

MÉTODOS CONVENCIONAIS DE PROTEÇÕES CONTRA EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE PILARES E DE ENCONTROS DE PONTES

CONVENTIONAL LOCAL SCOUR COUNTERMEASURES FOR BRIDGE PIERS AND ABUTMENTS

Cristina M. S. Fael

Professora Auxiliar /// Universidade da Beira Interior (Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura) ///
E-mail: cmsf@ubi.pt

António H. Cardoso

Professor Catedrático /// Instituto Superior Técnico (Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos).

RESUMO: O objetivo deste artigo consiste na apresentação dos critérios de projeto relativos a soluções convencionais de proteção contra erosões localizadas junto de pilares e encontros de pontes. Incluem-se soluções que envolvem a construção de tapetes de enrocamento, de colchões Reno, de blocos artificiais ligados por cabos e de ensacados de argamassa, especificando-se métodos de cálculo das dimensões dos blocos naturais ou artificiais e sugerem-se esquemas simples de fixação das dimensões dos tapetes, tanto em planta como em corte. Apresentam-se ainda recomendações a respeitar na instalação de filtros granulares ou de geotêxtil.

Palavras Chave: Medidas de proteção, pilares e encontros de pontes, erosões localizadas

ABSTRACT: The purpose of this paper is the presentation of design guidelines of conventional local scour countermeasures at bridge piers and abutments. Namely, solutions involving the construction of riprap mattress, Reno mattresses, cable-tied blocks and grout-filled bags are included, by specifying predictors of block sizes, for both natural and artificial, while schematic solutions are also suggested for the plan form and the thickness and topographic placement of mattresses. Recommendations for the setting of natural and synthetic filters are finally presented.

Keywords: Scour countermeasures, piers and bridge abutments, local scour

1. INTRODUÇÃO

As erosões localizadas que, muitas vezes, se desenvolvem junto de fundações de pontes, sejam pilares ou encontros, constituem as principais causas de colapso ou rutura parcial destas importantes infraestruturas viárias, particularmente, em períodos de cheias.

Em face das dificuldades inerentes à determinação rigorosa da profundidade de cavidades de erosão e dos inconvenientes estruturais que a existência dessas cavidades pode acarretar, desde há décadas que se vêm a desenvolver esforços de investigação no sentido da definição de soluções construtivas para reduzir ou eliminar as referidas cavidades. Estas soluções podem ser agrupadas em soluções ou medidas *convencionais*, por ação do encouraçamento do fundo, e em soluções ou medidas *não convencionais*, decorrentes de alterações da estrutura do escoamento.

No primeiro grupo, incluem-se soluções que têm por objetivo aumentar a capacidade de o fundo resistir localmente à erosão, impedindo que o escoamento descendente e os vórtices em ferradura e de esteira incidam diretamente no material original do fundo do rio, necessariamente mais fino. A função deste tipo de medidas de proteção não é tanto reduzir a extensão e profundidade das cavidades de erosão, mas antes afastá-las da proximidade da estrutura a proteger, de modo a garantir a sua estabilidade. No segundo grupo, incluem-se medidas que tiram partido de alterações da configuração do escoamento na proximidade de pilares ou encontros, de modo a reduzir o respetivo potencial erosivo.

Este artigo de revisão tem por objetivo sistematizar critérios de projeto relativos a *soluções convencionais* de proteção contra erosões localizadas junto de fundações de pontes. Para pilares, incluem-se especificações aplicáveis a tapetes constituídos por enrocamento, colchões Reno, lajetas artificiais ligadas por cabos, blocos artificiais soltos e ensacados de argamassa. Para encontros, reúnem-se, unicamente, resultados de estudos recentes relativos a tapetes de enrocamento.

As soluções apresentadas só se aplicam a cursos de água em equilíbrio, não sujeitos a erosões e deposições generalizadas ou a meandrização, e sem grandes cargas de material vegetal ou de lamas em suspensão.

O correto dimensionamento das soluções de proteção contra erosões localizadas implica que se conheçam

previamente as dimensões e forma das fundações, a velocidade média do escoamento de aproximação e o correspondente ângulo de enviesamento ou de ataque, a densidade do material a utilizar na construção dos tapetes e a curva granulométrica do material do fundo do rio.

2. MECANISMO DE RUTURA E SOLUÇÕES DE MITIGAÇÃO

Parola [1993], Chiew [1995] e Lauchlan [1999] concluíram que, junto de pilares de pontes e na ausência de transporte sólido generalizado no escoamento de aproximação, os tapetes formados por blocos soltos – de enrocamento ou outros – podem estar sujeitos aos seguintes mecanismos de rutura:

- i) *Rutura por atrito* (rolamento e deslizamento), que se traduz no transporte de blocos isolados para jusante pelo facto de ser excedida, localmente, a respetiva tensão ou velocidade crítica de início do movimento. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura consiste na utilização de blocos suficientemente pesados, soltos ou interligados.
- ii) *Rutura por sifonagem*, a que corresponde o afundamento dos tapetes devido à infraescavação provocada pela aspiração vertical de partículas do material do fundo através dos vazios dos tapetes. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura implica a colocação de tapetes suficientemente espessos sobre filtros geotécnicos ou sintéticos, devidamente dimensionados.
- iii) *Rutura de bordo*, entendida como o descalçamento do pilar em consequência do rolamento de blocos da periferia do pilar para o interior da cavidade que, inevitavelmente, se desenvolve exteriormente ao tapete. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura traduz-se na colocação de tapetes suficientemente extensos em planta.

Ainda que os referidos mecanismos de rutura tenham sido identificados para condições de escoamento sem transporte sólido generalizado, Chiew e Lim (2000) e Lauchlan e Melville (2001) referem que eles também ocorrem em escoamentos com transporte sólido generalizado. Lim e Chiew (2001) referem, ainda, outros dois mecanismos de rutura de tapetes de proteção de pilares, presentes unicamente em escoamentos com transporte sólido generalizado:

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em janeiro de 2013, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em abril de 2013. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 34, Nº 1, 25-41, maio de 2013.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh34n1-3

- iv) *Rutura devida à migração de configurações do fundo*, traduzida no afundamento dos tapetes em consequência da passagem das respetivas cavas. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura consiste na colocação do tapete suficientemente abaixo do leito médio do rio (ao nível das cavas das configurações de fundo).
- v) *Rutura por erosão generalizada do fundo*, que induz o transporte para jusante dos blocos dos tapetes em consequência do abaixamento do nível médio do fundo, resultante do défice de abastecimento de sedimentos a partir de montante ou de erosão regressiva originada a jusante. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura implica a construção de soleiras transversais de enrocamento (uma ou mais) a jusante da ponte.

Na ausência de erosão generalizada do fundo, a Figura 1 apresenta, esquematicamente, os domínios de ocorrência dos diferentes mecanismos de rutura de tapetes para diferentes condições de escoamento, assinalando a negrito os mais plausíveis em cada domínio. Na figura, u_* é a velocidade de atrito junto ao fundo, u_{*c} é a velocidade de atrito crítica, u_{*ce} é a velocidade de atrito crítica do enrocamento, D_{50} é o diâmetro mediano do material do fundo e D_{e50} o diâmetro mediano dos blocos de enrocamento.

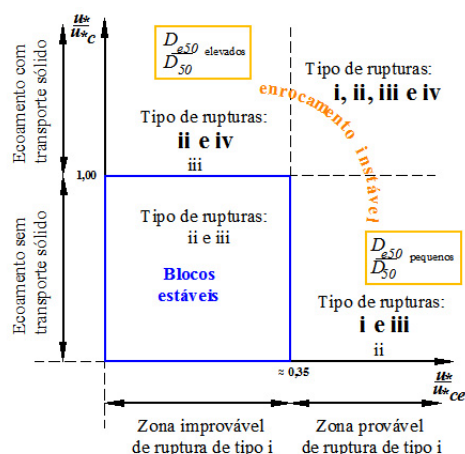


Figura 1 – Domínios de ocorrência dos mecanismos de rutura (adaptada de Melville e Coleman, 2000).

Para $u_*/u_{*ce} < \approx 0.35$ e $u_*/u_{*c} < 1.0$, por exemplo, os blocos de enrocamento não são suscetíveis à rutura por atrito e as ruturas por sifonagem e de bordo, podendo ocorrer, não são muito prováveis. Por sua vez, para $u_*/u_{*ce} > 0.35$ e $u_*/u_{*c} > 1.0$, podem ocorrer os quatro tipos de rutura compatíveis com ausência de erosão generalizada do fundo.

