK*, Freshwater Reviews
- Anstead, L., Boar, R., Tovey, N. (2012) *The effectiveness of a soil bioengineering solution for river bank stabilization during flood and drought conditions: two case studies from East Anglia*, Royal Geographical Society, Volume 44, Pages 479-488, ISSN 0004-0894
- Antão, Cristovão. (2012). *Seleção e Dimensionamento de Estruturas de proteção de Margens de Rios. Aplicações Práticas*. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- ASCE (1967). *Closure to Sediment transportation mechanics: initiation of motion*, by Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual, Vito A., Vanoni, J. Hydraul. Div., ASCE, vol. 93
- ASCE (1975). *Sedimentation engineering, Manuals and Reports on Engineering Practice*, no. 54, Ed. Vito A. Vanoni, ASCE
- Brighetti, Giorgio. (2001). *Estabilização e Proteção de Margens*. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária
- Buchanan, B. P., Walter, M. T., Nagle, G. N. and Schneider, R.L. (2012). *Monitoring and Assessment of a River Restoration Project in Central New York*. River Research and Applications, New York.
- Cardoso, Adriana. (2008). *Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação de Alternativas de Intervenção em Cursos de Água em Áreas Urbanas*, Escola de Engenharia da UFMG
- Cardoso, António. (1998). *Hidráulica Fluvial*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa
- Cartografia (2008). *Aulas de Topografia*, FEUP
- Chang, H. H. (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. John Wiley & Sons, New York
- Chow, V.T. (1959). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Inc, New York
- Chow, V.T. (1973). *Open-channel hydraulics*. McGraw Hill Inc, New York
- Coquim. (2014). <http://www.coquim.com.br/img/galerias/143a1aefea5f47615ca35ab752227e0a.jpg> (Junho, 2014)
- Cortes, R. M. V. (2004). *Requalificação de cursos de água*. Instituto da Água.

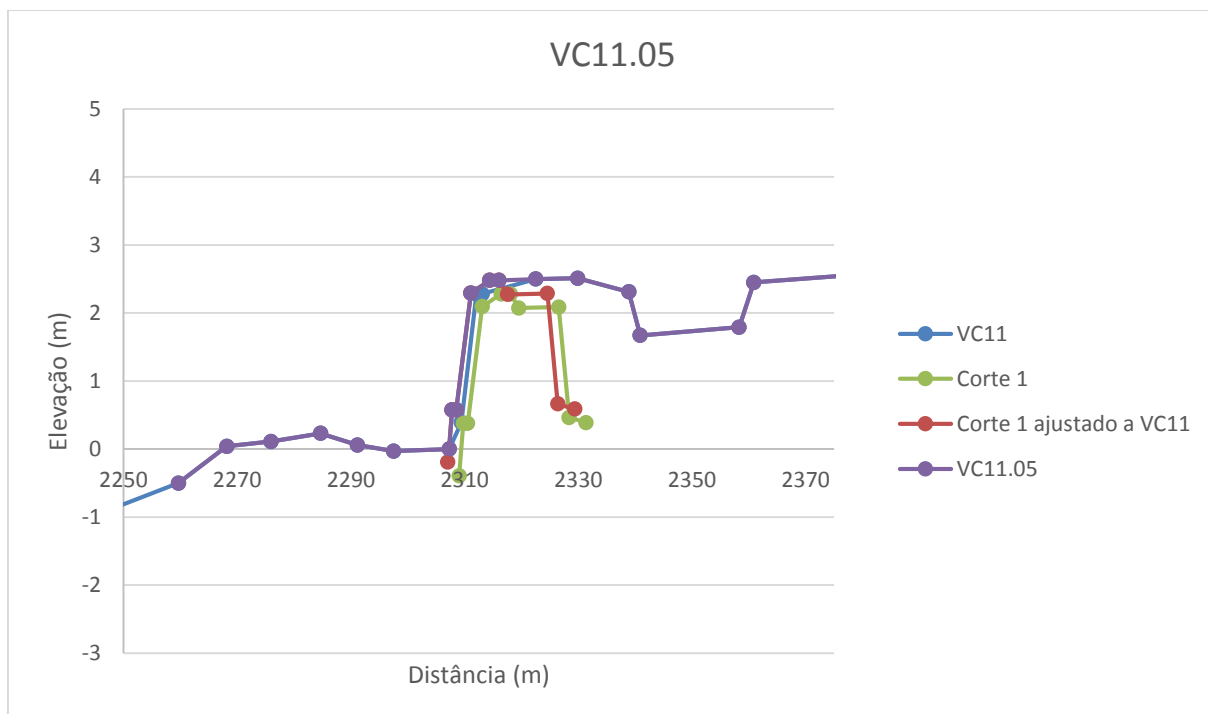
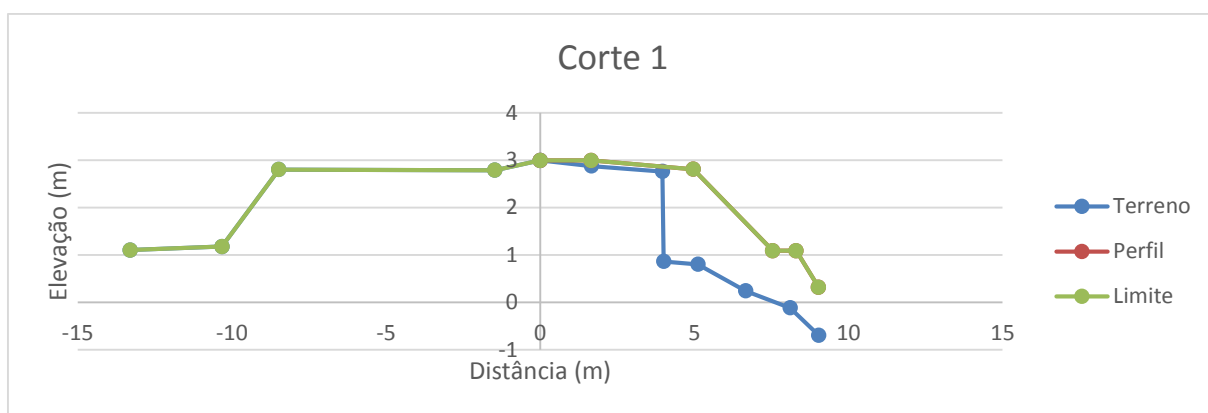
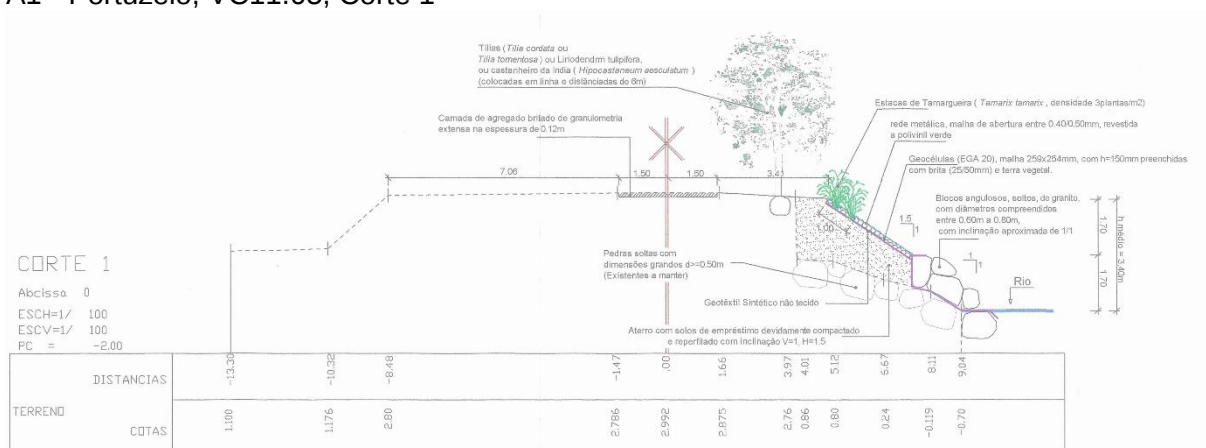
- Cortes, R. M. V., Fernandes, L. F., Cardão, J. M. N. (2011). *Requalificação das Margens do Rio Lima – Portuzelo: Projecto de Licenciamento*, UTAD/CMVC, Vila Real
- Cortes, R. M. V., Fernandes, L. F., Cardão, J. M. N. (2010). *Requalificação das Margens do Rio Lima – Cardielos: Projecto de Licenciamento*, UTAD/CMVC, Vila Real
- Escaraméia, M. (1998). *River and Channel revetments – A design manual*. Thomas Telford Ltd Londres.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (2001). *Stream Corridors Restoration*.
- Fernandes, João e Freitas, Aldo. (2011). *Introdução à Engenharia Natural Volume II*, EPAL, Rolo e Filhos II,SA
- Fischenich, C. e H. Allen. (2000). *Stream Management*. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.
- Fischenich, C. (2001). *Stability Thresholds for Stream Restoration Materials*, EMRRP Technical Notes Collection. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Georgia Environmental Protection Division, Watershed Protection Branch, (2011), *Streambank and Shoreline Stabilization*, Georgia
- Goncharev, V. N. (1964). *Dynamics of Channel Flow*, traduzido do Russo pelo Israel Program for Scientific Translations
- Graf, W.H. (1998). *Hydrodynamic Considerations*. In *Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*, Editor John Wiley & Sons, New York.
- Hemphill, R W. and Bramley, M. E. (1989). Protection of river and canal banks. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), Butterworths, London.
- Hjulstrom, F. (1935). *The Morphological Activity of Rivers as Illustrated by River Fyris*, Bolletín of the Geological Institute, Uppsala
- Jarvis, R. and Richards, I. G. (2008). *Engineering and the environment – perfect partners? The use of willows in bioengineering*. Meeting report CIWEM Birmingham, UK
- Kondolf, G. M., Curry, R. R. (1984). *The role of riparian vegetation in channel bank stability: Carmel River, California*. *California riparian systems: ecology, conservation, and management*.
- Kondolf, G. M., Curry, R. R. (1986). *Channel erosion along the Carmel River, Monterey County, California*. *Earth Surface Processes and Landforms Vol.11*, No. 3, Wiley InterScience.
- Kondolf, G. M., Micheli, E. R. (1995). *Evaluating stream restoration projects*. *Environ. Manage.* 19 (1), 1-15
- Kondolf, G.M., Piégay, H. (2005). *Bed Sediment Measurement*. In *Tools in fluvial geomorphology*,. Editor John Wiley & Sons, New York.
- Lane (1953). *Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by the Bureau of Reclamation*. Proceedings A.S.C.E. VOL. 70. Separata 280.
- Lencastre, Armando. (1996). *Hidráulica Geral*, Edição do Autor, Lisboa
- Li, Ming-Han e Eddleman, Karen E., (2002) *Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach*, *Landscape and Urban Planning*, Volume 60, Issue 4

