



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TATYANNE CYBELLE COUTINHO

CANAIS REVESTIDOS COM GABIÕES TIPO COLCHÃO: um estudo e verificação
de seus critérios de estabilidade

Recife
2019

TATYANNE CYBELLE COUTINHO

CANAIS REVESTIDOS COM GABIÕES TIPO COLCHÃO: um estudo e verificação
de seus critérios de estabilidade

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos
Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Roberto G. de Azevedo

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- C871c Coutinho, Tatyane Cybelle.
Canais revestidos com gabiões tipo colchão: um estudo e verificação de seus critérios de estabilidade / Tatyane Cybelle Coutinho – Recife, 2019.
74f., figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. José Roberto G. de Azevedo.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil, 2019.
Inclui referências e anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Revestimento. 3. Gabião. 4. Canalização. 5. Proteção. 6. Estabilidade. I. Azevedo, José Roberto G. de. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019–344

TATYANNE CYBELLE COUTINHO

CANAIS REVESTIDOS COM GABIÕES TIPO COLCHÃO: um estudo e verificação
de seus critérios de estabilidade

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 05/ 08/ 2019.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. José Roberto G. de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Anderson Luiz R. Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Robson Melo do Nascimento (Examinador Externo)
Maccaferri do Brasil Ltda.

“Dedico este trabalho à minha mãe e meu pai de coração, Genilda Gonçalves e Darcy Gondim Coutinho Júnior, que com todo apoio e carinho me ajudaram a chegar até aqui.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ser meu guia nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Genilda Gonçalves Coutinho e Darcy Gondim Coutinho Júnior, por terem me ensinado a importância de uma educação de qualidade e por toda paciência e zelo durante toda minha trajetória, sem eles eu não teria chegado até aqui.

Aos meus parentes e amigos, que estiveram na torcida e entenderam os momentos de ausência.

Aos mestres, pela excelência e comprometimento ao transmitir conhecimento e em especial ao meu orientador, Roberto Azevedo, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e por toda contribuição ao longo do processo.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade estudar o revestimento gabião do tipo colchão como solução de engenharia em obras de canalização e de proteção direta de margens erodíveis de cursos d'água. Para tanto, apresentou-se as características técnicas, vantagens e processo de instalação do gabião tipo colchão em obras hidráulicas. Além disso, fez-se um fluxograma de cálculo o qual permite apresentar a metodologia de cálculo utilizada para a verificação estabilidade desse revestimento. Essa metodologia se baseou em dois critérios básicos: o critério da tensão de arraste e o critério da velocidade crítica. Como exemplo prático da metodologia de cálculo utilizada para verificação da estabilidade em canais revestidos em gabião do tipo colchão, utilizou-se o estudo da Intervenção do Canal Olho D'água, o qual foi realizado pela empresa de engenharia Projetec (atual TPF), obtendo-se resultados satisfatórios. Concluiu-se que se trata de uma metodologia simples, o que pode facilitar o engenheiro na escolha da solução.

Palavras-chave: Revestimento. Gabião. Canalização. Proteção. Estabilidade.

ABSTRACT

The purpose of this project is to study the mattress gabion revetment as a solution engineering in hydraulic works and direct protection of eroded watercourse banks. For that, the technical characteristics, advantages and installation process of the gabion mattress in hydraulic works were presented. In addition, a calculation flowchart was made which allows to present the calculation methodology used to verify the stability of this revetment. This methodology was based on two basic criteria: the drag tension criteria and the critical velocity criteria. As a practical example of the calculation methodology used to verify stability in mattress gabion-coated channels, the study of the Intervention of the Olho D'água Channel was used, which was performed by the Projetec company (current TPF), obtaining results satisfactory. It was concluded that this is a simple methodology, which can facilitate the engineer in choosing the solution.

Keywords: Revetment. Gabion. Hydraulic. Protection. Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Destruição típica de margem por ação das correntes.....	15
Figura 2 - Destruição típica de margem por ação das ondas.	16
Figura 3 - Solapamento das margens.	17
Figura 4 - Principais tipos de proteção de margens.	20
Figura 5 - Gabião do tipo caixa na parte superior e gabião tipo colchão na parte inferior.	21
Figura 6 - Figura esquemática dos elementos do gabião do tipo colchão.....	22
Figura 7 - Colchão preenchido com rochas e solo vegetal, formando uma solução biotecnológica.....	23
Figura 8 - Seção esquemática de um canal trapezoidal revestido com gabião do tipo colchão com filtro geotêxtil.....	24
Figura 9- Canal revestido com revestimento flexível.	25
Figura 10 - Composição do arame usado em produtos de dupla torção	26
Figura 11 - Obra Hidráulica em gabião do tipo colchão integrado ao meio ambiente.	28
Figura 12 - Seção transversal de uma estrutura de gabião tipo colchão vegetado.	29
Figura 13 - Canal natural do Rio Pelotas à esquerda e Canal artificial de Suez à direita.....	31
Figura 14 - Parâmetros hidráulicos fundamentais das seções transversais.....	34
Figura 15 - Inclinações de margens recomendadas pela literatura.	36
Figura 16 - Fluxograma de Cálculo	38
Figura 17 - Tensão tangencial crítica em função da dimensão da pedra.	44
Figura 18 - Distribuição da tensão de arraste numa seção trapezoidal.....	46
Figura 19 - Coeficiente K em função da relação entre raio da curva e a largura da superfície livre da água.	48
Figura 20 - Velocidade crítica em função das dimensões das pedras.	49
Figura 21 - Esquema do movimento das pedras no interior das bolsas.	50

Figura 22 - Relação entre o parâmetro de deformação e o coeficiente eficaz de Shields.....	51
Figura 23 - Esquema do fluxo da água no interior do revestimento sem geotêxtil. ...	52
Figura 24 - Relação entre o parâmetro de deformação de Shields e o coeficiente eficaz de Shields.	53
Figura 25 - Esquema do fluxo da água no interior do revestimento com geotêxtil. ...	54
Figura 26 - Principais componentes da Micro-bacia Lagoa Olho D'água	55
Figura 27 - Localização da Microbacia Olho D'água no município de Jaboatão dos Guararapes.....	56
Figura 28 - Área de entorno ao Canal Olho D'água.....	57
Figura 29 - Vazão Crítica de Projeto.	59
Figura 30 - Esquema da seção do canal.	60
Figura 31 - Fases de execução do alargamento do canal na presença de solo mole.....	62
Figura 32 - Superfície crítica de ruptura da solução de substituição dos solos moles.....	63
Figura 33 - Velocidade crítica a partir do diâmetro das pedras e número de Froude.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permeabilidade média para diferentes texturas de solo em cm/s.	25
Tabela 2 - Vida útil e aplicabilidade de polímeros de revestimento disponíveis no mercado.....	26
Tabela 3 - Valores práticos de velocidades recomendadas.	32
Tabela 4 - Declividades recomendadas para canais.	35
Tabela 5 - Coeficiente de Manning para gabiões tipo colchão.	40
Tabela 6 - Tensões tangenciais críticas para colchões Reno®.....	45
Tabela 7 - Valores de Kf e Km.	46
Tabela 8 - Velocidade crítica e velocidade limite para colchões Reno®	49
Tabela 9 - Dados de Projeto.....	64
Tabela 10 - Velocidade crítica a partir do diâmetro das pedras.	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS	14
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	TIPOS DE OBRAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS DE CANAIS.....	18
2.2	REVESTIMENTO DE GABIÃO TIPO COLCHÃO	21
2.2.1	Características técnicas.....	21
2.2.2	Material de enchimento.....	22
2.2.3	Dimensões	23
2.2.4	Uso de geotêxteis.....	23
2.2.5	Vantagens	24
2.3	CANAIS.....	30
2.3.1	Tipos de escoamento em canais	31
2.3.2	Dados de projetos hidráulicos.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	39
3.1.1	Equação de Manning.....	39
3.1.2	Testes para definição do coeficiente de rugosidade dos gabiões tipo colchão	39
3.2	ESTABILIDADE DA SEÇÃO.....	41
3.2.1	Tensão crítica de arraste.....	41
3.2.2	Velocidade crítica	48
3.2.3	Deformações.....	50
3.2.4	Velocidade residual de fundo – utilização de filtros	51
4	ESTUDO DE CASO – CANAL DO OLHO D'ÁGUA	55
4.1	LOCALIZAÇÃO	55
4.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	57
4.3	SOLUÇÃO.....	57
4.3.1	Dados do Projeto.....	58
5	ANÁLISES E RESULTADOS	61
5.1	VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE	61
5.2	VERIFICAÇÕES DE ESTABILIDADE DO GABIÃO TIPO COLCHÃO	63
5.2.1	Verificação pelo critério da velocidade crítica	64
5.2.2	Verificação pela tensão de arraste	67

5.2.3	Controle das deformações.....	70
5.2.4	Verificação da velocidade residual no fundo.....	70
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	71
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A – SEÇÕES MAIS UTILIZADAS EM DIMENSIONAMENTOS DE CANAIS	75
	ANEXO B - MONTAGEM DE GABIÃO DO TIPO COLCHÃO.....	76

1 INTRODUÇÃO

Estabilidade de um curso d'água consiste no equilíbrio entre a ação fluvial e a resistência ao movimento dos materiais que constituem o leito do rio.

Muitas podem ser as causas capazes de alterar este equilíbrio. Embora esse desequilíbrio dos regimes fluviais seja intensificado por ações antrópicas; os cursos d'águas estão, também, constantemente, sujeitos à diversas ações naturais, como as variações climáticas e hidrológicas, que afetam a estabilidade dos canais fluviais. O rio é um corpo em contínua evolução, raramente se encontra em equilíbrio (FRACASSI, 2017, p. 40).

Constata-se um caráter extremamente dinâmico da configuração do canal fluvial, tanto no espaço como ao longo do tempo, sendo que a compreensão dos mecanismos de interação entre as interferências nos cursos d'água e suas consequências são de extrema importância nos estudos relativos à proteção contra erosão das margens nos rios [...] (BAPTISTA E LARA, 2014, p.289).

Desta forma, na maioria das vezes, faz-se necessário a utilização de revestimentos para proteção, parcialmente ou integralmente, do leito e de suas margens. A estabilização e a proteção de margens, segundo Brighetti e Scarati Martins (2001), sob o ponto de vista hidráulico, tem como objetivo manter a seção do curso d'água estável e dentro dos limites estabelecidos para sua utilização, seja como via de navegação, componente de um sistema de drenagem, aproveitamento elétrico ou abastecimento d'água.

Brighetti e Scarati Martins (2001) citam a seguir algumas principais finalidades da estabilização e proteção de margens, são elas:

- Evitar a erosão das margens com perda de material e danos aos terrenos adjacentes;
- Melhorar o alinhamento do fluxo, para manter a forma da seção transversal;
- Contribuir com a manutenção, aspectos visuais e paisagísticos, limpeza, etc.

Há diversas técnicas de revestimentos de vários tipos de materiais que podem ser indicados em obras de revestimento de cursos d'água ou de estabilização de suas margens.

A solução para os cursos d'água canalizados, consiste em definir um tipo de proteção que mais se adapte às condições locais, não somente quanto à resistência a ação do escoamento, mas também quanto a resistência às deformações do solo-base (MACCAFERRI, 2009, P.5).

Escolher a melhor opção para revestir cursos d'água nem sempre é uma tarefa fácil, é necessário considerar vários aspectos, tais como: técnicos, ambientais, sociais e econômicos.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Com o crescimento da consciência ambiental nos últimos anos, a procura de solução alternativas da engenharia que melhor se adeque ao ecossistema tem se intensificado cada vez mais, tomando o espaço das antigas soluções convencionais da engenharia. Consequentemente, vem surgindo a necessidade de estudar novas práticas e tecnologias, ou até mesmo, adaptações técnicas já conhecidas para proteger, recuperar, recompor margens trechos de cursos d'água comprometidas pela ação erosiva que ofereçam benefícios ao meio ambiente e menores custo de implantação.

Nessa perspectiva, o revestimento em gabião do tipo colchão tem obtido sucesso em obras hidráulicas devido à infinidade de vantagens que oferece, dentre elas: a boa capacidade de se integrar bem ao meio ambiente, bom custo benefício, facilidade de implantação na obra.

As obras de revestimentos de canais, segundo a Maccaferri (2009), podem representar 25% do total da obra a depender do material escolhido. Devido ao fato de não ser necessário o uso de maquinário especiais e mão-de-obra especializada durante sua execução, a solução gabionada torna-se mais econômica e prática em relação às outras soluções.

Portanto, o gabião do tipo colchão pode ser uma alternativa na recuperação de cursos d'água e no controle da erosão com uso dos recursos da própria região, e poderia ser adotado pelas administrações municipais e governamentais em locais, especialmente, mais desprovidos de recursos financeiros para investir em obras da

engenharia convencional, conforme será sugerido no estudo de caso do Canal Olho d'água do presente trabalho.

Considerando as diversas vantagens que o gabião do tipo colchão dispõe, o presente trabalho é de suma importância para o entendimento técnico aprofundado dessa solução.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem o objetivo de analisar os critérios necessários para o emprego do gabião do tipo colchão em obras hidráulicas de canalização a partir de verificações de estabilidade desse revestimento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivo específicos, pode-se listar:

- Apresentar um fluxograma de cálculo para análise das verificações de estabilidade do revestimento gabião do tipo colchão;
- Analisar a estabilidade do revestimento no caso prático da Intervenção do Canal Olho d'água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Durante a fase inicial da elaboração de um projeto de proteção e recuperação de margens de rios é necessário identificar as causas da instabilidade do talude do rio.

Para Brighetti e Scarati Martins (2001), estas causas podem ser classificadas em:

- Ação hidráulica, devido a ação da correnteza e ondas;
- Instabilidade geotécnica, resultante da saturação e infiltração de água.

As causas das instabilidades por ação hidráulica são subdivididas em:

- a) *Ação erosiva das correntes:* ocorre com o transporte de material devido a ação da força do escoamento superar a força limite do material que compõe o leito e/ou margem do rio. Os recuos das margens ocorrem quando da erosão do pé do talude, provocando solapamento dos mesmos (BRIGHETTI E SCARATI MARTINS, 2001, p.6) (Figura 1).

Figura 1 - Destruição típica de margem por ação das correntes.



Fonte: TODOESTUDO, 2019.

- b) *Ação das ondas:* Segundo Brighetti e Scarati Martins (2001), esse tipo de erosões se dá pelo choque das ondas contra as margens por consequência de agentes como o vento, embarcações ou ocupação de estruturas

hidráulicas do tipo comportas, usinas hidrelétricas e estações elevatórias (Figura 2).

Figura 2- Destruição típica de margem por ação das ondas.



Fonte: INFOESCOLA, 2019.

- c) *Irregularidades localizadas no escoamento*: Segundo Brighetti e Scarati Martins (2001), se dá pela perturbação da corrente líquida devido à presença de obstáculos no escoamento como espigões, pilares de pontes, afloramentos rochosos e outros que, conseqüentemente, causam movimento da parte inferior das margens. (**Error! Reference source not found.**).

Figura 3 - Solapamento das margens.



Fonte: MAPIONET, 2019.

As causas da erosão, conforme Brighetti e Scarati Martins (2001), devido à instabilidade geotécnica dos taludes das margens podem ser identificadas por:

- a) *Diminuição do ângulo natural de equilíbrio*: ocorre pela diminuição do ângulo de atrito de material devido à saturação do terreno, reduzindo a sua resistência;
- b) *Rompimento generalizado da margem*: A variação rápida do nível d'água ou a elevação do lençol freático também podem induzir o escorregamento do talude da margem.
- c) *'Piping' ou retro-erosão*: Este fenômeno, causado pela existência de escoamento através de caminhos preferenciais, em pontos fracos do terreno, permite que as partículas do talude sejam transportadas pelo fluxo provocando assim a erosão progressiva retrógrada.

A verificação da estabilidade dos canais sob ação do escoamento é considerada após a análise da estabilidade geotécnica (BRIGHETTI E SCARATI MARTINS, 2001, p.7).