De acordo com Melville *et al.* (2006), os mecanismos de rutura a que se encontram expostos os blocos de enrocamentos de proteção de aterros de acesso a encontros de pontes dependem da localização dos blocos. Quando colocados no leito, constituindo tapetes de pé, os mecanismos de rutura são iguais aos que ocorrem junto de pilares de pontes; quando colocados nas espaldas dos aterros, podem estar sujeitos a mais dois mecanismos de rutura (Blodgett e McConaughy, 1985):

- vi) *Rutura por erosão dos blocos*, em que estes se deslocam isoladamente devido à ação do escoamento; este mecanismo é equivalente ao mecanismo de rutura por atrito nos tapetes de pé e é facilitado por declive excessivo das espaldas, por remoção de blocos isolados ou por uma distribuição granulométrica dos blocos demasiado uniforme. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura consiste na utilização de blocos suficientemente pesados.
- vii) *Rutura por deslizamento translacional ou rotacional*, em que os blocos se movem em conjunto (movimento de massa); este tipo de rutura pode ser causado por declive excessivo das espaldas, subpressões elevadas, perda de apoio induzida pela rutura de bordo dos tapetes de pé ou pela presença de camadas impermeáveis que atuam como superfícies de rutura dos aterros. A solução genérica de mitigação deste tipo de rutura implica a construção de aterros estáveis em termos geotécnicos; implica ainda que não ocorra rutura de bordo dos tapetes de pé.

Na especificação das soluções convencionais que são objeto deste artigo de revisão, admite-se que os cursos de água estão em equilíbrio e que, no caso de encontros, os respetivos aterros são estáveis. Isto significa que a mitigação dos mecanismos v) e vii) não será aqui considerada.

3. PROTEÇÃO DE PILARES

3.1. Tapetes de enrocamento

Das soluções convencionais de proteção contra erosões localizadas junto de pilares, a mais praticada é a que corresponde à colocação de tapetes de enrocamento.

Os tapetes de enrocamentos são constituídos por blocos de pedra natural, geralmente soltos. Estes tapetes, como, aliás, todos os que serão especificados neste capítulo, pretendem criar uma barreira física que resista ao poder erosivo do escoamento, com capacidade para se acomodar a alterações da configuração do leito. A sua estabilidade depende do peso e do imbricamento entre blocos. Procede-se, a seguir, à caracterização da granulometria e graduação dos blocos, da extensão, configuração em planta e espessura dos tapetes de enrocamento, bem como do seu posicionamento relativamente ao nível do leito, tendo em vista garantir a estabilidade destes tapetes. Desde os anos 90, diversos autores têm sugerido formulações para calcular a dimensão média ou mediana dos blocos de enrocamento capazes de fazer face à rutura por atrito. De acordo com Parker *et al.* (1998), deve utilizar-se a equação de Parola e Jones (1991):

$$D_{e50} = \frac{U^2 K_f^2}{2.89(s-1)g} \quad (1)$$

em que, sendo D_{e50} o diâmetro mediano dos blocos de enrocamento, s é a respetiva densidade, U é a velocidade média do escoamento de aproximação, g a aceleração da gravidade e K_f um coeficiente de forma dos pilares. Este coeficiente toma o valor 1.5 quando a face de montante é arredondada e 1.7 quando a mesma face faz um ângulo reto com as faces laterais. Para velocidades médias do escoamento de aproximação inferiores a cerca de 5 ms^{-1} , sugerem-se aqui as seguintes equações alternativas:

– Equação de Breusers & Raudkivi (1991):

$$\frac{D_{e50}}{h} = \frac{0.278 F_r^3}{(s-1)^{1.5}} \quad (2)$$

Nesta equação, o número de Froude do escoamento, F_r , é definido com a velocidade crítica de início do movimento junto ao pilar, U_c , dada por $U_c = 2U$, e h é a profundidade média do escoamento de aproximação para o caudal de projeto.

– Equação de Bonasoundas (1973):

$$D_{e50} = 6 - 3.3U + 4U^2 \quad (3)$$

Nesta equação, D_{e50} é expresso em cm, sendo a velocidade média do escoamento de aproximação expressa em ms^{-1} .

– Equação de Quazi e Peterson (1973):

$$\frac{D_{e50}}{h} = \frac{0.85 F_r^{2.5}}{(s-1)^{1.25}} \quad (4)$$

Nesta equação, o número de Froude do escoamento é definido com a velocidade média do escoamento de aproximação.

Supondo conhecido o diâmetro mediano dos blocos capaz de fazer face à rutura por atrito, importa ainda conhecer a correspondente curva granulométrica. De acordo com Neil (1973), a curva granulométrica dos blocos de enrocamento, definida pela percentagem do peso de blocos que é inferior a um dado diâmetro característico, D_{en} , deve respeitar as relações apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Curva granulométrica dos enrocamentos, de acordo com Neil (1973).

Percentagem	Diâmetro D_{en}
100	$1.50 D_{e50}$
80	$1.25 D_{e50}$
50	$1.00 D_{e50}$
20	$0.60 D_{e50}$

Em alternativa, pode adotar-se o critério de Taylor segundo o qual os blocos de dimensão máxima e mínima deverão pesar, respetivamente, o quádruplo e um quarto dos blocos de diâmetro mediano. Tem-se, então, $D_{e100}/D_{e50} \approx 1.58$ e $D_{e0}/D_{e50} \approx 0.63$.

Na ausência de filtros, a espessura dos tapetes de enrocamento deve ser tal que proporcione a anulação da rutura por sifonagem. Esta solução é, geralmente, impraticável por conduzir a valores muito elevados. Por isso, de acordo com Melville e Coleman (2000), a espessura dos tapetes de enrocamento deve estar compreendida entre D_{e50} e $3D_{e50}$, adotando-se, geralmente, $2D_{e50}$. Para fazer face à rutura por sifonagem, é então inevitável proceder à colocação de filtros inferiormente aos tapetes. Estes filtros podem ser geotécnicos ou sintéticos (ver capítulo 5). Os filtros sintéticos, de geotêxtil, não devem ser utilizados em

rios com fundo de seixo devido à natureza abrasiva do meio. Os filtros geotécnicos ou granulares, devidamente dimensionados e construídos, podem, por sua vez, ser adotados em qualquer situação, incluindo em rios com fundo de seixo.

Os tapetes de enrocamento podem ser colocados com e sem escavação prévia do fundo. Independentemente da solução, para evitar a rutura de bordo, Parker *et al.* (1998) sugerem a planta tipo dos tapetes de enrocamento (que se apresenta na Figura 2) para um pilar retangular. Na figura, β é o ângulo de enviesamento do escoamento relativamente à direção do eixo longitudinal da secção do pilar, B_1 e C_1 definem a extensão do tapete de enrocamento, B_2 e C_2 a extensão de um eventual filtro sintético e D e L são a menor e a maior dimensão do pilar, respetivamente. Os valores de B_1 , B_2 , C_1 e C_2 encontram-se especificados no Quadro 2 em função da menor dimensão D do pilar, com e sem escavação prévia do fundo. De referir que, na prática, se considera $\cos\beta = 1$ para $\beta < 15^\circ$.

Quadro 2 - Dimensões de um tapete de enrocamento em torno de um pilar retangular e do correspondente filtro de geotêxtil.

Solução	B_1	B_2	C_1	C_2
com escavação	$4D/\cos\beta$	$3D/\cos\beta$	$1.5D/\cos\beta$	$D/\cos\beta$
sem escavação	$5D/\cos\beta$	$3D/\cos\beta$	$1.5D/\cos\beta$	$D/\cos\beta$

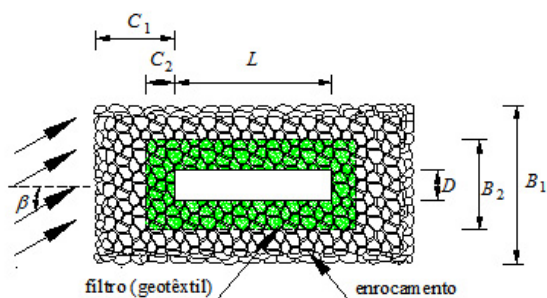


Figura 2 - Planta tipo de um tapete de enrocamento sobre filtro de geotêxtil (adaptado de Parker *et al.*, 1998).