- Li, X., Zhang, L., Zhang Z. (2006) *Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China, Ecological Engineering*, Volume 26, Issue 3
- Magalhães, Hélder. (2010). *Avaliação do Estado de Potencial Erosão das Margens de um Curso de Água. Aplicação a Troços estuarinos de Rios do Norte de Portugal*. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- Magdaleno, Fernando. (2011). *Manual de Técnicas de Restauración Fluvial*, CEDEX,
- Maia, R. (2013). *Aulas da unidade curricular Aproveitamentos Hidráulicos e Obras Flúvias 2 da Opção de Hidráulica do 5º Ano do MIEC*, FEUP
- Manci, K. M. (1989). *Riparian Ecosystem Creation and Restoration: A Literature Summary*. Biological Report 89 (20). US Fish and Wildlife Service, Washington, DC.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais Volume 1*, Feup Edições, Porto
- Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica Volume 2*, Feup Edições, Porto
- Montevecchi, Francesca. (2010). *Methodology Proposal to Assess Streambank Stability in Riverine Restoring Process*. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- Neill, C. R. (1973). *Guide to bridge hydraulics*, Road and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press.
- NRCS Natural Resources Conservation Service (1996). *Chapter 16: Streambank and Shoreline Protection*. Engineering Field Handbook, Aberdeen.
- Pinheiro, João e Cruz, Pedro. (2007). *Mapeamento das Zonas Inundáveis em Situação de Cheia nas Margens do Rio Lima em Viana do Castelo*. Seminário de Hidráulica 2006/07, FEUP.
- Rosgen, D.L. (2001). *A Practical Method of Computing Streambank Erosion Rate*. 7th Federal Interagency Sediment Conference, Março 24-29, Reno, Nevada.
- Shields, A. (1936). *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed- load Movement*. In Ott, W.P. and Unchelen, J.C. (Tradutores), *Mitteilungen der preussischen Nersuchsanstalt fur Wassed Brau end Schiffbuar*. Report 167, California Institute of Technology, Pasedena, Califórnia
- Sousa, Liliana. (2012). *Metodologia Para o Mapeamento de Cheias em Zonas de Risco. Aplicação a Um Troço de um Rio do Norte de Portugal*. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- Teiga Pedro. (2003). *Reabilitação de ribeiras em zonas edificadas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Teiga, Pedro. (2011). *Avaliação e Mitigação de Impactes em Reabilitação de Rios e Ribeiras em Zonas Edificadas. Uma Abordagem Participativa*. Dissertação de Doutoramento, FEUP.
- Woolsey, S., Capelli, F., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Paetzold, A., Roulier, C., Schweizer, S., Tiegs, S. D., Tockner, K., Weber, C., Peter, A. (2007). *A strategy to assess river restoration success*. *Freshwater Biology*.
- Zeh, Helgard. (2007). *Engenharia Natural – Manual Técnico*. Zurique
- Ziemer, R. R. (1981). *Roots and shallow stability of forested slopes*. *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. No. 132*

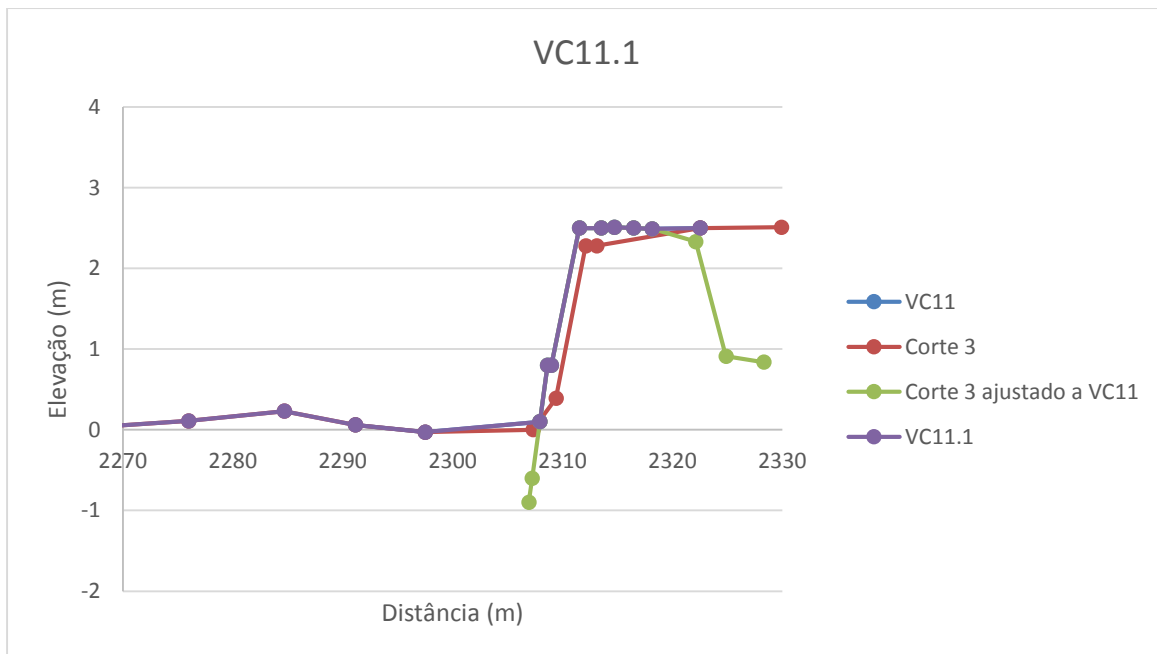
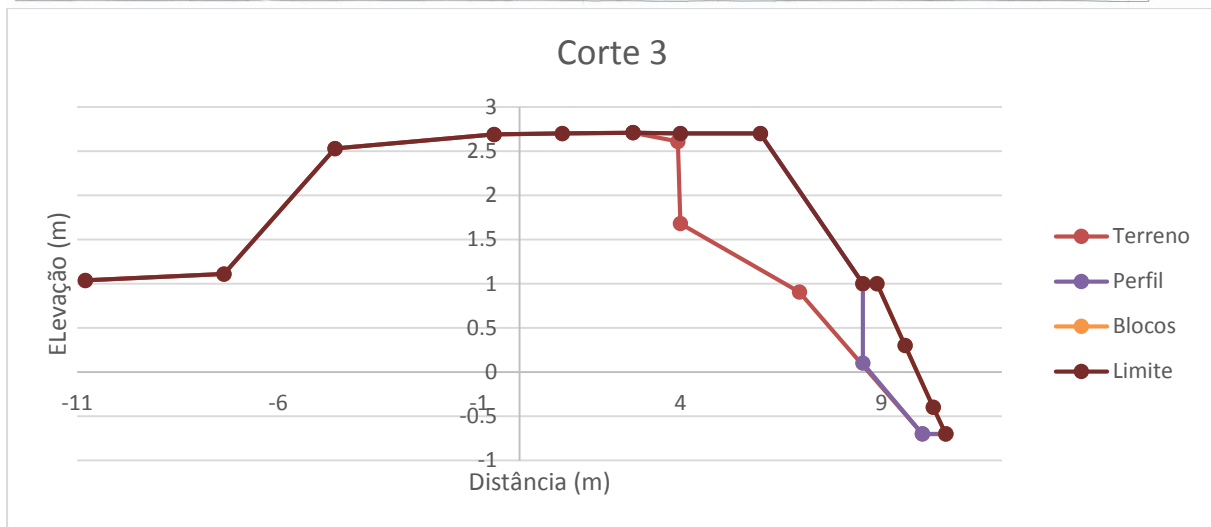
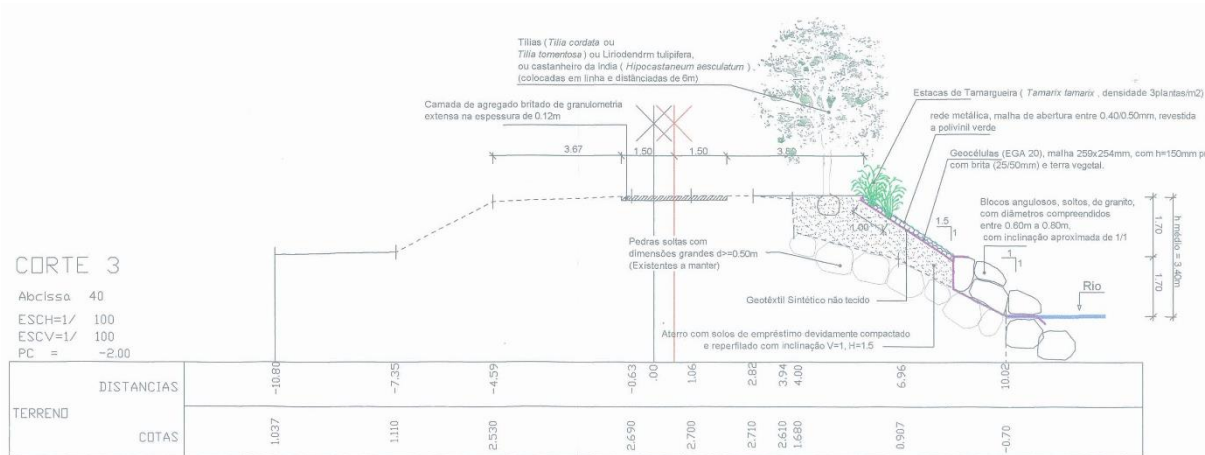
9

