

Escola Politécnica de Pernambuco
Programa de Pós-Graduação em Engenharia

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INSPEÇÃO,
MANUTENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS**

**FUNDAMENTOS DA EROSÃO NAS
FUNDAÇÕES DE PONTES E NOS ATERROS
DE ACESSO**

(2ª Edição revisada e atualizada)

Disciplina: Reforço e Recuperação de Pontes e Viadutos

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitória

**FUNDAMENTOS DA EROSÃO NAS
FUNDAÇÕES DE PONTES E NOS ATERROS
DE ACESSO**

(2ª Edição revisada e atualizada)

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitório

Recife, agosto de 2022

APRESENTAÇÃO DA SEGUNDA EDIÇÃO

Ao completar sete anos da publicação deste trabalho, percebemos a necessidade de uma revisão com a inclusão de alguns tópicos relacionados a conceitos que não faziam parte da publicação original de 2015 e também de ajustes em outros itens que careciam de um melhor detalhamento, considerando a atualidade e importância do tema, tendo em vista que a erosão continua sendo uma das principais causas dos problemas que ocorrem nas pontes em todo o mundo e é responsável pela maioria dos colapsos desses tipos de obras, chegando a 60% dos casos, conforme alguns autores.

A atualidade do tema está evidenciada pelas grandes alterações climáticas e ambientais que estão acontecendo no planeta, com interferência nos regimes dos rios, nos períodos de recorrência e nas intensidades das cheias que estão cada vez mais severas e com maior poder de destruição. Isso requer a necessidade de estudos permanentes sobre os efeitos da erosão nas pontes, que por sinal vem sendo desenvolvidos por pesquisadores em diversos países.

Nesse contexto, o texto original de 2015 foi atualizado com uma análise mais detalhada dos parâmetros hidrológicos, geotécnicos e estruturais relacionados aos efeitos da erosão sobre as pontes típicas da malha rodoviária brasileira. Também é feita uma abordagem sobre a influência do acúmulo de detritos nos pilares das pontes e sobre questões relacionadas à locação de pontes em trechos com alto risco de erosão. Foram incluídos mais alguns tipos de proteção para pilares e fundações e acrescentados alguns casos práticos de danos e colapsos causados pela erosão nos aterros de acesso nas extremidades das pontes, considerados elementos com grande vulnerabilidade à ação das águas, especialmente durante a ocorrência de cheias.

Esta atualização tem o mesmo objetivo da primeira edição, elaborada com base em notas de aula da disciplina Reforço e Recuperação de Pontes e Viadutos, que o autor leciona desde 2005 no Curso de Especialização em Inspeção, Manutenção e Recuperação de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Continua sendo um texto didático básico, que pode ser utilizado pelos engenheiros em geral, especialmente por aqueles que desenvolvem atividades relacionadas às pontes e têm interesse no tema, cuja natureza é essencialmente multidisciplinar, por envolver conhecimentos das áreas de geotecnia, hidrologia e estruturas.

Esperamos que a atualização deste trabalho possa contribuir para a ampliação do conhecimento sobre o tema que, mesmo sendo objeto de estudos acadêmicos e pesquisas em diversas partes do mundo, ainda é bastante carente de literatura técnica especializada no Brasil.

O autor

Recife, agosto de 2022

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	2
1 - FUNDAMENTOS DA EROSÃO NAS PONTES.....	3
1.1 - Conceituação	3
1.2 - Tipos de erosões nas fundações de pontes	3
1.3 - Principais parâmetros que influenciam a erosão nas fundações das pontes	4
1.3.1 - Parâmetros hidrológicos	5
1.3.2 - Parâmetros geotécnicos.....	5
1.3.3 - Parâmetros estruturais	6
1.4 - Locação de pontes com alto risco de erosão	8
1.5 - Profundidade da cavidade de erosão em torno dos pilares.....	10
1.6 - Profundidade da cavidade de erosão em torno dos encontros.....	13
2 - AÇÃO DAS CHEIAS SOBRE AS PONTES	16
2.1 - Providências para minimizar os efeitos das cheias	19
2.2 - Acúmulo de detritos nos pilares.....	20
2.3 - Influência das alterações nos leitos dos rios.....	22
3 - EFEITOS DA EROSÃO NAS FUNDAÇÕES DAS PONTES.....	25
3.1 - Danos em fundações diretas	26
3.2 - Danos em fundações profundas.....	29
3.3 - Casos de colapsos estruturais causados pela erosão e pelas cheias	32
3.4 - Algumas formas de proteção contra a erosão	37
4 - EROSÃO NOS ATERROS DE ACESSO	42
4.1 - Principais problemas relacionados aos aterros de acesso	47
4.2 - Exemplos de danos e colapsos em aterros de acesso	47
4.3 - Algumas soluções para recuperação dos aterros de acesso danificados.....	51
4.4 - Aterros de acesso sobre solo mole.....	54
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

INTRODUÇÃO

Esta publicação tem, além de sua finalidade didática, o objetivo de transmitir em linguagem acessível e de forma prática, os fundamentos do fenômeno da erosão e dos seus efeitos nas fundações e estruturas das pontes e nos aterros de acesso dessas obras.

Portanto, não tem a pretensão ser um tratado sobre tema tão complexo e multidisciplinar, cujo entendimento mais profundo requer muita dedicação e estudos especializados; o texto busca apenas dar uma contribuição à literatura básica de pontes, que nem sempre dá a devida atenção aos problemas causados pelo solapamento das fundações e às falhas estruturais, muitas delas graves, decorrentes do fenômeno da erosão. Tais problemas, além de gerarem grandes prejuízos econômicos e transtornos à população por causa das interrupções de tráfego e das obras de reforço ou de substituição de pontes, também podem provocar o colapso estrutural de toda uma ponte e por em risco a incolumidade dos usuários.

O texto foi dividido em cinco capítulos:

No primeiro capítulo é feita a conceituação de erosão, quais os tipos mais frequentes e os principais efeitos sobre as fundações das pontes. No segundo capítulo é abordado o fenômeno da cheia e o seu impacto sobre as estruturas das pontes, incluindo os efeitos do acúmulo de detritos nos pilares e dos desvios que acontecem nos leitos originais dos rios.

O terceiro capítulo mostra casos de danos localizados nas fundações e colapsos parciais e totais de pontes que tiveram suas estruturas avariadas ou destruídas pela erosão ao longo do tempo, ou durante a ocorrência de grandes precipitações pluviométricas e cheias.

O quarto capítulo aborda os problemas relacionados aos aterros de acesso das pontes, destacando a grande vulnerabilidade à erosão desses elementos de ligação com a rodovia. Essa vulnerabilidade é ainda maior durante as cheias, como comprovam os casos de danos e destruições parciais ou totais desses maciços de terra. Também é abordada de maneira sumária a questão dos aterros de acesso sobre solo mole.

No quinto e último capítulo são feitas as considerações finais, contextualizando os conceitos e os casos expostos no texto com a realidade dos projetos e da conservação das pontes da malha rodoviária brasileira.

Ao final, são relacionadas as referências bibliográficas consultadas para a elaboração do texto, que poderão ser úteis para os leitores que tenham o interesse em aprofundar os conhecimentos sobre o tema.

1 - FUNDAMENTOS DA EROSÃO NAS PONTES

1.1 - Conceituação

A erosão é um fenômeno de grande complexidade e as repercussões de seus efeitos sobre a estrutura de uma ponte podem ser de tal intensidade que em determinadas situações resultam em danos significativos e até no colapso da obra.

Sabe-se que os pilares e encontros localizados nas calhas dos rios constituem obstáculos que modificam os mecanismos de escoamento das águas, aumentando a velocidade, a vorticidade e a turbulência, que geram cavidades (ou fossas) de erosão junto a essas estruturas, podendo causar o solapamento das fundações.

Isso compromete a estabilidade não apenas das fundações, mas de toda a estrutura de uma ponte, em especial das mais antigas e as construídas em trechos de rios cujos leitos sofreram mudanças de perfis nem sempre detectadas a tempo de impedir uma maior magnitude dos danos.

O estudo da erosão nas fundações das pontes é de fundamental importância na fase de projeto e deve envolver a participação de engenheiros geotécnicos, hidrólogos e estruturais, para evitar que no futuro tais obras necessitem de grandes e onerosos reparos ou até possam vir a sofrer colapso estrutural.

1.2 - Tipos de erosões nas fundações de pontes

Nas pontes geralmente acontecem três tipos de erosões, inclusive simultaneamente:

- a) Erosão generalizada no leito do rio a longo prazo, a montante, a jusante ou sob a ponte;
- b) Erosão de contração junto à ponte (idêntica à generalizada, mas que ocorre apenas sob a ponte);
- c) Erosão localizada (fossa de erosão) que se desenvolve em torno dos pilares e encontros.

A figura 1.1 mostra os tipos de erosões que se desenvolvem junto a uma ponte. Na figura 1.2 são destacadas as diferentes movimentações do escoamento (vórtices) em torno de um pilar de ponte.

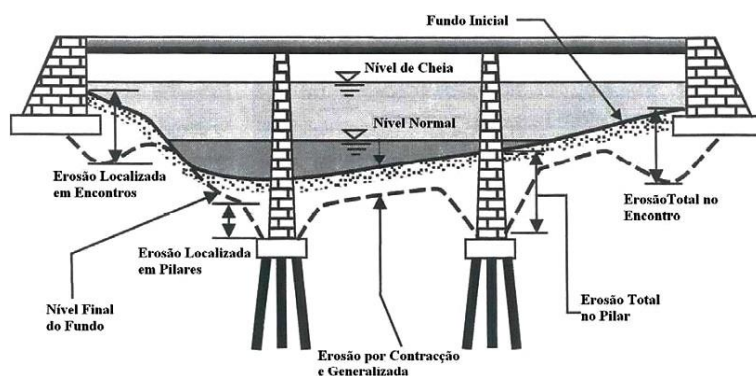


Figura 1.1 - Tipos de erosões que ocorrem em uma ponte. (Fonte: CARDOSO, 2008)

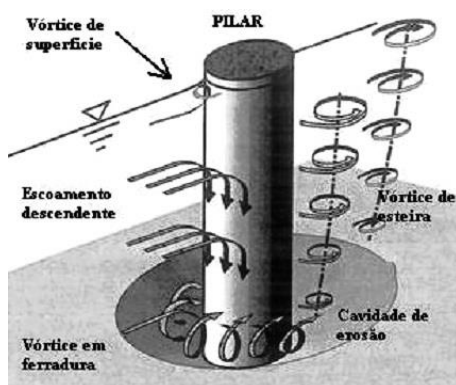


Figura 1.2 - Vórtices efetuados pela correnteza em torno dos pilares de uma ponte. (Fonte: CARDOSO, 2008)

1.3 - Principais parâmetros que influenciam a erosão nas fundações das pontes

De modo geral, as fundações de uma ponte rodoviária típica podem ser diretas (sapatas) ou profundas (estacas ou tubulões). Considerando que tais componentes estruturais são vitais para a garantia da estabilidade da obra e que são executados em cotas abaixo dos leitos dos rios, não podem deixar de merecer uma especial atenção nas etapas de projeto e construção para não correrem o risco de ficarem expostas e sofrerem deslocamentos e solapamentos pela erosão, pois esse fenômeno sempre ocorre, em maior ou menor intensidade, dependendo das características hidrológicas e geotécnicas do leito do rio e também da tipologia estrutural da ponte.

No caso da erosão localizada a sua profundidade é influenciada por parâmetros hidrológicos, geotécnicos e estruturais que devem ser considerados nas etapas de projeto, construção e manutenção das pontes por meio de estudos multidisciplinares realizados por profissionais especializados nessas três áreas.

A figura 1.3 ilustra os efeitos da erosão localizada nas fundações de uma ponte em fundações diretas (sapatas isoladas) e em fundações profundas (estacas).