Na Figura 3 representa-se esquematicamente um tapete de enrocamento colocado com escavação

[cf. Parker *et al.*, 1998]. Geralmente, a profundidade mínima da escavação, coincidente com a espessura do tapete de enrocamento, é, neste caso, $d \approx 2D_{e50}$. Porém, se forem expectáveis, na secção transversal do escoamento correspondente à dos pilares, cavidades de erosão devidas à contração da secção do escoamento ou à proximidade de uma curva do curso de água, a profundidade de escavação e a espessura do tapete não devem ser inferiores à profundidade máxima esperada para essas cavidades.

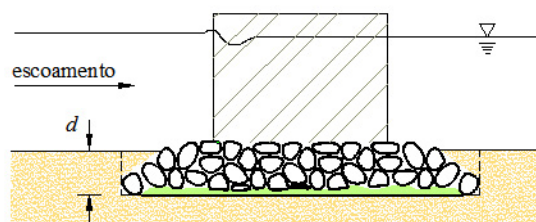


Figura 3 - Corte tipo de um tapete de enrocamento em escavação e sobre filtro de geotêxtil.

Na Figura 4 representa-se um tapete de enrocamento colocado sem escavação, sobre o fundo do rio [cf. Parker *et al.*, 1998]. Neste caso, a espessura do tapete de enrocamento obedece à condição $d \approx 3D_{e50}$. Cabe aqui referir que esta solução implica o alisamento prévio do fundo, preenchendo cavidades com cascalho ou enrocamento fino; não pode ser aplicada quando forem previsíveis erosões localizadas decorrentes, diretamente, da existência de curvas ou da ocorrência da contração da secção do escoamento. Também se exclui esta solução sempre que a espessura mínima do tapete de enrocamento seja superior a 25% da altura do escoamento para o caudal de projeto.

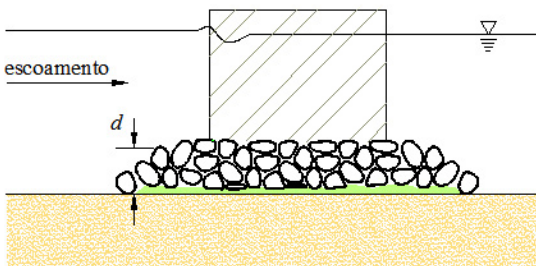


Figura 4 - Corte tipo de um tapete de enrocamento sem escavação e sobre filtro de geotêxtil.

Na Figura 5 representa-se, finalmente, um tapete de enrocamento colocado em escavação (cf. Lauchlan, 1999) para fazer face à rutura devida à migração de configurações do fundo, que podem ocorrer quando há transporte sólido generalizado. Na figura, Y_r representa a profundidade de colocação do tapete abaixo do nível do leito, dada pela equação

$$\frac{D_{e50}}{h} = 0.3S_f \left(1 - \frac{Y_r}{h}\right)^{2.75} F_r^{1.2} \quad (5)$$

sendo de realçar o facto de Y_r depender da solução adotada para D_{e50} . Na Equação (5), S_f é um fator de segurança, cujo valor mínimo é 1.1.

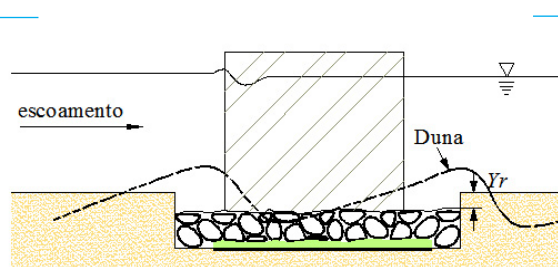


Figura 5 - Corte tipo de um tapete de enrocamento em escavação e sobre filtro de geotêxtil.

Saliente-se que, em todos os casos, entre filtros de geotêxtil e os blocos de enrocamento deve ser colocada uma camada de brita, com uma espessura, $e \approx 0.10$ m, que evite a rutura do geotêxtil por punção, durante a colocação dos tapetes.

3.2. Tapetes de colchões Reno

Uma alternativa frequente aos tapetes de enrocamento são os tapetes de colchões Reno. Os colchões Reno são elementos construtivos constituídos por cestos metálicos paralelepípedicos preenchidos com blocos de pedra, geralmente, solta; a dimensão vertical destes cestos é claramente inferior às restantes. Estes colchões só são aplicáveis no caso de rios com fundo constituído por material fino, até granulometrias típicas da areia, uma vez que, para granulometrias superiores, o efeito da abrasão é potencialmente elevado e facilmente provocaria a destruição dos cestos metálicos. Pela mesma razão, também não são aplicáveis quando o curso de água transporta grandes quantidades de material sólido por arrastamento, independentemente da respetiva granulometria.

Convém ainda ter presente que, apesar de esta se ter transformado numa solução bastante corrente, não existe experiência suficiente quanto à sua durabilidade (cf. Maynord, 1995). Ou seja, esta solução tem associado um risco de insucesso superior ao dos tapetes de enrocamento.

O dimensionamento dos colchões Reno implica a definição do volume e altura dos colchões, da dimensão dos blocos colocados no respetivo interior e da configuração e colocação dos tapetes. Estes aspetos foram tratados, pela primeira vez, por Simons *et al.* (1984).

O diâmetro dos blocos é geralmente determinado em função da velocidade média do escoamento de aproximação, por aplicação de fórmulas ou tabelas dos fornecedores, de modo a fazer face à rutura por atrito. Como a tensão de arrastamento no fundo aumenta na proximidade dos pilares, a velocidade de cálculo deve ser cerca de duas a três vezes superior à velocidade média do escoamento de aproximação. Estabelecida a velocidade de cálculo, sugere-se, por exemplo, a utilização das tabelas propostas por Agostini *et al.* (1988) para dimensionar os tapetes. No Quadro 3 apresentam-se as espessuras tipo e as dimensões dos blocos de enchimento dos colchões Reno propostas por estes autores. No caso de os blocos serem impregnados com betuminoso para fazerem face a velocidades mais elevadas, o dimensionamento dos tapetes pode ser feito com base no Quadro 4. Recomenda-se, ainda, que a menor dimensão dos blocos seja 25% superior à abertura da rede dos cestos e que a maior não exceda 2/3 da altura dos colchões.

Para fazer face à rutura de bordo, a cobertura dos tapetes de colchões Reno em torno dos pilares deve ser tal que a distância mínima da respetiva extremidade a qualquer face do pilar seja $2D/\cos\beta$ (Parker *et al.*, 1998). Por isso, a menor dimensão dos tapetes é $5D/\cos\beta$. Considera-se, como anteriormente, $\cos\beta = 1$ para $\beta < 15^\circ$.

Normalmente, para mitigar a rutura por sifonagem, os tapetes de colchões Reno são aplicados sobre filtros sintéticos (ver capítulo 5) sem se proceder à escavação prévia do fundo, o que implica que não ocorram grandes configurações de fundo no escoamento de aproximação. Tal como no caso de enrocamentos sem escavação do fundo, esta solução requer o alisamento do fundo, preenchendo cavidades com cascalho ou enrocamento fino. Por vezes, o filtro é fixado no fundo dos colchões antes do respetivo enchimento com blocos.

A altura dos colchões deve ser tão pequena quanto possível, de forma a minimizar a obstrução ao escoamento, mas nunca inferior a 0.15 m.

Quadro 3 - Características dos colchões Reno (Agostini *et al.*, 1998).

Espessura (m)	Blocos		Velocidade crítica (ms ⁻¹)	Velocidade máxima (ms ⁻¹)
	Gama (mm)	D_{50} (m)		
0.15 – 0.17	70 - 100	0.085	3.5	4.2
	70 - 150	0.110	4.2	4.5
0.23 – 0.25	70 - 100	0.085	3.6	5.5
	70 - 150	0.120	4.5	6.1
0.30	70 - 120	0.100	4.2	5.5
	100 - 150	0.125	5.0	6.4

Quadro 4 - Características dos colchões Reno com blocos impregnados com betuminoso (Agostini *et al.*, 1998).

Espessura (m)	Gama dos Blocos (mm)	Betume (kgm ⁻²)	Velocidade (ms ⁻¹)
0.15 – 0.17	70 - 90	80 - 120	5.5
0.23 – 0.25	70 - 120	120 - 160	6.3
0.30	100 - 150	160 - 200	7.0

No caso de, excepcionalmente, os colchões Reno serem utilizados, em escavação, em escoamentos com movimento generalizado do fundo do rio, a profundidade de escavação é dada, como para tapetes de enrocamento, pela Equação (5), o que lhes permite fazer face à rutura por migração de configurações do fundo.