A avaliação das causas de instabilidade das margens deve ser feita com bastante cuidado, pois caso a desestabilização esteja ocorrendo de forma permanente pela água dos rios, apenas a recomposição do talude não é suficiente, deve-se planejar um sistema de proteção contra erosão fluvial.

2.1 TIPOS DE OBRAS DE PROTEÇÃO DE MARGENS DE CANAIS

A Maccaferri (2009) classifica as obras de proteção de canais como:

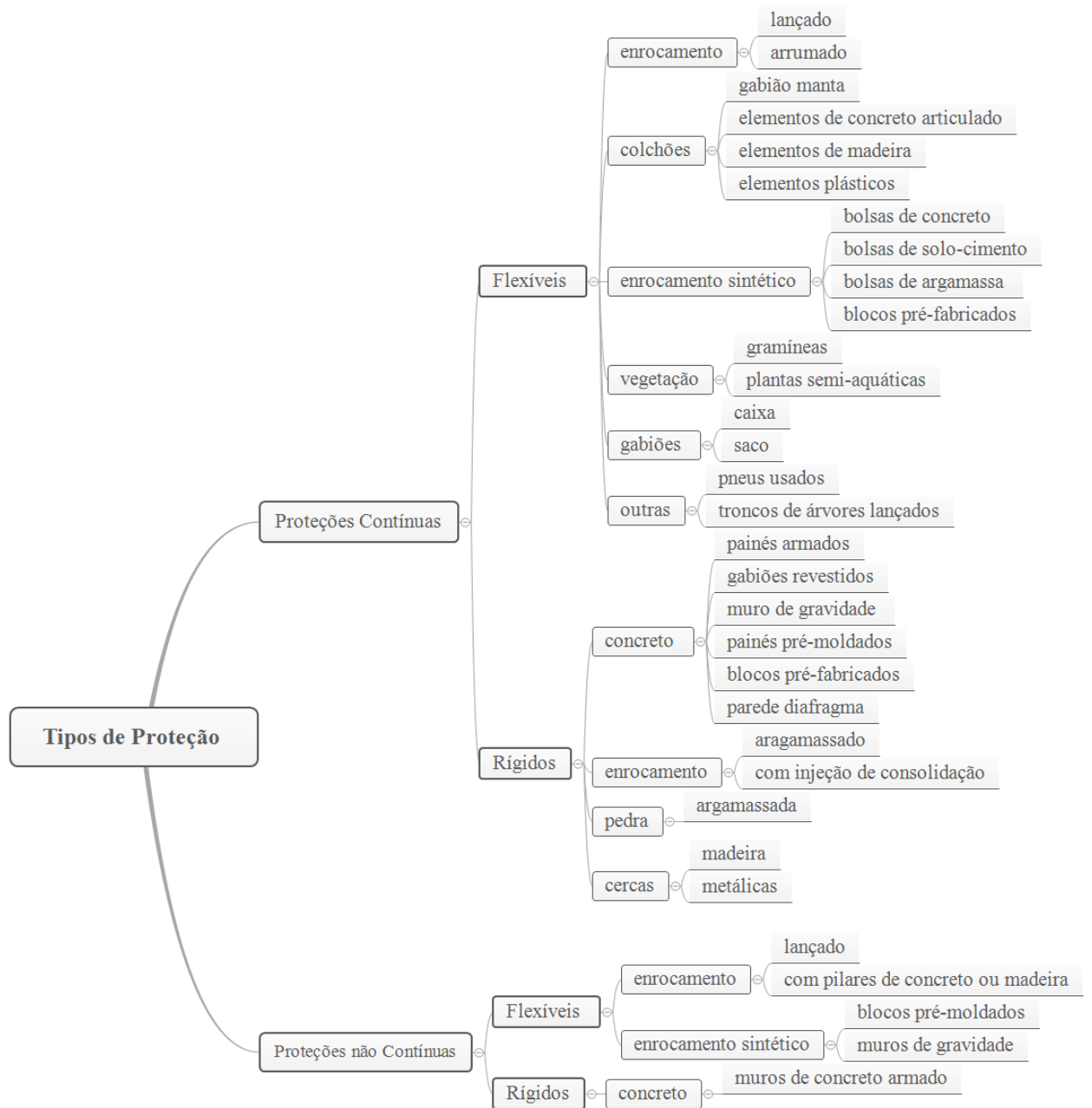
- *Proteção contínua ou direta*: aquelas dispostas paralelamente à direção do fluxo do rio, ficando em contato direto com o material da margem propriamente dito;
- *Proteção descontínua ou indireta*: através do uso de espigões ou diques que, segundo Silva (2004), são obras que afastam ou direcionam escoamento da margem e, conseqüentemente, geram zonas de baixa velocidade, evitando com que o material da encosta seja erodido.
- *Obras de sustentação*: são verdadeiras estruturas de contenção, praticamente verticais, capazes de sustentar esforços dos taludes situados nas margens e tem função resistir à ação das ondas.

Brighetti e Scarati Martins (2001) dividem as proteções contínuas em flexíveis e rígidas, conforme figura 4. As proteções contínuas flexíveis são aquelas capazes de acompanhar as deformações do material-base componente dos leitos, sem perder seu aspecto de integridade. Por isto, são fortemente recomendados sobre solos com baixa capacidade de carga, como por exemplo, solos compostos de argila mole. Já os revestimentos rígidos não admitem deformação sem a perda de alguma de suas características, como a impermeabilidade, rugosidade, aspecto visual e etc.

As alternativas para escolha de um determinado tipo de canal, quanto à sua forma e material de revestimento, dependem de diversos aspectos. Podem ser citados os seguintes aspectos, que devem ser levados em conta no processo de concepção do canal:

- Hidráulicos: vazões de projeto, velocidades de funcionamento, lâminas d'água etc.;
- Tecnológicos e operacionais: topografia local, faixa disponível para implantação, disponibilidade de materiais, equipamentos, mão-de-obra, área para bota-fora, possibilidade e facilidade para manutenção etc.;
- Ambientais: impacto das obras e serviços, tanto no que diz respeito aos aspectos ecológicos e de qualidade das águas, como da própria inserção ambiental, em função da ocupação adjacentes, paisagismo etc.;
- Sociais: inserção no sistema viário, possibilitando recreação e lazer etc. (BAPTISTA E LARA, 2014, p.345).

Figura 4 - Principais tipos de proteção de margens.



Fonte: Adaptada de BRIGHETTI E SCARATI MARTINS, 2001.

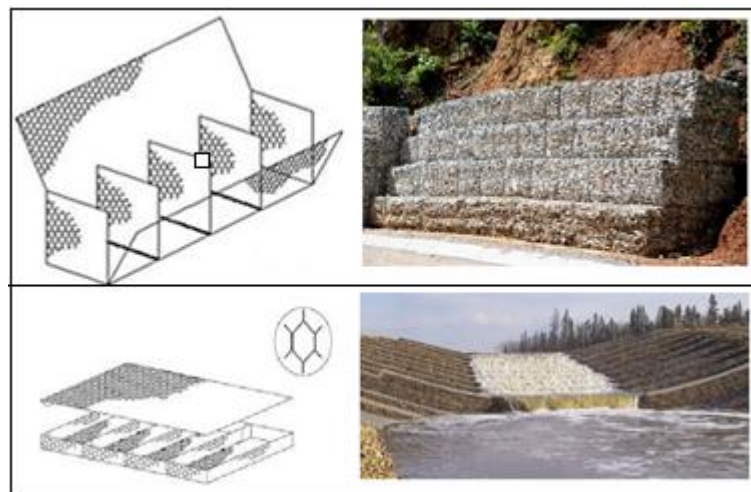
2.2 REVESTIMENTO DE GABIÃO TIPO COLCHÃO

Conforme visto anteriormente, há diversas soluções para proteger o leito e as margens do rio. Este tópico destina-se à apresentação das características do revestimento em gabião do tipo colchão, exclusivamente.

2.2.1. Características técnicas

O nome gabião vem da palavra italiana “gabbiona” que significa gaiola ou cesto grande. O gabião do tipo colchão se diferencia do gabião tipo caixa por possuir grande área e pequena espessura, fazendo com que seu uso seja apropriado para revestimentos, apenas, não exercendo a função de contenção de margens, como os gabiões do tipo caixa (Figura 5).

Figura 5 - Gabião do tipo caixa na parte superior e gabião tipo colchão na parte inferior.



Fonte: Adaptada de MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, s.d.

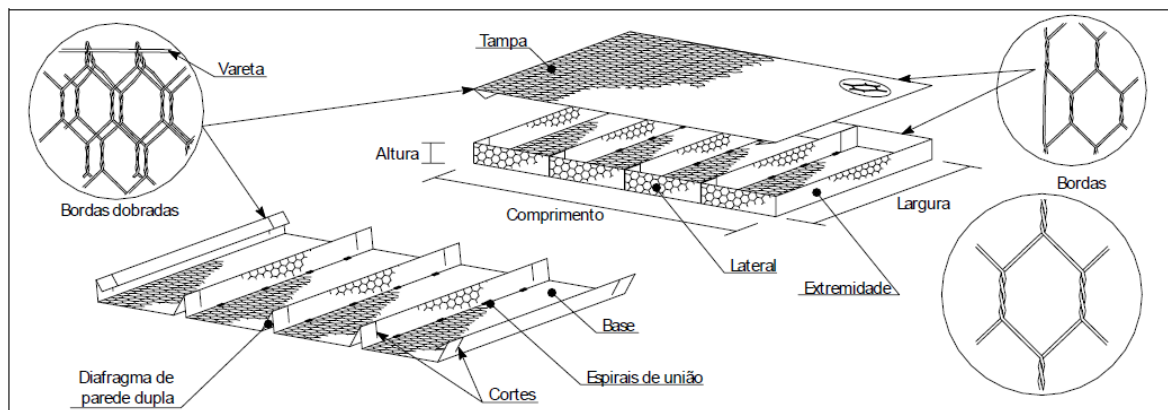
Conforme a Maccaferri (2009), o gabião do tipo colchão é uma estrutura flexível produzida por uma rede metálica hexagonal, tipo 6x8, em dupla torção. Esta rede é formada por fios de arame de diâmetro de 2mm, revestido com uma liga de zinco-alumínio de aço, podendo ser coberta por um material plástico, normalmente PVC, que protege o arame contra corrosão causada pela agressividade da água. Segundo Fracassi (2017), recomenda-se a utilização de dupla proteção da rede (galvânica e PVC), pois, embora no momento do projeto a qualidade da água seja

boa, não se sabe se, no futuro, fatores externos podem comprometer essa qualidade.

Cada peça do gabião tipo colchão é constituída por uma base e uma tampa (Figura 5).

A base que é dobrada durante a produção possui paredes internas a cada metro de seu comprimento, os diafragmas. Os diafragmas têm função tanto estrutural como de impedir movimentos do material de enchimento pela correnteza da água ao longo do colchão. Durante a montagem, as faces são ligadas através de fios de arames de mesmo material e diâmetro de 2,20mm.

Figura 6 - Figura esquemática dos elementos do gabião do tipo colchão.



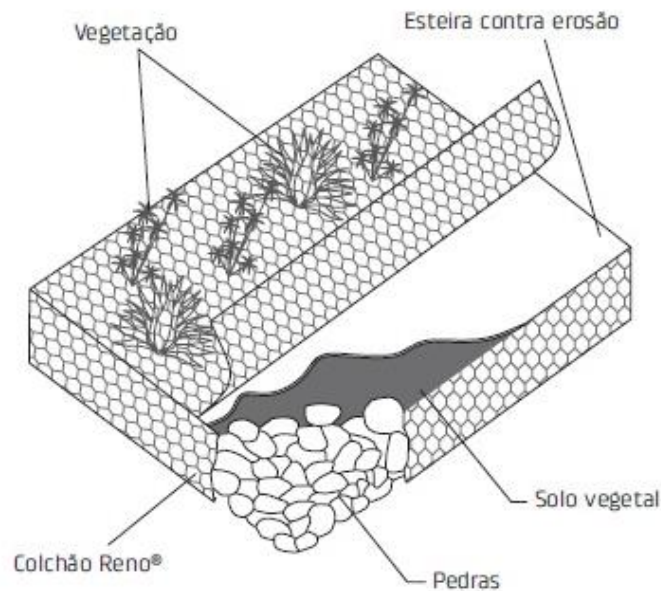
Fonte: MACCAFERRI, 2009.

2.2.2 Material de enchimento

Segundo a Maccaferri, o enchimento dos colchões deve ser feito com materiais resultantes de rochas selecionadas com índice de desgaste à abrasão, segundo o ensaio “Los Angeles”, menor ou igual à 40%. A Maccaferri sugere ainda pedras de granitos, basaltos, blocos de concreto, etc. Essas rochas devem ser maiores que a abertura da tela para que não haja fuga do material.

Pode-se ainda usar solo vegetal (Figura 7) para preencher os vazios entre as pedras, a fim de criar melhores condições para o desenvolvimento da vegetação (FRACASSI, 2017, p. 214).

Figura 7 - Colchão preenchido com rochas e solo vegetal, formando uma solução biotecnológica



Fonte: FRACASSI, 2017.

2.2.3 Dimensões

Segundo a Maccaferri (2009), os colchões fabricados possuem suas dimensões padronizadas. Os comprimentos são sempre múltiplos de 1m que podem variar de 3m a 6m, com largura fixa de 2m. As espessuras disponíveis comercialmente variam entre 0,17m, 0,23m e 0,30m. Porém, há casos especiais, em que o pedido das peças pode ser feito por encomenda e, assim, fabricadas em tamanhos diferentes dos usuais.

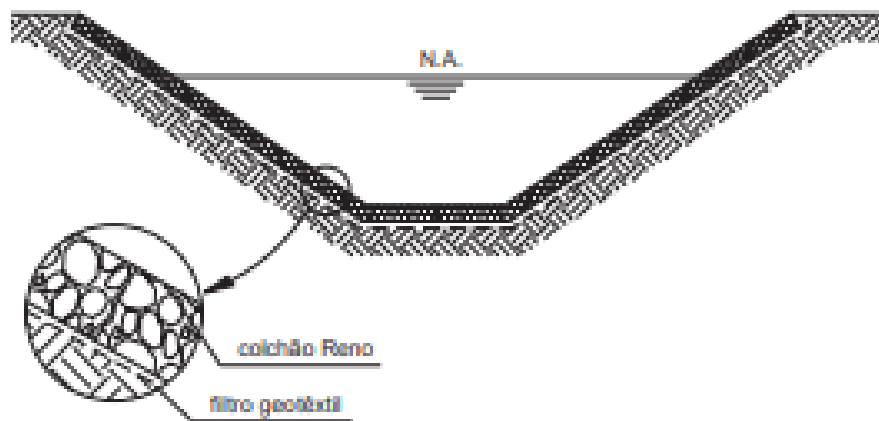
2.2.4 Uso de geotêxteis

O geotêxtil é uma membrana sintética filtrante, com resistência mecânica à compactação. Admite grandes deformações longitudinais, apresentando o inconveniente de ter seus vazios colmatados por material fino coloidal (BRIGHETTI E SCARATI MARTINS, 2001, p.31).

Conforme com Brighetti e Sacarati Martins, o uso de geotêxteis permite a redução da velocidade da água que passa por esses vazios (**Error! Reference**

source not found.). Assim, o filtro geotêxtil tem a função evitar o carreamento de partículas do solo sob que estão o revestimento. Por isso, recomenda-se o uso do geotêxtil em estruturas gabionadas.

Figura 8 - Seção esquemática de um canal trapezoidal revestido com gabião do tipo colchão com filtro geotêxtil.



Fonte: MACCAFERRI, 2010.

2.2.5 Vantagens

Os gabiões do tipo colchões são bastante empregados em obras hidráulicas e de proteção à erosão por possuírem características muito vantajosas as quais serão listadas e desenvolvidas a seguir.

2.2.5.1 Flexibilidade

Segundo Caio Pereira (2018), esta solução permite que o colchão sofra recalques e deformações sem correr o risco de romper, pode ser instalado seguindo o formato do solo por se tratar de uma estrutura flexível (Figura 9). Devido a este fato, é fortemente recomendado em situações em que há grande presença de solo mole, ou seja, solos com baixa capacidade de carga.