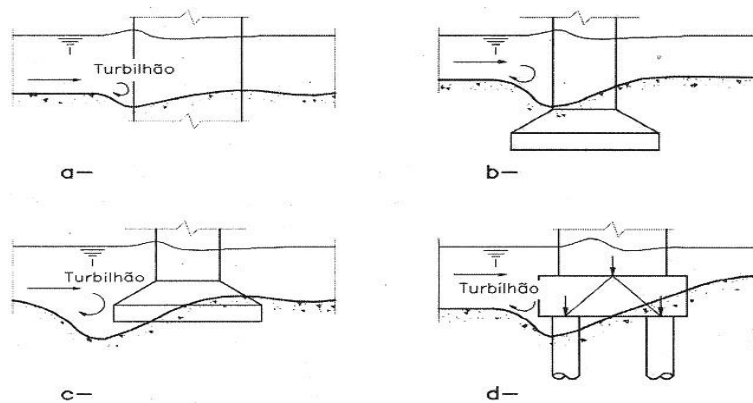


Figura 1.3 - Efeitos da erosão localizada nas fundações de uma ponte. (Fonte: GUSMÃO FILHO, 2003).

A seguir são relacionados os principais parâmetros hidrológicos, geotécnicos e estruturais considerados no fenômeno da erosão.

1.3.1 - Parâmetros hidrológicos

Os parâmetros hidrológicos estão diretamente relacionados às características dos cursos d'água onde a ponte está implantada, como os tipos de rios e os respectivos comportamentos: se confinado, de baixa velocidade, de meandros, de estuário de maré, entre outros. Esse conhecimento é muito importante para a correta análise das condições hidráulicas e hidrológicas, que irão exercer um papel determinante na avaliação da ação da erosão sobre a ponte e do desempenho estrutural mais adequado para combater o fenômeno.

Os principais parâmetros hidrológicos são:

Velocidade, direção e altura da correnteza;

Seção de vazão sob a ponte;

Quantidade e espaçamento entre os pilares dentro da calha do rio;

Ângulo entre a correnteza e os pilares da ponte (ângulo de ataque);

Localização da ponte (se em curva ou com comprimento insuficiente);

Cotas de máximas enchentes (obtidas por estudos hidrológicos e preferencialmente também confirmadas por informações no local onde a obra será construída).

1.3.2 - Parâmetros geotécnicos

Geralmente os solos dos leitos dos rios onde as pontes são implantadas são depositados pela água e conhecidos como solos sedimentares, saturados, e quando arenosos são bastante vulneráveis à erosão, principalmente para águas em movimento, como é o caso da correnteza de um rio.

Entre os fatores geotécnicos destaca-se o potencial de erosão de um solo, que é um parâmetro fundamental e deve ser determinado por meio de ensaios utilizando as propriedades geotécnicas.

A capacidade de carga do solo, as tensões admissíveis e os recalques também são fatores fundamentais na análise da erosão e também devem ser obtidos de ensaios de solo.

Entre os parâmetros geotécnicos destacam-se: ângulo de atrito interno, módulo de Young, módulo de Poisson, índice de compressão, índice de vazios, pressão de pré-adensamento e coeficiente de empuxo no repouso.

Porém, é importante destacar que, infelizmente, na maioria dos projetos de pontes rodoviárias típicas, quase não são realizados ensaios de solos. A maioria dos parâmetros geotécnicos utilizados são obtidos por meio de correlações semi-empíricas com o número de golpes (N_{spt}) e com a classificação das camadas do solo dos relatórios das sondagens geotécnicas realizadas no local da obra, geralmente um furo em cada apoio da ponte.

1.3.3 - Parâmetros estruturais

Os parâmetros estruturais para prevenir e avaliar os efeitos da erosão em uma ponte estão relacionados a indicadores de desempenho que dependem principalmente da tipologia estrutural e das fundações. Devem ser analisados concomitantemente com os parâmetros hidrológicos e geotécnicos.

É de fundamental importância o conhecimento das zonas vulneráveis e os respectivos modos de falha do sistema estrutural da ponte à erosão para que seja possível avaliar o tipo de dano (parcial ou colapso), inclusive a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo. Providências ainda na fase de concepção de projeto para garantir uma adequada redundância da ponte aos efeitos dos deslocamentos de apoios causados pela erosão ao longo do tempo, irão certamente minimizar os danos e também diminuir a possibilidade de colapso.

Para as pontes existentes, em especial as mais antigas, e já submetidas ao processo erosivo, a inspeção feita por especialistas deverá ser a primeira etapa do processo de análise, quando serão levantadas as informações sobre a geometria, tipo de estrutura e os danos visualizados. Nas etapas seguintes devem ser estudados a redundância estrutural e o grau de risco das falhas causadas pela erosão, de modo a permitir a tomada de decisão sobre a solução mais apropriada para sanar o problema.

Duas situações, que representam os sistemas estruturais mais utilizados nos tabuleiros das pontes típicas das rodovias brasileiras, estão apresentadas na figura 1.4 que mostra os deslocamentos nos apoios e os modos de falha em tabuleiros de vigas isostáticas e de vigas hiperestáticas devidos a recalques diferenciais causados pela erosão.

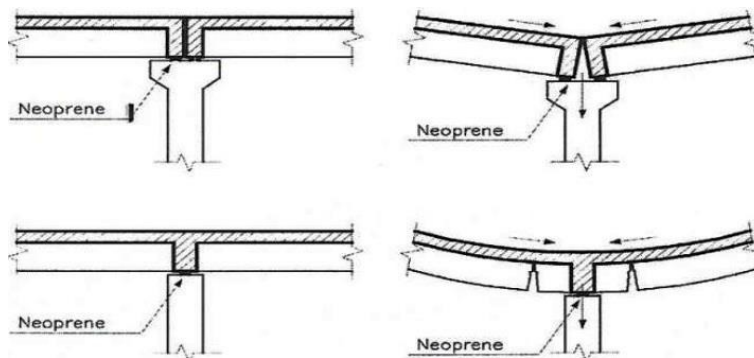


Figura 1.4 - Deslocamentos nos apoios em tabuleiros de vigas isostáticas e vigas hiperestáticas.
(Fonte: GUSMÃO FILHO, 2003)

Essas duas concepções de tabuleiro apresentam comportamentos diferentes aos recalques diferenciais causados pela erosão. O tabuleiro isostático, composto por vigas bi apoiadas, dependendo da intensidade dos deslocamentos pode ter apenas desaprumos e desconforto do tráfego, não ocorrendo danos significativos à superestrutura da ponte. Porém, para maiores deslocamentos, quando os recalques assumirem valores maiores do que os admissíveis, poderá acontecer além do desconforto ao tráfego sobre o tabuleiro, a inviabilidade da utilização da ponte, havendo ainda o risco de ruptura frágil por colapso progressivo.

O tabuleiro em vigas contínuas poderá apresentar rótulas plásticas conforme mostra a mesma figura, mas tem uma boa capacidade de redistribuição dos esforços quando ocorre o deslocamento, caracterizando uma estrutura mais redundante e, dependendo do grau de redundância, possibilitar a realização de intervenções de recuperação e reforço que garantam a continuação da obra em serviço além de, em caso de colapso parcial ou total, permitir uma ruptura dúctil.

A figura 1.5 mostra uma situação típica de ponte com tabuleiro em vigas pré-moldadas isostáticas, que sofreu deslocamento de apoio causado pela erosão. A figura 1.6 ilustra os modos de falha causados pelos deslocamentos de apoios de uma ponte com tabuleiro em vigas contínuas. A figura 1.7 mostra esquematicamente as zonas vulneráveis e os modos de falhas na estrutura de uma ponte em vigas contínuas, devidos à rotação de um pilar pela erosão nas fundações. Também são ilustradas na figura as rótulas plásticas características que ocorrem no tabuleiro para esses tipos de deslocamentos diferenciais e a indicação dos posicionamentos das armaduras nas vigas principais para garantir a redistribuição dos esforços e a ductilidade da estrutura quando da ocorrência dos recalques.



Figura 1.5 - Exemplo de deslocamentos causados pela erosão em tabuleiros com vigas isostáticas. (Fonte: Tech. Report, COST TU1406, 2018)

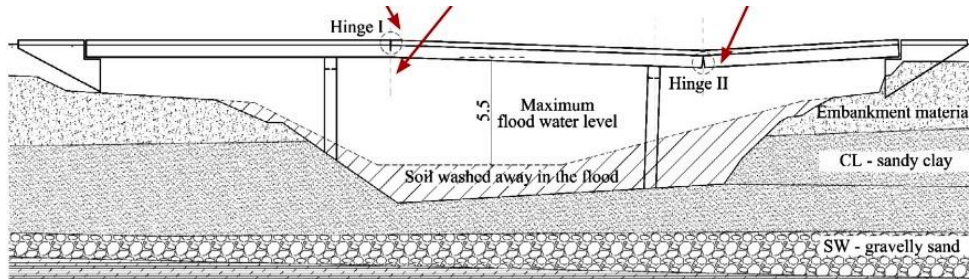


Figura 1.6 - Modos de falhas e rótulas plásticas causados por deslocamentos devidos a erosão de apoios de ponte em tabuleiro com vigas contínuas. (Fonte: Tech. Report, COST TU1406, 2018)

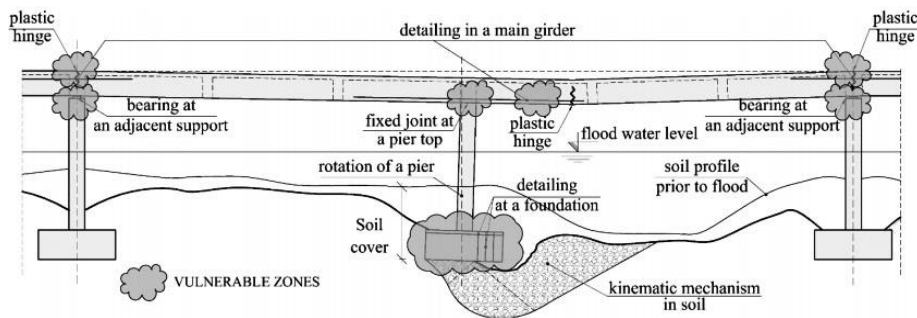


Figura 1.7 - Ilustração das zonas vulneráveis e modos de falha, causados pelo deslocamento e rotação de apoio, na estrutura de uma ponte típica em vigas contínuas. (Fonte: Tech. Report, TU 1406, 2018)

1.4 - Locação de pontes com alto risco de erosão

O modo mais eficaz para eliminar, ou pelo menos minimizar, os efeitos da erosão nas fundações de uma ponte é a adoção de procedimentos adequados ainda na fase de projeto, o que significa na tomada de decisões relacionadas aos fatores geotécnicos, hidrológicos, geométricos e estruturais já relacionados, que influenciam a ocorrência do fenômeno e as suas consequências sobre o desempenho e a estabilidade da obra.

De imediato, é possível dizer que a locação, o comprimento da ponte, a distribuição e a forma dos apoios tem uma grande importância quanto à maior ou menor possibilidade de erosão e que, sempre que possível, a ponte possa ser implantada em um local que minimize os riscos da erosão. Um exemplo concreto de locação problemática é o de uma ponte executada em trecho curvo do rio, que gera grandes erosões na margem correspondente ao raio externo e sedimentação na margem do raio interno da curva, como mostra a figura 1.8 que ilustra uma

ponte com extremidades em balanços, projetada em uma curva do rio e que ao longo do tempo sofreu uma severa erosão no lado do raio externo da curva, com a destruição do aterro de acesso, enquanto na margem do lado interno aconteceu uma sedimentação.



Figura 1.8 - Erosão causada pela locação da ponte em trecho curvo do rio. Observar a erosão na margem do raio externo e a sedimentação no lado do raio interno. (Fonte: acervo do autor)

Uma situação típica, diretamente relacionada à ocorrência de erosão causada pela locação inadequada e muito encontrada entre as pontes típicas da malha viária brasileira, está ilustrada esquematicamente na figura 1.9 que mostra uma ponte locada em um rio que tem um canal principal e duas margens inudáveis (conhecidas na literatura como planícies de inundação). O v o da ponte cobre apenas a largura do canal e os encontros com os respectivos aterros de acesso constituem obstáculos às planícies de inundação e ainda diminuem a seção de vazão sob a ponte como mostra a figura.