3.3. Tapetes de lajetas artificiais ligadas por cabos

Os tapetes de lajetas artificiais ligadas por cabos constituem-se como soluções contínuas de proteção com a extensão que se pretenda. Esta solução tem vindo a afirmar-se no continente americano, com destaque para a América do Sul. Geralmente, as lajetas são de betão; os cabos de ligação dos blocos devem ser, por um lado, suficientemente flexíveis para permitirem a deformação dos tapetes e, por outro, suficientemente resistentes à abrasão. Os cabos de aço inoxidável cumprem este desiderato mas as cordas de nylon podem ser uma boa alternativa desde que resistentes à ação de raios ultravioleta. Estes tapetes são bastante flexíveis e, nessa medida, suportam facilmente eventuais deformações do fundo aluvionar. Aplicam-se no caso de fundos em material relativamente fino, não sendo apropriados

para proteger pilares em fundos de material grosseiro (seixo ou granulometria superior). Também não são recomendados para fazer face a erosões localizadas em torno de pilares de forma complexa.

A solução de blocos artificiais ligados por cabos foi estudada por McCorquodale *et al.* (1993), Bertoldi e Jones (1994) e Jones *et al.* (1995), tendo em vista mitigar, simultaneamente, a ruptura por atrito e a rutura de bordo. As duas variáveis que importa considerar no dimensionamento dos tapetes de blocos artificiais são o respetivo peso por unidade de área e a altura. De acordo com Parker *et al.* (1998), o peso por unidade de área (em Nm⁻²), G , é dado por

$$G = 0.20 \frac{\rho_{ba}}{(s_{ba} - 1)} U^2 \quad (6)$$

em que ρ_{ba} é a massa volúmica do material dos blocos e s_{ba} é a correspondente densidade.

A altura dos blocos, H_{ba} , expressa em m, depende do peso por unidade de área e do índice de vazios, i_v . É dada por

$$H_{ba} = \frac{G}{\rho_{ba}(1 - i_v)} \quad (7)$$

Recomenda-se que o espaçamento entre blocos e, nessa medida, o índice de vazios sejam tais que garantam adequada flexibilidade dos tapetes. Na Figura 6 representa-se a planta tipo de um tapete de blocos artificiais ligados por cabos, adaptada de Parker *et al.* (1998). Como se pode constatar, o tapete tipo tem uma largura de $4D/\cos\beta$ e um comprimento tipo de $[L + 3D/\cos\beta]$, em que L e D têm o significado apresentado na Figura 2. Por sua vez, o filtro de geotêxtil a instalar para fazer face à rutura por sifonagem tem a largura de $3D/\cos\beta$ e o comprimento de $[L + 2D/\cos\beta]$. Como nos casos anteriores, considera-se $\cos\beta = 1$ para $\beta < 15^\circ$.

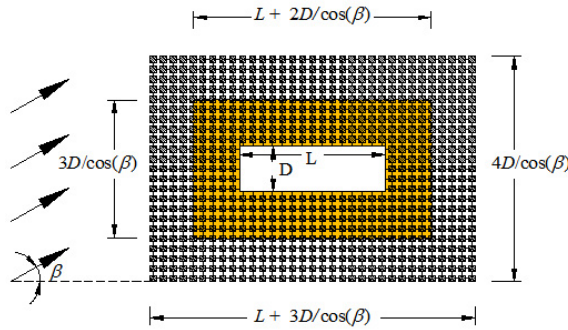


Figura 6 - Tapetes de blocos artificiais ligados por cabos (adaptado de Parker *et al.*, 1998).

Normalmente, a instalação de tapetes de blocos artificiais ligados por cabos não implica a escavação do fundo, *i.e.*, os tapetes são colocados diretamente sobre o filtro de geotêxtil e este sobre o fundo, devidamente alisado por preenchimento de eventuais cavidades preexistentes. Porém, quando $H_{ba} > 0.25h$, deve-se proceder à escavação do fundo de modo a que a espessura saliente do tapete não exceda $0.25h$.

3.4. Tapetes de blocos artificiais soltos

Em termos gerais, estes tapetes podem ser entendidos como tapetes de enrocamento "artificial". Apresentam-se como alternativa aos tapetes de enrocamento natural, quando são economicamente mais vantajosos. Os blocos artificiais são geralmente construídos em betão armado, mas podem também ser totalmente metálicos ou feitos com materiais compósitos. Existem diversas formas e tamanhos, nomeadamente tetrápodes, dolos, tetraedros e toscanos (ver Figura 7). Todos são concebidos de forma a maximizar o imbricamento entre eles, a reduzir o

volume de material utilizado e a garantir o máximo de estabilidade.

Os blocos artificiais têm sido pouco utilizados. Como são fabricados com dimensões padrão, uniformes, são sempre aplicados sobre filtros (ver capítulo 5), como forma de mitigar a ruptura por sifonagem.

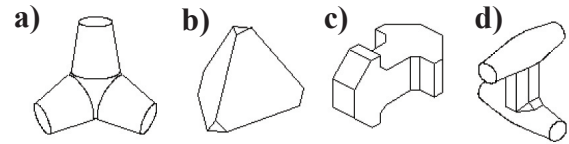


Figura 7 - a) Tetrápodes; b) Tetraedros; c) Toscano; d) Dolos.

Tendo em vista fazer face à rutura por atrito, Fotherby e Ruff (1995) sugeriram a seguinte equação de dimensionamento de toscanos de betão:

$$\frac{D_{eq}}{h} = \frac{0.255F_r}{(s_{ba} - 1)} \left(\frac{D_p}{h} \right)^{0.5} \quad (8)$$

em que D_{eq} é o diâmetro equivalente de cada unidade, definido como o diâmetro de uma esfera de betão com o mesmo peso, D_p é a largura projetada do pilar, F_r é o número de Froude do escoamento calculado com a velocidade média do escoamento de aproximação corrigida:

$$U^* = 1.5C_1 K_f C_h U \quad (9)$$

onde C_1 e C_h são coeficientes que atendem, respetivamente, à influência da localização do pilar e à influência do nível do topo da camada dos toscanos, relativamente ao fundo. Os valores destes coeficientes e, de igual modo, os coeficientes de forma mais usuais, encontram-se reunidos no Quadro 5.

Aqueles autores recomendaram ainda que a espessura dos tapetes seja $d = 2D_{eq}$. Por sua vez, a planta seria definida por uma extensão lateral igual a $1.5D_p$, medida em todas as direções a partir das faces do pilar. Sugere-se, porém, que tanto as dimensões dos tapetes como as dos filtros respeitem as recomendações de Parker *et al.* (1998) para tapetes de enrocamento natural. Estes tapetes podem igualmente ser tratados como tapete de enrocamento para efeitos da mitigação da rutura por migração das configurações do fundo.

Quadro 5 - Valores dos coeficientes C_1 , K_f e C_h .

		C_1	K_f	C_h
Posição do pilar	Junto a margens de canais prismáticos retilíneos	0.9		
	Junto de curvas	1.2		
Forma do pilar	Circular		1.0	
	Retangular		1.1	
Colocação do tapete	Assente em escavação			1.0
	Assente no fundo original			1.1

Não se conhecendo estudos sobre as dimensões dos tetrápodes e dos dolos, pode admitir-se que são semelhantes às dos toscanos uma vez que garantem, igualmente, bons graus de imbricamento.

3.5. Ensacados de argamassa

Os tapetes de ensacados de argamassa são, como o nome indica, constituídos por blocos soltos de argamassa moldados em sacos. Geralmente, os sacos são de sisal ou de materiais plásticos. Esta forma de obter os blocos, sendo económica, tem o inconveniente de os tornar pouco angulosos. Por isso, os tapetes de ensacados de argamassa são menos estáveis do que os descritos anteriormente. Trata-se, assim, de uma solução de que só se deve tirar partido se existirem dificuldades em obter enrocamentos ou se for inviável, legalmente ou por razões construtivas, recorrer a alternativas.

Independentemente dos considerandos anteriores, os ensacados de argamassa só devem ser utilizados sobre fundos de material relativamente fino. Deste modo, os blocos tendem a ficar totalmente apoiados no fundo e minimiza-se a probabilidade de se partirem. Para que não se partam facilmente, também não convém que sejam muito mais longos do que espessos.

As principais fontes bibliográficas relativas a esta solução são Fotherby (1992), Bertoldi *et al.* (1994) e Jones *et al.* (1995). Para o cálculo do diâmetro dos blocos, podem utilizar-se relações semelhantes às utilizadas para o cálculo de enrocamentos, tendo em consideração que geralmente a argamassa é menos densa do que a rocha. Considera-se ainda aconselhável aumentar o diâmetro em cerca de 20% para aumentar a estabilidade dos tapetes (cf. Parker *et al.*, 1998).