Figura 9- Canal revestido com revestimento flexível.



Fonte: MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, s.d.

2.2.5.2 Permeabilidade

Conforme a Tabela 1, nota-se que a permeabilidade dos gabiões e colchões são maiores que a de qualquer tipo de solo. Essa característica autodrenante dos gabiões tipo colchão faz com que esse tipo de solução não necessite do uso de barreiras em sua estrutura.

Tabela 1 - Permeabilidade média para diferentes texturas de solo em cm/s.

Gabiões	>30*
Colchões Reno	>15*
Arenosos	0,08
Limoargilosos arenosos	0,04
Limosos	0,02
Limoargilosos	0,013
Argilo-limosos	0,042
Argilosos	0,083

*Estimativa da Maccaferri.

Fonte: FAO, s.d apud FRACASSI, 2017.

Outra vantagem na aplicação de colchões em obras hidráulicas, segundo Maccaferri (2010), é que esse revestimento não impede a percolação da água entre rio/solo, mantendo, desta forma, o nível do lençol freático existente.

2.2.5.3 Durável

Por se tratar de uma solução que possui contato com água, o arame é suscetível à corrosão (Figura 10). Por isso, recebe durante a fabricação uma camada de galvanização e outra de polímero, conforme já mencionado anteriormente, que são capazes de prolongar a vida útil do material.

Figura 10 - Composição do arame usado em produtos de dupla torção



Fonte: FRACASSI, 2017.

Há uma diversidade de polímeros de revestimento disponíveis no mercado, conforme Tabela 2, os quais devem ser escolhidos de acordo com a agressividade do entorno ou vida útil esperada de projeto. Assim, é importante que o responsável da obra esteja atento às condições locais no momento da especificação do material. De acordo com Fracassi (2017), a Maccaferri tem desenvolvido atualmente um revestimento chamado de PoliMac® que possuem melhorias em suas características em relação ao PVC, como: maior resistência aos raios UV, maior resistência química, não liberação de elementos tóxicos durante sua vida útil, etc.

Tabela 2 - Vida útil e aplicabilidade de polímeros de revestimento disponíveis no mercado.

Tipo de exposição (combinações de condições extremas reduzirão a vida de projeto)	Grau de agressividade do entorno			
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto
Presença de água	Seco	Seco	Frequente	Frequente

Presença de salinidade	Não	Não	Ocasional	Frequente
Abrasão provocada por vento/água	Não	Muito pouca	Ocasional	Frequente
Exposição a contaminantes	Não	Muito pouca	Ocasional	Frequente
Resistividade do solo	Muito baixa	Baixa	Baixa	Alta
Revestimento do produto	Vida esperada de projeto (anos) de acordo com a Tabela A.1 da norma EN 10223-3: 2013			
Zn	60	25	10	Não recomendado
Al/Zn	120	>120	25	10
Al/Zn + PVC	>120	>120	>120	120
Al/Zn + PMC	>120	>120	>120	120

Fonte: FRACASSI, 2017.

2.3.5.4 Baixo impacto ambiental

Por se tratar de uma solução que permite o crescimento da vegetação devido a presença de vazios em sua estrutura, é frequentemente usado em ambientes com matas preservadas, córregos, rios e lagos (Figura 11).

O gabião do tipo colchão é listado por Fracassi (2017), como uma solução da bioengenharia. A bioengenharia é um conceito novo que ainda se encontra em desenvolvimento no Brasil, mas já é bastante conhecido e utilizado em alguns países da Europa e da América do Norte. A bioengenharia se trata de aplicações de técnicas e tecnologias a partir materiais encontrados na natureza para resolver problemas de erosão e instabilidades de taludes. Para Gray e Sotir (1996) apud SCHMEIER (2013), trata-se de uma técnica que associa baixo custo, por utilizar material natural, muitas vezes advindos da própria região ou localidade, à eficiência na estabilização dos taludes e na melhoria visual da área recuperada, uma vez que aumenta a área verde, reduzindo o impacto visual.

Deve ser enfatizado que as obras em gabiões sempre demonstraram uma marcada renaturalização espontânea, expressando seu potencial para permitir a recuperação natural das biocenoses destruídas ou alteradas. A vegetação e os gabiões mostraram poder coexistir e fornecer uns aos outros as condições ótimas de desenvolvimento, o que representa uma verdadeira exemplificação do conceito-base da Engenharia Ambiental, que se propõe a analisar e verificar a

combinação entre materiais vivos e não vivos nas obras de defesa contra a erosão (FRACASSI, 2017, p.309).

Figura 11 - Obra Hidráulica em gabião do tipo colchão integrado ao meio ambiente.



Fonte: MACCAFERRI DA AMÉRICA LATINA, 2019.

Segundo Fracassi (2017), a bioengenharia considera um dos métodos que, sob o ponto de vista ambiental, pode ser utilizado na hora de escolher a solução. Este método está em analisar o nível mínimo de energia das possíveis soluções. O nível mínimo de energia relaciona o grau de intervenção da solução que pode variar de grau zero, sem intervenções, até um grau mais alto quando envolve elementos estruturais na intervenção.

Por isso, diferentemente de outras soluções, o gabião do tipo colchão não prejudica o crescimento da vegetação ao redor, já que possui frestas em sua estrutura.

Figura 12 - Seção transversal de uma estrutura de gabião tipo colchão vegetado.



Fonte: FRACASSI, 2017.

2.2.5.5 Baixo custo

O baixo custo dessa solução, segundo Caio Pereira (2018), está associado ao uso de materiais naturais e de mão-de-obra não especializada.

2.3.5.6 Agilidade e facilidade durante a execução

A solução em Gabião do tipo colchão é significativamente simples e rápida se comparada a muitas outras soluções tradicionais. Conforme a Maccaferri (2010), não requer mão-de-obra qualificada e sem o uso de equipamentos especiais.

Segundo a Maccaferri, a execução dos gabiões do tipo colchão resume-se nas seguintes etapas (ver Anexo B):

- 1) Preparação da base e dos taludes: A base e/ou taludes devem ser regularizados e nivelados para o posicionamento dos colchões de maneira tal que se tenha uma superfície suficientemente plana para a sua implantação.
- 2) Montagem: consiste em desdobrar o gabião tipo colchão sobre uma superfície plana, esticando-o até que se obtenha o seu comprimento nominal. As paredes dos diafragmas devem ser unidas e, juntamente com as paredes laterais, posicionadas na vertical. Recomenda-se o uso de um sarrafo de madeira para que as peças sejam perfeitamente alinhadas. Por conseguinte,

as paredes frontais e os diafragmas devem ser costuradas às paredes laterais.

- 3) Instalação: os colchões depois de montados são transportados e assentados no local de projeto e amarrados entre si. Os colchões devem ser fixados com estacas de madeira e grampos nos casos de revestimento de taludes íngremes, garantindo a estabilidade da estrutura;
- 4) Enchimento: As pedras devem ser arrumadas dentro dos colchões, não simplesmente despejadas de modo que fique o menor número de vazios possível, com permeabilidade entre 25% e 30%, assim como definida em projeto.
- 5) Fechamento: Nesta etapa, os colchões já estão preenchidos, então as tampas são trazidas até o local da instalação, posicionadas sobre o respectivo colchão para serem costuradas. A tampa é costurada em umas bordas e depois esticada e amarradas ao longo das outras quinas, sendo unidas aos diafragmas e aos tirantes verticais.

2.3 CANAIS

Segundo Porto (2006), os canais podem ser classificados como naturais, que são cursos d'água existentes na natureza, como as pequenas correntes, córregos, rios, estuários, etc., ou artificiais, de seção aberta ou fechada, construídos pelo homem, como canais de irrigação, de navegação aquedutos, galerias, etc (Figura 13).

Figura 13 - Canal natural do Rio Pelotas à esquerda e Canal artificial de Suez à direita.



Fonte: ADAPTADA PELA AUTORA, 2019.

2.3.1 Tipos de escoamento em canais

O escoamento em condutos pode acontecer de duas formas: aberto ou fechado. O escoamento de canal aberto deve ter uma superfície livre, enquanto o escoamento de canal não tem nenhuma, já que a água deve preencher todo o conduto. Uma superfície livre está sujeita à pressão atmosférica (CHOW, 1959).

O escoamento em canais pode ainda se classificar como permanente e variável.

Segundo Azevedo Netto *et al* (1998), o escoamento é considerado permanente se, numa determinada seção, a vazão permanece constante. Caso contrário, ou seja, se a vazão variar ao com tempo em qualquer ponto do escoamento, o escoamento é classificado como não permanente ou variável.

O escoamento é dito uniforme se a profundidade e a velocidade forem constantes. Para isso, a seção de escoamento não pode ser alterada. E a natureza das paredes do canal deve ser sempre a mesma.

Segundo a Maccaferri (2009), na prática, é bastante improvável que se tenha o regime permanente e uniforme, porém o escoamento de canais pode ser dito permanente e uniforme nos seguintes cenários:

- 1) A seção do canal seja aproximadamente prismática no trecho considerado. Conforme Baptista e Lara (2014), diz-se que o canal é prismático quando a seção do conduto é constante ao longo de toda sua extensão;
- 2) Não ocorram perturbação no escoamento no trecho considerado, nem em trechos próximos à montante e jusante.

2.3.2 Dados de projetos hidráulicos

Neste tópico estão representados os dados necessários para o dimensionamento hidráulico de canais a céu aberto, considerando-se escoamento permanente e uniforme.

2.3.2.1 Vazão de projeto/velocidade de projeto

Em projetos hidráulicos, a primeira informação a ser definida é a vazão ou velocidade média de escoamento. Segundo Fracassi (2017), a vazão que geralmente é usada para projetar canais é a vazão máxima. A vazão máxima depende do período de retorno considerado e deve ser adequado às necessidades de cada caso em função dos riscos inerentes à obra. No caso de controle de cheias deve-se considerar um período de retorno elevado, da ordem de 50 a 100 anos.

De acordo com Azevedo Neto *et al* (1998), para boas condições de funcionamento e manutenção nos canais, a velocidade média de escoamento em canais deve ficar entre os valores limites máximos e mínimos. Os valores mínimos de velocidades são fixados para evitar que o material em suspensão contido na água se deposite no fundo, produzindo o assoreamento do canal e deve obedecida principalmente nos canais com grandes descargas sólida (coletores de esgoto) (**Error! Reference source not found.**). A velocidade máxima é necessária para evitar danos físicos nas paredes do canal. Pode-se efetuar o controle da velocidade de escoamento no canal alterando o raio hidráulico, e mais efetivamente, pela mudança de declividade através de quedas no canal.

Tabela 3 - Valores práticos de velocidades recomendadas.

Tipo do Canal	Velocidade recomendada (m/s)
Canais de navegação sem revestimento	até 0,50
Aquedutos de água potável	0,60 a 1,30
Coletores e emissários de esgoto	0,60 a 1,50
Canais sem revestimento	0,40 a 0,80
Canais com revestimento	0,60 a 1,30

Fonte: AZEVEDO NETTO *ET AL*, 1998.

2.3.2.2 Coeficiente de Manning “n”

Para Baptiste e Lara (2014), o coeficiente de rugosidade de Manning “n”, traduz a resistência ao escoamento associada à parede do conduto.

A equação de Manning é umas das equações mais empregadas para avaliação do escoamento em canais com superfície livre em regime uniforme (BAPTISTA E LARA, 2014, p.296).

2.4.2.3 Número de Froude

Outro adimensional muito utilizado nos estudos dos canais é o número de Froude, expresso por:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (1)$$

Em que V é a velocidade média na seção, g, a aceleração da gravidade e L_c , uma dimensão característica no escoamento.

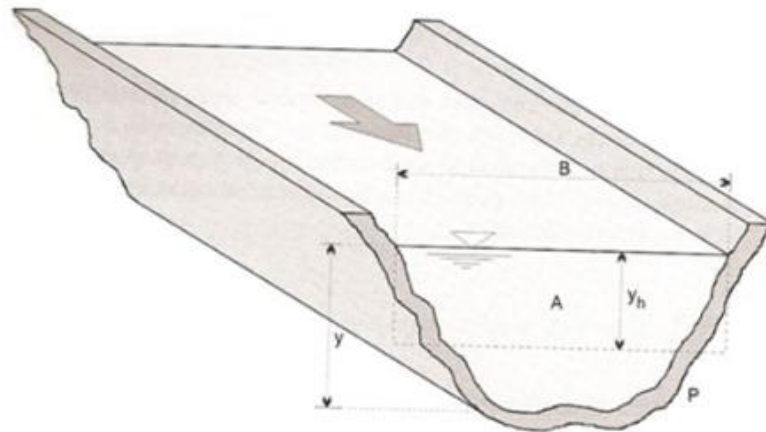
Segundo Porto (2006), o número de Froude é utilizado para classificar os escoamentos livres que ocorrem nas aplicações práticas em três tipos, como se segue:

- a) Escoamento subcrítico ou fluvial, $Fr < 1$;
- b) Escoamento supercrítico ou torrencial, $Fr > 1$;
- c) Escoamento crítico, $Fr=1$.

2.3.2.4 Parâmetros geométricos dos canais

Em função da geometria da seção e da profundidade de escoamento, pode-se definir um certo número de parâmetros, que tem grande importância e são largamente utilizados nos cálculos hidráulicos (**Error! Reference source not found.**) (BAPTISTA E LARA, 2014. p.189).

Figura 14 - Parâmetros hidráulicos fundamentais das seções transversais.



Fonte: BAPTISTA E LARA, 2014.

- a) Seção ou Área Molhada (A): parte da seção transversal que é ocupada pelo líquido;
- b) Perímetro Molhado (P): comprimento relativo ao contato do líquido como conduto;
- c) Largura Superficial (B): largura da superfície em contato com a atmosfera;
- d) Profundidade (y): altura do líquido acima do fundo do canal;
- e) Profundidade Hidráulica (y_h): razão entre a área molhada e a largura superficial;
- f) Raio Hidráulico: (R_h): razão entre a área molhada e o perímetro molhado;
- g) Borda livre: distância vertical do topo do canal até o nível de água calculado para as condições de vazão de projeto.

A borda livre é recomendada para evitar alguns problemas que podem ocorrer nos canais, tais como:

Não há uma regra universalmente aceita para a determinação da altura da borda ou folga do canal. Alguns autores recomendam a borda livre variando de 5% e

30% da profundidade hidráulica do canal. Outros autores recomendam deixar uma folga equivalente a 20 a 30% da vazão de projeto.

- h) Declividade do fundo do canal: A velocidade é função da declividade e, em consequência, dos limites estabelecidos para a velocidade podem ser estabelecidos limites para a declividade, como indicados na **Error! Reference source not found..**

Tabela 4 - Declividades recomendadas para canais.

Tipo do Canal	Declividade recomendada (m/m)
Canais de navegação	até 0,00025
Canais de industriais	0,0004 a 0,0005
Canais de irrigação pequenos	0,0006 a 0,0008
Canais de irrigação grandes	0,0002 a 0,0005
Aquedutos de água potável	0,00015 a 0,001

Fonte: AZEVEDO NETTO ET AL, 1998.

- i) Declividade das margens: conforme Porto (2006), para que o talude seja geotecnicaamente estável, a máxima inclinação dos taludes deve ser inferior que o ângulo de atrito do material de revestimento.

Figura 15 - Inclinações de margens recomendadas pela literatura.

Inclinação de Margem recomendada (Lencastre, 1972)				
Inclinação Recomendada para os Taludes dos Canais (Lencastre, 1972)	Horizontal / Vertical			
	Natureza dos taludes	Inclinação	Natureza dos taludes	Inclinação
	Rocha dura, alvenaria ordinária, concreto	0 a 1/4	Aluviões compactos	1/1
	Rocha fissurada, alvenaria de pedra seca	1/2	Cascalho grosso	3/2
	Argila dura	3/4	Terra ordinária, areia grossa	2/1
			Terra mexida, areia normal	2,5/1 a 3/1

Inclinação dos Taludes (Conf. CHOW, 1959)	
Material	Inclinação dos Taludes H:V
Rocha	0:1
Solos pedregosos	0.25:1
Canais em terra revestidos de concreto	0.5:1 a 1:1
Argila resistente e compacta	1.5:1
Solos argilo-arenosos	2:1
Solos arenosos ou argilosos de alta porosidade	3:1

Fonte: AZEVEDO NETTO ET AL, 1998.