Sempre que acontece um aumento no nível da água do rio, a correnteza começa a erodir os aterros de acesso a montante, aumenta a velocidade por causa da diminuição da seção do canal principal e em seguida também causa erosão nos encontros e aterros de acesso a jusante. Essa condição caracteriza uma ponte locada com alto rico de erosão, mesmo que não aconteçam grandes cheias, e requer uma atenção permanente, especialmente quanto aos aterros de acesso.

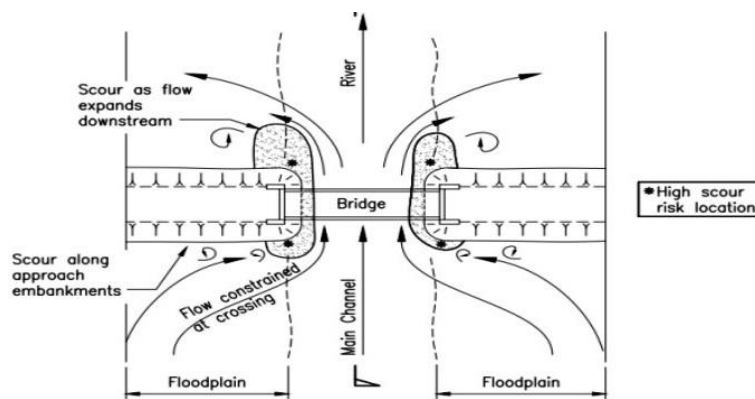


Figura 1.9 - Exemplo de ponte locada com alto risco de erosão. (Fonte: T.M.R. Bridge Scour Manual, 2013)

Existem outras situações que caracterizam uma locação com alto risco de erosão como é o caso da ponte da figura 1.10, que é encontrado com alguma frequência em rodovias do interior do Nordeste do Brasil. É possível observar que a ponte foi implantada sobre um aterro que funciona como uma espécie de barragem de terra, geralmente construída precariamente, para armazenar água, caracterizando um pequeno açude, para a agricultura de pequenas localidades.

Nesse caso, Trata-se de uma ponte com um único vão cujos encontros de alvenaria de pedras estão apoiados diretamente sobre um lastro de concreto simples (ou ciclópico) no topo do aterro, que no Nordeste é conhecido como “aterro barragem”. Acontece que nos períodos de chuvas intensas o açude transborda sobre o aterro, que funciona como uma espécie de vertedouro, com uma grande velocidade e intensidade do escoamento sob a ponte, cuja seção de vazão é geralmente insuficiente, o que provoca uma significativa erosão a jusante, como a mostrada na figura, que indica a formação de vazios sob o lastro de concreto que serve de apoio para as bases dos encontros. A evolução da erosão se não for corrigida à tempo, poderá configurar uma condição de risco estrutural para a ponte.



Figura 1.10 - Ponte locada sobre o aterro de um açude, numa condição de alto risco de erosão.
(Fonte: acervo do autor)

1.5 - Profundidade da cavidade de erosão em torno dos pilares

A determinação da cavidade (ou fossa) de erosão em torno dos pilares de uma ponte é de fundamental importância para a análise das causas e a solução do problema. Trata-se, porém, de uma questão bastante complexa pela grande quantidade de variáveis envolvidas. A quantidade e a forma dos pilares no leito do rio merecem especial atenção pelo fato de tais componentes interferirem diretamente nas condições de escoamento, e a profundidade de erosão depender significativamente do tipo de obstrução que os diferentes obstáculos causam à correnteza.

Na figura 1.11 estão ilustradas as seções transversais mais usuais de pilares de pontes, para as quais foram determinados experimentalmente, e estão disponíveis na literatura, os fatores de forma para o cálculo da profundidade da erosão.

Convém esclarecer que os fatores de forma para tais seções transversais foram definidos considerando pilares com seção constante ao longo de toda a altura (pilares uniformes) e com o escoamento perpendicular aos pilares, de modo que qualquer inclinação do pilar na direção da correnteza pode alterar significativamente os benefícios hidrodinâmicos da forma adotada.

Na tabela 1.1 estão indicados os fatores de forma da profundidade de erosão desenvolvidos por vários pesquisadores para as diversas seções transversais de pilares.

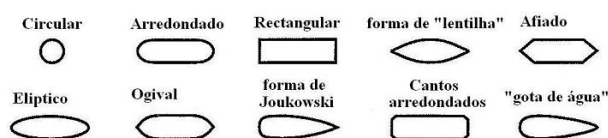


Figura 1.11 - Formas usuais de seções transversais de pilares de pontes. (Fonte: CARDOSO, 2008)

Tabela 1.1 - Fatores de forma para pilares com seção transversal constante e alinhados com o escoamento. (Fonte: CARDOSO, 2008)

Forma	l/b	Tison (1940)	Laursen & Toch (1956)	Chabert & Engeldinger (1956)	Garde (1961)	Larras (1963)	Venkatadri (1965)	Maza Alvarez (1968)	Dietz (1972)	Neill (1973)	Richardson and Davis (1965)
Circular	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		1,0
Arredondado	4	1,0	1,0	1,03	1,0	1,0	1,0	1,0	0,85		1,0
Retangular	1								1,22		
	3								1,08		
	4	1,24									
	5								0,99		
Quadrado			1,11		1,11	1,11		1,24		1,33	1,1
Afiado										0,80	0,90
Forma de lentilha	2		0,89			0,91					
	3		0,78			0,76					
	4	0,59		0,73	0,76						
	7									0,80	
Parabólico						0,56			0,80		
Face triangular 60°		0,77					0,75	0,73	0,65		
Face triangular 90°							1,25	1,0	0,76		
Elíptico	2		0,89			0,91			0,83	1,0	
	3		0,83			0,83			0,80		
	5								0,99		
Ogival	4			0,92		0,92					
Joukowski	4			0,86		0,86					
Com cantos arredondados	4								1,01		
Gota de água	3,5								0,80		

Por se tratar de uma questão bastante específica, que foge ao caráter didático deste texto, que é transmitir os conceitos básicos sobre o tema, não serão abordados os procedimentos de cálculo da profundidade de erosão, cuja complexidade faz com que às vezes tenha que ser analisada conforme diversas teorias de diferentes autores.

De modo geral, os meios mais utilizados para a avaliação da profundidade de erosão são:

Medições locais, com o uso de hastes, sensores, sondas, scanner a laser, inspeções subaquáticas;

Expressões semi-empíricas da literatura, sendo as de Melville e Coleman e de Richardson e Davis as mais utilizadas;

Modelos físicos em laboratório;

Modelagem numérica.

A utilização dos modelos físicos em laboratório com a modelagem numéricas com programas de Elementos Finitos tem sido muito utilizada por pesquisadores em todo o mundo, com resultados consistentes que muito tem auxiliado os projetos de pontes novas e a avaliação da erosão em pontes existentes. A figura 1.12 mostra um exemplo da determinação da profundidade de erosão em torno das fundações de uma ponte no Canadá feita por pesquisadores brasileiros (Vasquez e Lima, 2009), obtida por um modelo de laboratório validado por modelagem numérica.



Figura 1.12 - Modelo físico em laboratório com modelagem numérica para determinação da profundidade de erosão em torno dos pilares de uma ponte. (Fonte: VASQUEZ e LIMA, 2009)

Porém, é importante destacar que além dos pilares uniformes, que se caracterizam pela seção transversal constante, na grande maioria dos casos práticos devem ser considerados os pilares não uniformes com seções variáveis ao longo da altura do seu eixo principal. O caso mais frequente é o constituído por pilar, bloco de coroamento e um grupo de estacas, também conhecido na literatura como pilar complexo.

É possível dizer simplificadamente que esse modelo pode ser considerado como um pilar simples, desde que seja determinado o diâmetro equivalente, conforme a figura 1.13, onde:

D_{pilar} = Diâmetro equivalente do pilar;

D_m = Diâmetro equivalente do bloco de coroamento;

D_{ge} = Diâmetro equivalente do grupo de estacas.

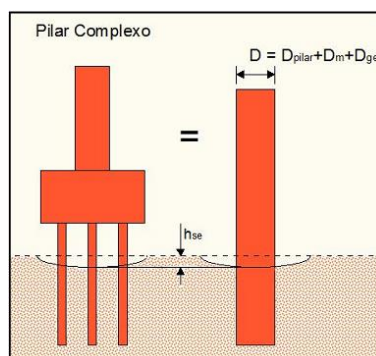


Figura 1.13 – Diâmetro equivalente de um pilar complexo. (Fonte: SHEPPARD, 2005, apud. FONSECA, 2011).

Para determinar a profundidade de erosão devem ser considerados três casos: No caso 1 o bloco de coroamento está situado acima do leito do rio; no caso 2 o bloco está parcialmente enterrado e no caso 3 totalmente enterrado, como mostra a figura 1.14.

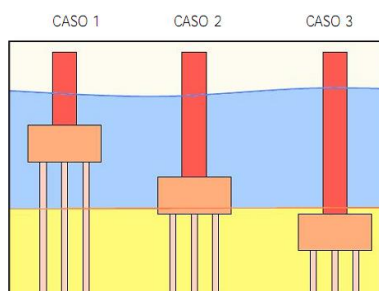


Figura 1.14 - três situações para a previsão da profundidade de erosão em um pilar complexo.
(Fonte: SHEPPARD, 2005, apud. FONSECA, 2011).

1.6 - Profundidade da cavidade de erosão em torno dos encontros

Os encontros também são elementos fundamentais para o estudo dos efeitos da erosão nas estruturas das pontes e estão sujeitos aos vórtices da correnteza e às cavidades geradas pela erosão ilustrados na figura 1.15. Dependendo do tipo de encontro será possível evitar, ou pelo menos mitigar, a erosão localizada nas fundações e também nos aterros de acesso. A pior situação possível quanto à ação danosa da erosão é quando a ponte não tem encontros, sendo o caso mais comum o das pontes com extremidades em balanço, que se trata de uma tipologia amplamente utilizada entre as pontes existentes na malha rodoviária brasileira e também a mais vulnerável à erosão nas extremidades. A determinação da profundidade da cavidade de erosão nos encontros é feita geralmente por estudos desenvolvidos por vários autores, por modelos em laboratório e por modelagem numérica. Medições para avaliações preliminares poderão ser feitas utilizando-se alguns dos procedimentos adotados em pilares, quando as condições do leito do rio e da ponte permitirem.

Existem dois tipos de encontros bastante utilizados nas pontes rodoviárias típicas que constituem o objeto deste estudo: os encontros com alas e os encontros fechados, como mostrados na figura 1.16. O primeiro tipo é muito encontrado nas pequenas pontes antigas, sendo geralmente utilizados os sistemas construtivos em alvenaria de pedras argamassadas e em concreto ciclópico. O segundo tipo é geralmente construído em concreto armado.

Os dois tipos, desde que corretamente projetados, atendem adequadamente aos efeitos da erosão nas extremidades das pontes, sendo os encontros com as paredes verticais os mais eficientes por propiciar um maior afastamento das saias dos aterros de acesso da calha do rio, porém como têm custos mais elevados do que os encontros em alas, são muitas vezes preteridos nos projetos, em nome de uma economia que no futuro torna-se mais onerosa pelos recursos que serão gastos para corrigir os danos causados pela erosão nos aterros de acesso e nos próprios encontros.

É importante destacar que os encontros de concreto armado, quando adequadamente dimensionados, têm também um bom desempenho aos efeitos dos deslocamentos diferenciais causados pelas erosões, ao contrário dos encontros de alvenaria de pedras e de concreto ciclópico que não têm resistência à tração e se tornam vulneráveis aos recalques diferenciais que ocorrem no leito do rio, como é o caso de encontro em concreto ciclópico da figura 1.17 que sofreu uma fissura de grande abertura, caracterizando o seccionamento da parede por causa da erosão na base que gerou grandes esforços de tração.



Figura 1.15 - a) Vórtices da correnteza em torno dos encontros. (Fonte: CARDOSO,2008)
 b) Cavidade de erosão na fundação de um encontro. (Fonte: acervo do autor)



Figura 1.16 - Encontro com alas e encontro com paredes verticais. (Fonte: acervo do autor)

Dependendo da intensidade dos recalques diferenciais causados por uma severa erosão no leito do rio, os encontros, mesmo sendo de concreto armado, podem apresentar um quadro fissuratório como o da figura 1.18 se não tiverem sido dimensionados para tais deslocamentos.