ANEXOS

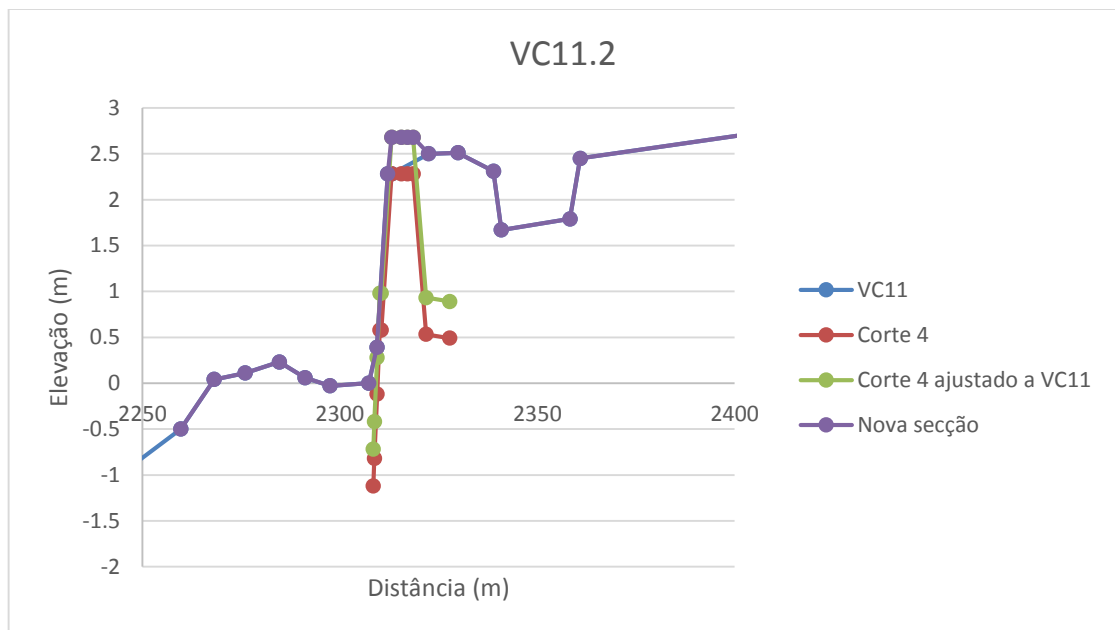
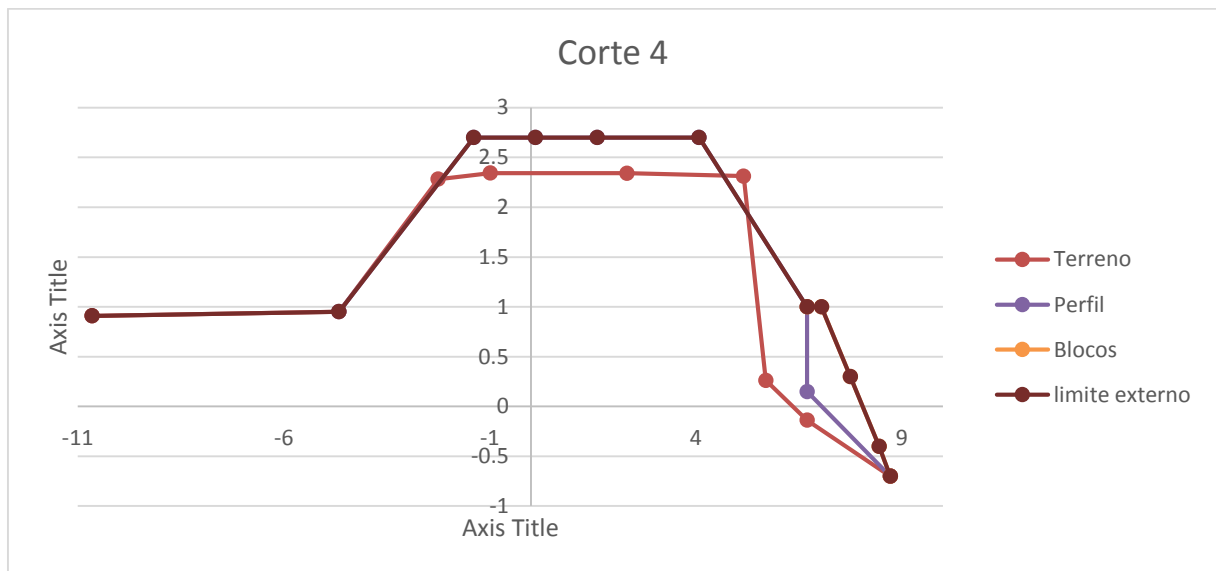
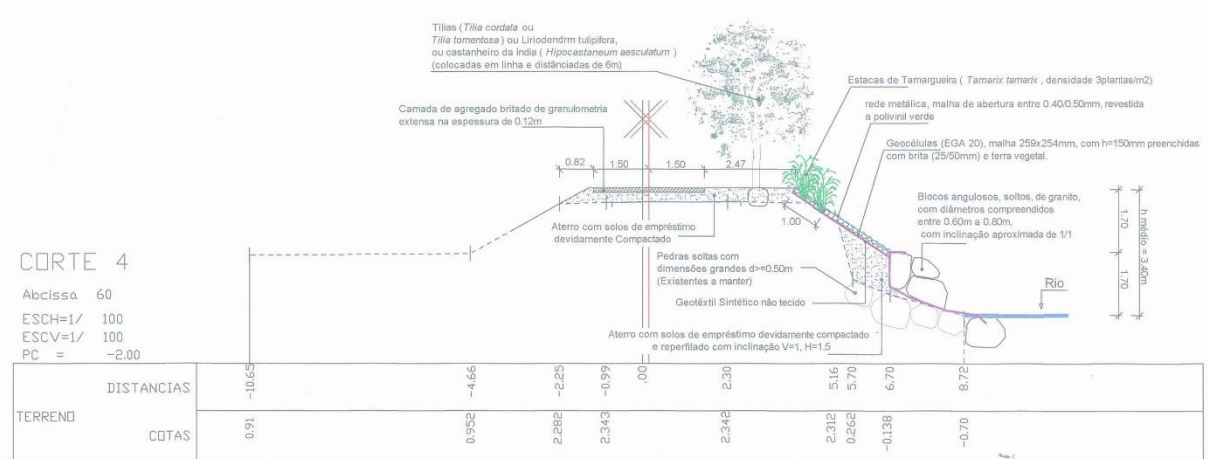
A1 - Portuzelo, VC11.05, Corte 1