O corte e a planta típica dos tapetes construídos com ensacados de argamassa são semelhantes aos dos tapetes de enrocamento com escavação prévia do fundo, assentes sobre filtro. A diferença está na extensão em planta: neste caso (ver Figura 2),

$B_f = 5D/\cos\beta$ e $C_f = 2D/\cos\beta$. Além disso, o filtro passa a cobrir uma área igual à do tapete, ao contrário do que acontece nas soluções descritas anteriormente.

4. PROTEÇÃO DE ENCONTROS

4.1. Introdução

A solução mais usual de proteção contra erosões localizadas junto de encontros de pontes e respetivos aterros de acesso consiste na colocação de tapetes de enrocamento. Nos Estados Unidos da América e na América do Sul, designadamente na Argentina, estão em curso trabalhos de investigação com vista à utilização de tapetes de lajetas artificiais ligadas por cabos, à imagem do que já se pratica para a proteção de pilares. Apesar destes esforços, o conhecimento e a experiência acumulados são limitados, pelo que, a seguir, só se procede à especificação de soluções que utilizam blocos de enrocamento.

Nos últimos anos, realizaram-se, em Portugal, vários estudos sobre a utilização de tapetes de enrocamento para protecção de encontros de pontes e respetivos aterros. Antes de se apresentarem os principais resultados dos estudos, é importante ter presente que os encontros podem ser aparentes com muros verticais, aparentes com muros ala ou perdidos (ver Figura 8).

Os blocos de enrocamento podem ser colocados junto à base dos encontros formando tapetes de pé ou sobre as espaldas dos aterros de acesso, no caso de encontros aparentes com muros ala e de encontros perdidos (ver Figura 9). Nos tapetes de pé, os blocos devem fazer face aos cinco primeiros mecanismos de rutura identificados no capítulo 2. Nas espaldas de aterros geotecnicalemente estáveis, os blocos devem fazer face à rutura por erosão.

Neste artigo, resumem-se, entre outros, os resultados de Fael (2007), Melville *et al.* (2007), Cardoso e Fael

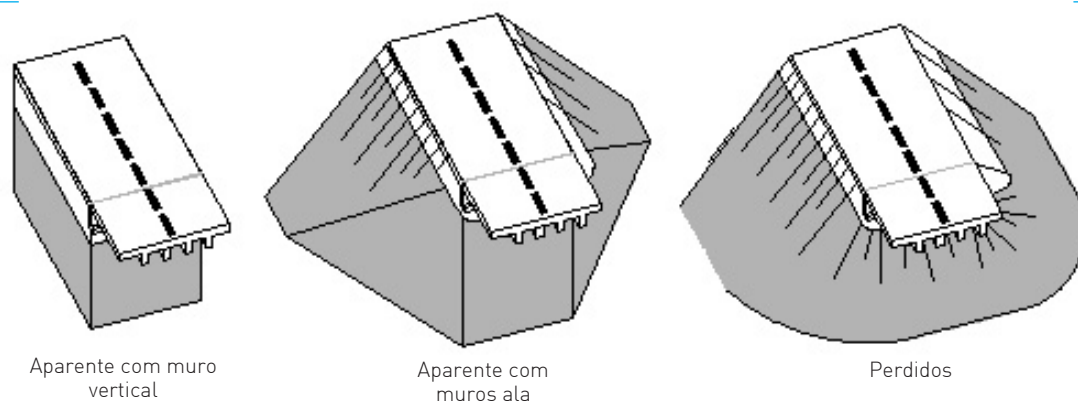


Figura 8 – Tipos de encontros.

[2009] e Cardoso *et al.* (2010 a,b). Cabe aqui referir que, nestes estudos, se partiu do pressuposto que os mecanismos de rutura associados à erosão generalizada do fundo e à migração de configurações do fundo não se manifestam. Esta hipótese é fortemente plausível uma vez que, na prática, os encontros de pontes raramente são instalados no leito principal dos rios e, nos leitos de cheia, os referidos mecanismos não são comuns. Parte-se ainda do pressuposto que a rutura por deslizamento translacional ou rotacional dos aterros de acesso, em que os blocos se movem em conjunto, não estará presente se o respetivo corpo estiver devidamente dimensionado, no respeito pela estabilidade geotécnica.

Em face do exposto, caracterizam-se seguidamente a dimensão dos blocos dos tapetes de pé e das espaldas dos aterros de acesso aos encontros, a espessura desses tapetes e a configuração dos tapetes de pé, em planta. Saliente-se que os estudos aqui sintetizados são válidos para $h/D_{e50} < 22$, $L/h < 7.8$ e $F_r < 0.57$ e que se consideram desprezáveis os efeitos da contração da secção do escoamento. Neste contexto, L é o comprimento do encontro.

4.2. Diâmetro mediano dos blocos

Para encontros aparentes com muros ala, Melville *et al.* (2007) concluíram que as equações propostas

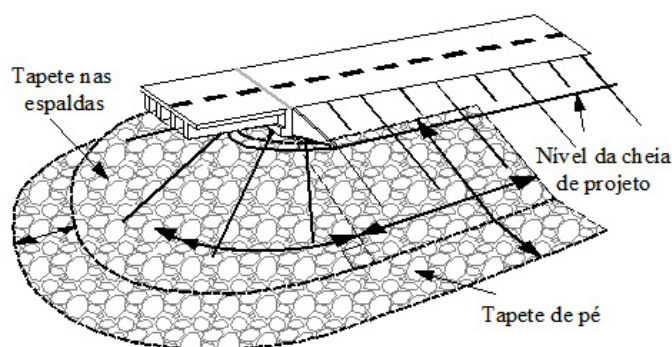


Figura 9 – Tapetes de enrocamentos em encontros perdidos (Melville e Comenan, 2000).

por Lagasse *et al.* [2001], designadamente

$$\frac{D_{e50}}{h_{sc}} = \frac{1.02}{(s-1)} F_{rsc}^2 \quad \text{para } F_{rsc} < 0.8 \quad (10)$$

e

$$\frac{D_{e50}}{h_{sc}} = \frac{0.69}{(s-1)} F_{rsc}^{0.28} \quad \text{para } F_{rsc} \geq 0.8 \quad (11)$$

se podem aplicar ao dimensionamento dos blocos dos tapetes de pé. Na Equação (11) h_{sc} é a altura do escoamento na secção contraída, $F_{rsc} = U_{sc} / \sqrt{gh_{sc}}$ é o número de Froude do escoamento na mesma secção e U_{sc} é a correspondente velocidade média do escoamento.

Cardoso e Fael [2009] concluíram que é possível prever o diâmetro mediano dos blocos de tapetes de pé de encontros aparentes com muros verticais com base nas variáveis características do escoamento de aproximação, situação em que o comprimento relativo do encontro, L/h , desempenha um papel importante. Segundo estes autores a condição crítica de ruptura por atrito dos blocos de tapetes de pé é dada, neste caso, por

$$I_s = 1 - a \left(\frac{L}{h} \right)^b \quad (12)$$

em que $I_s = U_s / U_c$ é a intensidade de escoamento crítica, a e b são constantes experimentais ($a = 0.40$, $b = 0.25$), U_s é a velocidade média do escoamento de aproximação acima da qual ocorre rutura por atrito dos blocos situados junto ao encontro e U_c é a velocidade crítica de arrastamento dos blocos num escoamento uniforme em canal retangular muito largo. Para um dado valor de L/h , é possível calcular I_s e resolver o problema inverso: conhecendo a velocidade do escoamento de aproximação, U_s , pode-se calcular o valor de U_c e, conhecendo U_c , pode-se determinar o correspondente valor de D_{e50} . No cálculo de D_{e50} podem-se utilizar vários métodos disponíveis na literatura, incluindo, a título de exemplo, a equação de Neil [1967]:

$$\frac{U_c^2}{(s-1)gD_{e50}} = 2.5 \left(\frac{h}{D_{e50}} \right)^{0.2} \quad (13)$$

Para encontros perdidos, Cardoso *et al.* [2010 a] concluíram que a equação de previsão de Pagán-Ortiz [1991],

$$\frac{D_{e50}}{h_{sc}} = \frac{C}{(s-1)} F_{rsc}^2 \quad (14)$$

com $C = 0.535$ – como sugerido originalmente pelo autor – conduz a valores apropriados do diâmetro mediano dos blocos de enrocamento dos tapetes de pé, quando o declive das espaldas, V:H, é igual a 1:2 ou a 2:3. Nos termos da Figura 10, a Equação (14) constitui a envolvente às observações.