Figura 1.17 - Seccionamento da parede de um encontro de concreto ciclópico, causado pela erosão localizada e pela falta de resistência à tração do material. (Fonte: acervo do autor)

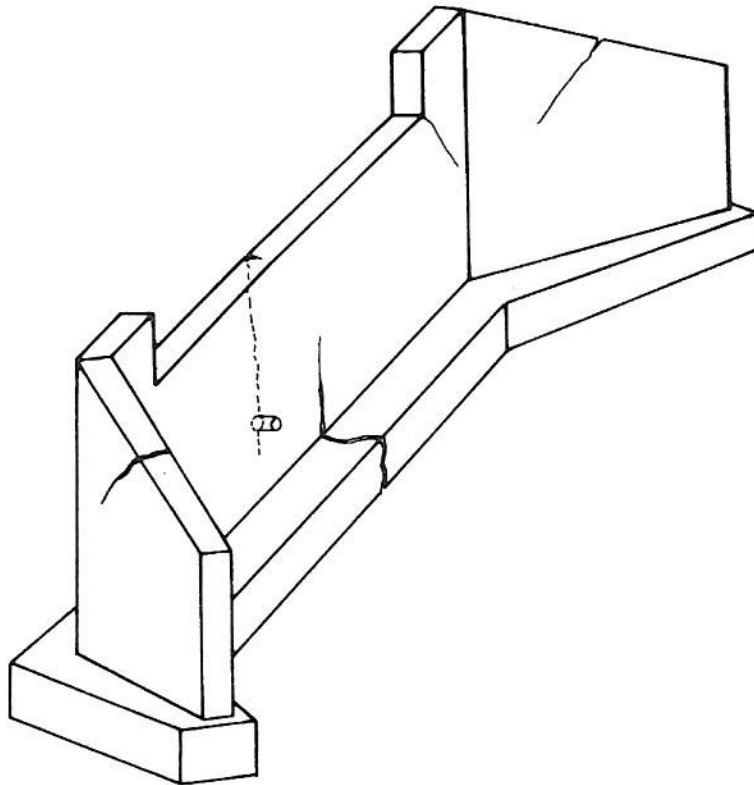


Figura 1.18 – Ocorrência de fissuras em um encontro de concreto armado, provocadas por recalques diferenciais do terreno de fundação. (Fonte: PFEIL, 1983)

2 - AÇÃO DAS CHEIAS SOBRE AS PONTES

As cheias representam um fenômeno com capacidade de produzir graves danos a uma ponte por causa da rápida elevação do nível da água, associada a grandes descargas e velocidades. Os estudos hidrológicos para as pontes rodoviárias do Brasil consideram um período de recorrência (também denominado tempo de retorno) de 100 anos, que é o tempo estimado entre as ocorrências de mesma magnitude para o fenômeno.

Porém, as mudanças climáticas e ambientais que estão ocorrendo em todo o mundo têm interferido nas intensidades e nas frequências das cheias, inclusive aumentando o poder de destruição sobre as pontes, de modo que o tempo de retorno no qual os projetos são baseados vem sendo objeto de estudos por pesquisadores de diversos países com o objetivo de aperfeiçoar os projetos no que se refere ao desempenho das novas pontes à ação de enchentes cada vez mais severas. Os estudos também buscam soluções para evitar o colapso das pontes antigas, que foram projetadas para condições hidrológicas que hoje já não conseguem mais atender aos efeitos do fenômeno sobre as suas estruturas, caracterizado pela grande intensidade da força de arrasto que aumenta o poder erosivo da água, atinge maiores profundidades no leito do rio e causa o solapamento das fundações, criando uma situação que tem causado o colapso estrutural da pontes em todo o mundo, inclusive no Brasil.

A pressão dinâmica atua transversalmente sobre os pilares e encontros e depende da velocidade da água, da forma do pilar e da parte exposta à água, conforme a expressão seguinte:

$$P = kV^2 \left(KN/m^2 \right) \quad [1]$$

Onde:

P = pressão dinâmica da água.

K = coeficiente determinado experimentalmente.

V = velocidade da água corrente.

Na figura 2.1 estão indicados alguns valores de k que constam da literatura para as formas mais usuais de pilares de pontes.

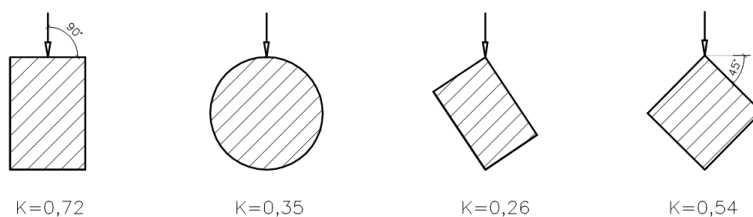


Figura 2.1 - Valores do coeficiente k para diferentes formas de pilares. (Fonte: PFEIL, 1978)

O poder de destruição de uma cheia é geralmente ampliado por deficiências nos projetos das pontes, por falhas construtivas dessas obras e, principalmente, por deficiência ou ausência de manutenções.

Os dois exemplos de colapso estrutural que estão mostrados a seguir comprovam a necessidade de se adotar adequados estudos geotécnicos, hidrológicos e estruturais nos projetos para tornar as pontes mais seguras quanto aos efeitos deletérios das cheias.

O primeiro caso, apresentado nas figuras 2.2 e 2.3, refere-se ao desabamento parcial de uma ponte na cidade de Barreiros, PE, que teve tramos do tabuleiro, constituído por vigas pré-moldadas simplesmente apoiadas, arrancados durante uma cheia do rio Una em 2010.

Mesmo não tendo sido realizados estudos para diagnosticar com profundidade como se deu o acidente estrutural, ficou claro que a ponte foi construída com a cota superior do tabuleiro abaixo da cota de máxima enchente do rio e que não foi projetada para resistir à grande descarga da cheia que gerou uma pressão dinâmica ao longo das faces laterais das vigas do tabuleiro que por sua vez não tinham peso nem condições de apoio para suportar essas ações, por tratarem-se de tramos isostáticos.

Tudo indica que não foram realizados os estudos hidrológicos necessários para que a cheia não cobrisse o tabuleiro, que por sua vez foi projetado inadequadamente sem qualquer redundância, pois se fosse constituído por vigas contínuas, provavelmente não tivesse acontecido o colapso, mesmo sendo encoberto pela correnteza. Porém, esse colapso não foi estudado e perdeu-se uma boa oportunidade para obter um maior conhecimento para o aperfeiçoamento dos projetos de pontes quanto aos efeitos das grandes cheias que são comuns na região em que aconteceu o acidente.



Figura 2.2 - Aspecto da ponte após o colapso, com a maior parte do tabuleiro de vigas simplesmente apoiadas arrancado pela cheia. (Fonte: acervo do autor)



Figura 2.3 - Partes dos tramos isostáticos do tabuleiro após serem arremessados pela grade intensidade da pressão exercida pela correnteza. (Fonte: acervo do autor)

O segundo caso, ilustrado nas figuras 2.4 e 2.5 mostra o que restou após a ocorrência simultânea do colapso estrutural de duas pontes da BR 101/PE na cidade de Palmares, durante a mesma cheia do rio Una em 2010.

As duas pontes faziam parte do alargamento da rodovia e estavam situadas paralelamente e bem próximas uma da outra. A primeira ponte era antiga e já fazia parte da pista original da rodovia, tendo sido alargada e reforçada para adequar-se ao novo gabarito da pista e às cargas móveis atuais. A segunda era uma ponte nova, construída na pista adicionada para alargar a rodovia e de acordo com as normas e procedimentos atualmente vigentes.

Durante uma grande cheia em 2010, as duas obras tombaram ao mesmo tempo, provavelmente a ponte situada a montante da correnteza tombou sobre a que estava a jusante, causando um tipo de colapso progressivo, que também infelizmente não foi objeto de qualquer tipo de estudo que pudesse diagnosticar os mecanismos geotécnicos, estruturais e hidrológicos envolvidos na ocorrência do duplo desabamento para evitar futuros colapsos desse tipo, que pelas próprias especificidades mereceria naturalmente uma atenção especial. Ou seja, mais uma vez foi desperdiçada uma grande oportunidade de estudar um acidente com características especiais e de aprofundar o conhecimento sobre o fenômeno das cheias e as suas consequências sobre as estruturas de pontes situadas em locais com características assemelhadas às do acidente.



Figura 2.4 - Ruínas das duas pontes, que desabaram uma sobre a outra logo após o acidente causado pela cheia. (Fonte: acervo do autor)



Figura 2.5 - Ruína após o desabamento duplo, podendo ser observado os escombros das longarina de ponte antiga que tinham sido reforçadas com protensão externa. (Fonte: acervo do autor)

2.1 - Providências para minimizar os efeitos das cheias

Para minimizar os efeitos das cheias sobre as estruturas das pontes se faz necessário adotar algumas providências nas fases de projeto, de execução e de manutenção.

Recomenda-se, portanto, os seguintes procedimentos entre outros que possam eliminar ou mitigar os danos causados pelas cheias:

- Dimensionar adequadamente a seção de vazão de projeto, adotando um comprimento apropriado da ponte para atender essa vazão;
- Deixar uma folga de pelo menos 1,00m entre a cota da máxima enchente e o fundo do tabuleiro da ponte;
- Minimizar a quantidade de pilares dentro da calha do rio, otimizando os espaçamentos entre eles. Devem ser evitados pilares com arestas de 90°
- Aprofundar os estudos geotécnicos de modo a permitir uma solução de fundação apropriada para resistir aos efeitos da erosão, em especial durante as cheias;

- Atenção especial para o projeto dos encontros e dos aterros de acesso, por se tratar de elementos que quando inadequadamente projetados aumentam a obstrução da calha do rio e são elementos vulneráveis por ocasião das cheias;
- Realizar a dragagem do canal natural do rio, de modo a eliminar os depósitos do fundo e das margens, aumentando assim a seção de vazão;
- Retificar o leito do rio para aumentar a capacidade de escoamento;
- Fazer revestimento ou consolidação das margens, de modo que a menor rugosidade permita aumento na capacidade de vazão, ou menor altura de água para uma vazão dada.

2.2 - Acúmulo de detritos nos pilares

É muito frequente que durante uma cheia haja o transporte de material sólido pela correnteza, geralmente troncos e vegetação de grande porte e outros tipos de entulhos que ficam retidos nos pilares das pontes e, na maioria dos casos, não são removidos quando o nível da água volta ao normal. Tais detritos que passam a constituir um estrangulamento da seção de vazão sob a ponte, também geram efeitos hidrodinâmicos pelo aumento da área de atuação da força de arrasto sobre os pilares, e causam um aumento significativo na profundidade da erosão em torno dos pilares, dependendo do tempo em que ficam retidos na estrutura da ponte.

As figuras 2.6 e 2.7 mostram exemplos do acúmulo de detritos que permaneceram retidos nos pilares de pontes durante muito tempo após a ocorrência de uma cheia.



Figura 2.6 - Retenção e permanência de detritos nos pilares de uma ponte após uma cheia.
(Fonte: acervo do autor)



Figura 2.7 - Retenção de detritos com grande obstrução da seção de vazão sob a ponte.
(Fonte: BURGOS e VITÓRIO, 2017)

A literatura internacional prevê dois modelos para a avaliação da erosão em torno dos pilares com acúmulo de detritos. No primeiro modelo é considerada uma forma retangular e no segundo uma forma triangular, de modo que as análises para a avaliação da profundidade de erosão com a presença de detritos nos pilares pode ser feita considerando cada um desses modelos, mostrados na figura 2.8. A figura 2.9 ilustra os tipos de vórtices gerados pelos modelos horizontal e vertical, obtidos em laboratório e também as configurações das cavidades de erosão para os dois modelos.

Pesquisa desenvolvida na Universidade da Beira Interior em Portugal (DIAS, 2018) com a utilização de modelo reduzido de retenção de detritos em pilares de pontes, indicou um aumento de até 56% da profundidade de erosão para um tempo de 168 horas de ensaio.