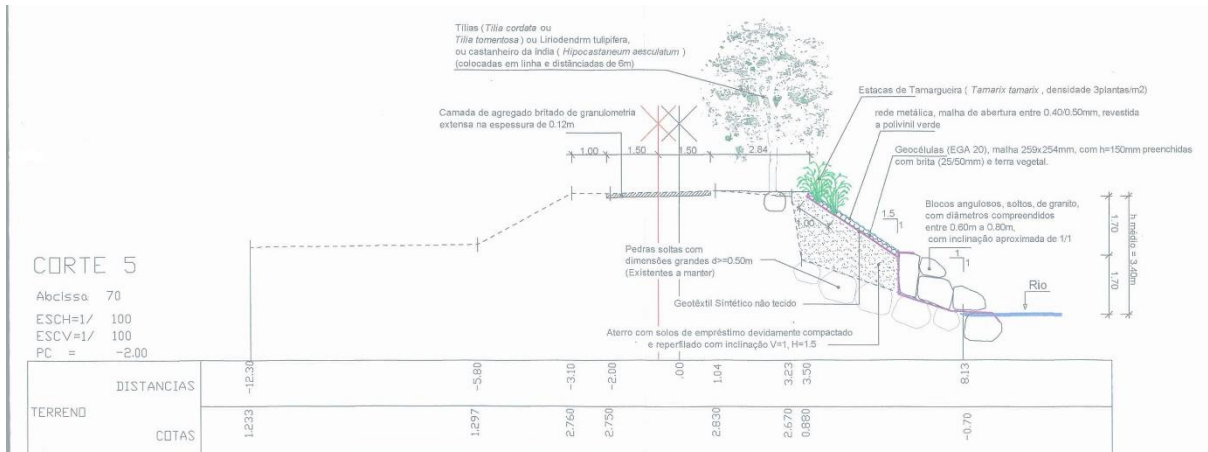
A2 – Portuzelo, VC11.1, Corte 3



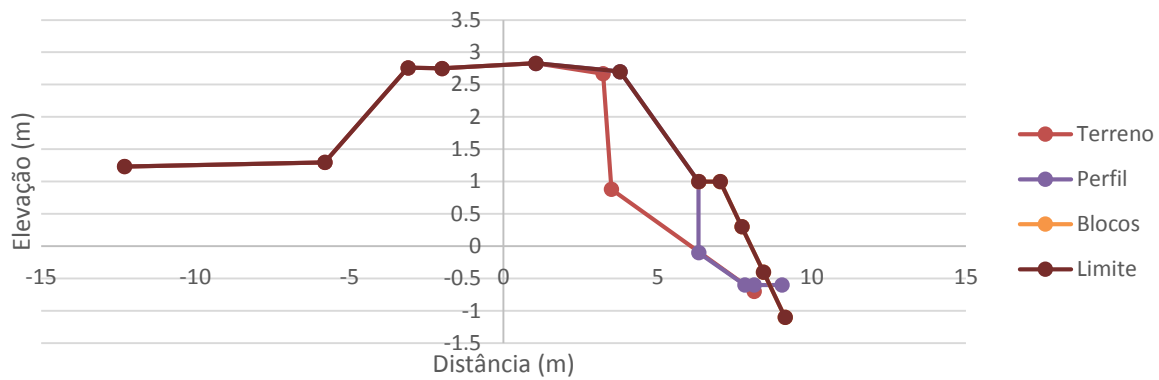
A3 – Portuzelo, VC11.2, Corte 4



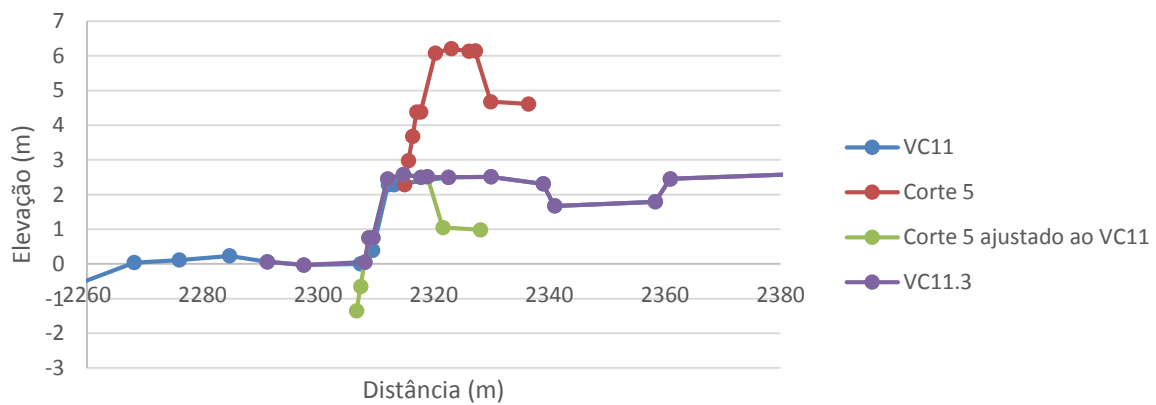
A4 – Portuzelo, VC11.3, Corte 5



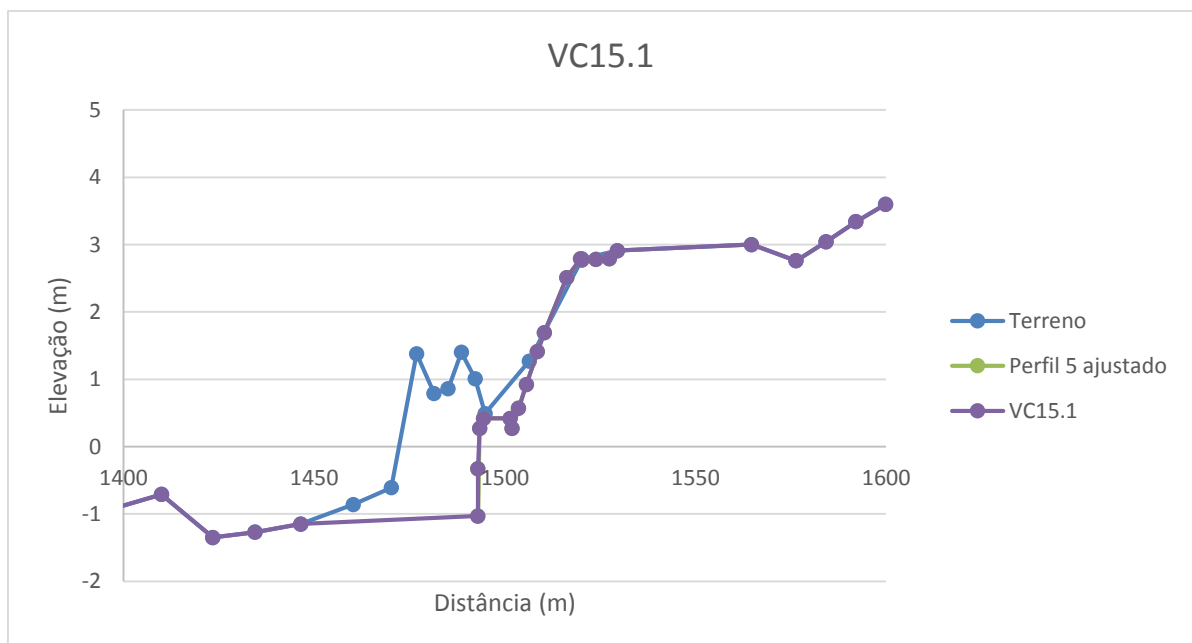
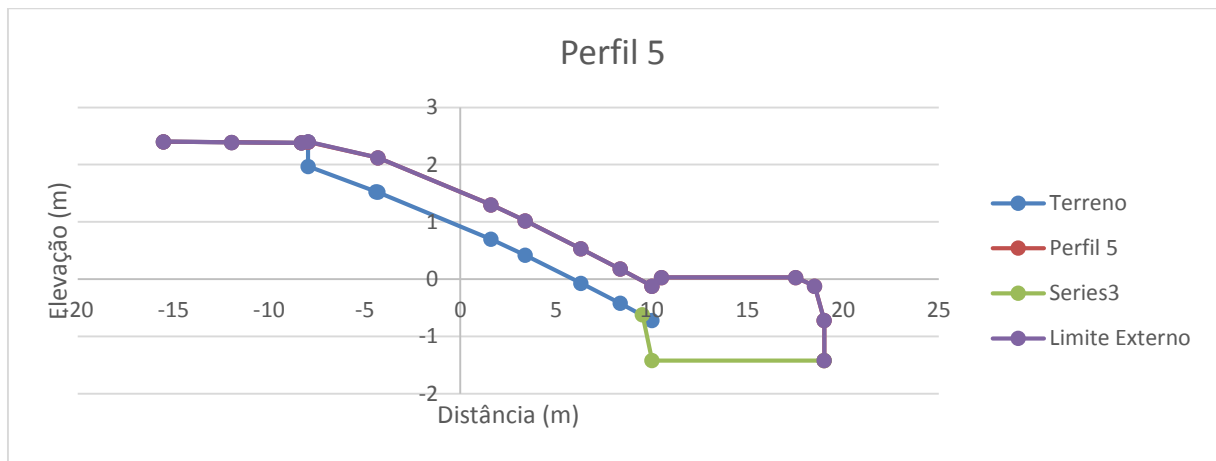
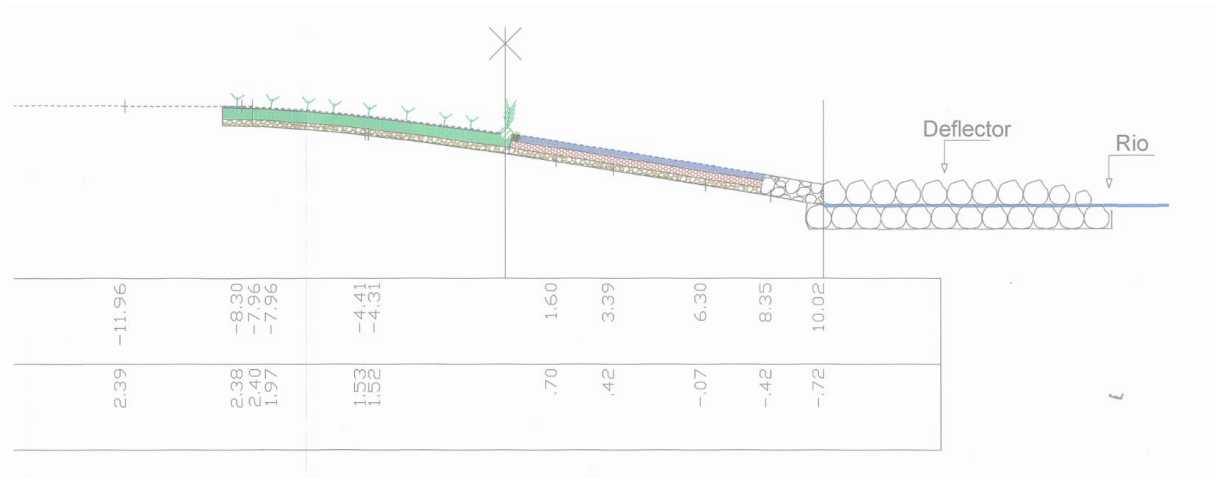
Corte 5