A inclinação das margens é antes de tudo definida após os critérios de estabilidade que levam em conta aspectos como características geotécnicas do solo, saturação do material, esforços e carregamentos decorrentes de tráfego ou construções, efeitos sísmicos etc. (BRIGHETTI E SCARATI MARTINS, 2001).

2.3.2.4 Parâmetros geotécnicos

As características do solo podem influenciar fortemente a escolha da solução a ser utilizada, podendo inviabilizar algumas alternativas, especialmente do ponto de vista econômico.

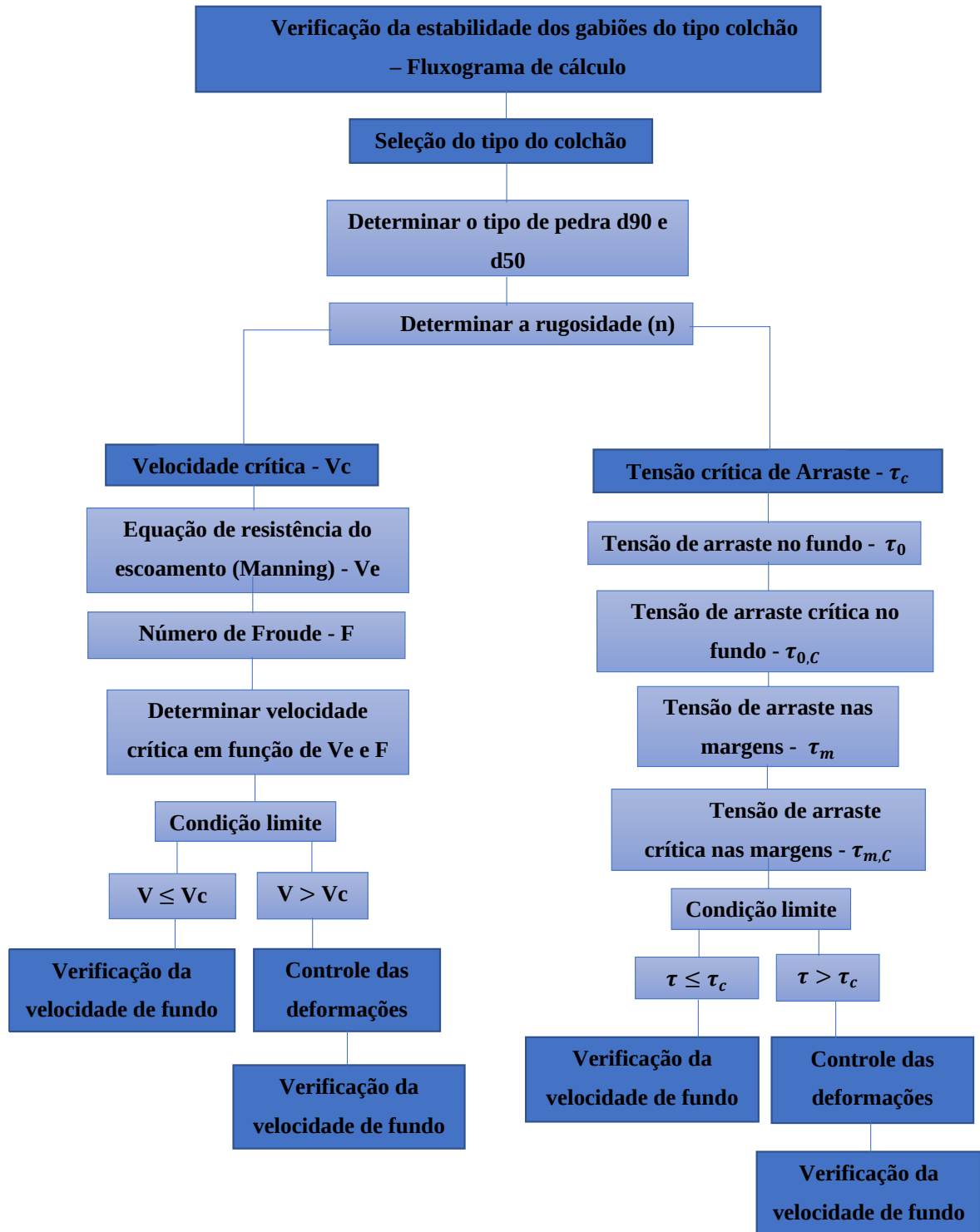
Podem ser citados como parâmetros geotécnicos: a capacidade de carga do solo, a permeabilidade e estabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O comportamento das várias estruturas de dupla torção foi desenvolvido pela Maccaferri a partir do século passado, com a colaboração de laboratórios e universidades de todo mundo.

Esse tópico tem o objetivo de apresentar e descrever a metodologia utilizada pela Maccaferri em análises de estabilidade de canais revestidos em gabião do tipo colchão. Esta metodologia, que será baseada no fluxograma de cálculo a seguir, se resume em dois critérios básicos de cálculo: verificação pela velocidade crítica e verificação pela tensão de arraste.

Figura 16 - Fluxograma de Cálculo



Fonte: Autora (2019).

3.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Os cálculos de dimensionamento hidráulico de canais que serão apresentados a seguir consideram um regime de escoamento permanente e uniforme e uma declividade pequena ao longo do leito do canal.

3.1.1 Equação de Manning

Conforme a Baptista e Lara (2014), em regimes em que o escoamento é permanente e uniforme, sabe-se que $i \equiv j$, a declividade da linha de energia é igual à declividade do fundo do canal. Pode-se então aplicar a equação de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot A \cdot i^{1/2} \quad (3)$$

ou

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (4)$$

Onde,

Q = Vazão média do escoamento (m^3/s);

V = velocidade média do escoamento (m/s);

n = coeficiente de Manning;

R_H = raio hidráulico da seção transversal (m);

A = área da seção transversal (m^2);

i = declividade do leito do canal (m/m).

Segundo Maccaferri (2009), fórmula de Manning (4) é de simples aplicação e consegue gerar bons resultados práticos. Devido a este fato, é muito empregada em projetos de canalização.

Os valores n de Manning para diferentes superfícies de revestimento do canal em gabião foi estudado pela empresa Maccaferri juntamente com laboratórios e universidades de todo o mundo e será abordado no item a seguir.

3.1.2 Testes para definição do coeficiente de rugosidade dos gabiões tipo colchão

Os colchões Reno®, segundo a Maccaferri (2009) foram submetidos a experimentos feitos no Centro de Pesquisa de Engenharia do Laboratório de Hidráulica da Universidade do Estado do Colorado, Fort Collins – EUA e no Laboratório de Pesquisa de Águas da Universidade do Estado de Utah – EUA em escala real e em modelos, para que pudessem analisar o desempenho e a resistência dos revestimentos. Concluiu-se que a equação (5), proposta por Meyer Peter e Muller, pode ser usada também para colchões Reno®:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (5)$$

Onde d_{90} é a abertura da peneira que permite a passagem de 90% do material da superfície do leito em metros.

A partir do experimento, obteve-se os coeficientes listados na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Coeficiente de Manning para gabiões tipo colchão.

Tipo	Natureza do Canal	Cn[s.m]^(1/3)
1	Canais revestidos colchão Reno® e recoberto de argamassa	0,0130
2	Canais revestidos colchão Reno® perfeitamente impermeabilizado com mastique de betume hidráulico aplicado com métodos particulares para obter uma superfície plana e bem lisa.	0,0158
3	Canais revestidos colchão Reno® e gabiões caixa perfeitamente impermeabilizados com mastique de betume hidráulico aplicado diretamente.	0,0172
4	Canais revestidos colchão Reno® e gabiões caixa consolidados até a superfície com mastique de betume hidráulico que envolva as pedras superficiais.	0,0200
5	Canais revestidos colchão Reno® e gabiões caixa consolidados até a superfície com mastique de betume hidráulico que penetra em profundidade.	0,0215
6	Canais revestidos colchão Reno® enchidos com material bem selecionado e colocado na obra com muito cuidado.	0,0222
7	Canais revestidos colchão Reno® enchidos com material bem selecionado e colocado na obra sem cuidado.	0,0250

8	Canais revestidos colchão Reno® enchidos com material de pedreira e colocado na obra sem cuidado.	0,0270
9	Canais em terra em más condições de manutenção: emaranhamento de vegetação no fundo e nas margens; ou depósitos irregulares de pedras e cascalhos, ou profundas erosões irregulares. Também canais em terra executados com escavadeira mecânica e com manutenção descuidada.	0,0303
10	Curso d'água naturais com leito de pedras arredondas e movimento do material de fundo.	0,0480

Fonte: MACCAFERRI, 2009.

3.2 ESTABILIDADE DA SEÇÃO

A estabilidade de um revestimento gabião do tipo colchão pode ser verificada através de dois critérios básicos:

- 1) Em função da tensão crítica de arraste;
- 2) Em função da velocidade crítica.

Segundo Fracassi (2017), o método da tensão de arraste é mais preciso sob ponto de vista técnico e científico, porém há caso em que se disponibiliza apenas de dados da velocidade média do fluxo da água num dado trecho.

3.2.1 Tensão crítica de arraste

Baptista e Lara (2014) definem tensão de arraste como a tensão cisalhante exercida pela água em escoamento junto ao leito e as margens do curso d'água.

Para a Maccaferri (2009) um revestimento em pedra estará estável quando não houver movimento dos elementos que o formam, aplicando-se tanto para os revestimentos constituídos por colchões, nos quais há a presença de uma rede metálica, quanto para os revestimentos constituídos somente de pedras soltas.

A tensão de arraste deve ser avaliada em relação ao fundo do canal e em relação às suas margens uma vez que a tensão não é constante ao longo da seção transversal do canal.

3.2.1.1 Tensões tangenciais em relação ao fundo do canal

Na hipótese de escoamento uniforme, segundo Baptista e Lara (2014), a tensão de arraste no fundo do canal pode ser definida por:

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot R_H \cdot i \quad (6)$$

Onde,

γ_w : peso específico da água (10 KN/m³);

R_H : Raio hidráulico da seção transversal (m);

i : declividade do canal (m/m).

Para os cursos d'água e os canais suficientemente largos, o raio hidráulico R_H é praticamente coincidente com a profundidade da água y no ponto a ser verificado (FRACASSI, 2017, p.304). Pode-se, portanto, calcular a tensão de arraste no fundo com a expressão a seguir:

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (7)$$

A tensão de fundo pode variar de acordo com a largura do canal e a profundidade da água. Por isso a literatura recomenda o uso do coeficiente corretivo K_f em canais mais estreitos. (Ver Tabela 7). Desta forma, a expressão, definida por Lencastre (1983) *apud* Maccaferri (2009) passa a ser:

$$\tau_0 = K_f \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (8)$$

A tensão de arraste crítica é função do material constituinte do canal. (BAPTISTA E LARA, 2014, p.298).

A ação da água, responsável pelo movimento, é caracterizada pela tensão de arraste; enquanto que, tensão de resistência é caracterizada pelo peso das

partículas. Em 1963, Shields propôs um parâmetro que relacionava as características do escoamento com a das partículas.

$$C_* = \frac{\tau_{0,C}}{(\gamma_s - \gamma_m) \cdot d_m} \quad (9)$$

Onde,

C_* = coeficiente de Shields;

$\tau_{0,C}$ = tensão tangencial na situação crítica (N/m²);

γ_s = peso específico das pedras (KN/m³);

d_m = diâmetro médio do material de fundo (m).

Assim, tensão crítica pode ser determinada pela equação a seguir:

$$\tau_{0,C} = C_* \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m \quad (10)$$

Desta forma, se a tensão tangencial provocada pela ação da água no revestimento de fundo for inferior ou igual a tensão tangencial crítica suportada por este revestimento, o revestimento será considerado estável.

$$\tau_0 \leq \tau_{0,C} \quad (11)$$

De acordo Fracassi (2017), em pesquisas sobre o comportamento dos gabiões tipo colchão realizadas em Fort Collins, no Instituto del Agua (INA) e na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, determinou-se também o coeficiente de Shields para o conjunto rede e pedras, obtendo o valor de:

$$C_* \cong 0,10 \quad (12)$$

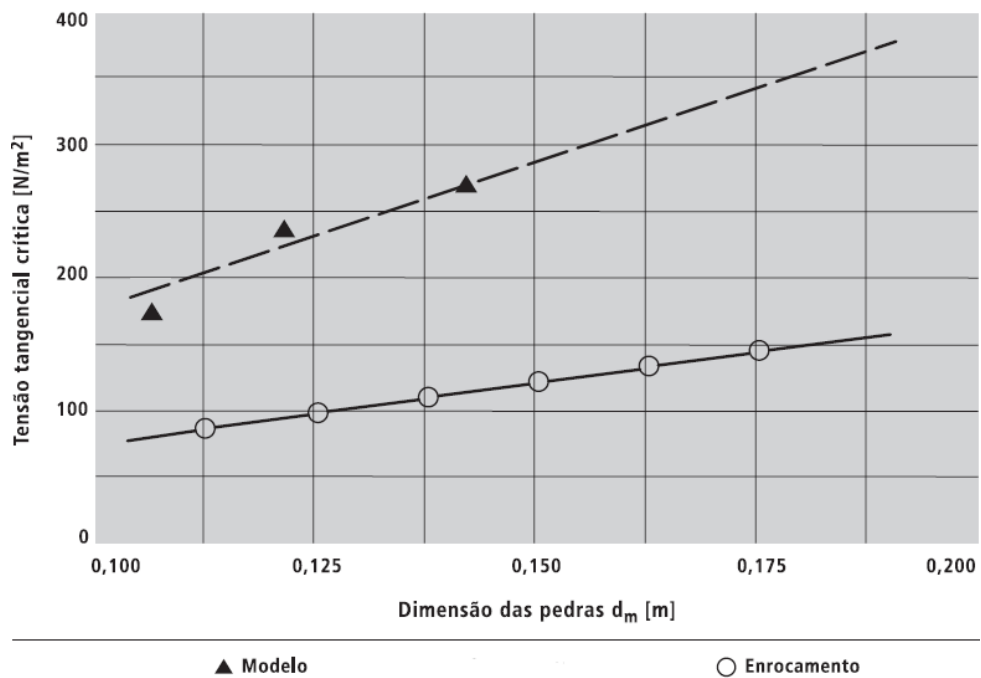
Enquanto que esse coeficiente para pedras soltas (rip-rap) equivale:

$$C_* \cong 0,047 \quad (13)$$

Segundo a Maccaferri (2009), concluiu-se que as pedras contidas nos colchões suportam uma tensão aproximadamente o dobro daquela suportada pelo rip-rap. Esse fato deve ao confinamento das pedras pela rede metálica. Para Fracassi (2017), isso significa também que se ambos forem dimensionados para a mesma situação, a espessura necessária para o colchão será igual a um terço, aproximadamente, da espessura necessária para o enrocamento, havendo redução no volume e, conseqüentemente, no custo.

Para pré-dimensionamentos, a Maccaferri (2009) disponibiliza o gráfico da Figura 16 que relaciona a tensão em função da dimensão das pedras e a Tabela 6.

Figura 17 - Tensão tangencial crítica em função da dimensão da pedra.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Tabela 6 - Tensões tangenciais críticas para colchões Reno®.

Tipo	Espessura [m]	Pedras de enchimento		τ de arraste		
		Dimensões [mm]	d50[m]	Crítica[N/m²]	Experimental [N/m²]	Máxima admissível [N/m²]
Colchão Reno® malha 6x8	0,17	70 a 100	0,09	136,00	155,00	163,20
		70 a 150	0,11	176,00	200,00	211,20
	0,23	70 a 100	0,09	136,00	155,00	163,20
		70 a 150	0,11	176,00	200,00	211,20
	0,3	70 a 120	0,10	160,00	175,00	192,00
		70 a 150	0,13	200,00	230,00	240,00

Fonte: MACCAFERRI, 2009.