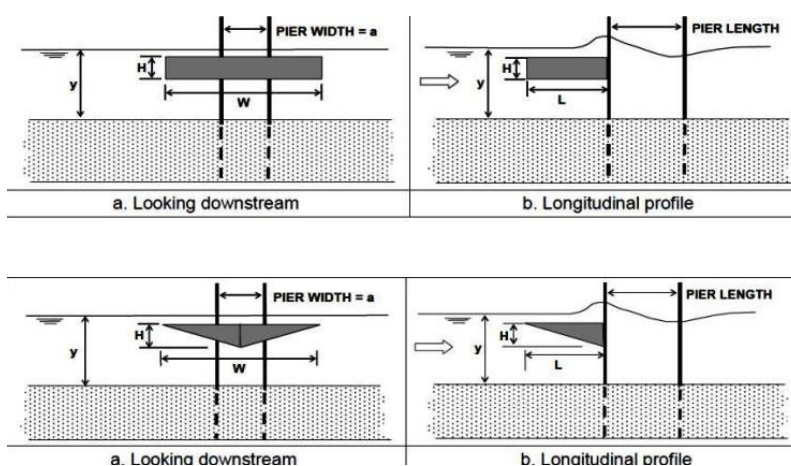


Figura 2.8 - Modelos de acúmulo de detritos retangular e triangular em torno dos pilares. (Fonte: NCHRP Report 563, 2006)

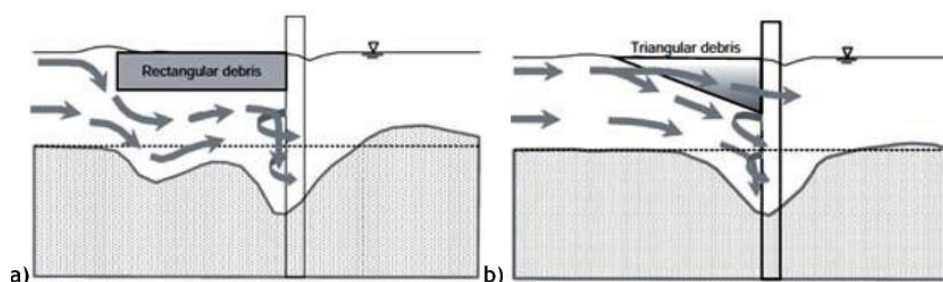


Figura 2.9 - Configurações dos vórtices da correnteza e das cavidades de erosão em torno dos pilares para os modelos retangular e triangular de acúmulo de detritos. (Fonte: DIAS, 2018)

A última revisão da norma brasileira **NBR-7187** (2021) incluiu o modelo triangular de acúmulo de detritos em pilares de pontes, sob a ótica da hidrodinâmica, para o cálculo da pressão da água em movimento nas estruturas das pontes, que deverá ser considerada atuando no centro de gravidade da área do triângulo da figura 2.10, onde a dimensão **A** corresponde a metade da profundidade da água, não inferior a 3,0m e a dimensão **B** é igual à soma dos comprimentos dos vãos adjacentes, não superior a 12,0m, acrescida do elemento estrutural. Deve ser adotado para o cálculo da pressão da água em movimento o valor de $K=0,71$.

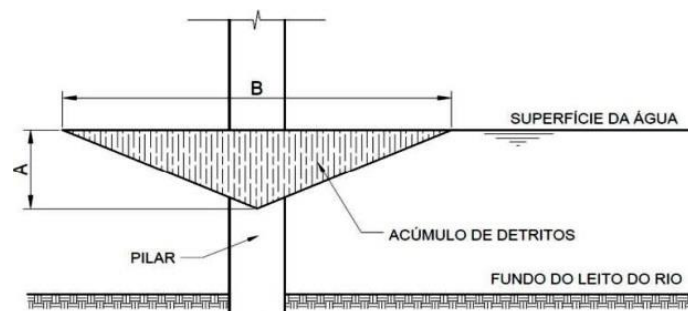


Figura 2.10 - Modelo de acúmulo de detritos para o cálculo da pressão da água em movimento.
(Fonte: ABNT NBR-7187, 2021)

2.3 - Influência das alterações nos leitos dos rios

Uma situação observada com muita frequência nas inspeções realizadas nas pontes típicas das rodovias brasileiras, é o desvio da calha do rio ao longo dos anos, quando comparado com as condições originais para as quais a ponte foi projetada. Essa situação, se não for corrigida a tempo, causa problemas ao longo de toda a vida útil da estrutura, mas é durante uma cheia que a modificação do leito do rio evidencia o grau de risco que representa, pois geralmente uma ponte é projetada de tal modo para que o eixo da obra preferencialmente coincida com o eixo do calha do rio.

Ocorre que pela ação humana ou da natureza, pode acontecer um desvio da calha do rio, que se dá pela construção de outras obras a montante, como por exemplo, pequenas barragens que modificam o traçado original do curso d'água, ou então por um processo natural que pode ocorrer ao longo de décadas, dependendo do regime do rio. Isso também altera a posição dos pilares e encontros da ponte em relação ao escoamento de tal modo que uma parte dos pilares com as respectivas fundações, pode ficar fora da lâmina d'água, enquanto a outra parte continua no leito do rio e submetida a grandes erosões.

A figura 2.11 mostra um exemplo típico desse tipo de alteração no traçado no leito do rio que deixou uma parte da ponte sobre as novas margens formadas pelo desvio e a outra parte na água e submetida a uma erosão de grande intensidade que deixou descoberto um bloco de fundação e causou o desconfinamento das estacas deixando-as semi-enterradas, com redução da capacidade de carga e, conseqüentemente, com o risco de colapso estrutural.



Figura 2.11 - Grave risco estrutural pela falta de confinamento das estacas causado pela erosão ampliada pelo desvio do leito original do rio ao longo do tempo. (Fonte: acervo do autor)

Outra situação recorrente nas pontes mais antigas, cujos desempenhos hidrológicos estão geralmente defasados, é o rebaixamento do leito original do rio pela erosão geral ao longo dos anos (que acontece também concomitantemente com o desvio do traçado) e é muitas vezes acelerada pela erosão de contração sob a ponte, de tal modo que o perfil original vai sofrendo significativo rebaixamento, podendo causar o solapamento das fundações se o processo não for identificado e corrigido a tempo. Esse fenômeno é ilustrado esquematicamente pela figura 2.12 que mostra o perfil de um rio que passou por um processo de rebaixamento durante um período de oito anos.

A situação pode ser agravada quando durante as cheias a correnteza se choca com a face montante do tabuleiro e divide-se em duas partes: uma que passa por cima da ponte e outra que passa com grande pressão sob a ponte após bater no tabuleiro. Isso causa um fenômeno no qual a intensidade da água provoca uma pressão de grande intensidade na direção do leito do rio, formando uma cavidade de erosão consideravelmente superior embaixo da ponte, conforme o esquema da figura 2.13.

Alguns exemplos da situação acima descrita aconteceram durante duas grandes cheias na Zona da Mata Sul de Pernambuco, uma no ano de 2010, quando 89 pontes foram seriamente danificadas, e outra em 2017 quando 37 pontes foram bastante atingidas em cinco cidades, sendo várias dessas obras totalmente cobertas pela correnteza, como foi o caso de uma ponte na cidade de Belém de Maria, mostrada na figura 2.14.

Essas duas últimas cheias revelaram um quadro preocupante sobre o estado de conservação das antigas pontes do interior do Estado de Pernambuco, em sua grande maioria com problemas relacionados à insuficiência da seção de vazão, e também com avançada deterioração estrutural, largura insuficiente do tabuleiro e outras deficiências relacionadas à (falta de) segurança e funcionalidade que necessitam ser sanadas para evitar futuros desastres.

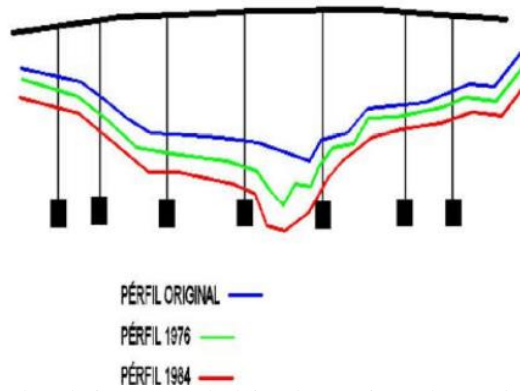


Figura 2.12 - Esquema do rebaixamento do leito de um rio ao longo de um período de tempo. (Fonte: GUITELMAN, 2012)

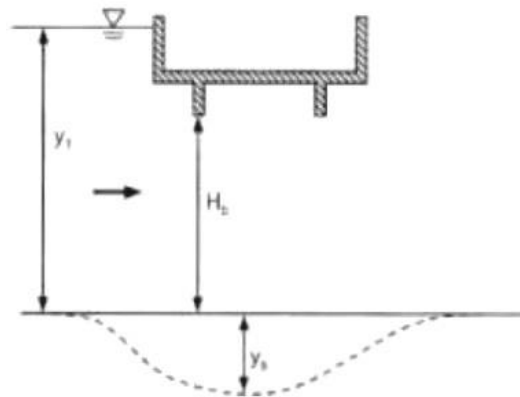


Figura 2.13 - Profundidade de erosão com grande rebaixamento do leito do rio causada pela pressão da correnteza após o choque com o tabuleiro da ponte. (Fonte: UNIV. ALGRAVE)



Figura 2.14 - Ponte antes da cheia e depois de totalmente coberta pela água durante a cheia. (Fonte: BURGOS e VITÓRIO, 2017)

3 - EFEITOS DA EROSÃO NAS FUNDAÇÕES DAS PONTES

Os efeitos da erosão sobre as fundações de uma ponte são, de modo geral, de grande intensidade e dependendo de cada caso podem causar graves avarias estruturais não apenas nas fundações, mas na estrutura como um todo.

A ausência de inspeções regulares faz com que os problemas só sejam detectados quando a estrutura começa a apresentar sinais visíveis de recalques, deslocamentos, fissuras e outras avarias causadas pelo solapamento das fundações.

Dependendo da etapa e do grau de evolução das avarias quando identificadas, é possível fazer as correções necessárias, mesmo que dispendiosas, por meio de intervenções de reforço das fundações e das partes danificadas da estrutura da ponte.

Porém, muitas vezes os problemas não são identificados a tempo e continuam evoluindo sem que seja adotada qualquer providência. Tais situações são as mais perigosas, pois alterações súbitas na correnteza do rio como as causadas durante uma cheia, ou pela maior intensidade do tráfego sobre a ponte, podem potencializar os efeitos dos problemas já existentes pela erosão e caracterizar uma situação de colapso estrutural parcial ou total.

Como foi explicado no capítulo 1 deste texto, a identificação, análise e solução dos efeitos da erosão em uma ponte requerem estudos aprofundados realizados por equipe multidisciplinar, tendo em vista a complexidade do fenômeno e a grande quantidade das variáveis envolvidas, que vão desde o regime do rio e o tipo de solo, até o grau de redundância da ponte aos deslocamentos causados pela erosão.

Evidentemente, o modo mais eficaz para eliminar, ou pelo menos minimizar, os efeitos da erosão nas fundações de uma ponte é a adoção de medidas preventivas ainda na fase de projeto, o que implica na tomada de decisões relacionadas aos fatores geotécnicos, hidrológicos, geométricos e estruturais que influenciam a ocorrência do fenômeno e as suas consequências sobre a estabilidade e funcionalidade da obra, como já abordado no capítulo 1 deste texto.

A correta execução das fundações em uma cota apropriada, considerando a profundidade de erosão, é uma providência mínima que deve ser tomada por se tratar de fator de fundamental importância, considerando que significativa quantidade de reforços de fundações e das superestruturas de pontes são motivados pela execução das fundações em cotas insuficientes, que as deixam vulneráveis ao solapamento, principalmente quando acontecem cheias e modificações no leito do rio.