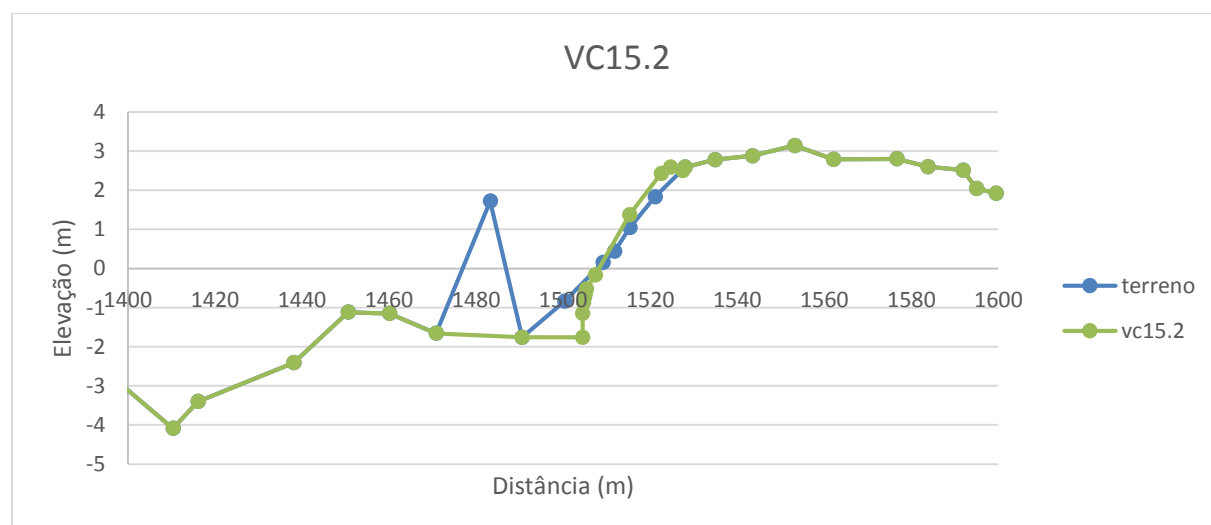
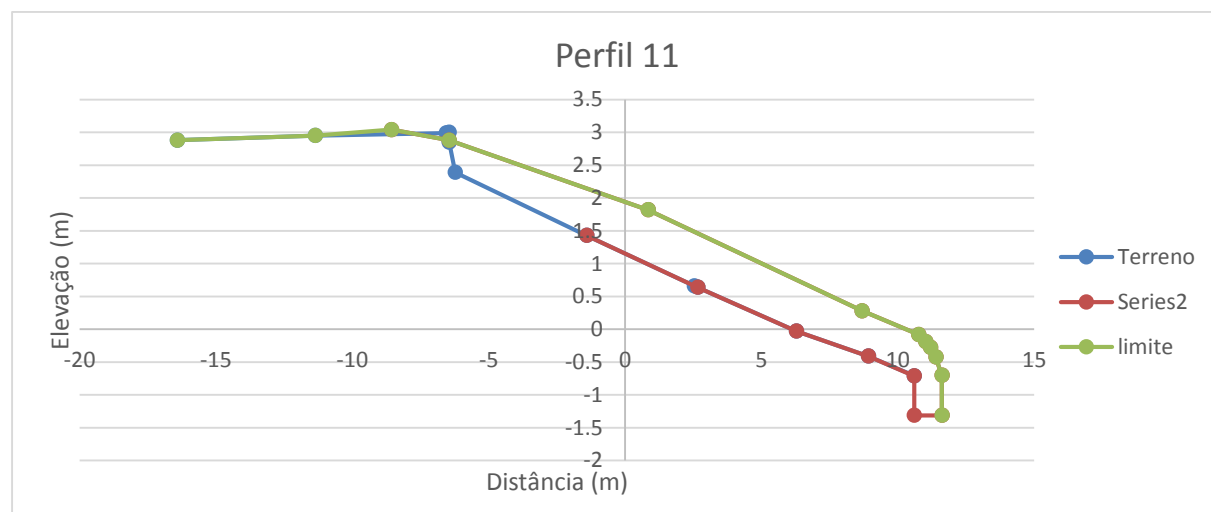
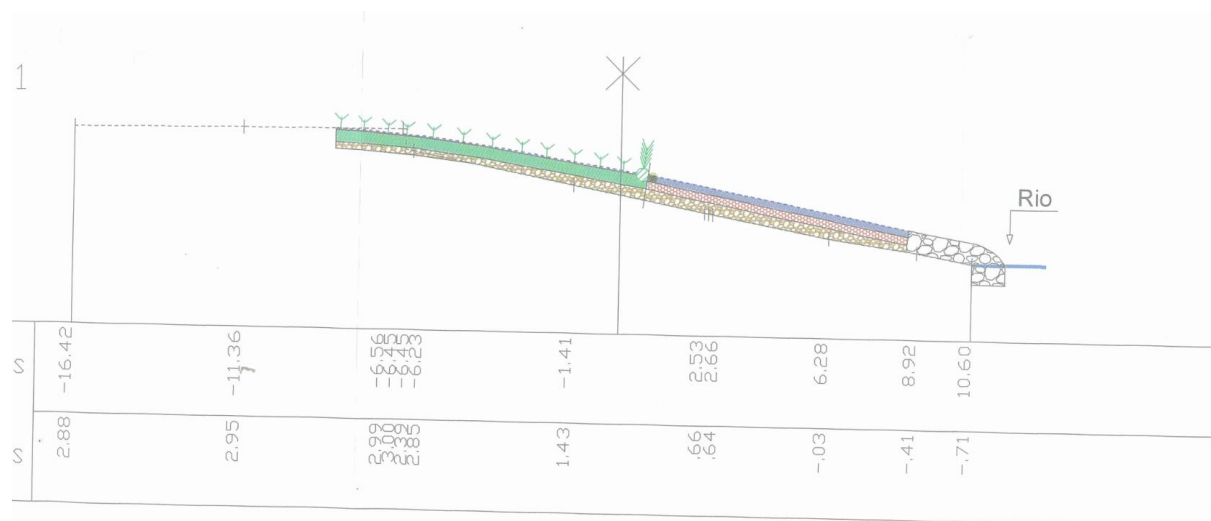
VC11.3



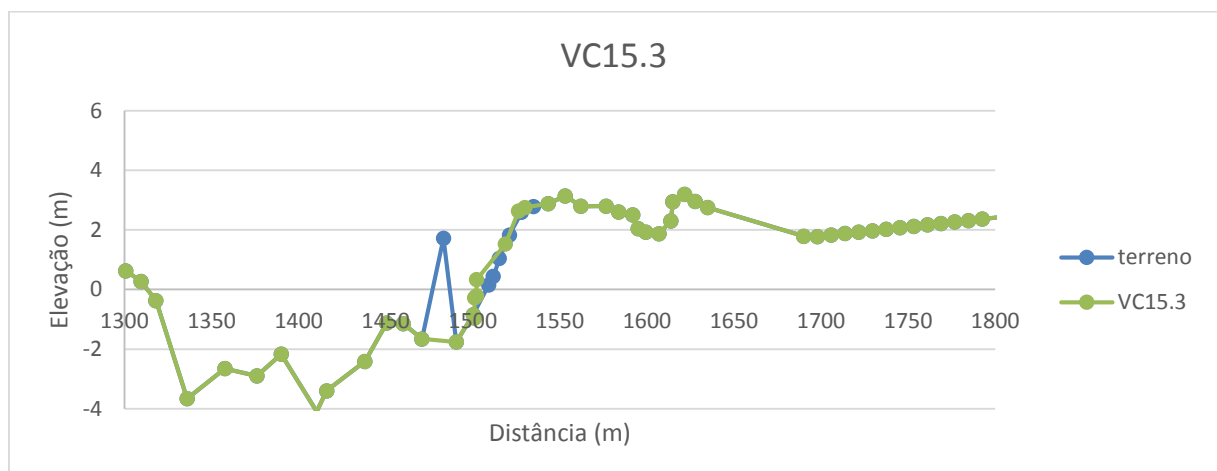
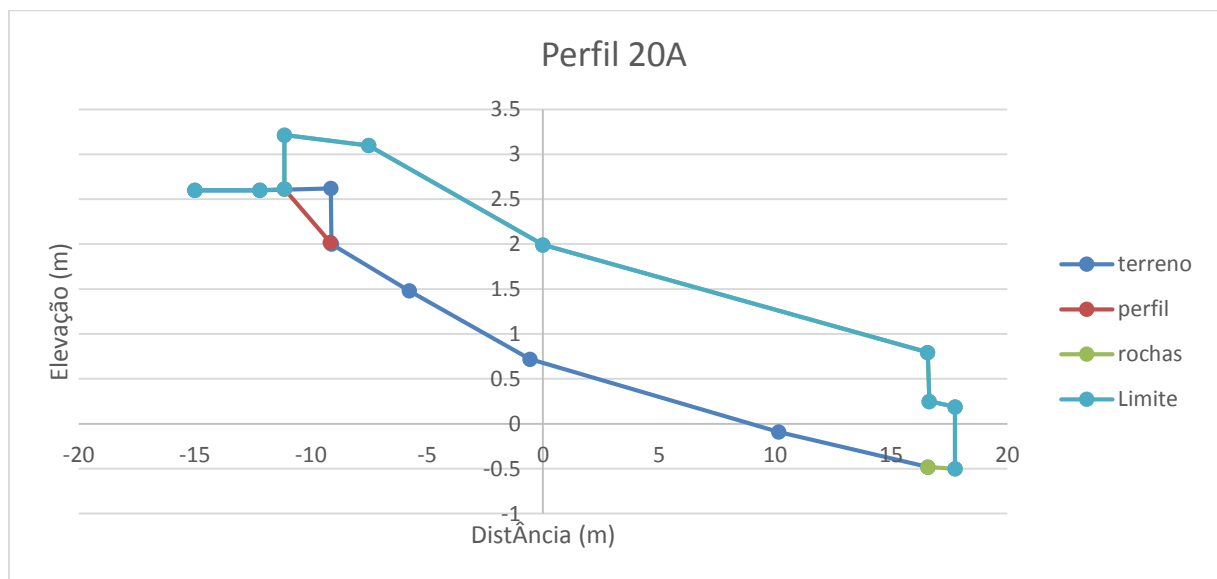
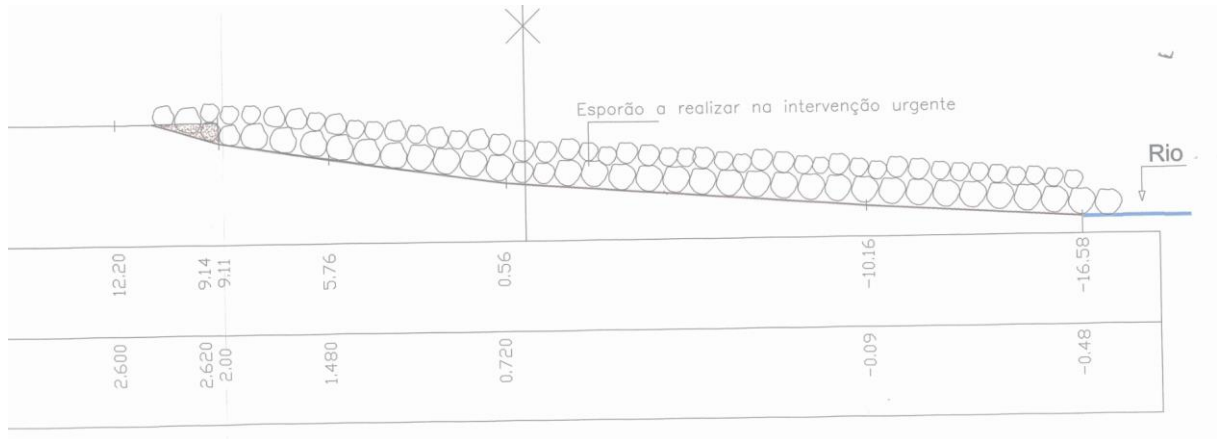
A5 – Cardielos, VC15.1, Perfil 5