3.2.1.2 Tensões tangenciais em relação às margens do canal

A tensão tangencial resultante da ação do escoamento sobre o material de revestimento aplicado nas margens de canal pode ser obtida através da equação 19:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (14)$$

Onde,

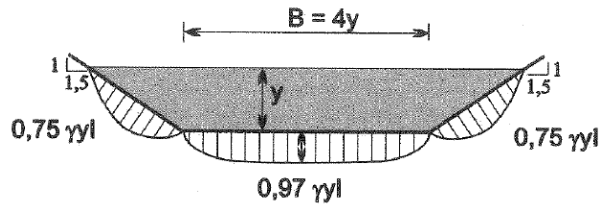
γ_w : peso específico da água (10 KN/m³);

y = altura líquida da água (m);

i: declividade do canal (m/m).

O coeficiente 0,75 que multiplica a tensão tangencial de fundo não é constante, varia com a profundidade do escoamento e a largura da base do canal. O padrão de distribuição varia com a forma da seção (BAPTISTA E LARA, 2014). Um esquema da distribuição da tensão de arraste numa seção trapezoidal com base igual a quatro vezes a profundidade do talude de 1:1,5 é mostrado na Figura 17:

Figura 18 - Distribuição da tensão de arraste numa seção trapezoidal.



Fonte: BAPTISTA E LARA, 2014.

Assim, como na tensão de arraste de fundo, pode-se calcular a tensão de arraste nas margens a partir da Equação (15), aplicando o fator corretivo K_m definido na Tabela 7:

$$\tau_m = K_m \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (15)$$

Tabela 7 - Valores de K_f e K_m .

b/y	m=2		m=1,5		m=0	
	K_f	K_m	K_f	K_m	K_f	K_m
0	0	0,65	0	0,565	0	0
1	0,78	0,73	0,78	0,695	0,372	0,468
2	0,89	0,76	0,89	0,735	0,686	0,686
3	0,94	0,76	0,94	0,743	0,870	0,740
4	0,97	0,77	0,97	0,75	0,936	0,744
6	0,98	0,77	0,98	0,755	-	-
8	0,99	0,77	0,99	0,76	-	-

Fonte: LENCASTRE, 1983, APUD MACCAFERRI, 2009.

A tensão crítica nas margens também é diferente da tensão de fundo, sendo que para as margens é utilizada a seguinte expressão:

$$\tau_{m,c} = \tau_{o,c} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \varphi}} \quad (16)$$

Onde:

$\tau_{m,c}$: tensão tangencial crítica nas margens dos canais (N/m²);

$\tau_{o,c}$: tensão tangencial crítica no fundo (N/m²);;

α : ângulo de inclinação do talude (°);

φ : ângulo de atrito do material de enchimento do revestimento (°).

Segundo a Maccaferri (2009), o valor do ângulo de atrito das pedras que preenchem o colchão é de aproximadamente 41° e na maioria dos casos práticos os gabiões tipo colchão são aplicados em taludes de até 45° de inclinação. Porém, nestes casos são utilizadas estacas para auxiliar na fixação dos colchões junto ao solo. Assim, deve-se usar valor de ângulo de atrito pouco superior do que os 45°, pois quando o valor do ângulo de atrito é menor que a inclinação, significa que o revestimento é instável.

A estabilidade para os revestimentos das margens é dada pela relação do mesmo tipo apresentada na equação (17), ou seja:

$$\tau_m \leq \tau_{m,c} \quad (17)$$

Pelo mesmo motivo como foi considerado que a tensão tangencial aplicada no fundo do canal, pode-se admitir o mesmo raciocínio, sendo que:

$$\tau_m \leq 1,2 \cdot \tau_{m,c} \quad (18)$$

No caso de adotar-se a tensão máxima admissível que equivale a utilizar a Equação (24) para o dimensionamento do canal, deve haver controle das deformações resultantes da ação de escoamento, a Maccaferri (2009) recomenda, por exemplo, admitir um número maior de diafragmas e de “tirantes” com o objetivo de melhor consolidar as pedras entre as telas.

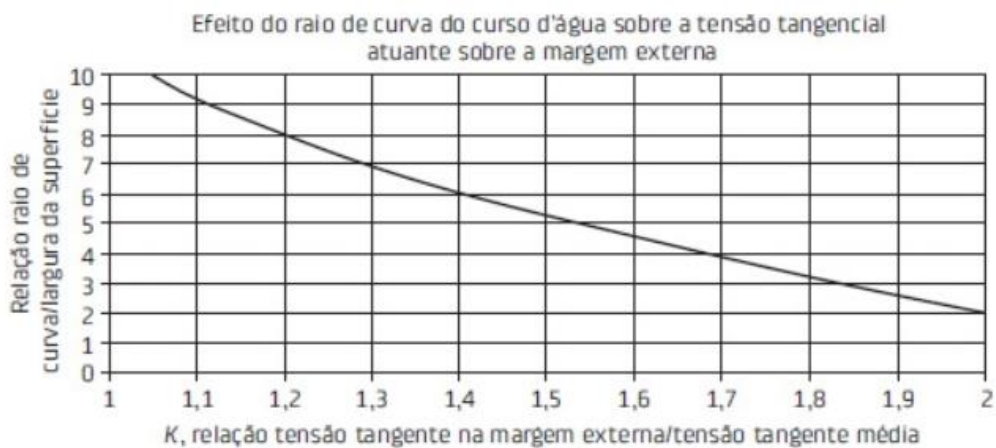
3.2.1.3 Trechos curvos

Nos trechos curvos têm-se um aumento da tensão tangencial sobre a margem externa. Por isso, deve-se assumir:

$$\tau_m = K \cdot \gamma_w \cdot R_h \cdot i \quad (19)$$

O coeficiente K pode ser obtido da Figura 18 em função da relação entre a largura da superfície da água e o raio de curvatura.

Figura 19 - Coeficiente K em função da relação entre raio da curva e a largura da superfície livre da água.



Fonte: FRACASSI (2017).

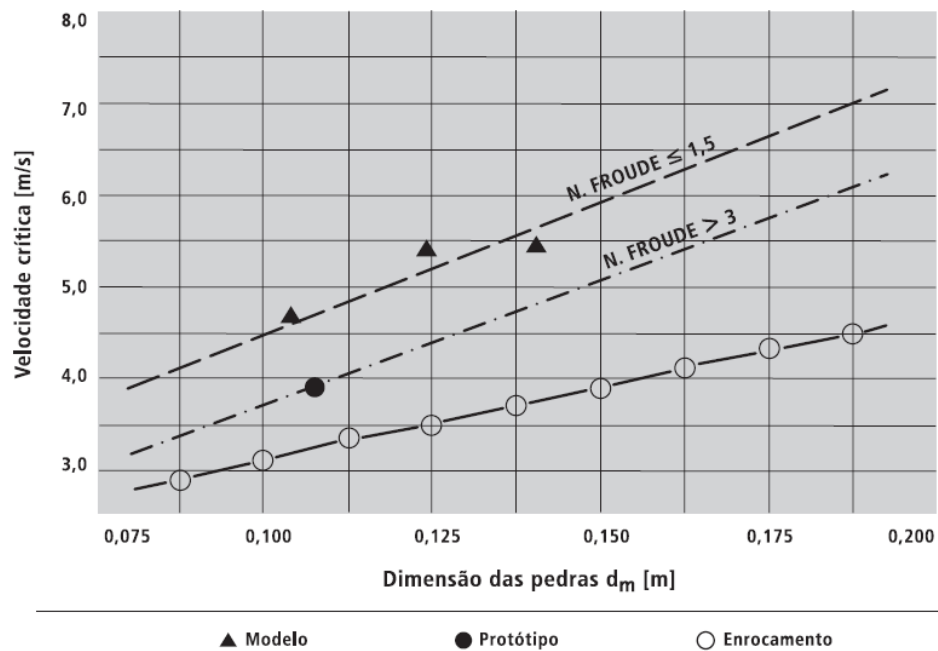
3.2.2 Velocidade crítica

Esse critério consiste em dimensionar o canal respeitando o limite da velocidade ou velocidade crítica para que não haja deslocamento do revestimento.

Segundo Lencastre apud Maccaferri (2009), a verificação da estabilidade do fundo de canais por esse critério baseia-se na velocidade média de escoamento, pois não é possível determinar com a precisão a velocidade crítica próximo ao fundo do canal.

A partir dos experimentos realizados em Fort Collins, foi construído o gráfico da Figura 19, que representa a velocidade crítica do início do movimento das pedras em função das suas dimensões (MACCAFERRI, 2009, p.44).

Figura 20 - Velocidade crítica em função das dimensões das pedras.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Para fins de pré-dimensionamento, a Maccaferri disponibiliza a Tabela 8 que permite obter rápidas indicações sobre a velocidade crítica e a velocidade limite para diferentes espessuras de colchão Reno® (gabiões do tipo colchão).

Tabela 8 - Velocidade crítica e velocidade limite para colchões Reno®

Tipo	Espessura [m]	Pedras de enchimento		Velocidade Crítica [m/s]	Velocidade Limite [m/s]
		Dimensões [mm]	d ₅₀ [m]		
Colchão Reno® malha 6x8	0,17	70 a 100	0,085	3,50	4,20
		70 a 150	0,110	3,80	4,50
	0,23	70 a 100	0,085	3,70	4,50
		70 a 150	0,110	4,10	4,90
	0,3	70 a 120	0,100	4,30	4,70
		70 a 150	0,125	4,90	5,00

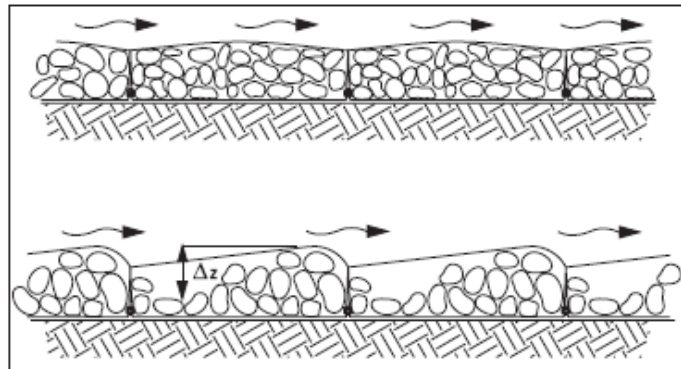
Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Velocidade crítica, segundo a Maccaferri (2009), é aquela em que ocasiona o início da movimentação das pedras do revestimento. A velocidade limite é aquela que o revestimento suporta por curtos intervalos de tempo sem romper.

3.2.3 Deformações

Conforme a Maccaferri (2009), no caso em que a tensão tangencial relativa ao escoamento for maior que a tensão tangencial suportada pelo material, ou seja, maior que tensão crítica, deve-se fazer uma análise das deformações que é causada pelo “primeiro movimento” das pedras, ou seja, o ponto crítico da estabilidade do revestimento. Esse movimento, quando é limitado, não prejudica o comportamento do colchão Reno® (FRACASSI, 2017, p. 10).

Figura 21 - Esquema do movimento das pedras no interior das bolsas.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Assim deve-se calcular o grau de deformação causado por esse movimento das pedras e comparar com o grau de deformação aceitável para que não haja ruptura da tela do colchão.

Para evitar que ocorra ruptura, deve-se garantir a seguinte relação:

$$\frac{\Delta z}{d_m} \leq 2 \cdot \left(\frac{t}{d_m} - 1 \right) \quad (20)$$

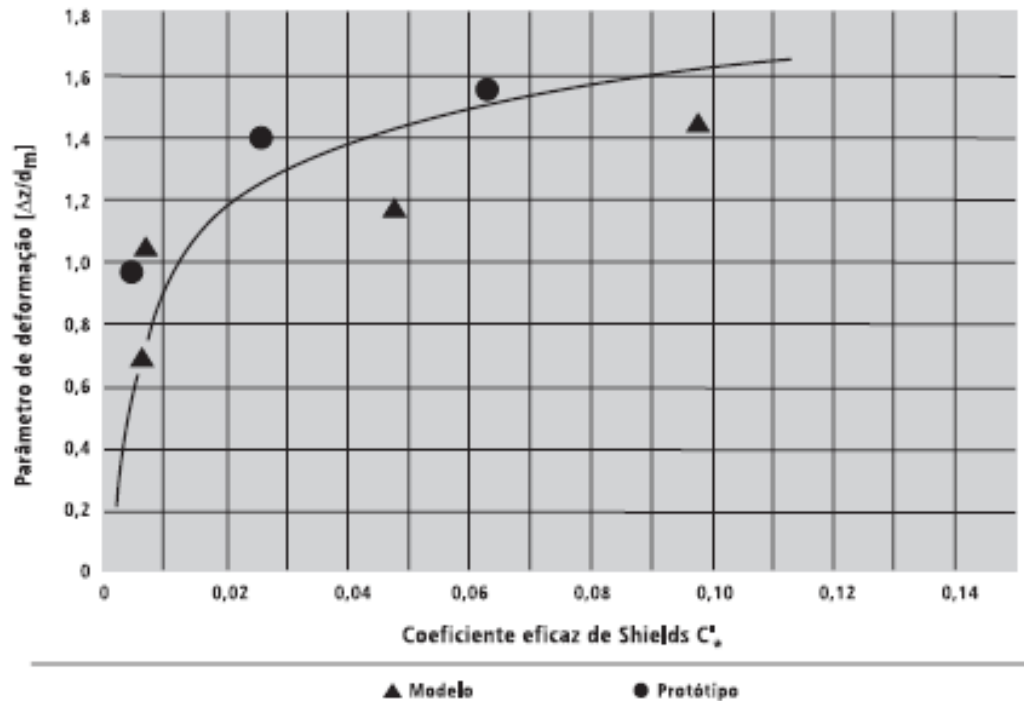
Onde:

Δz : distância vertical entre o ponto mais baixo e mais alto da superfície (m);

d_m : dimensão média das pedras (m).

t: espessura do gabião colchão (m).

Figura 22 - Relação entre o parâmetro de deformação e o coeficiente eficaz de Shields.

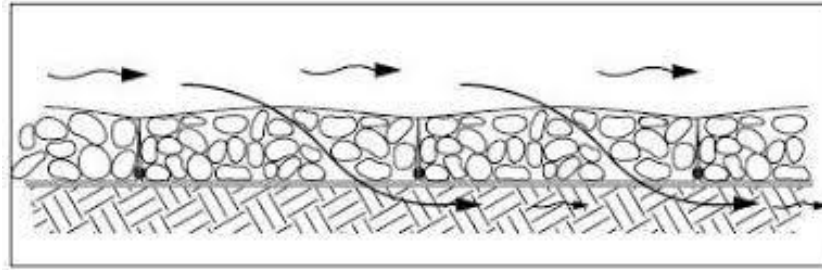


Fonte: MACCAFERRI, 2009.

3.2.4 Velocidade residual de fundo – utilização de filtros

Como já mencionado, a alta permeabilidade é uma das características do gabião do tipo colchão. Devido a essa permeabilidade, parte da água que escoar no curso d'água percola através desses vazios alcançando o solo base com uma velocidade (Figura 22). Conforme a Maccaferri (2009), essa velocidade deve possuir um valor muito baixo para evitar carreamento das partículas do solo.

Figura 23 - Esquema do fluxo da água no interior do revestimento sem geotêxtil.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Desta forma, conforme Fracassi (2017), não só é necessário dimensionar a espessura do colchão e o tamanho das pedras para que resistam a ação da água, como também deve ser evitada a erosão do solo natural que serve de apoio para o revestimento.

Essa velocidade residual de fundo, no cenário em que sua direção predominante é paralela ao revestimento, varia proporcionalmente principalmente com declividade do canal e com a permeabilidade do gabião tipo colchão, segundo a Maccaferri (2009).