Cardoso *et al.* [2010 a] determinaram ainda os valores de a e b da Equação (12) para encontros perdidos. No Quadro 6 reúnem-se os coeficientes a e b da mesma equação para as duas inclinações de espaldas. No mesmo quadro também se incluem os valores de a e b sugeridos por Cardoso e Fael [2009] para encontros aparentes com muro vertical.

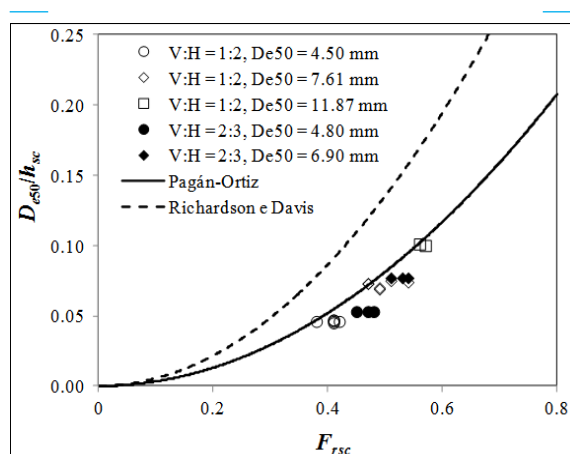


Figura 10 – Variação de D_{e50}/h_{sc} com o número de Froude na secção contraída, F_{rsc} .

Quadro 6 – Valores de a e b da Equação (12) para diferentes tipos de encontros.

Tipo de encontro	a (–)	b (–)
Aparente com muros verticais	0.400	0.250
Perdido, espaldas a V:H = 2:3	0.355	0.275
Perdido, espaldas a V:H = 1:2	0.300	0.300

Para efeitos de proteção de espaldas dos aterros de acesso a encontros perdidos, Cardoso *et al.* (2010 a) concluíram que a Equação (14) também constitui uma curva envolvente à rutura incipiente desde que se considere $C = 0.720$. O facto de $C = 0.720 > 0.535$ reflete a maior propensão para a rutura por erosão nas espaldas, comparativamente com o que acontece no tapete de pé (onde se pode considerar $C = 0.535$, de acordo com Pagán-Ortiz (1991)). Em termos práticos, isto significa que é seguro utilizar blocos iguais nas espaldas dos aterros e nos tapetes de pé se, no respetivo dimensionamento, se recorrer à equação de Pagán-Ortiz (1991) com $C = 0.720$.

De acordo com Cardoso *et al.* (2010 a), a rutura por erosão nas espaldas dos aterros de encontros perdidos também pode ser mitigada com tapetes de enrocamento cujos blocos verifiquem a seguinte generalização da Equação (12):

$$I_s = I_{s0} - a \left(\frac{L}{h} \right)^b \quad (15)$$

onde I_{s0} é um parâmetro que depende da inclinação das espaldas. Os valores de I_{s0} , a e b são os que constam no Quadro 7. A Figura 11 ilustra os resultados que estão na base da Equação (15).

Quadro 7 – Valores de a , b e I_{s0} da Equação (15) para diferentes inclinações das espaldas dos aterros de encontros perdidos.

Inclinação	a (–)	b (–)	I_{s0} (–)
Perdido, espaldas a V:H = 2:3	0.19	0.45	0.78
Perdido, espaldas a V:H = 1:2	0.25	0.35	0.89

4.3. Espessura dos tapetes de enrocamento

De acordo com Melville e Coleman (2000), a espessura dos tapetes de enrocamento de proteção de encontros, quer sejam tapetes de pé ou de proteção das espaldas dos aterros, deve estar compreendido entre $2D_{e50}$ e $3D_{e50}$. Em todos os casos, os tapetes devem ser colocados sobre filtro porque, de outro modo, a espessura dos tapetes necessária para garantir a ausência de rutura por sifonagem seria inportavelmente elevada, como constatou Fael (2007). De facto, de acordo com esta autora, na ausência de filtro e independentemente da espessura dos tapetes de enrocamento, é praticamente impossível garantir a completa ausência

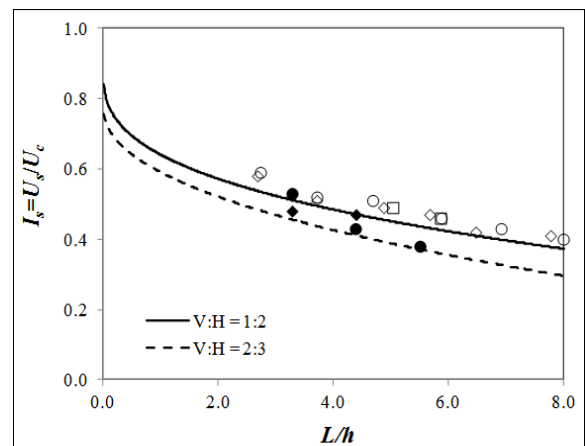


Figura 11 – Variação de I_s com L/h para dimensionamento de enrocamento de espaldas.

de cavidades de erosão por ação de sifonagem (ver Figura 12). Para espessuras do tapete enrocamento superiores a $6D_{e50}$ a profundidade da cavidade de erosão será reduzida ($\approx 10\% h$) e praticamente independente do comprimento do encontro, L , mas não se anula. Na figura, h_{se} é a profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão gerada por infraescavação do tapete, h é a profundidade média do escoamento de aproximação e N é o número de camadas de enrocamento.

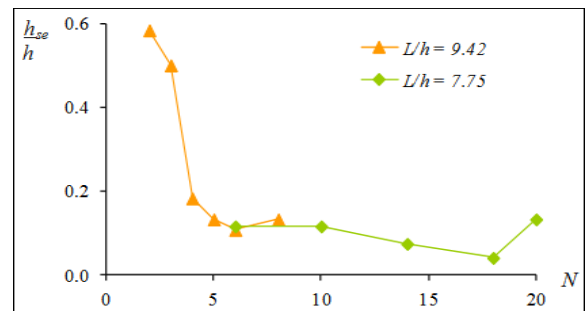


Figura 12 – Variação de h_{se}/h com N .

4.4. Configuração dos tapetes em planta

Na sequência dos estudos de Pagán-Ortiz (1991) e de Atayee *et al.* (1993), Richardson e Davis (1995) sugeriram que, para encontros aparentes com paredes verticais localizados em leito de cheia, os tapetes devem ter uma largura igual a duas vezes a profundidade do escoamento de aproximação, de forma a mitigarem a rutura de bordo. Nos termos da Figura 13, a dimensão

principal dos tapetes em planta, w , é dada por $w = 2h$, ignorando, por exemplo, a influência do comprimento relativo do encontro, L/h .

Mais recentemente, Cardoso *et al.* (2010 b) sugeriram a seguinte equação de previsão da largura dos tapetes de pé:

$$\frac{w}{h} = 0.75 \left(\frac{L}{h} \right)^{0.55} \quad [16]$$

Esta equação, representada na Figura 15, é válida para encontros aparentes com muro vertical e para encontros perdidos desde que $L/h \leq 9.0$. Para valores superiores de L/h , pode-se considerar $w/h = 2.5$.

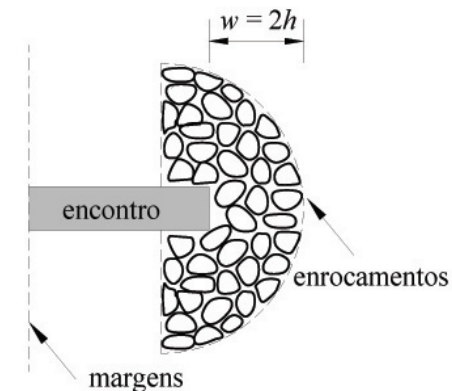


Figura 13 – Planta tipo de tapetes de enrocamento para encontros aparentes com muros verticais, de acordo com Richardson e Davis (1995).

Para encontros perdidos, Melville e Coleman (2000) sugeriram a utilização da solução apresentada na Figura 14. A figura indica que os tapetes se devem estender numa largura $w = H/Vh_{se}$. Neste contexto, h_{se} é a profundidade de equilíbrio da previsível cavidade de erosão num fundo não protegido.