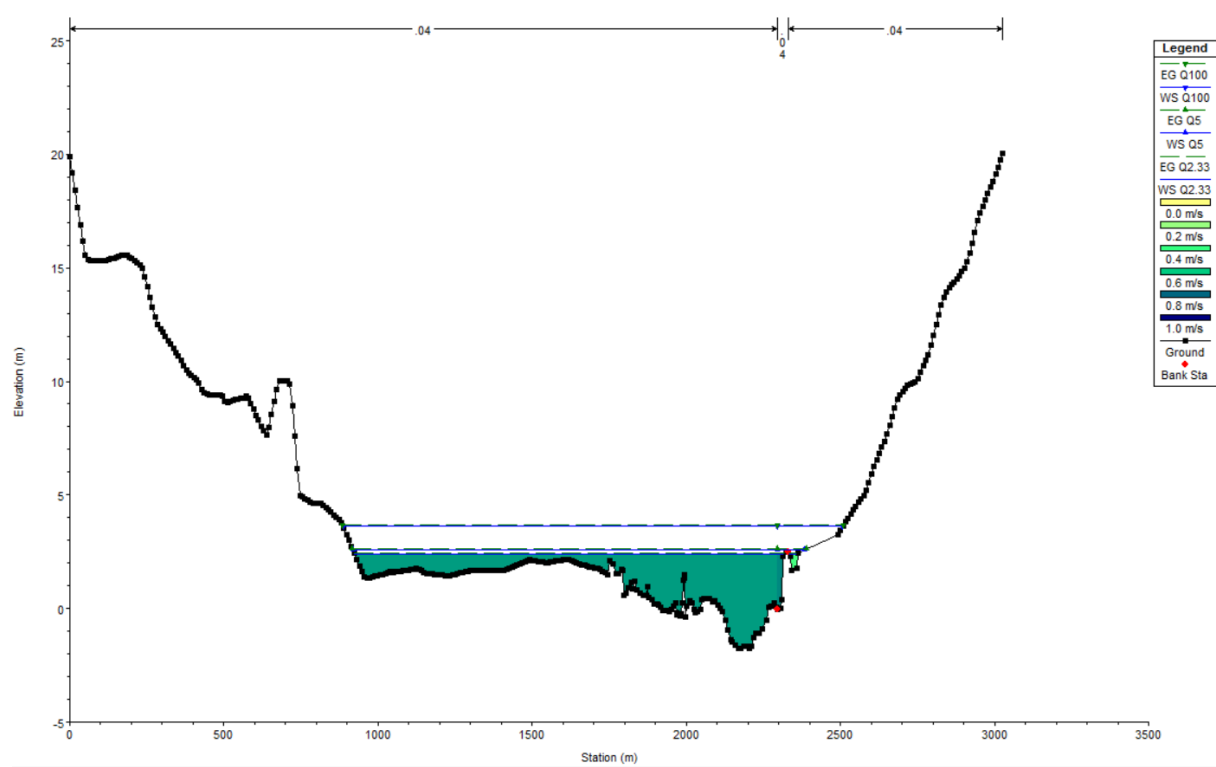
A6 – Cardielos, VC15.2, Perfil 11



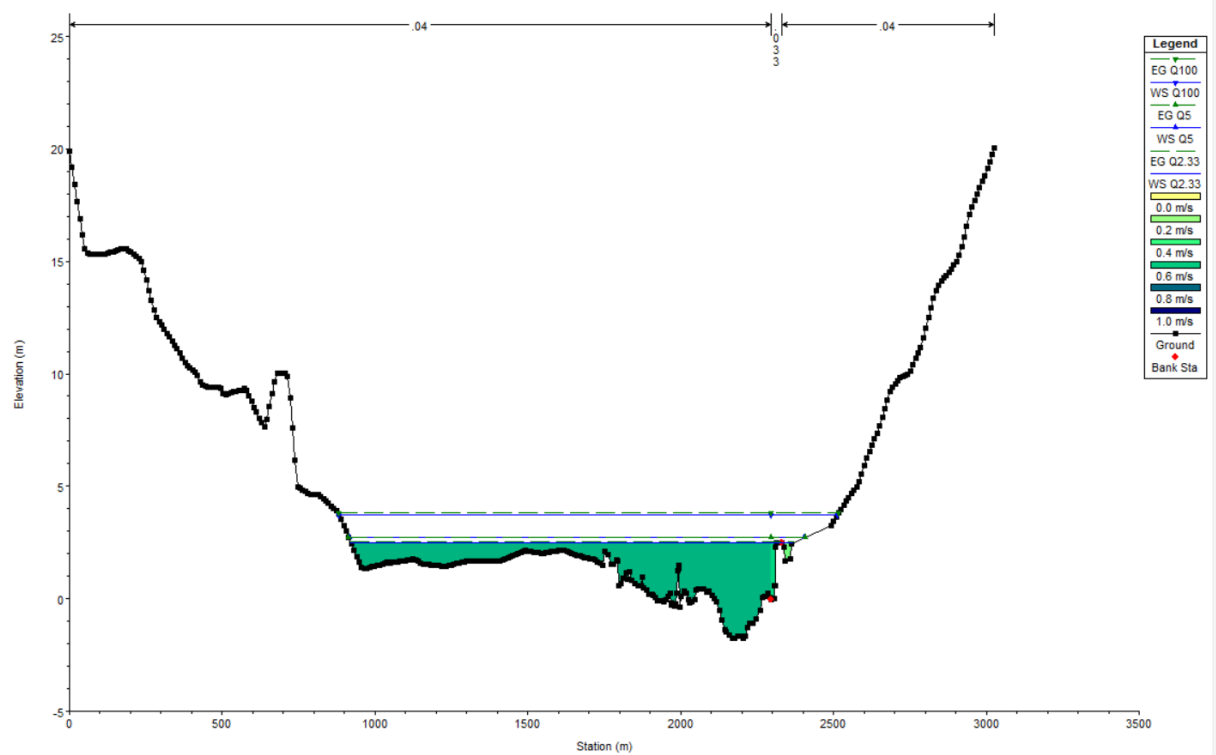
A7 – Cardielos, VC15.3, Perfil 20A



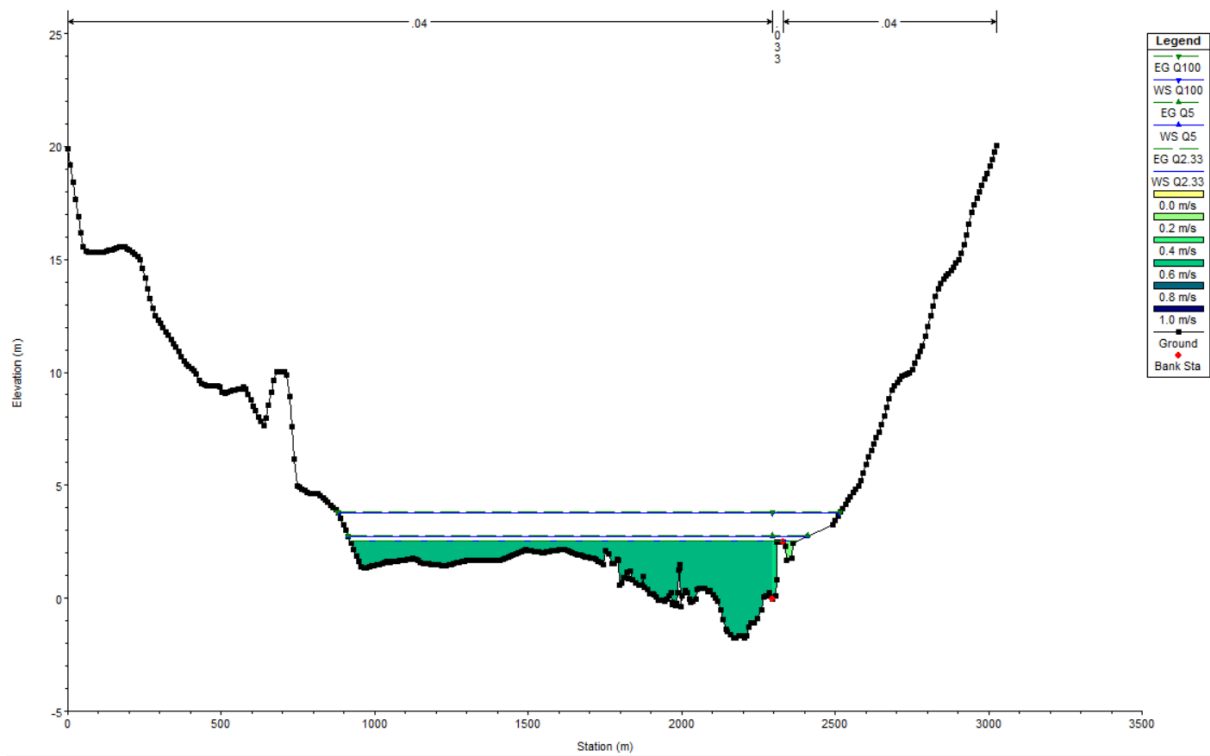
HEC-RAS VC11