A velocidade da água sob o gabião do tipo colchão pode ser determinada com a fórmula de Manning (Equação 21):

$$V_b = \frac{1}{n_f} \cdot \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (21)$$

Onde:

V_b : velocidade da água na base do solo, sob o revestimento (m/s);

n_f : coeficiente de rugosidade fundo;

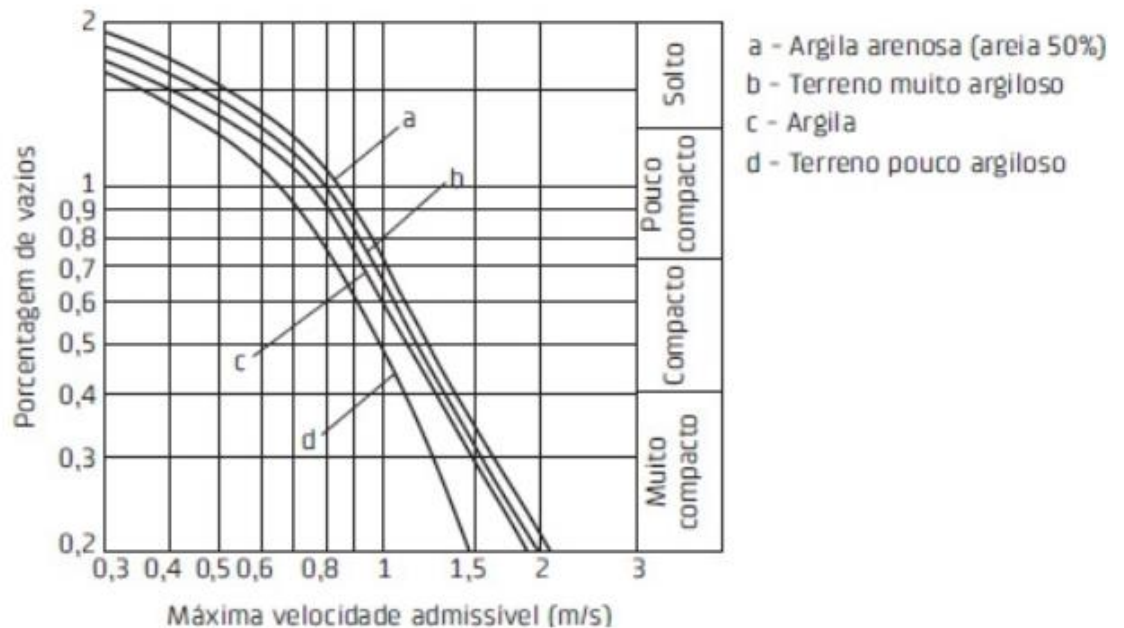
d_m : dimensão média das pedras (m).

i : declividade do leito do canal (m/m).

De acordo com a Maccaferri (2009), $n_f = 0,02$ se abaixo do colchão Reno se encontra filtro geotêxtil ou nenhum filtro, e $n_f = 0,025$, se existe um filtro em cascalho. Sendo d_m a dimensão média das pedras, $d_m/2$ é assumido como raio hidráulico para o movimento de água abaixo do revestimento.

A velocidade V_e é a velocidade limite que o solo pode suportar sem ser erodido e para o caso de solos coesivos pode ser obtido no gráfico da Figura 23:

Figura 24 - Relação entre o parâmetro de deformação de Shields e o coeficiente eficaz de Shields.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Para solos constituídos por sedimentos não coesivos (areia e cascalhos), pode-se utilizar a Equação 22:

$$V_e = 16,1 \cdot d_m^{1/2} \quad (22)$$

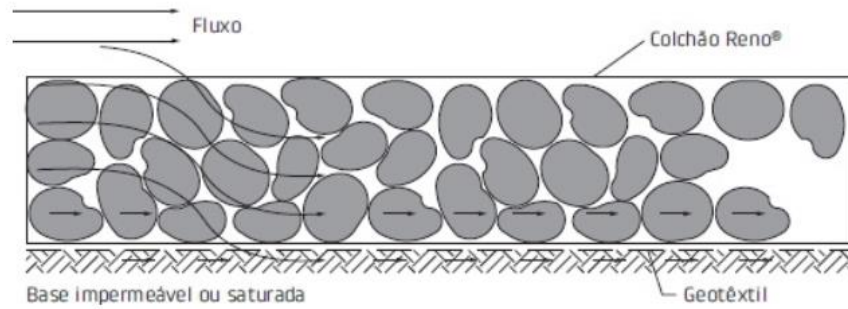
Onde:

V_e : velocidade admissível (m/s);

d_m : dimensão média das pedras (m).

No caso de ser usado um filtro geotêxtil, a velocidade da água que passa através do geotêxtil, na interface com o solo, é reduzida e vale $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$ dos valores de v_b , dependendo do geotêxtil (FRACASSI, 2017, p. 315).

Figura 25 - Esquema do fluxo da água no interior do revestimento com geotêxtil.



Fonte: MACCAFERRI, 2009.

Se mesmo com o emprego de um filtro geotêxtil, a velocidade da água sob o revestimento é superior a admissível, torna-se necessário dimensionar um filtro de cascalho ou areia, segundo Fracassi (2017). Esse filtro deve medir de 0,15 a 0,20 m de espessura e sempre maior que S' definido por:

$$S' = \frac{d_v}{f} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_e}{v_b} \right)^2 \right] \quad (23)$$

Onde:

f : é o coeficiente de Darcy-Weisbach, $f = 0,05$;

d_v : diâmetro equivalente dos vazios

$$d_v = \frac{d_{50}^{(filtro)}}{5} \quad (24)$$

A granulometria do filtro determina-se com as seguintes relações:

$$\frac{d_{50}^{(filtro)}}{d_{50}^{(solo)}} \leq 40 \quad (25)$$

$$5 \leq \frac{d_{15}^{(filtro)}}{d_{15}^{(solo)}} \leq 40 \quad (26)$$

$$\frac{d_{15}^{(filtro)}}{d_{85}^{(solo)}} \leq 5 \quad (27)$$

4. ESTUDO DE CASO – CANAL DO OLHO D'ÁGUA

O presente capítulo tem por finalidade apresentar o estudo de caso da Intervenção do Canal Olho D'água. Esse estudo tem como principal solução a aplicação de gabião tipo colchão em suas margens e em uma parcela de seu leito. Será analisado a viabilidade técnica desse revestimento através das metodologias de cálculo apresentadas no item anterior.

4.1 LOCALIZAÇÃO

O Canal Olho D'água, localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, consiste num canal exultório que, juntamente a um conjunto de outros canais afluentes, compõe a microbacia da Lagoa Olho D'água (Figura 25).

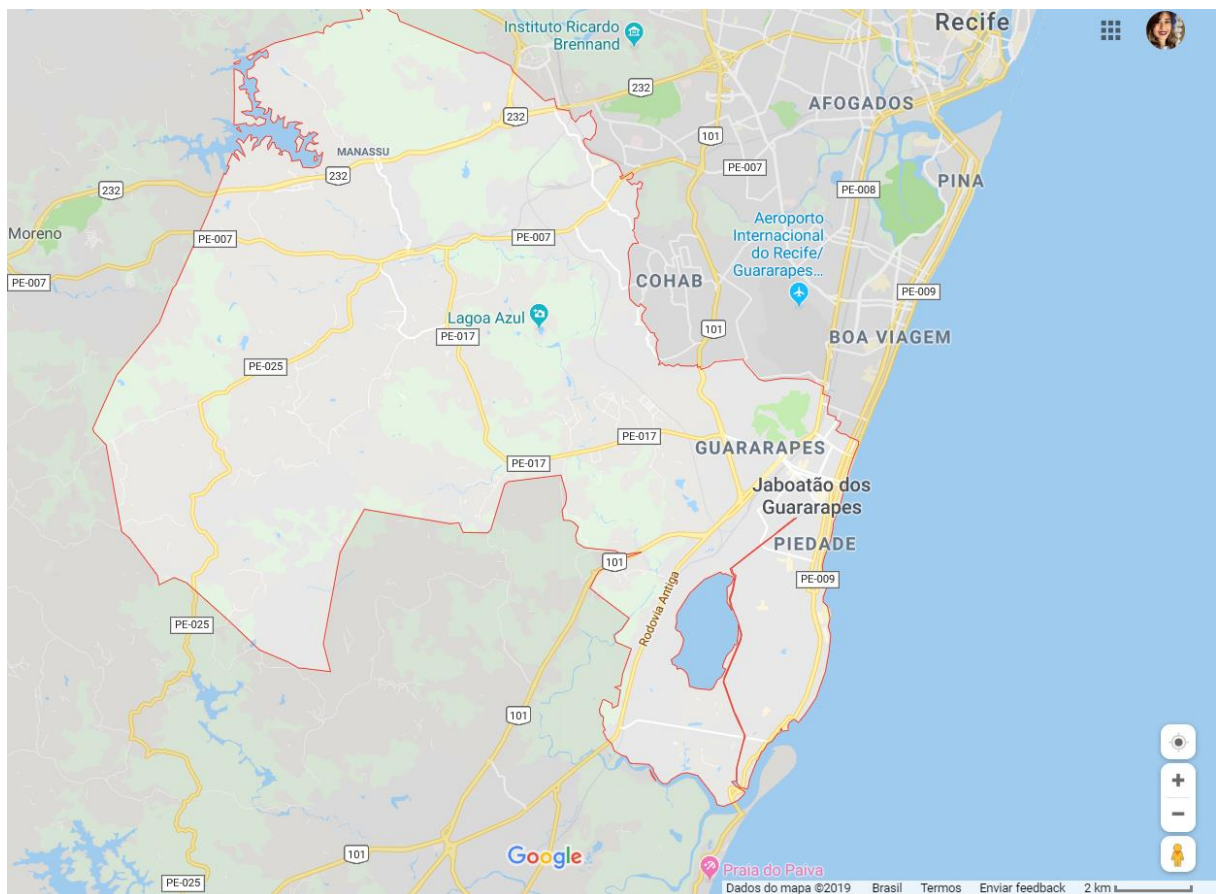
Figura 26 - Principais componentes da Micro-bacia Lagoa Olho D'água



Fonte: PROJETEC, 2016.

Em termos hidráulicos, a Lagoa Olho D'água apresenta um espelho de aproximadamente 3,55 km², perímetro de 19,42 km e profundidade média de 1 m em períodos secos (Figura 26). Dentre o seu conjunto de canais que estão conectados à lagoa, destaca-se a importância do Canal Olho D'água. Segundo Projetec (2016), este é o principal canal componente desta microbacia, pois além de escoar todas as contribuições hídricas da lagoa, permite a reposição de suas águas nas marés de alta amplitude. Sendo assim, este canal rege o comportamento hidráulico de toda a Lagoa e de seus afluentes.

Figura 27 - Localização da Microbacia Olho D'água no município de Jaboatão dos Guararapes.



Fonte: GOOGLE MAPS, 2019.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Figura 28 - Área de entorno ao Canal Olho D'água



Fonte: PROJETEC, 2016.

Com uma taxa de urbanização elevada e um histórico de ocupação irregular, a população residente na região de espraiamento da Lagoa e das margens do Canal Olho D'água sofre com problemas constantes de alagamentos. De acordo com o Plano Diretor da Cidade de Jaboatão dos Guararapes, os desníveis entre o espelho líquido e o terreno das margens da Lagoa são baixíssimos, de modo que, qualquer elevação do nível d'água implica grandes extensões de alagamentos. A configuração atual da mancha urbana, a ocupação irregular das margens dos canais, o lançamento direto de esgoto doméstico e a ausência de um sistema de micro-drenagem adequado agravam a situação.

Dada à complexidade da situação atual, a melhoria do constante quadro de alagamentos da região, requer um conjunto diversificado de ações. Sendo assim, a redução dos impactos de alagamentos do cenário atual requer intervenções de cunho hidráulico, urbanístico e social.

4.3 SOLUÇÃO

Segundo a Projetec (2016), em termos hidráulicos, a Lagoa Olho D'água apresenta um espelho de aproximadamente 3,55 km², perímetro de 19,42 km e profundidade média de 1 m em períodos secos. Dentre o seu conjunto de canais que estão conectados à lagoa, destaca-se a importância do Canal Olho D'água. Este é o principal canal componente desta micro-bacia, pois além de escoar todas as

contribuições hídricas da lagoa, permite a reposição de suas águas nas marés de alta amplitude. Sendo assim, este canal rege o comportamento hidráulico de toda a Lagoa e de seus afluentes.

Entretanto, conforme apontam o Plano das Águas Pluviais do Município de Jaboatão dos Guararapes (2013) e o Plano de Desenvolvimento Sustentável da Lagoa Olho D'água (CEHAB, 2011) *apud* Projetec (2016), este canal apresenta seção insuficiente e requer uma intervenção de modo a aumentar sua vazão de escoamento. Ambos os estudos apresentam a intervenção de redimensionamento do leito do canal Olho D'água como a principal ação de cunho hidráulico necessária para a melhoria do constante quadro de alagamento existente em toda a região de entorno da Lagoa Olho D'água.

A Projetec (2016) propôs a estruturação do Canal Olho d'Água com aumento da seção do canal para 30 m de base menor e 40 m de base maior, com atribuição de declividade ao mesmo, Taludes do canal – 1:2 (crista em 2,5 m); e revestimento dos taludes com gabiões do tipo colchão.

4.3.1 Dados do Projeto

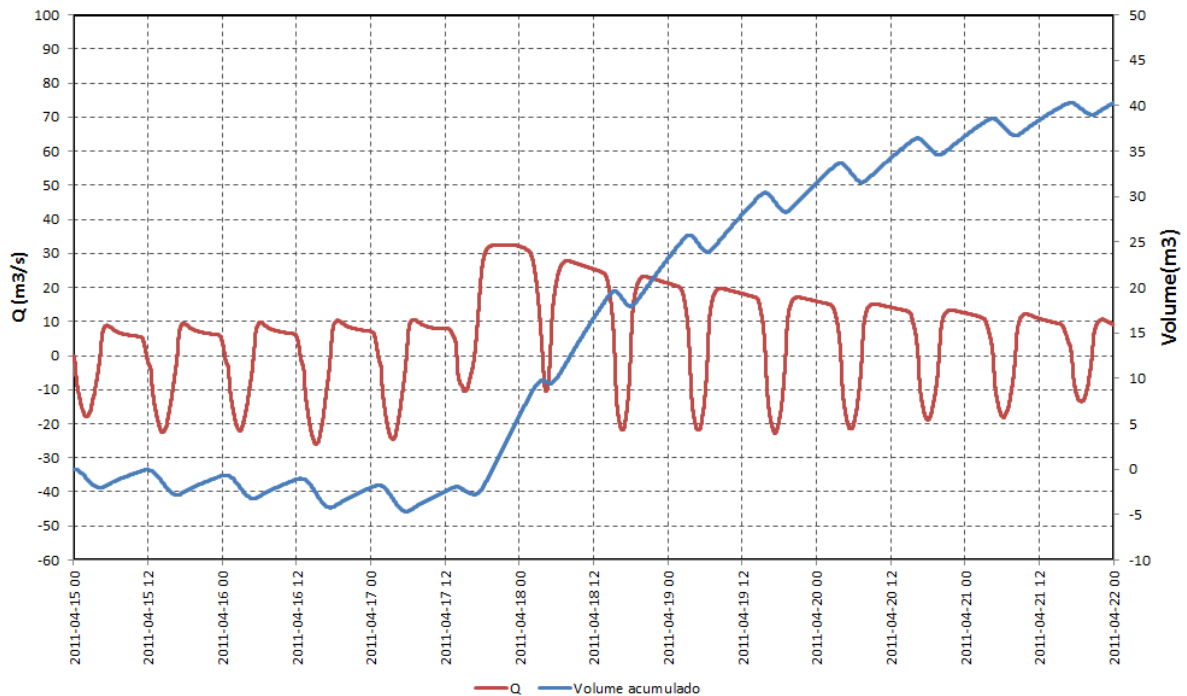
Os dados de projeto necessários para os cálculos de verificação de estabilidade do colchão que serão aqui apresentados foram obtidos e disponibilizados pelo departamento técnico da Projetec – Projetos Técnicos, atual TPF.

4.3.1.1 Dados Hidrológicos

A simulação do escoamento do canal e determinação do seu perfil hidráulico foi elaborada, segundo Projetec (2016), utilizando-se o modelo HEC-RAS – River Analysis System, Versão 4.1, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica, que é uma divisão do Instituto de Recursos Hídricos do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos.