Ainda existe no Brasil uma grande quantidade de pontes, muita delas bem antigas, que apresentam precárias condições estruturais de ordem geral e, principalmente, quanto aos efeitos da erosão. Isso é comprovado todos os anos durante a ocorrência das grandes precipitações

pluviométricas e das cheias que acontecem em várias regiões do país, que danificam ou causam o colapso de muitas pontes, gerando inestimáveis prejuízos econômicos, sociais e humanos.

Nesse sentido, são apresentados a seguir alguns exemplos dos principais efeitos causados pela erosão nas fundações e estruturas das pontes e também exemplos de colapsos ocorridos com esses tipos de obras durante a ocorrência de cheias, separando os eventos conforme o tipo de fundação da ponte.

3.1 - Danos em fundações diretas

As fundações diretas nas pontes rodoviárias típicas são geralmente constituídas por sapatas isoladas de concreto armado ou blocos de concreto, simples ou ciclópico para os pilares e de sapatas corridas de concreto armado, concreto ciclópico ou alvenaria de pedras para os encontros e alas, sendo estes dois últimos materiais encontrados nas antigas pontes de rodovias do interior do país.

As fundações diretas devem ser projetadas de tal modo que fiquem abaixo da profundidade de erosão, a ser prevista por meio dos estudos geotécnicos, hidráulicos e estruturais, também já relacionados, de modo que não haja a perda de contato entre a fundação e o solo no bordo da tensão mínima da base da sapata ou do bloco.

Porém, a deficiência e/ou ausência dos devidos cuidados para evitar o solapamento das fundações diretas faz com que significativa quantidade de pontes fique em situação de risco quanto a colapsos parcial ou total, que muitas vezes são potencializados durante as cheias.

Os exemplos apresentados a seguir mostram pontes que tiveram problemas originados pela erosão nas fundações diretas, com maior ou menor intensidade, e que necessitaram de estudos e de reforços estruturais para restabelecer as condições de segurança.

A figura 3.1 mostra uma ponte de rodovia do interior de Pernambuco cujas fundações em sapatas foram executadas em uma cota superficial do leito do rio que sofreu processo de erosão, aumentada por desvio do leito do rio sob a ponte. A sapata atingiu uma condição limite para o solapamento.



Figura 3.1 - Sapata em condição limite de solapamento. (Fonte: acervo do autor)

O caso mostrado na figura 3.2 trata de uma ponte na rodovia PE -057 com fundações diretas constituídas por sapatas isoladas sobre um bloco de concreto ciclópico em cada par de pilares.

Durante a ocorrência de uma cheia no rio os blocos sob as sapatas sofreram solapamento e por pouco não levaram a ponte ao colapso. A obra conseguiu ser salva por meio da execução de reforço com estacas raiz em cada uma das sapatas que foram encamisadas pelos blocos de coroamento das estacas de reforço. Os encontros, que também foram danificados, passaram por reforço, com o uso de estacas raiz.



Figura 3.2 - Fuga de material sob as sapatas causando risco de colapso da ponte. (Fonte: acervo do autor)

O caso seguinte, mostrado na figura 3.3, refere-se a uma ponte na rodovia PE- 230 que quase sofreu colapso estrutural por causa de uma grande erosão do solo pedregulhoso sob a fundação de um encontro, que foi ampliada ao longo do tempo por um talvegue com grande declividade e conseqüentemente com grande velocidade da água sob a ponte. Por se tratar de uma ponte de rodovia do interior, com pequeno fluxo de veículos, o problema permaneceu despercebido

durante anos, até ser descoberto e solucionado ainda a tempo de evitar o colapso, com a realização de estudos geotécnicos, hidrológicos e estruturais que determinaram o reforço da fundação do encontro, a regularização do leito do rio e o restabelecimento da seção de vazão sob a ponte.



Figura 3.3 - Grande erosão na fundação de um encontro. (Fonte: acervo do autor)

O próximo caso trata de uma ponte sobre o rio Una na PE-120, que teve erosões localizadas em torno das fundações dos pilares, em sapatas isoladas que foram executadas sobre rocha a pouca profundidade de leito do rio. A situação foi agravada ao longo do tempo pela deficiência da seção de vazão sob a ponte, causada pela grande quantidade de pilares dentro do rio e também pelo depósito de detritos em torno dos pilares, que foram transportados pela correnteza e estrangularam ainda mais a seção de vazão, aumentaram a intensidade dos vórtices e consequentemente, a profundidade de erosão das fundações que ficaram na iminência de sofrer solapamento, conforme mostra a figura 3.4. Para solucionar o problema e evitar o colapso da ponte foi realizado o reforço das sapatas, inclusive com a ancoragem das mesmas na camada rochosa situada a pouca profundidade no leito do rio.



Figura 3.4 - Retenção de detritos em torno dos pilares e erosão localizada, com início de solapamento das fundações. (Fonte: acervo do autor)

O caso mostrado na figura 3.5 trata de uma ponte cujas fundações em sapatas de concreto armado foram executadas diretamente sobre um leito rochoso aparente na cota do leito do rio.

Porém, durante um período em que o leito do rio permaneceu seco, foi constatada uma erosão localizada na rocha sob as superfícies inferiores das sapatas, na iminência de causar deslocamentos diferenciais nas fundações.

Em uma simples análise visual foi possível constatar que se tratava de uma rocha bastante fraturada, que na prática comporta-se de maneira semelhante a predegulhos, e que aparentemente não passou pelas avaliações necessárias, que poderiam ser obtidas através de sondagens rotativas para a determinar a resistência, a classificação quanto à intemperização e a qualidade RQD (Rock Quality Designation). Ou seja, as fundações foram simplesmente apoiadas na rocha, aparentemente sem qualquer estudo. Ao longo do tempo aconteceram grandes infiltrações de água pelas fraturas da rocha, iniciando um processo de decomposição e com a formação muito clara de uma cavidade de erosão que pôde ser observada visualmente quando o leito do rio ficou seco.

Essa situação deve ser vista como um exemplo de que mesmo as fundações executadas em rocha podem sofrer os efeitos da erosão, inclusive com deslocamentos diferenciais; e que é imprescindível a realização de sondagens rotativas e de todos os estudos geotécnicos para o correto conhecimento das características da rocha.



Figura 3.5 - Erosão localizada em torno de fundações diretas executadas sobre rocha fraturada sem maiores estudos. (Fonte: acervo do autor)

3.2 - Danos em fundações profundas

As fundações profundas mais usuais nas pontes rodoviárias típicas são as estacas e os tubulões. Esta segunda alternativa, muito utilizada até anos atrás, anos encontra-se atualmente em desuso, especialmente os tubulões executados a ar comprimido, por causarem muitos riscos à saúde dos trabalhadores, sendo proibidos pela atual legislação de segurança do trabalho. Diante disso, as pontes cujas fundações não podem mais ser viabilizadas em tubulões utilizam necessariamente estacas, que podem ser dos diversos tipos disponíveis no mercado, a depender das características de cada solo e das cargas transmitidas pela estrutura.

As fundações em estacas, embora sejam consideradas pelos engenheiros em geral como sendo as mais seguras, pelo fato de conseguir transferir as cargas das estruturas para as camadas mais profundas e resistentes do solo, também são elementos que podem se tornar vulneráveis e causar o colapso de uma ponte se existirem camadas erodíveis que não tenham sido consideradas no cálculo do estaqueamento.

Nesse sentido, o Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais (DNER, 1996) diz: “havendo a possibilidade da ocorrência de erosões, as camadas erodíveis não podem ser levadas em conta no cálculo da capacidade das estacas e os comprimentos de estacas que poderão ficar livres com a erosão provável sofrerão os efeitos da correnteza e deverão ter sua estabilidade comprovada, isoladamente e em conjunto com a mesoestrutura”

Isso quer dizer que se existirem camadas erodíveis no leito do rio, o cálculo da capacidade de carga das estacas, que é a soma da capacidade por atrito lateral com a resistência de ponta, que é obtida pelos métodos semi-empíricos disponíveis na literatura, não deverá ser considerado para essas camadas, que poderão tornar as estacas semi-enterradas, pela perda de confinamento, se acontecer a erosão. Nesses casos o ideal seria que os blocos de estacas ficassem abaixo da fossa de erosão, mas como isso nem sempre é possível por causa de dificuldades construtivas, as estacas devem ser consideradas semi-enterradas ao longo do comprimento correspondente à espessura da camada erodível. Deverão ser dimensionadas para a flambagem e para os esforços referentes ao modelo estrutural da figura 3.6 onde o valor de L_0 representa a espessura da camada submetida ao processo de erosão.

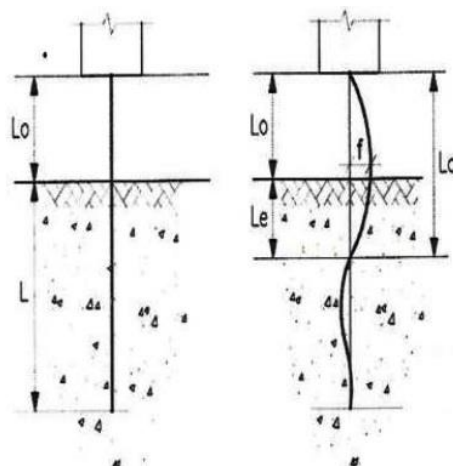


Figura 3.6 - Modelo para o cálculo de estacas atravessando uma camada erodível do solo.
(Fonte: GUSMÃO FILHO, 2003)

O caso mostrado a seguir na figura 3.7a ilustra bem quando uma fundação em estacas é submetida a uma erosão de grande intensidade. Trata-se de um bloco das fundações de um encontro que sofreu severa erosão que deixou parte das estacas sem confinamento, perdendo toda resistência ao atrito lateral ao longo do comprimento em que ficaram semi-enterradas.

Trata-se de uma situação que requer uma imediata análise, seguida da solução mais apropriada (geralmente reforço com o acréscimo de outras estacas), pois essas estacas existentes não foram calculadas para a condição pós erosão e dependendo do acréscimo dos esforços a que forem submetidas podem atingir a ruptura e causar colapso parcial ou total da ponte.

A figura 3.7b também mostra um caso de estacas em processo de perda de capacidade de carga pela ação da erosão ainda em estágio inicial em um encontro de ponte. A figura 3.8 mostra um pilar-parede do vão central de uma ponte submetido a grandes carregamentos, cujas estacas se encontram em uma camada erodível que vai formando uma cavidade em torno do conjunto que vai evoluindo até atingir um comprimento crítico do desconfinamento, necessitando de uma análise estrutural para avaliar a necessidade ou não de reforço para evitar a possibilidade de colapso.



Figura 3.7 - a) Estacas de um encontro de ponte com grande perda de confinamento causado por uma erosão severa. b) Estacas de um encontro em um processo moderado de erosão, mas que continua evoluindo. (Fonte: acervo do autor)



Figura 3.8 - Evolução da erosão em torno de um bloco de estacas. (Fonte: acervo do autor)

3.3 - Casos de colapsos estruturais causados pela erosão e pelas cheias

Na maioria dos casos as erosões existentes nas fundações continuam evoluindo com o tempo até chegarem ao estado limite de ruptura, não apenas das fundações, mas da estrutura da ponte, seja por colapso parcial ou total. Geralmente essa condição limite para o colapso estrutural tem maior probabilidade de acontecer durante ou logo após uma cheia, como nos casos mostrados a seguir.

O caso de colapso mostrado na figura 3.9 refere-se a uma ponte no município de Maraiial em Pernambuco cujo sistema estrutural era constituído por tabuleiro metálico com vãos isostáticos apoiados sobre pilares-parede de concreto; tinha fundações superficiais e 30 anos de construída quando sofreu a ação de uma grande cheia. A pressão dinâmica causada pela força de arrasto gerou esforços de grande magnitude nos pilares e o solapamento das sapatas, provocando o colapso da obra que foi demolida e substituída, pelo fato de não ter mais condições de ser recuperada e reforçada. Os fatores que contribuíram de forma determinante para o grande poder de devastação da cheia sobre a ponte foram o estrangulamento da seção de vazão pela grande quantidade de pilares-parede na calha do rio, a execução das fundações em uma camada superficial do leito e a pouca redundância estrutural da ponte formada por tabuleiro em tramos metálicos isostáticos, que contribuíram para a ocorrência de colapso progressivo.