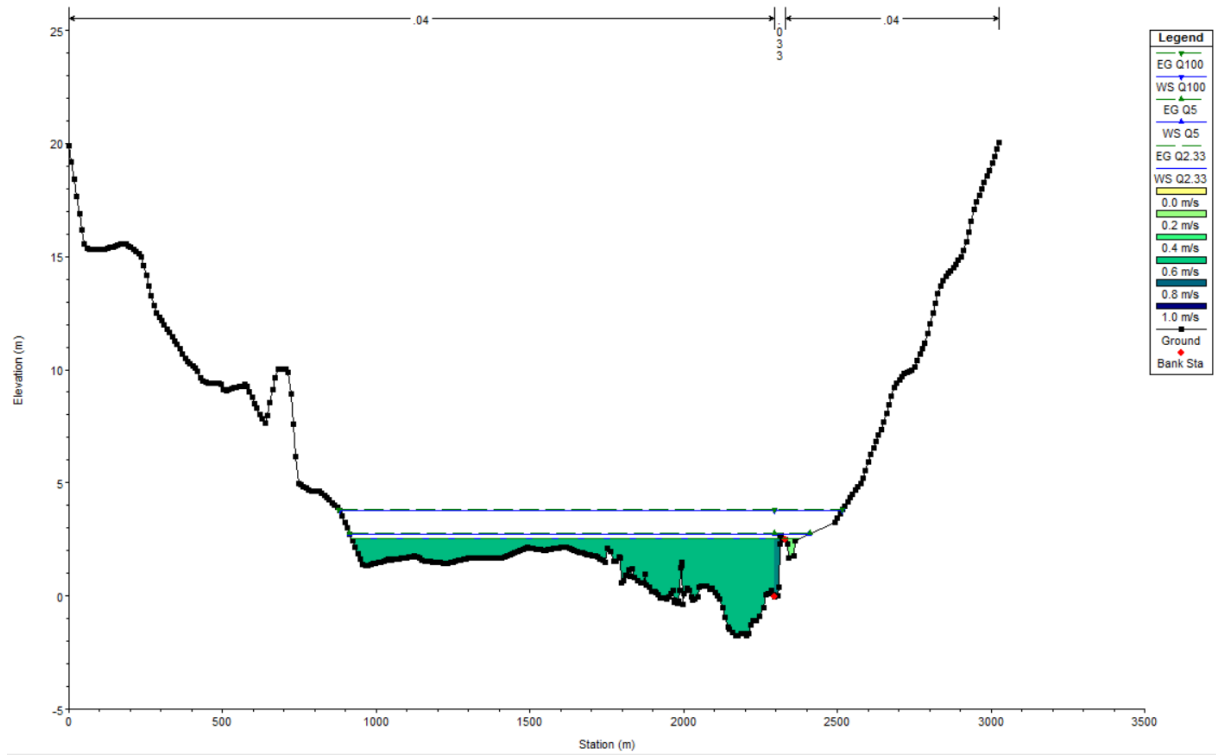
HEC-RAS VC11.05



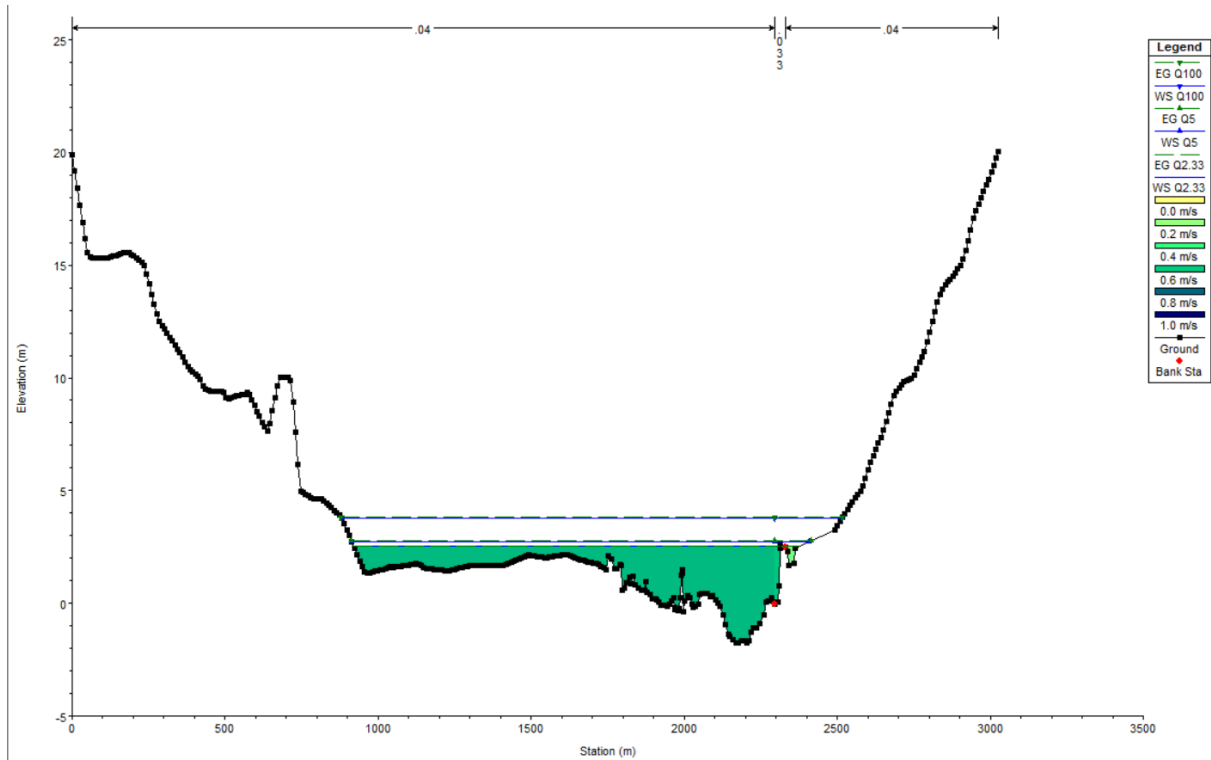
HEC-RAS VC11.1



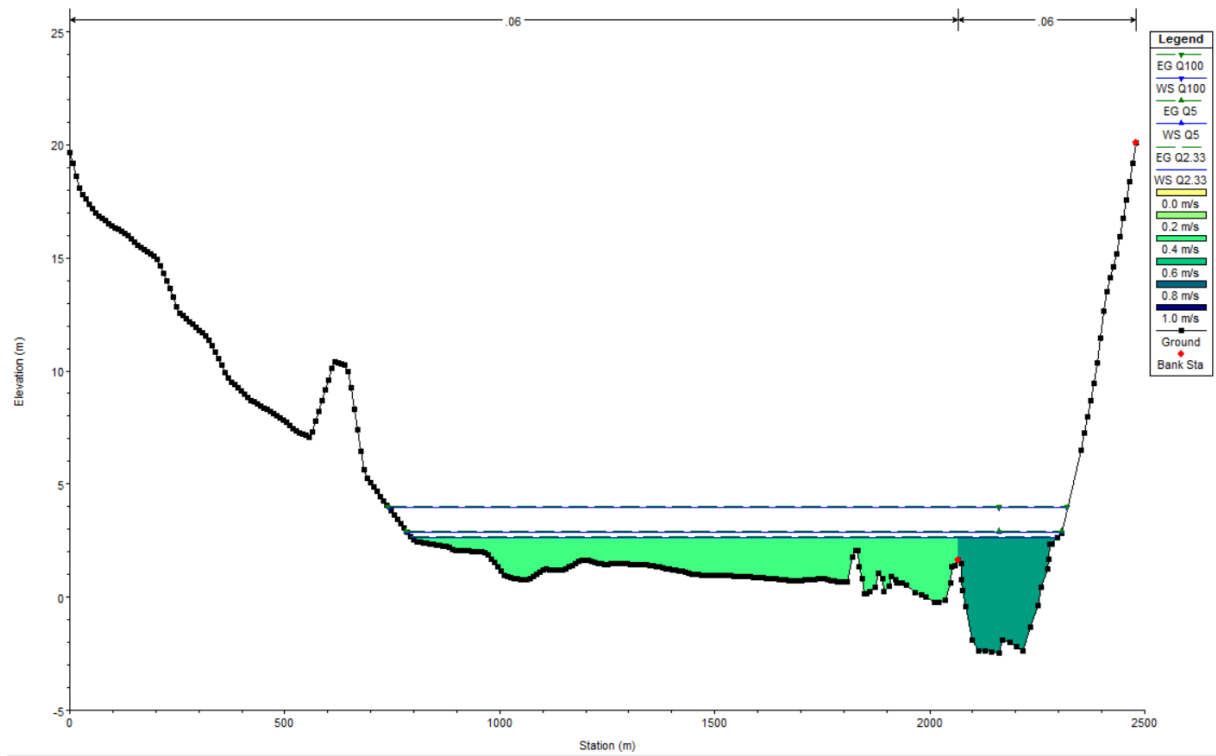
HEC-RAS VC11.2



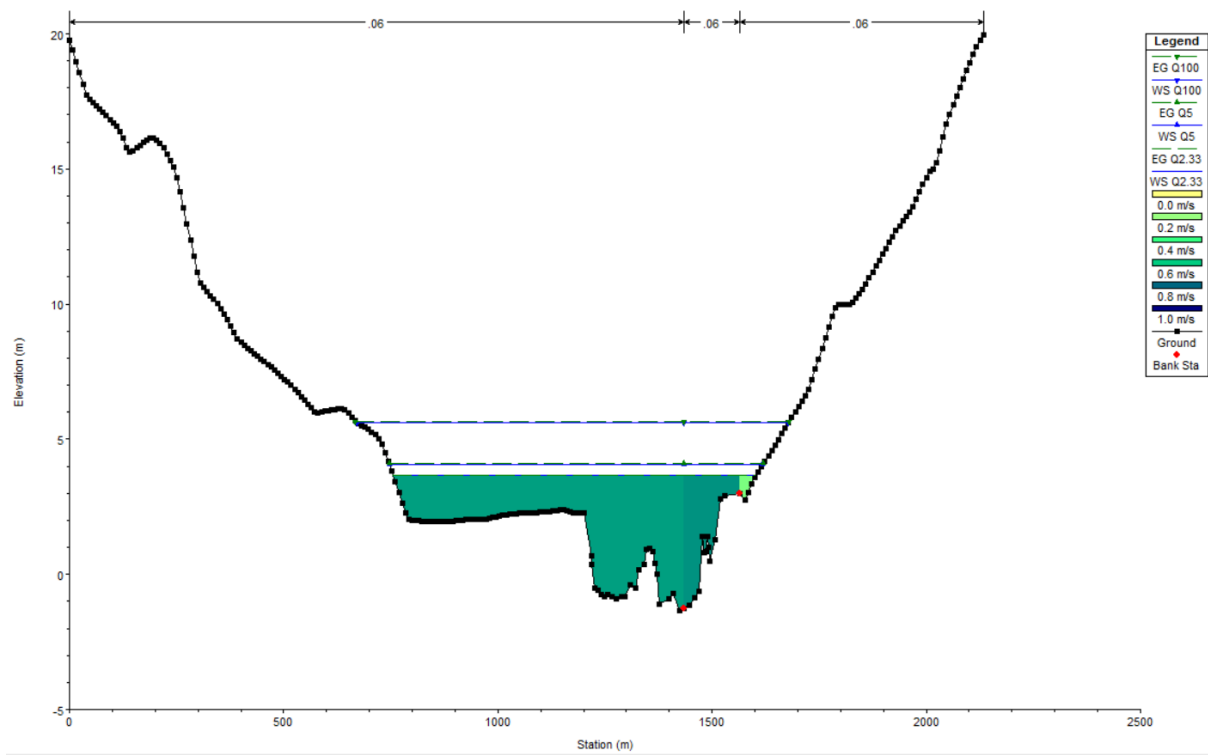
HEC-RAS VC11.3