Em termos hidráulicos, os principais resultados relativos às vazões obtidos podem ser visualizados na Figura 27. Como pode ser visto, a vazão máxima no canal obtida na simulação é de 33,00 m³/s.

Figura 29 - Vazão Crítica de Projeto.



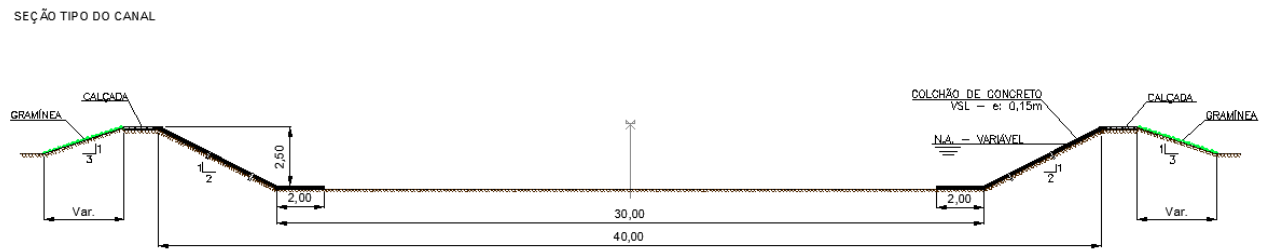
Fonte: PROJETEC, 2016.

4.3.1.2 Geometria do Canal

A solução indicada para este sistema foi baseada no estudo do cenário atual o qual propõe a estruturação do Canal Olho d'Água pela retificação de seu leito, modificando-a do seu estado natural para uma seção prismática trapezoidal com base menor (largura do fundo) com 30 m de comprimento, altura total de 2,5 m e taludes das bermas com a inclinação de 1v:2h. Com isto, a base superior (largura da “boca”) terá o comprimento de 40 m.

Os taludes da seção projetada deverão ser revestidos com estruturas de colchão Reno®. Este revestimento deverá se estender ao longo do fundo por mais 2,0 m além do pé do talude. Desta forma, o fundo do canal permanecerá sem revestimento ao longo do seu percurso. A seção proposta assumirá, então, a forma mostrada, esquematicamente, na **Error! Reference source not found.** a seguir

Figura 30 - Esquema da seção do canal.



Fonte: PROJETEC, 2016.

4.3.1.3 Declividade

A declividade adotada para o trecho retificado será de 0,0001515 m/m. A cota do fundo do canal retificado no seu ponto de partida, à saída da Lagoa, deverá ser - 0,10 m.

4.3.1.4 Coeficiente de Manning

O coeficiente de rugosidade adotado foi igual a 0,020.

4.3.1.5 Cargas de Projeto

Sobrecarga de tráfego de veículos de 10 KPa.

4.3.1.6 Dados geotécnicos

Solo mole até 12 m de profundidade com resistência não drenada de 15 KPa.

Sobrecarga de tráfego de veículos de 10 KPa.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

Neste tópico estão as análises e resultados das verificações de estabilidade do revestimento gabião do tipo colchão para o estudo de caso de Intervenção do Canal Olho D'água. Essa análise foi embasada através da metodologia de cálculo apresentadas no item 3.

5.1 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE

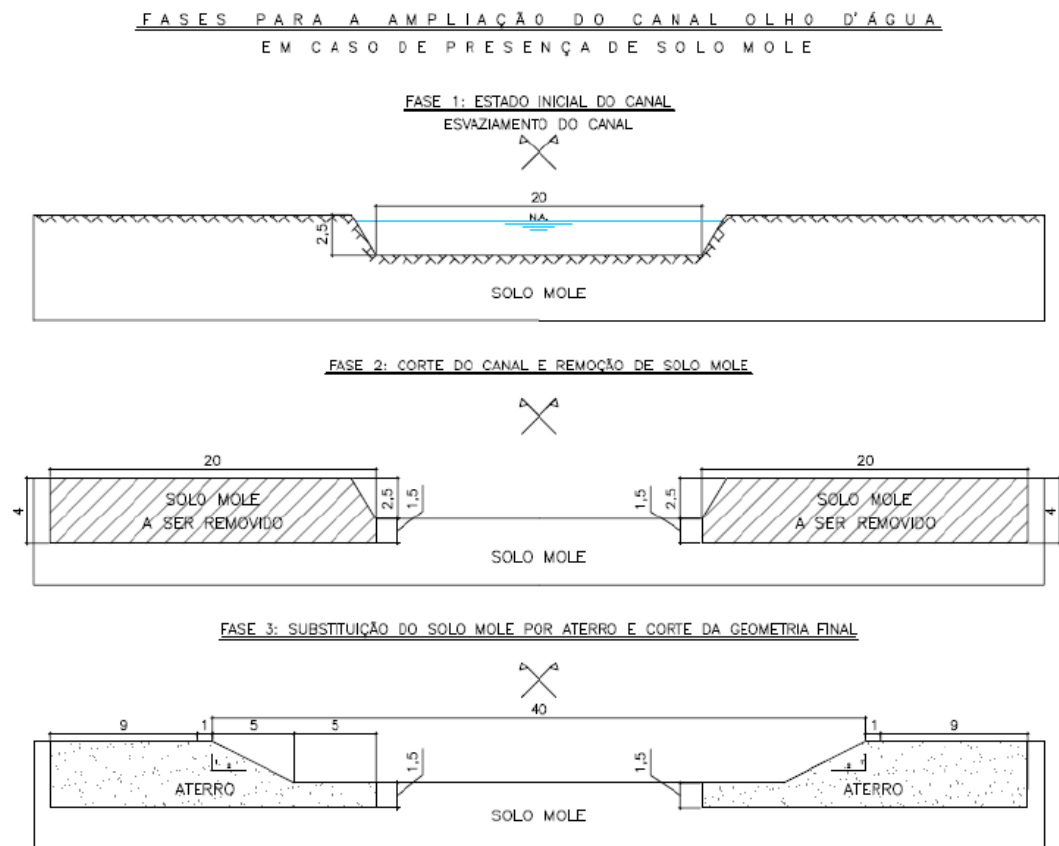
Apesar de esse não ser o tema desse trabalho, a verificação da estabilidade das margens dos taludes é de extrema necessária e indispensável em projetos hidráulicos.

Conforme mencionado anteriormente, a verificação da estabilidade de taludes deve anteceder às verificações de escoamento de canais.

Esta solução foi validada em termos de estabilidade dos taludes a partir da análise do fator de segurança global a ruptura da encosta do canal. Foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Substituição de solo mole com aterro de material granular de 1,5 a 4 m de espessura, coesão nula e ângulo de atrito de 30 graus (**Error! Reference source not found.**);
- Solo mole até 12 m de profundidade com resistência não drenada de 15 KPa;
- Sobrecarga de tráfego de veículos de 10 Kpa (PROJETEC, 2016).

Figura 31 - Fases de execução do alargamento do canal na presença de solo mole.

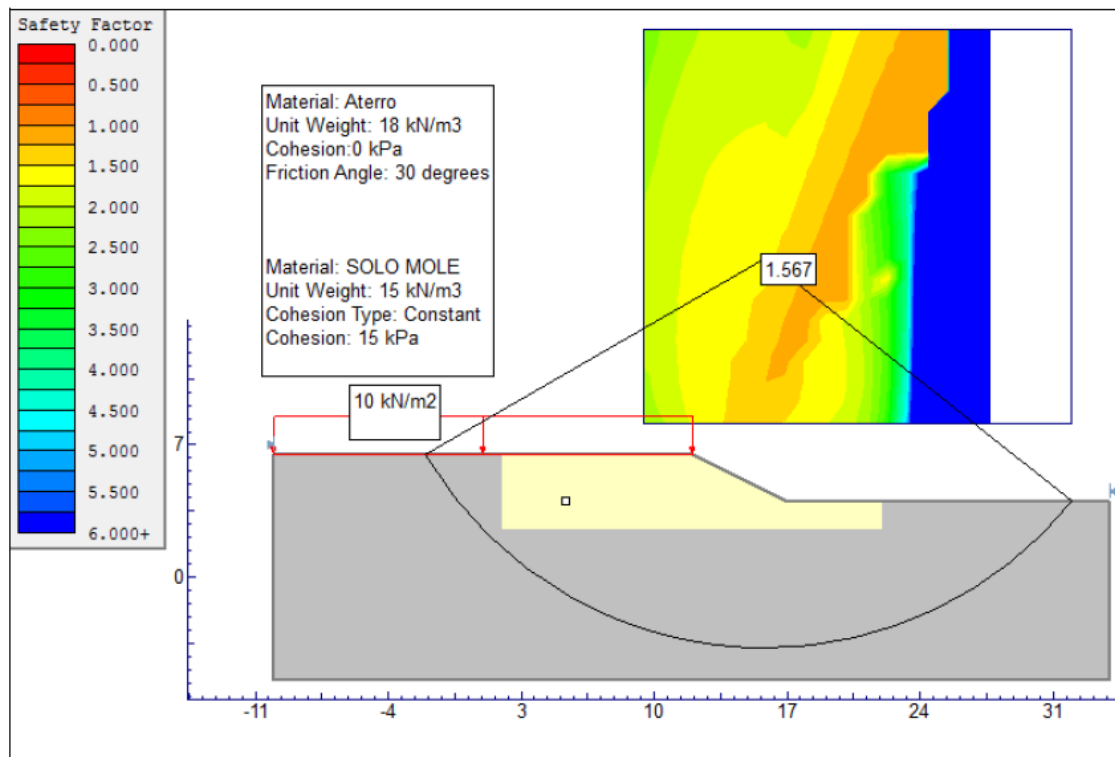


Fonte: PROJETEC, 2016.

De acordo com a Projetec (2016), esta análise foi desenvolvida através da utilização do método de Bishop simplificado no software Slide 5.0.

O fator de segurança obtido foi $F.S = 1.567$, conforme a **Error! Reference source not found..** Através desta análise podemos concluir o fator de segurança obtido é suficiente para garantir a estabilidade do talude conforme a NBR-11682. Portanto, conclui-se que os taludes do canal Olho D'água são geotecnicaamente estáveis nas condições previamente citadas.

Figura 32 - Superfície crítica de ruptura da solução de substituição dos solos moles.



Fonte: PROJETEC, 2016.

5.2 VERIFICAÇÕES DE ESTABILIDADE DO GABIÃO TIPO COLCHÃO

Neste item serão feitas as verificações do revestimento em gabião do tipo colchão. As verificações serão feitas de acordo com a metodologia apresentada no item 3.

Abaixo segue o quadro resumo (Tabela 9) dos dados coletado pela Projotec – Projetos Técnicos, atual TPF. Dados necessários para as verificações de estabilidade do colchão Reno do caso em análise.

Tabela 9 - Dados de Projeto.

Dados de Projeto	
Vazão de Projeto	33,26 m³/s
Declividade longitudinal	0,0001515 m/m
Coeficiente de rugosidade	0,020
Forma	Trapezoidal
Base menor	30 m
Inclinação de Taludes	1:2
Altura líquida	1,34 m

Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

5.2.1 Verificação pelo critério da velocidade crítica

1- Seleção do tipo de gabião tipo colchão

Conforme a Figura 20, a espessura de projeto é de 0,15 m. Todavia, será utilizado o revestimento de espessura de 0,17 m, uma vez que esta é a espessura mínima padronizada e comercializada pela Maccaferri.

A granulometria das pedras disponíveis para o preenchimento dos gabiões tipo colchão são:

$$d_{50} = 85 \text{ mm}$$

$$d_{90} = 95 \text{ mm}$$

Serão utilizadas pedras de diâmetro 85 mm (d_{50}) nesse estudo de caso prático. Consequentemente, estima-se poder usar o gabião colchão de malha 6 x 8 cm, já que a abertura da malha é menor que o diâmetro das pedras, impossibilitando a fuga de material.

2- Determinação da velocidade de escoamento

a) *Raio hidráulico*

A área da seção transversal (A), perímetro molhado (P) e o raio hidráulico (R_h), em função da profundidade (y), são definidos pelas seguintes relações (Anexo A):

$$A = b \cdot y + y^2 \cdot \cotg \varnothing \quad (28)$$

$$P = b + \frac{2 \cdot y}{\sin \varnothing} \quad (29)$$

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (30)$$

Onde:

b = largura do fundo do canal (m);

y = altura líquida da água (m);

$\varnothing$ = ângulo de inclinação da margem (°).

Para y = 1,34m; b = 30m; $\varnothing$ = 26.56°.

Assim, tem-se:

$$\text{Área} = 43,79 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro Molhado} = 35,99 \text{ m}$$

$$R_H = 1,22 \text{ m}$$

b) *Velocidade de escoamento*

Através da equação de Manning, obtém-se a velocidade de escoamento:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (31)$$

Onde n = 0,020; R_h = 1,22m; i = 0,0001515 m/m.

$$V = 0,70 \text{ m/s}$$

3- Número de Froude

Para caracterização dos regimes de escoamento quanto a energia, calcula-se:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{g \cdot A}{P}}} \quad (32)$$

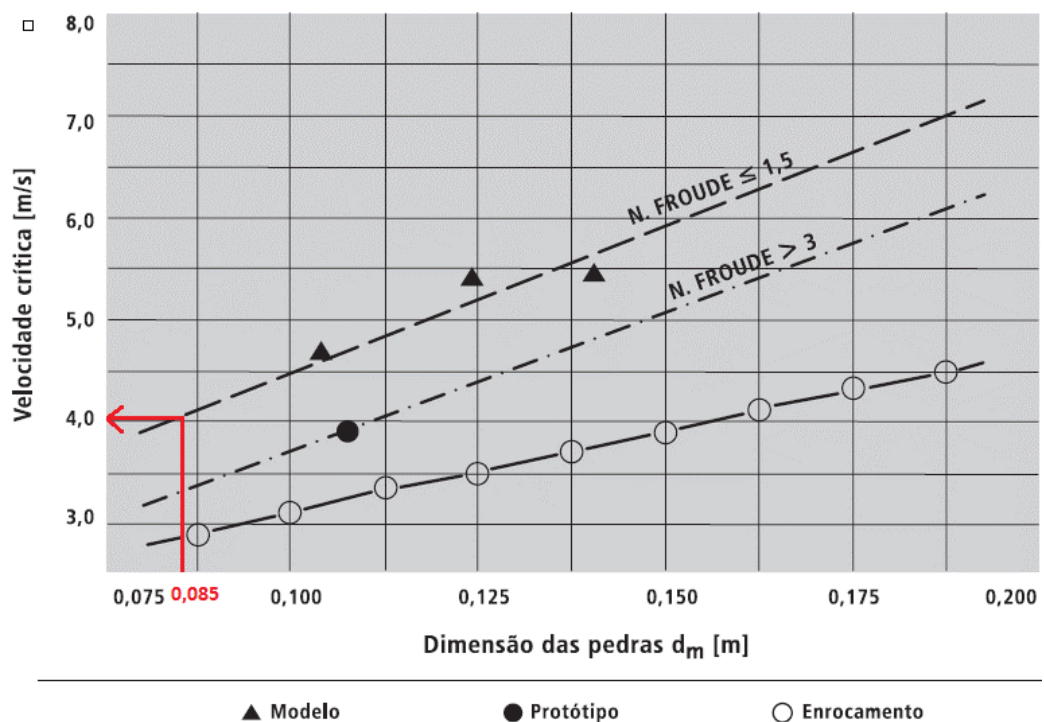
$$Fr = 0,20$$

O fluxo encontra-se na condição subcrítico, pois $Fr < 1,0$.

4- Determinação da velocidade crítica (V_c)

A velocidade crítica é determinada a partir do gráfico da Figura 32 ou Tabela 10 obtidos através de experimentos realizados em Fort Collins. Logo, tem-se a velocidade crítica:

Figura 33 - Velocidade crítica a partir do diâmetro das pedras e número de Froude.



Fonte: Adaptado de MACCAFERRI (2009).

Pela tabela:

Tabela 10 - Velocidade crítica a partir do diâmetro das pedras.