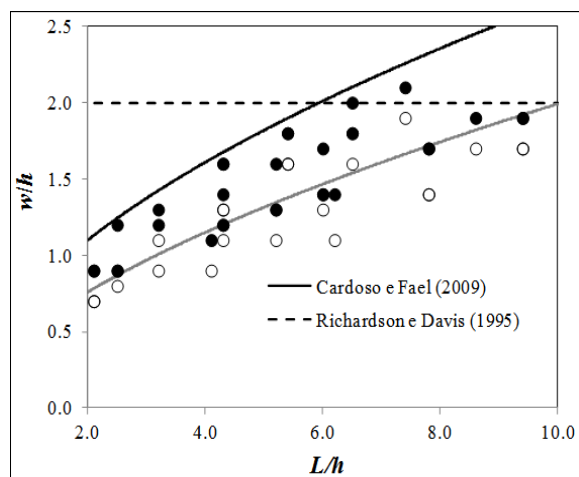


Figura 15 – Variação de w/h em função de L/h .

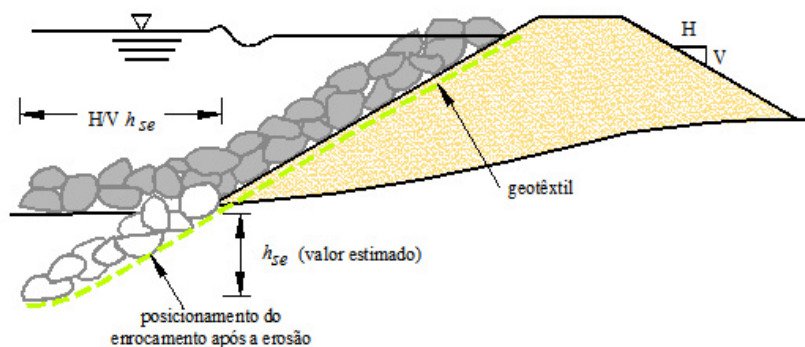


Figura 14 – Tapete de enrocamento colocado sobre filtro de geotêxtil (Melville e Coleman, 2000).

Cardoso *et al.* (2010 b) também salientaram que, embora não tenha sido efetuada a avaliação sistemática das variáveis w_u e w_d , [ver Figura 16], é possível considerar $w_d = 0$ e $w_u = \text{mínimo } \{L_p, 2h\}$ sem risco de rutura de bordo.

4.5. Distância vertical dos tapetes ao fundo

Não são conhecidos estudos sobre a influência da migração das configurações de fundo no comportamento dos tapetes de pé. Como se referiu, quando os encontros são construídos no leito de cheia, não se desenvolvem, em geral, configurações de fundo e, como tal, não existe o risco de rutura por afundamento dos tapetes em consequência da passagem das respetivas cavas.

Quando, excecionalmente, se projetam encontros no leito principal, podem desenvolver-se dunas ou antidunas, impondo-se a necessidade de mitigar a rutura associada à migração das configurações do fundo. Na Nova Zelândia, o "Ministry of Works and Development" (1979) recomenda, para o efeito, a colocação do tapete de pé ao nível da profundidade previsível da cavidade de erosão. Esta solução parece muito conservadora e dispendiosa. Na ausência de orientações mais específicas, entende-se que os tapetes de pé devem afundar-se à cota expectável do leito associada às cavas das configurações de fundo.

5. FILTROS

5.1. Considerações gerais

Ficou claro anteriormente e, em particular, no parágrafo 4.3, que a melhor solução prática para mitigar a rutura

dos vários tipos de tapetes por sifonagem consiste na colocação de filtros inferiormente aos tapetes. Os blocos dos tapetes fixam os filtros que, por sua vez, previnem a ocorrência de erosões localizadas. Os filtros podem ser granulares ou geotécnicos e sintéticos ou de geotêxtil. Apresentam-se a seguir algumas recomendações a respeitar no dimensionamento e instalação dos filtros.

5.2. Filtros de geotêxtil

Se os fundos aluvionares forem constituídos por areia, há vantagens em utilizar filtros de geotêxtil. Estes filtros, que promovem o comportamento de conjunto dos tapetes, aumentando a respetiva estabilidade, devem respeitar as seguintes recomendações:

- Com exceção dos tapetes de ensacados de argamassa, a área coberta pelos filtros deve ser inferior à dos tapetes. A distância ao limite dos tapetes deve ser da ordem de $D/\cos\beta$ para tapetes de enrocamento, de colchões Reno ou de blocos artificiais soltos e da ordem de $0.5D/\cos\beta$ para tapetes de lajetas artificiais ligadas por cabos.
- Devem ser suficientemente permeáveis para que não se instalem subpressões suscetíveis de originar o levantamento dos filtros e dos tapetes, durante as cheias.
- Não devem ser tão abertos que possam ser atravessados por uma percentagem significativa de partículas finas do material do fundo. Em alguns casos, este objetivo só é alcançável colocando um filtro granular inferiormente ao geotêxtil.
- Devem ser suficientemente resistentes para

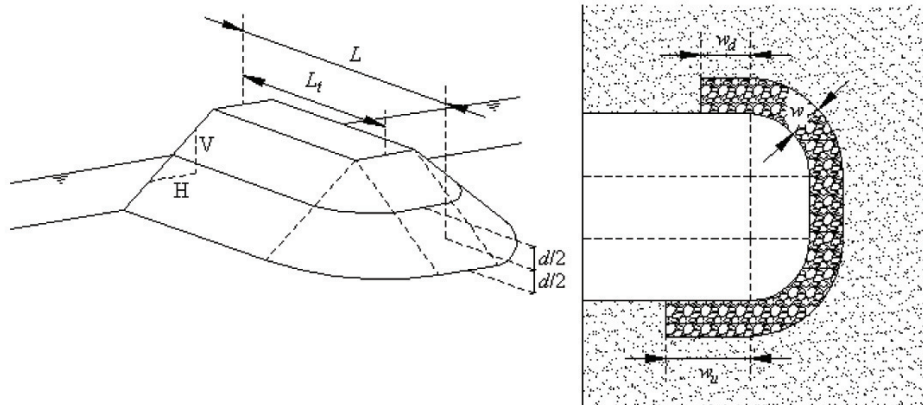


Figura 16 – Perspetiva e planta esquemática de encontros.

poderem ser cosidos ou pregados a pilares sem romperem, uma vez que pequenos orifícios podem dar origem a infraescavações significativas.

- Devem ter durabilidades da ordem de 100 anos nas condições concretas de instalação.
- Devem ser resistentes à ação dos raios ultravioleta.
- Em troços sujeitos a erosão e deposição alternadas e generalizadas, tanto o geotêxtil como o tapete que se lhe sobrepõe, devem ser colocados ao nível mínimo do fundo correspondente à fase de erosão generalizada.

Os filtros de geotêxtil não devem ser utilizados em rios com fundo de seixo devido à natureza abrasiva dos seixos. Instalam-se preferencialmente em período de estiagem e devem ser fornecidos com duas mangas: uma no perímetro interior, a colocar junto ao pilar ou encontros, e outra no perímetro exterior.

A manga exterior deverá conter um cabo ligado a vários ganchos que servem para estender o filtro e prendê-lo ao fundo; pode ser cheia com cascalho com funções de balastro na fase de descida do geotêxtil.

No caso de pilares, na manga interior é colocado um tubo flexível, durável, no interior do qual se manipula um cabo com os mesmos requisitos. O cabo é esticado e agrafado ao perímetro do pilar de forma a eliminar quaisquer aberturas através das quais os sedimentos do fundo possam ser aspirados. Quando este objetivo não é completamente atingido, as zonas das aberturas devem ser preenchidas por filtros granulares.

5.3. Filtros granulares

Os filtros granulares podem ser adotados em situações em que os filtros de geotêxtil não sejam aplicáveis, designadamente em rios com fundo de seixo. Não se dispondo de geotêxtil, podem ainda ser utilizados em fundos de areia. Em caso algum poderão ser utilizados em tapetes de lajetas artificiais ligadas por cabos.

Apesar de recomendados por autores como Neil (1973), estes filtros podem ser difíceis de construir. Além disso, uma vez construídos, podem sofrer deformações e ser total ou parcialmente destruídos em fundos em que ocorra a formação de dunas ou antidunas.

O dimensionamento de filtros granulares deve respeitar as relações de Terzagui:

$$\frac{D_{50}(\text{filtro})}{D_{50}(\text{material do fundo})} < 40 \quad 5 < \frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{50}(\text{material do fundo})} < 40$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{material do fundo})} < 40$$

No caso de os blocos dos tapetes de proteção satisfazerem, eles próprios, as relações anteriores, deixa de ser necessária a colocação de filtros. Quando se aplicam, estes filtros devem cobrir toda a área a proteger com enrocamento, colchões Reno ou ensacados de argamassa.