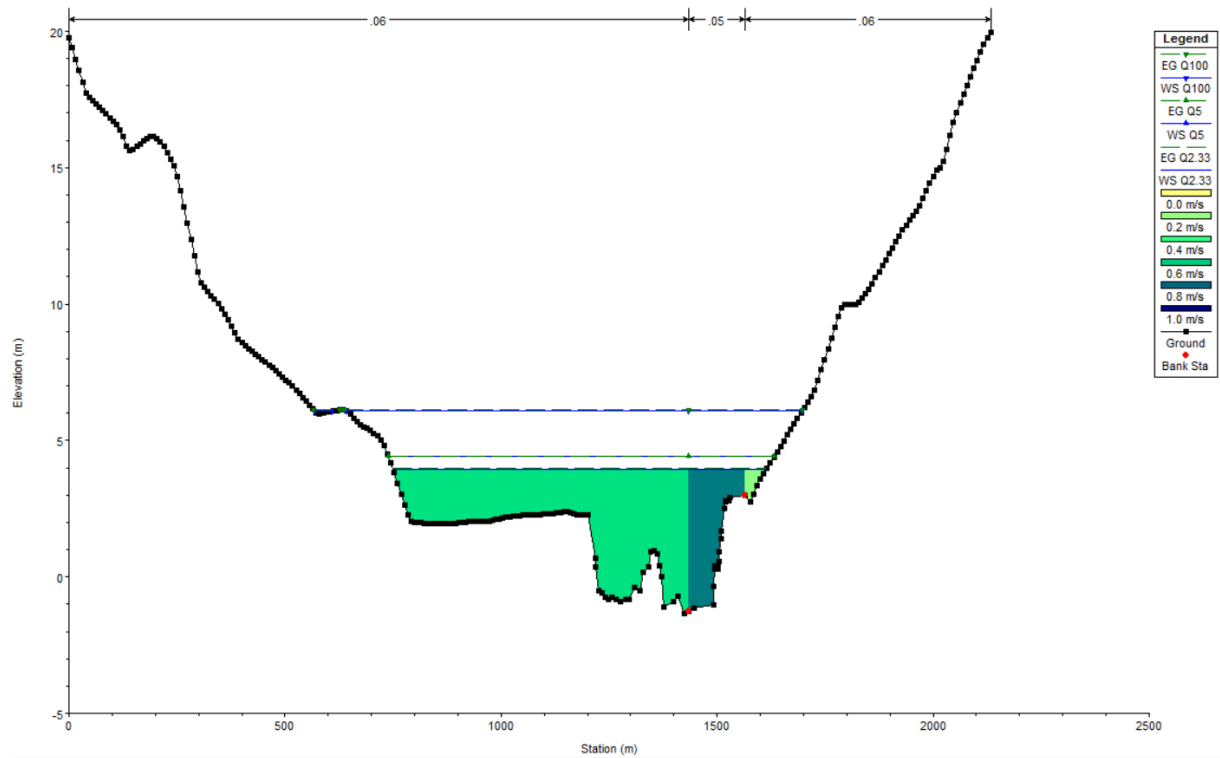
HEC-RAS VC12



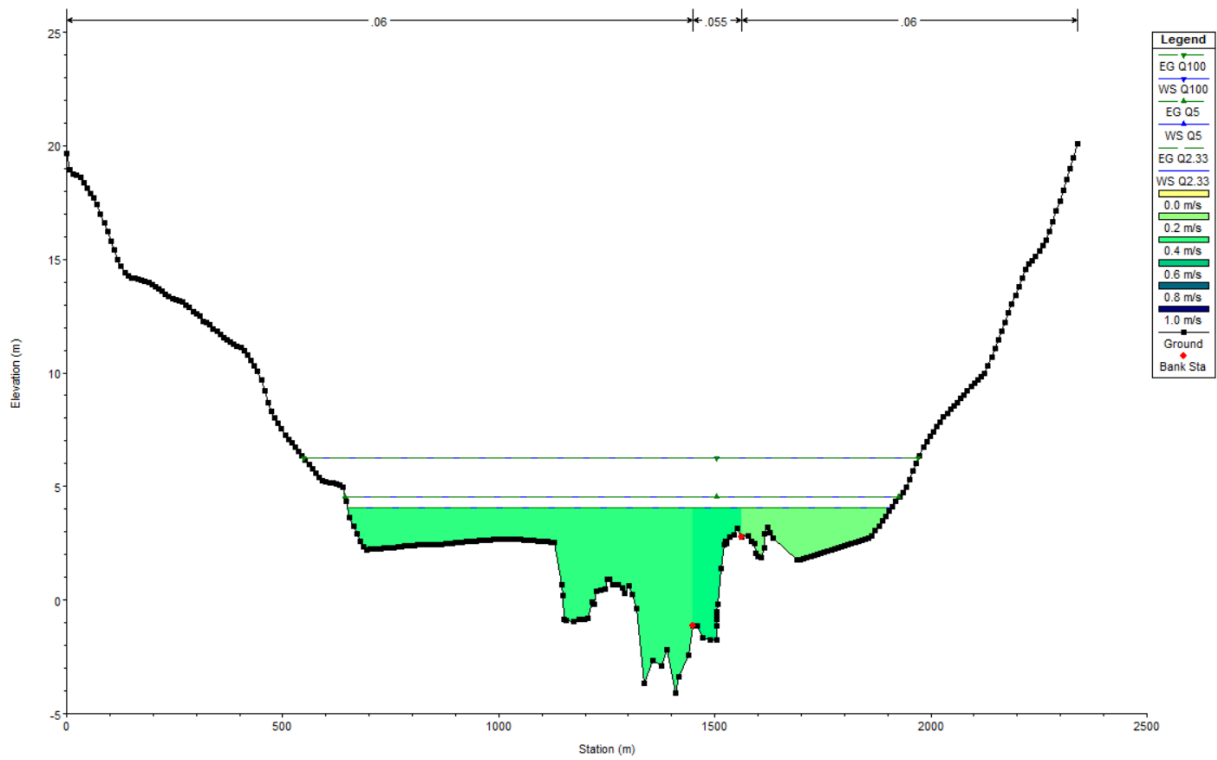
HEC-RAS VC15



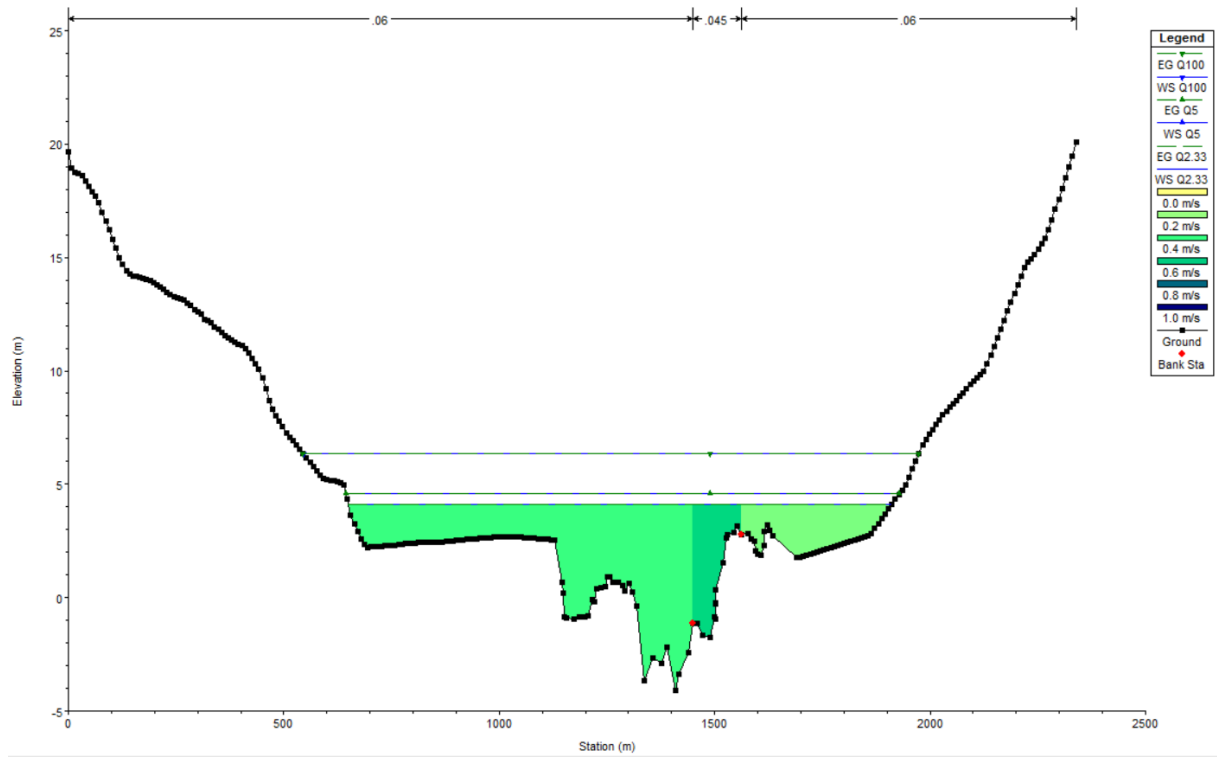
HEC-RAS VC15.1



HEC-RAS VC15.2



HEC-RAS VC15.3



HEC-RAS VC16