Figura 3.9 - Colapso total da ponte após uma cheia. (Fonte: acervo do autor)

O caso mostrado na figura 3.10 refere-se a uma ponte na rodovia PE-555, com 30m de extensão com as extremidades em balanço que em 2004, com 30 anos de construída, entrou em colapso após a ocorrência de uma cheia.

A ruptura foi causada pelo tombamento de um dos muros de arrimo de alvenaria de pedras executados nas extremidades dos balanços do tabuleiro.

O muro de contenção não fazia parte do projeto original da ponte, e foi construído aparentemente para conter os aterros de acesso, originalmente em taludes. Porém, não se tem uma informação precisa sobre isso. Sabe-se apenas que o muro foi construído também sem fundações adequadas e sem dispositivos de drenagem (barbacans), de tal modo que quando o

nível da água da cheia baixou, o corpo do aterro permaneceu totalmente saturado pela ausência de drenos no muro, criando um empuxo hidrostático que, somado ao empuxo de terra, causou o tombamento da obra de contenção sobre os pilares, destruindo a ponte que teve que ser demolida e substituída por uma nova obra.



Figura 3.10 - Colapso causado pelo tombamento de um muro de contenção sobre os pilares da ponte.
(Fonte: acervo do autor)

A seguir é mostrado colapso da ponte sobre o rio Jacuí, ocorrido em janeiro de 2010 na rodovia RSC-287 na cidade de Lajedo RS, que se transformou em uma tragédia pelo fato de ter causado a morte de cinco pessoas.

A ruptura ocorreu em um trecho de 100m da ponte durante uma cheia e foi causada pelo solapamento das fundações, conforme as declarações feitas por especialistas à época do acidente.

Um fato curioso é que o colapso da ponte sobre o rio Jacuí foi o quarto desabamento de pontes nessa mesma rodovia, desde os anos 80 e todos eles aconteceram durante grandes precipitações e cheias nos rios. As duas primeiras pontes colapsaram no mesmo mês de maio de 1984; a terceira em março de 2005 e finalmente a ponte do rio Jacuí em janeiro de 2010.

Na figura 3.11 está ilustrada a parte que restou da ponte sobre o rio Jacuí após o colapso e a montagem da figura 3.12 mostra imagens das quatro pontes que desabaram, com as respectivas datas dos acidentes estruturais na mesma rodovia.



Figura 3.11 - A parte que restou da estrutura da ponte sobre o rio Jacuí após o colapso.
(Fonte: Internet, 2010)



Figura 3.12 - Quatro pontes que sofreram colapso estrutural na rodovia RSC-287.
(Fonte: ZERO HORA, 2010)

O acidente estrutural mostrado a seguir refere-se a uma ponte com tabuleiro simplesmente apoiado, sobre um córrego na área urbana da cidade de São Roque em SP, que teve as fundações dos encontros solapadas durante a ocorrência de fortes chuvas em 2012. Isso causou o desabamento da parte do tabuleiro onde se localizava o passeio de pedestres, porém toda a estrutura sofreu danos acentuados e a ponte teve que ser interditada e posteriormente demolida tendo em vista a inviabilidade de ser recuperada e reforçada. A figura 3.13 detalha a situação da obra após a ruptura.



Figura 3.13 - Aspecto da ponte após solapamento dos encontros e desabamento de trecho do tabuleiro.
(Fonte: ESTADÃO, 2012)

O acidente estrutural mostrado a seguir na figura 3.14 em uma ponte urbana na cidade de Bezerros-PE, já era previsível pelo fato de a ponte com 30m de comprimento, e dois vãos de 15m, indicar há algum tempo sinais evidentes de deslocamentos causados por recalque em um dos encontros, que apresentava uma fissura de cisalhamento com grande abertura. Durante a ocorrência de uma das cheias do rio a ponte, então com 60 anos de construída, entrou em colapso pelo solapamento das fundações do encontro avariado, de tal modo que não foi mais possível ser reforçada e recuperada, tendo sido então demolida e substituída por uma obra nova.



Figura 3.14 - colapso de uma ponte antiga que já apresentava sinais de de ruptura por cisalhamento em um dos encontros. (Fonte: acervo do autor)

Outro caso de colapso, mostrado na figura 3.15, aconteceu na ponte sobre o rio do Barro, na rodovia que dá acesso à cidade de Ituberá, no sul da Bahia, que sofreu solapamento das fundações de um dos encontros em dezembro de 2014. Tratava-se de uma antiga ponte com tabuleiro de concreto apoiado sobre dois encontros de alvenaria de pedras. Durante uma forte chuva o aumento da correnteza solapou a fundação de um dos encontros que, provavelmente já

passava por um processo erosivo avançado. O colapso foi de tal natureza que destruiu completamente a ponte.



Figura 3.15 - Aspecto da ponte após o desabamento. (Fonte: PREFEITURA DE ITUBERÁ, 2014).

O caso de colapso mostrado a seguir trata de uma ponte rodoviária no interior de Pernambuco cuja estrutura rompeu durante uma cheia de rio em 2018. A obra já estava com mais de 50 anos de construída e tinha um tabuleiro em grelha com quatro vigas contínuas de inércia variável com dois vãos, dois encontros de alvenaria de pedras, um pilar parede central de alvenaria de pedras e fundações diretas.

Tratava-se de uma obra com razoável robustez que mesmo quase não passando por manutenções, resistiu a diversas cheias ao longo dos anos, porém não resistiu à intensidade da última cheia, em parte pela maior intensidade quando comparada a cheias anteriores e principalmente pelas precárias condições de conservação que já apresentava nos últimos tempos, conforme as manifestações patológicas observadas durante a inspeção realizada após o colapso.

A razoável redundância do tabuleiro impediu que a ponte desmoronasse totalmente, mas a intensidade da cheia cobriu o tabuleiro e solapou as fundações dos encontros e do pilar parede, que sofreu uma rotação no sentido longitudinal da ponte e um recalque que o deixou também inclinado no sentido transversal. Esses deslocamentos geraram rótulas plásticas no tabuleiro, com algumas semelhanças das que constam da figura 1.7 que ilustra um modelo de modos de falhas de vigas contínuas submetidas à rotação de um apoio pela erosão.

Os estudos realizados pelo autor mostraram a inviabilidade de recuperar e reforçar a ponte, que estava defasada quanto à seção de vazão e à cota de máxima cheia; também estava com a integridade estrutural comprometida pelos danos já existentes e os que foram causados pela cheia. Foi então demolida e substituída por uma ponte nova. As figuras 3.16, 3.17 e 3.18 mostram alguns detalhes dos danos e do colapso da ponte.



Figura 3.16 - Vista superior da ponte com o tabuleiro deslocado após a cheia. (Fonte: acervo do autor)



Figura 3.17 - Vista lateral da ponte mostrando a rotação do apoio central, o solapamento do encontro e as rótulas plásticas geradas pelos deslocamentos. (Fonte: acervo do autor)



Figura 3.18 - Deslocamento transversal do pilar parede e os danos no tabuleiro. (Fonte: acervo do autor)

3.4 - Algumas formas de proteção contra a erosão

O modo mais eficaz para eliminar, ou pelo menos minimizar, os efeitos da erosão nas fundações de uma ponte é a adoção de medidas preventivas ainda na fase de projeto, o que implica na tomada de decisões relacionadas aos fatores geotécnicos, hidrológicos, geométricos e estruturais que influenciam a ocorrência do fenômeno e as suas consequências sobre o desempenho e a estabilidade da obra.

De imediato é possível dizer que a localização, o comprimento da ponte, a forma e a distribuição dos apoios tem uma grande influência quanto à maior ou menor possibilidade de erosão. Um exemplo concreto é a implantação de uma ponte em trechos curvos do rio, já apresentada no capítulo 1, o que gera grandes erosões na margem externa e sedimentação na margem interna. Também devem ser evitados se possível, terrenos aluvionares com grandes declives que são mais vulneráveis à erosão.

Outra questão fundamental que não pode deixar de ser considerada é a correta execução das fundações em uma cota apropriada, considerando a profundidade de erosão, pois significativa quantidade dos acidentes estruturais é motivada pela execução de tais componentes em cotas inadequadas que as deixam vulneráveis ao solapamento.

Existem dispositivos que podem ser projetados e implantados para proteger as fundações e conter os efeitos erosivos, merecendo destaque os tapetes de enrocamento que são de fácil dimensionamento, apresentam facilidade de execução e não têm custos elevados.

Esses elementos de proteção são constituídos por pedras naturais soltas que criam uma barreira resistente ao poder erosivo do escoamento, com a flexibilidade de acomodação às alterações da configuração do leito do rio. A figura 3.19 mostra uma planta típica de um tapete de enrocamento sobre filtro geotêxtil.

A figura 3.20 mostra um corte vertical esquemático da proteção de um pilar de ponte com um tapete de enrocamento executado sobre filtro geotêxtil em uma cavidade junto ao pilar. A figura 3.21 ilustra a situação do tapete de enrocamento sobre filtro geotêxtil sem a escavação em torno do pilar.

Os pilares também podem ser protegidos simplesmente com a colocação de camadas de pedras em torno das fundações, formando um tipo de enrocamento também conhecido na literatura como rip rap, conforme as figuras 3.22 e 3.23.

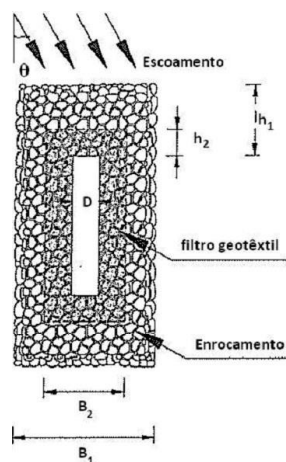


Figura 3.19 - Planta esquemática de um tapete de enrocamento sobre filtro geotêxtil para proteção da fundação de uma ponte. (Fonte: FAEL e CARDOSO, 2013)

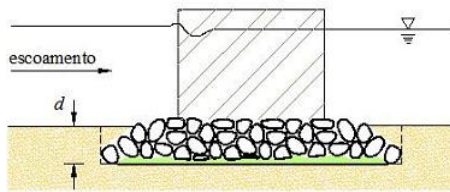


Figura 3.20 - Corte esquemático de tapete de enrocamento com escavação.
(Fonte: FAEL e CARDOSO, 2013).

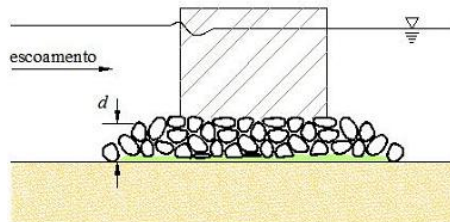


Figura 3.21 - Corte esquemático de tapete de enrocamento sem escavação.
(Fonte: FAEL e CARDOSO, 2013).

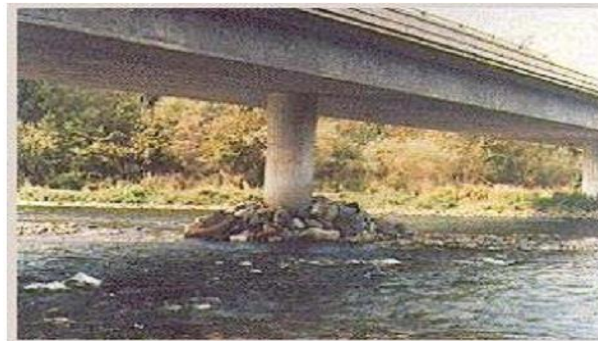


Figura 3.22 - Proteção de pilar com a utilização de enrocamento conhecido como rip rap.
(Fonte: GUILTELMAN, 2012)



Figura 3.23 - Proteção de pilares e encontros com enrocamento tipo rip rap. (Fonte: CALDAS, 2015)

Também são geralmente utilizados outros tipos de proteção dos pilares e fundações contra a erosão conforme relação a seguir:

- Tapete de colchão reno;
- Filtros geotêxteis e filtros granulares;
- Sacos de argamassa;
- Blocos de concreto com geometrias diversas, conforme ilustração da figura 3.24.