SIMBOLOGIA

a, b	Coefficientes na equação da intensidade de escoamento crítica
B	Largura da secção transversal do escoamento
B_1, C_1	Extensão do tapete de enrocamento
B_2, C_2	Extensão do filtro de geotêxtil
C	Coefficiente
C_l	Coefficiente que traduz a influência da localização do pilar
C_h	Coefficiente que traduz a influência do nível do topo da camada dos toscanos relativamente ao fundo
K_f	Coefficiente de forma dos pilares
d	Espessura do tapete de enrocamento
D	Menor dimensão do pilar
D_{50}	Diâmetro mediano do material do fundo
D_{e50}	Diâmetro mediano dos blocos de enrocamento
D_{en}	Diâmetro de peneiração dos blocos de enrocamento tal que n% em peso é mais fino
D_{eq}	Diâmetro equivalente de cada unidade artificial
D_n	Diâmetro de peneiração do material do fundo tal que n% em peso é mais fino
e	Espessura da camada de brita
F_r	Número de Froude do escoamento
F_{rsc}	Número de Froude do escoamento na secção contraída
g	Aceleração da gravidade
G	Peso dos blocos artificiais por unidade de área de tapete
h	Profundidade média do escoamento de aproximação para o caudal de projecto
H_{ba}	Altura dos blocos artificiais
h_{sc}	Altura do escoamento na secção contraída
h_{se}	Profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão
I_s	Intensidade de escoamento crítica
I_{s0}	Parâmetro que depende da inclinação das espaldas
i_v	Índice de vazios

L	Comprimento do pilar ou do encontro
N	Número de camadas de enrocamento
s	Densidade dos blocos de enrocamento
s_{ba}	Densidade do material dos blocos artificiais
S_f	Factor de segurança
u_*	Velocidade de atrito junto ao fundo
u_{*c}	Velocidade de atrito junto ao fundo crítica
u_{*ce}	Velocidade de atrito crítica do enrocamento
U	Velocidade média do escoamento de aproximação
U^*	Velocidade média do escoamento de aproximação corrigida
U_c	Velocidade média de início do movimento junto ao pilar
U_s	Velocidade média do escoamento de aproximação acima da qual ocorre rutura por atrito junto ao encontro
U_{sc}	Velocidade média do escoamento na secção contraída
w_i	Principal dimensão característica do tapete
w_u, w_d	Dimensões dos tapetes
Y_r	Profundidade de colocação do tapete abaixo do nível do leito
β	Ângulo de enviesamento do escoamento relativamente à direcção do eixo longitudinal da secção do pilar
ρ_{ba}	Massa volúmica do material dos blocos artificiais

BIBLIOGRAFIA

Agostini, R., Cesario, L., Ferraiolo, F. & Papetti, A. (1988). *Structures flexibles en gabions et matelas Reno pour les tronçons torrentiels et fluviaux*. Officine Maccaferri S.p.A., Bologna, Italie.

Atayee, A.T., Pagán-Ortiz, J.E., Jones, J.S. & Kilgore, R.T. (1993). *A study of riprap as scour protection for spill-through abutments*. Proceedings, ASCE Hydraulic Conf., ASCE, New York.

Bertoldi, D. A., and Jones, J. S. (1994). *An Experimental Study of Scour Protection Alternatives at Bridge Piers*. Turner-Fairbank Laboratory, Federal Highway Administration.

Blodgett, J.C. & McConaughy, C.E. (1985). *Evaluation of rock riprap design practices for protection of channels near highway structures—Phase I*. Preliminary Report subject to revision, prepared by the U.S. Geological Survey in co-operation with Federal Highway

Administration, Washington, U.S. Department of Transportation, U.S.A.

Bonasoundas, M. (1973). *Flow structure and problems at circular bridge piers*. Oscar V. Miller Institute. Munich Technical University, Munich, Germany, Repost 28.

Breusers, H.N.C. & Raudkivi, A.J. (1991). *Scouring, Hydraulics Structures Design Manual*. IAHR A.A. Balkema ed., Rotterdam.

Cardoso, A.H. & Fael, C.M.S. (2009). *Protecting vertical-wall abutments with riprap-mattresses*. Journal Hydraulic Engineering, 135(6), 457–465.

Cardoso, A.H., Simarro, G., Fael, C.M.S., Le Doucen, O. & Schleiss, A. (2010 b). *Toe protection for spill-through and vertical-wall abutments*. Journal of Hydraulic Research, 48(4), 491–498.

Cardoso, A.H., Simarro, G., Le Doucen, O. & Schleiss, A. (2010 a). *Sizing of riprap for spill-through abutments*. Journal ICE Water Management 163 Issue WMI.

Chiew, Y.M. & Lim, F.H. (2000). *Failure behaviour of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions*. Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), pp. 43–55.

Chiew, Y.M. (1995). *Mechanics of riprap failure at bridge piers*. Journal of Hydraulic Engineering, 121(9), pp. 635–643.

Fael, C.M.S. (2007). *Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Fotherby, L.M. & Ruff, J.F. (1995). *Bridge Scour Protection System Using Toskanes - Phase 1*. Pennsylvania Department of Transportation, Report 91–02.

Fotherby, L.M. (1992). *Footings, mats, grout bags and tetrapods: Protection methods against local scour at bridge piers*. M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A.

Jones, J.S., Bertoldi, D. & Stein, S. (1995). *Alternative scour countermeasures*. Proceedings, 1st International Conference on Water Resources. Part 2 (of 2), Vol. 2, American Society of Civil Engineers.

Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D. & Cloper, P.E. (2001). *Bridge scour and stream stability countermeasures*. Hydraulic Engineering Circular 23 (HEC-23). Report FHWA-NH1-01-003. Federal Highway Administration, Washington, DC.

Lauchlan, C.S. & Melville, B.W. (2001). *Riprap protection at bridge piers*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(5), pp. 412–418.

- Lauchlan, C.S. (1999). *Countermeasures for pier scour*. PhD. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Lim, F.H. & Chiew, Y.M. (2001). *Parametric study of riprap failure around bridge piers*. Journal of Hydraulic Research, 39(1), pp. 61–72.
- Maynard, S.T. (1995). *Gabion-matress channel-protection design*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121, pp. 1035–1039.
- McCorquodale, J.A., Moawad, A., & McCorquodale, A.C. (1993). *Cable-tied block erosion protection*. Hydraulic Engineering (1993), American Society of Civil Engineers conference.
- Melville, B., Ballegooy, S., Coleman, S. & Barkdoll, B. (2006). *Countermeasure toe protection at spill-through abutments*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(3), pp. 235–245.
- Melville, B., Ballegooy, S., Coleman, S. & Barkdoll, B. (2007). *Riprap size selection at wing-wall abutments*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133(11), pp. 1265–1269.
- Melville, B.W. & Coleman, E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, LLC.
- Ministry of Works and Development (1979). *Code of practice for the design of bridge waterways*. Civil Division Publication CDP 705/C, Ministry of Works and Development, Wellington, New Zealand, p. 57.
- Neil, C.R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press.
- Pagán-Ortiz, J. (1991). *Stability of rock riprap for protection at the toe abutments located at the floodplain*. Federal Highway Administration. Research Report FHWA-RD-91-057, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Parker, G., Toro-Escobar, C., Voigt, R.L., Melville, B.W., Hadfield, A., Lauchlan, C, Chiew, Y.M., Parola, A.C. & Hagerty, D.J. (1998). *Countermeasures to protect bridge piers from scour*. User's guide, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, USA.
- Parola, A.C. & Jones, S.D. (1991). *Sizing riprap to protect bridge piers from scour*. Transportation Research Record, USA.
- Parola, A.C. (1993). *Stability of Riprap at Bridge Piers*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(10), pp. 1080–1093.
- Quazi, M.E. & Peterson, A.W. (1973). *A method for bridge pier riprap design*, Proceedings of the First Canadian Hydraulics Conference, Edmonton, Canada, pp. 99–106.
- Richardson, E.V. & Davis, S.R. (1995). *Evaluating scour at bridges*. Hydraulic Engineering Circular n° 18 (HEC-18), 3ª edition, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, Report n° FHWA-IP-90-017, p. 204.
- Simons, D.B., Chen, Y.H. & Swenson, L.J. (1984). *Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses*. Report, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A.