Tipo	Espessura [m]	Pedras de enchimento		Velocidade crítica [m/s]	Velocidade limite [m/s]
		Dimensões [mm]	d ₅₀ [m]		
Colchão Reno®	0,17	70 a 100	0,085	3,5	4,2
		70 a 150	0,110	3,8	4,5
	0,23	70 a 100	0,085	3,7	4,5
		70 a 150	0,110	4,1	4,9
	0,30	70 a 120	0,100	4,0	4,7
		100 a 150	0,125	4,3	5,0

Fonte: Adaptado de MACCAFERRI (2009).

Segundo o gráfico, a velocidade que o escoamento pode atingir sem que ocorra o movimento das pedras de dimensões de 0,085mm é de 4,0 m/s. Enquanto que a Tabela 10 indica também a velocidade limite de 4,2 m/s que pode ser suportada pelo revestimento por curtos intervalos de tempo sem que provoque danos à estrutura do revestimento.

5- Condição limite

Para que o colchão seja estável em relação à verificação da velocidade crítica, este deve atender a condição limite:

$$V \leq V_c$$

$$V = 0,70 \text{ m/s}$$

$$V_c = 4,00 \text{ m/s}$$

Portanto, o colchão é estável na verificação pelo critério da velocidade crítica.

5.2.2 Verificação pela tensão de arraste

1. Tensão de arraste no fundo

Em canais suficientemente largos, como visto anteriormente, o raio hidráulico praticamente igual a profundidade da água y no ponto a ser verificado. Calcula-se, portanto, a tensão de arraste no fundo com a expressão a seguir:

$$\tau_f = \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (33)$$

Onde, γ_w : peso específico da água, ou seja, $\gamma_w=1000 \text{ Kgf/m}^3$;

$y = 1,34 \text{ m}$;

$i = 0,0001515 \text{ m/m}$.

Calcula-se:

$$\begin{aligned} \tau_f &= 0,20 \text{ Kgf/m}^2 \\ \tau_f &= 2,00 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

2. Tensão crítica de arraste no fundo

A tensão tangencial na situação crítica de início de movimento é calculada através da equação:

$$\tau_{f,c} = C_* \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m \quad (34)$$

Onde:

C_* = coeficiente de Shields;

γ_s = peso específico das pedras, $\gamma_s= 24000 \text{ Kgf/m}^3$;

d_m = diâmetro médio do material de fundo (m); $d_m = 0,085\text{m}$.

O coeficiente de Shields conforme já foi mencionado é igual a $C_* \approx 0,10$. Logo, tem-se:

$$\begin{aligned} \tau_{f,c} &= 11,9 \text{ Kgf/m}^2 \\ \tau_{f,c} &= 119,00 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3. Condição limite

$$T_f \leq T_{f, c}$$

$$T_f = 2,00 \text{ N/m}^2$$

$$T_{f, c} = 119,00 \text{ N/m}^2$$

Portanto, colchão é estável, não produzindo movimento das pedras contidas no revestimento de fundo.

4. Tensão de arraste nas margens

A tensão tangencial na situação crítica de início de movimento nas margens é dada por:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (35)$$

Onde, γ_w : peso específico da água, ou seja, $\gamma_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$;

$y = 1,34 \text{ m}$;

$i = 0,0001515 \text{ m/m}$.

$$T_m = 0,152 \text{ Kg/m}^2$$

$$T_m = 1,52 \text{ N/m}^2$$

5. Tensão crítica de arraste nas margens

Como visto anteriormente, a tensão crítica nas margens é calculada pela Equação:

$$\tau_{m,c} = \tau_{f,c} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \varphi}} \quad (36)$$

Onde:

$T_{m, c}$: tensão tangencial crítica nas margens dos canais (N/m^2);

$\tau_{f, c}$: tensão tangencial crítica no fundo (N/m^2);

α : ângulo de inclinação do talude;

φ : ângulo de atrito do material de enchimento do revestimento.

$$\begin{aligned} & T_{m, c} \\ = & 9,62 \text{ Kgf/m}^2 \\ & T_{m, c} \\ = & 96,20 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

6. Condição limite

Para que a condição limite no critério de tensão de arraste nas margens seja atendida, deve-se atender a seguinte relação:

$$T_m \leq T_{m, c}$$

$$T_m = 1,52 \text{ N/m}^2$$

$$T_{m, c} = 96,2 \text{ N/m}^2$$

Logo, conclui-se que o revestimento das margens do canal também é estável.

5.2.3 Controle das deformações

Como as condições limites foram satisfeitas com folga tanto na verificação pelo critério da velocidade quanto pelo critério da tensão de arraste, não é necessário fazer a verificação das deformações nas vazões de cheia. Pois, o controle das deformações só é feito quando as tensões e escoamento superam as tensões admissíveis pelo material.

5.2.4 Verificação da velocidade residual no fundo

Conforme previsto nos estudos da Projetec (2016), haverá uso de filtro geotêxtil na interface entre o gabião do tipo colchão e o solo. Neste item, deve-se verificar a velocidade residual de escoamento sob o colchão (V_b) e compará-la com a velocidade admissível (V_e) para que não haja transporte das partículas de sólido.

$$V_b = \frac{1}{n_f} \cdot \left(\frac{d_m}{2}\right)^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (37)$$

Onde:

V_b : velocidade da água na base do solo, sob o revestimento (m/s);

n_f : coeficiente de rugosidade fundo (m/s), $n_f = 0,02$;

d_m : dimensão média das pedras (m).

$$V_b = 0,075 \text{ m/s}$$

Como o solo de aterro nesse estudo é arenoso, podemos calcular a velocidade que o solo suporta sem ser erodido, ou seja, V_e por:

$$V_e = 16,1 \cdot d_m^{1/2}$$

$$V_e = 4,69 \text{ m/s}$$

Assim, tem-se que a velocidade da água que ultrapassa o revestimento é inferior à velocidade admissível pelo material do solo-base. Portanto, o filtro geotêxtil torna-se suficiente, não sendo necessário prever um filtro de cascalho ou areia.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O revestimento em gabião do tipo colchão é uma solução que se destaca dentre as demais alternativas convencionais por possuir algumas vantagens na sua aplicação, como: alta permeabilidade, baixo custo, alta durabilidade e baixo impacto ambiental.

A análise de estabilidade do gabião consiste em fazer algumas verificações, como: verificação pelo critério da velocidade crítica ou verificação pelo critério da tensão de arraste, irá depender dos dados de projeto que serão fornecidos; o controle das deformações, caso necessário, e a verificação da velocidade residual no fundo, que definirá a necessidade da utilização de filtro de areia e cascalho. Vale ressaltar que deve ser feita a verificação da estabilidade geotécnicas das margens do canal previamente. Esses cálculos de verificação de estabilidade são de grande simplicidade, conforme visto no caso prático da Intervenção do Canal Olho D'água, e podem ser feitos através de fluxograma.

Além dessa facilidade de aplicação da metodologia de cálculo do revestimento, existem alguns gráficos e tabelas que relacionam os dados de projetos, como velocidade ou vazão, com a espessura do revestimento que permite o pré-dimensionamento do tipo de gabião colchão a ser utilizado na obra, facilitando o engenheiro na tomada de decisões.

Como recomendação futura e complemento deste trabalho, poderia ser realizado um estudo de viabilidade econômica, comparando a solução de revestimento em gabião do tipo colchão com outras soluções.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, 1990.
- BAPTISTA, M. B; LARA, M. M – **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ed. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2014.
- BRIGHETTI, G; SCARATI MARTINS, J. R – PHD 5023 – **Obras Fluviais**, 2001.
- CHOW, V.T. – **Open Channel Hydraulics**. McGraw-Hill, 1959.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. Volume I – O canal fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- FRACASSI, Gerardo. **Proteção de rios com soluções Maccaferri**. Oficina de Textos, 2017.
- INFOESCOLA. **Erosão**. Disponível em:
<https://www.infoescola.com/geologia/erosao/>. Acesso em: 05 de junho de 2019.
- MACCAFERRI AMERICA LATINA. **Produtos**. Disponível em:
<https://www.maccaferri.com/br/aplicacoes/obras-hidraulicas/>. Acesso em: 05 de junho de 2019.
- MACCAFERRI. **Manual técnico de revestimentos de canais e cursos d'água**. São Paulo, 2009.
- MACCAFERRI. **Catálogo de Revestimentos de canais e cursos d'água**. São Paulo, 2010.
- MAPIONET. **Solapamento dos solos**. Disponível em: <https://mapio.net/pic/p-44330091/>. Acesso em: 05 de junho de 2019.
- PEREIRA, Caio. **O que é Gabião, principais tipos, vantagens e desvantagens**. Escola Engenharia, 2018. Disponível em:
<https://www.escolaengenharia.com.br/gabiao/>. Acesso em: 15 de maio de 2019.
- TOMÁZ, P. **Canal revestido com colchão Reno**, 2010.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.
- PROJETEC – PROJETOS TECNICOS. **Estudo de Caso - Projeto Básico do Canal Olho D'água**. Pernambuco, 2016.
- SCHMEIER, N. P. **Bioengenharia de solos: uma alternativa à recuperação de áreas degradadas**. Revista Destaques Acadêmicos, v. 5, n. 4, p. 127-130, 2013.

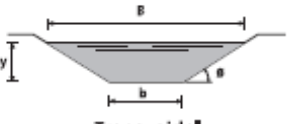
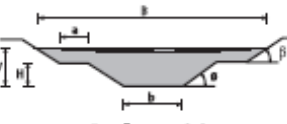
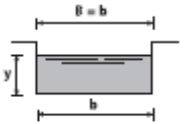
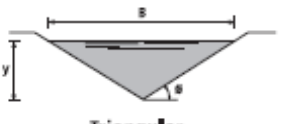
SILVA, Pedro José da. **Estrutura para identificação e avaliação de impactos ambientais em obras hidroviárias**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SIMONS, L. I.; ASSOCIATES. **Engineering Analysis of Fluvial Systems**. Fort Collins: Simons, LI & Associates, 1982.

TODO ESTUDO. **Erosão**. Disponível em:

<https://www.todoestudo.com/geografia/erosao>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

ANEXO A – SEÇÕES MAIS UTILIZADAS EM DIMENSIONAMENTOS DE CANAIS

SEÇÃO	ÁREA (A)	PERÍMETRO MOLHADO (C)	RAIO HIDRÁULICO (R_H)
 Trapezoidal	$y (b + y \cotg \phi)$	$b + \frac{2y}{\sen \phi}$	$\frac{y (b + y \cotg \phi)}{b + \frac{2y}{\sen \phi}}$
 Duplo trapézio	$(b + 2a) \cdot y + y^2 \cotg \phi - 2aH$ (1)	$b + 2a + \frac{2y}{\sen \phi}$ (1)	$\frac{(b + 2a) \cdot y + y^2 \cotg \phi - 2aH}{b + 2a + \frac{2y}{\sen \phi}}$ (1)
 Retangular	$b y$	$b + 2y$	$\frac{b y}{b + 2y}$ (2)
 Parabólica	$\frac{2}{3} B y$	$B + \frac{8}{3} \frac{y^2}{B}$ (3)	$\frac{2B^2 y}{3B^2 + 8y^2}$ (3)
 Triangular arredondada sobre o fundo	$\frac{B^2 \tg \phi}{4} - r^2 \tg \phi + r^2 \phi$ (4)	$\frac{B}{\phi \cos \phi} - 2r \tg \phi + 2r$ (4)	$\frac{\frac{B^2 \tg \phi}{4} - r^2 \tg \phi + r^2 \phi}{\frac{B}{\cos \phi} - 2r \tg \phi + 2r}$ (4)
 Triangular	$y^2 \cdot \cotg \phi$	$\frac{2 y}{\sen \phi}$	$\frac{y}{2} \cos \phi$

(1) No caso de $\beta = \theta$

(2) Quando $B \gg y \Rightarrow R \equiv y$

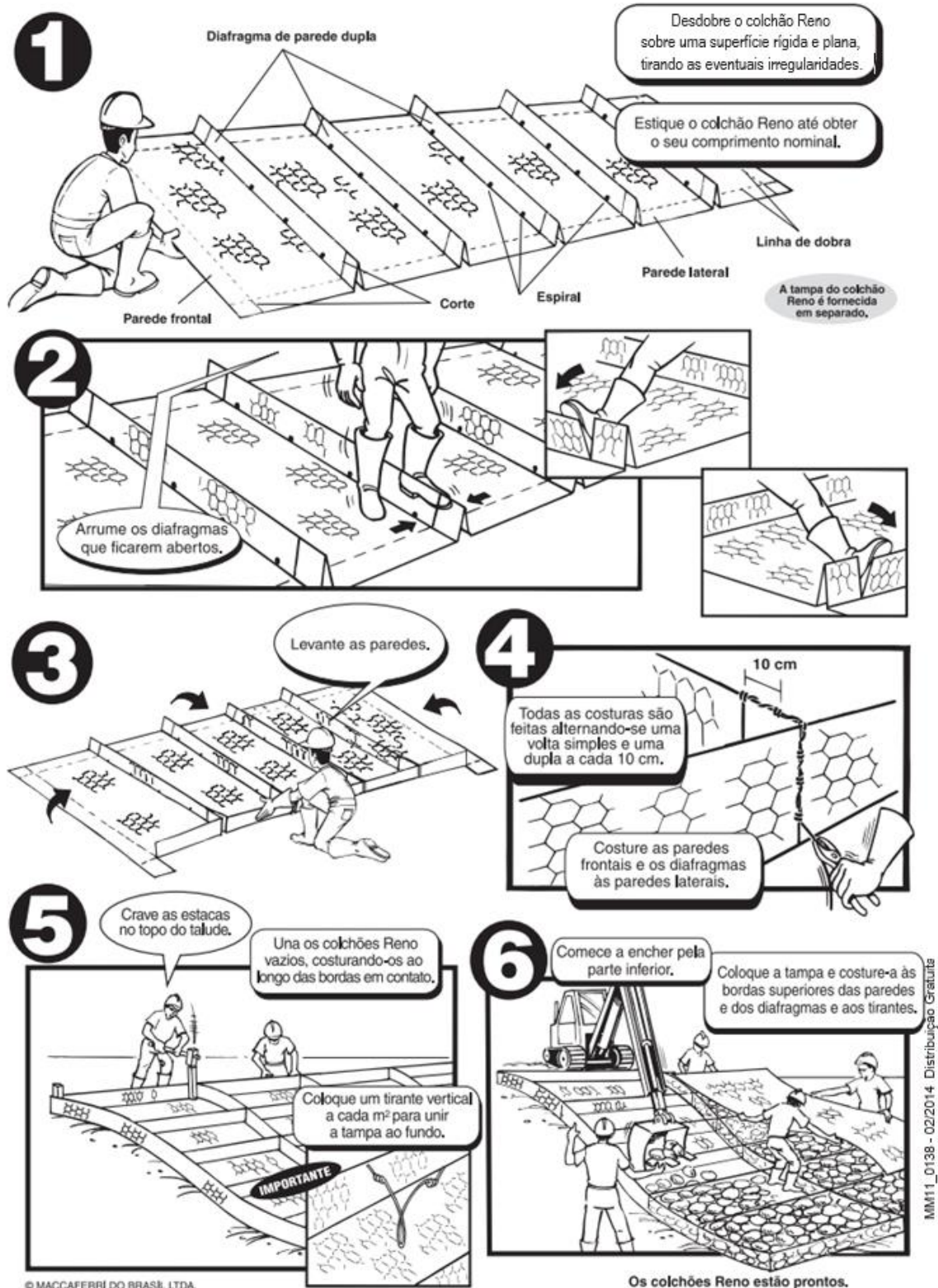
(3) Satisfeita com suficiente aproximação
se $0 < x \leq 1$
onde $x = 4y/B$

Quando $x > 1$ se usará a expressão:

$$C = \frac{B}{2} \left[\sqrt{1 + x^2} + \frac{1}{x} \ln (x + \sqrt{1 + x^2}) \right]$$

(4) θ em radianos.

ANEXO B - MONTAGEM DE GABIÃO DO TIPO COLCHÃO



Fonte: MACCAFERRI