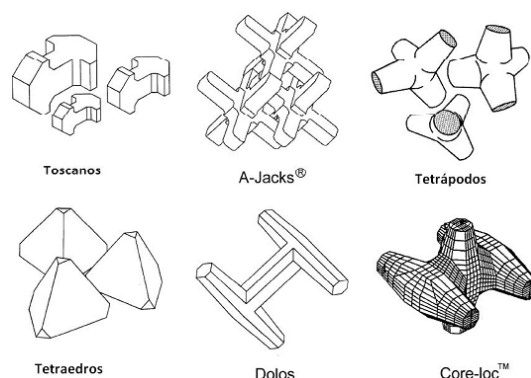


Figura 3.24 - Blocos de concreto com geometrias diversas pra proteção de pilares de pontes contra a erosão.

Existem também outros dispositivos contra a erosão que, ao contrário dos enrocamentos, rip raps, sacos de argamassa, blocos de concreto, entre outros que protegem as fundações com base nas características do escoamento, protegem alterando essas características.

Esses tipos de proteção têm sido estudados por pesquisadores em diversos países, principalmente por meio de modelos de laboratórios, sendo alguns deles parcialmente validados e outros ainda não.

A figura 3.25 mostra seis desses dispositivos, que são: a) “cata-ventos” submersos, b) soleira no leito do rio, c) pilares de sacrifício, d) colar, e) cabos e f) ranhura. As eficiências de cada um foram obtidas por meio de ensaios e estão relacionadas a seguir segundo CALDAS (2015)

Os “cata-ventos” submersos se mostraram eficientes apenas nas sete primeiras horas de ensaio e reduziram em 12,4% a profundidade de erosão; a soleira no rio reduziu a cavidade de erosão em 14,3%; os pilares de sacrifício chegaram a reduzir a erosão em até 32,2% mas o efeito desse dispositivo tende a diminuir com o tempo; o colar em torno do pilar com diâmetro três vezes maior, num leito arenoso conseguiu uma redução de 28,7%; os cabos em torno do pilar proporcionou a menor redução da profundidade de erosão (8,7%). Finalmente, a ranhura, chegou a reduzir a profundidade de erosão em até 33,2%.

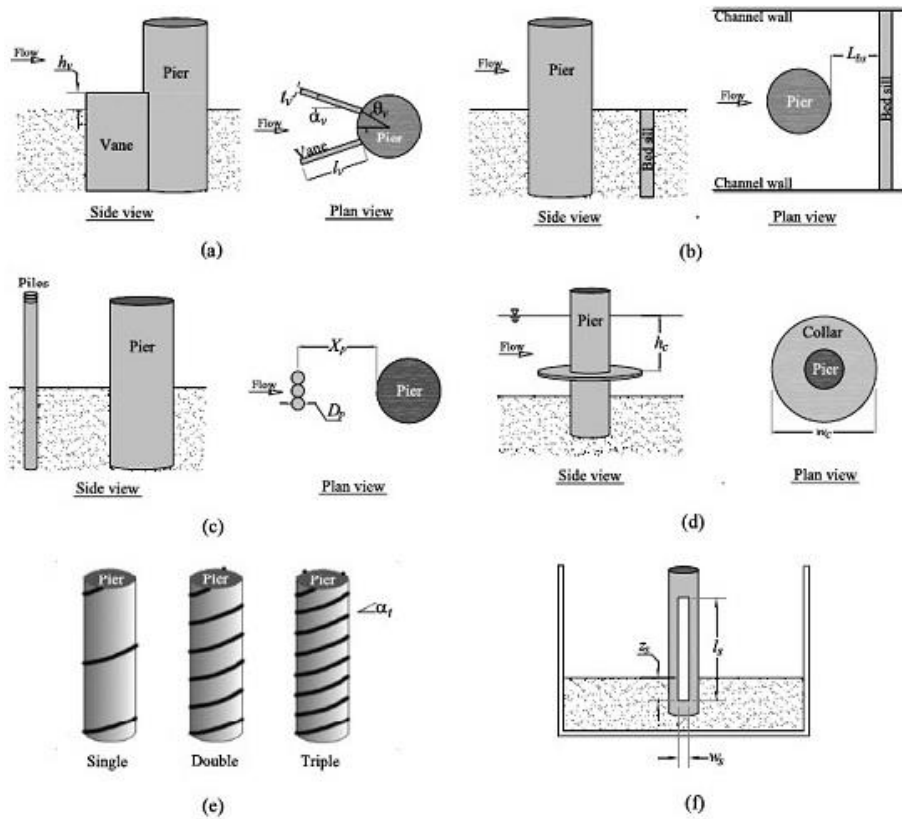


Figura 3.25 - Seis dispositivos atualmente pesquisados para reduzir a profundidade da erosão em torno de pilares de pontes. (Fonte: CALDAS, 2015)

4 - EROSÃO NOS ATERROS DE ACESSO

Os aterros de acesso são responsáveis pela ligação entre a ponte e a rodovia; constituem-se em elementos importantes para a funcionalidade e a segurança da obra, bem como para a integridade dos usuários.

Porém, os aterros também podem ser elementos causadores de graves problemas relacionados à erosão nas extremidades das pontes. A ruptura desses maciços de terra é responsável por significativa quantidade de acidentes estruturais em Obras de Arte Especiais e muitas delas já necessitaram ser parcialmente ou totalmente interditadas por causa da destruição dos taludes e do núcleo do aterro.

Em algumas situações limites a ruptura de um aterro de acesso pode comprometer a estabilidade da própria ponte, acarretando grandes prejuízos materiais e até a perda de vidas humanas.

A primeira etapa para evitar, ou pelo menos diminuir, a possibilidade de problemas é a elaboração de um bom projeto que defina detalhadamente todas as especificações necessárias para diminuir essa reconhecida deficiência na transição entre a rodovia e a ponte.

Uma questão importante é a proteção dos taludes nos trechos adjacentes à ponte. O DNIT (2004) recomenda que a proteção superficial deve ser feita em trechos com comprimentos não inferiores a três vezes a altura do aterro de acesso. Os tipos de proteção mais usualmente utilizados são: vegetação, pedras argamassadas, concreto, gabiões, etc.

Especial atenção deve ser dada aos aterros de acesso das pontes com extremidades em balanço, que representem uma situação para a qual não se consegue uma boa compactação pelo fato de os aterros serem executados após a construção da ponte. A excessiva movimentação dos balanços extremos do tabuleiro também contribui para aumentar as deficiências dos aterros.

Nos viadutos localizados dentro de centros urbanos, onde a limitação dos espaços impossibilita a existência de taludes, os aterros de acesso são geralmente executados com estruturas de contenção denominadas terra armada (ou solo armado) que consistem na utilização da resistência interna do solo associada a materiais de construção convencionais (concreto e aço). A aderência das armaduras, constituídas por tiras de aço ou de materiais extensíveis (polímeros) garantem a estabilidade das placas pré-moldadas das paredes de contenção, conhecidas como escamas, que são encaixadas entre si garantindo assim a estabilidade do maciço.

As figuras seguintes mostram os tipos mais usuais de aterros de acesso das pontes típicas das rodovias brasileiras. Tais situações se referem a aterros apoiados em solos com boa capacidade de suporte, tendo em vista que os aterros sobre solo mole, que serão apresentados em seguida, devem passar por análises especiais que definam as soluções apropriadas para cada caso por

conta dos problemas causados pela elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento.

A figura 4.1 mostra um detalhe típico de projeto de uma ponte com extremidades em balanço. A ligação com o aterro de acesso é feita por taludes com inclinação 3:2 (horizontal: vertical) até a cota do terreno natural. A parte superior do talude do aterro sob a ponte é contido pela cortina frontal na extremidade do tabuleiro e lateralmente pelas duas alas. A laje de transição (chamada de laje de aproximação nas pontes mais antigas) realiza a compensação de possíveis adensamentos do aterro.

Na figura 4.2 pode ser observada uma ponte com extremidades em balanço construída com o mesmo tipo de aterro de acesso, cujos taludes foram protegidos por uma camada de concreto moldada no local, com uma malha de armaduras para evitar deformações e fissuração. A solução garante uma eficaz proteção e também contempla um dissipador de energia para diminuir a velocidade da água sobre o talude.

A figura 4.3 mostra uma ponte também com extremidades em balanço, cujos taludes dos aterros de acesso foram protegidos por uma camada de alvenaria de pedras argamassadas e com recravas no terreno natural para evitar a erosão na base do aterro. Trata-se de uma solução razoavelmente eficiente porque garante alguma impermeabilização ao aterro, mas se trata de uma proteção rígida sem resistência à tração, sensível a deformações dos taludes e a infiltrações de águas se os rejuntas da alvenaria de pedras não forem bem executados.

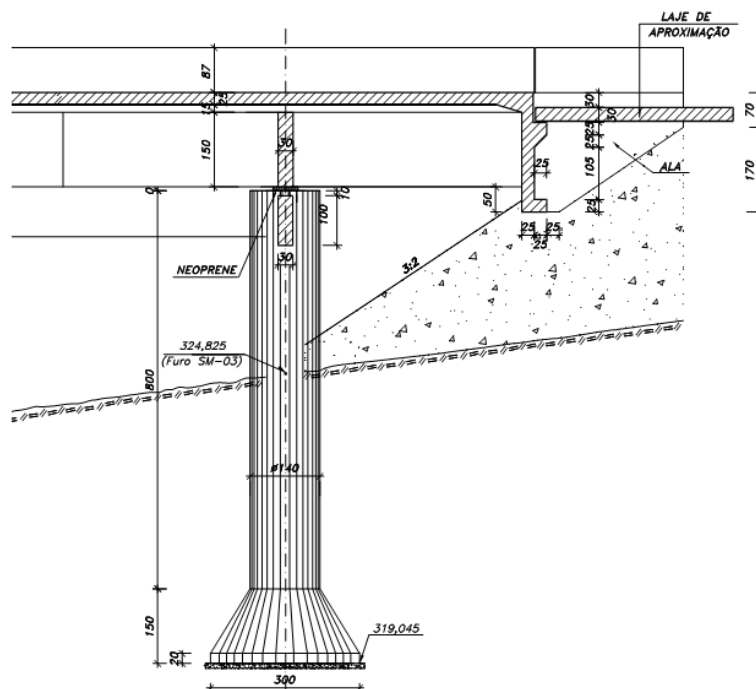


Figura 4.1 - Detalhe típico do aterro de acesso em uma ponte com extremidades em balanço, mostrando a inclinação adotada, as cortinas, as alas e a laje de transição. (Fonte: VITÓRIO, 2007).



Figura 4.2 - Proteção do talude do aterro de acesso de ponte com extremidades em balanço com uma camada de concreto e um dissipador de energia para a descida das águas. (Fonte: acervo do autor)



Figura 4.3 - Várias vistas dos taludes dos aterros de acesso de uma ponte rodoviária com extremidades em balanço. Os aterros foram protegidos com alvenaria de pedras argamassadas. (Fonte: acervo do autor)

Outra forma de projetar os aterros de acesso é ilustrada na figura 4.4 que mostra o projeto de uma ponte com fundações em estacas raiz executadas no solo e em rocha, cujos aterros tinham grandes alturas; para viabilizá-los e evitar a construção de um encontro pesado, que aumentaria significativamente os custos da obra, optou-se pela execução do aterro em duas fases.

Na primeira fase do aterro a crista do talude inferior coincidiu com a cota da base do talude superior, mantendo uma banquetas de 4,00m de largura, nas laterais e sob o tabuleiro junto à travessa, para que o maciço compactado pudesse garantir o confinamento das estacas ao longo da espessura do aterro. Na segunda fase foi projetado um talude cuja crista coincidiu com a cota

do greide da rodovia e a base coincidiu com a cota da face inferior da travessa extrema (crista do talude da 1ª fase do aterro).

Na figura 4.5 está detalhada a forma adotada para proteger os taludes da erosão para essa solução de aterro. Observa-se que na parte inferior do talude foi utilizado gabião tipo caixa em duas camadas com recravas no terreno natural, se estendendo até acima da cota de máxima enchente. Acima do gabião, foi prevista proteção vegetal para toda a superfície do talude.

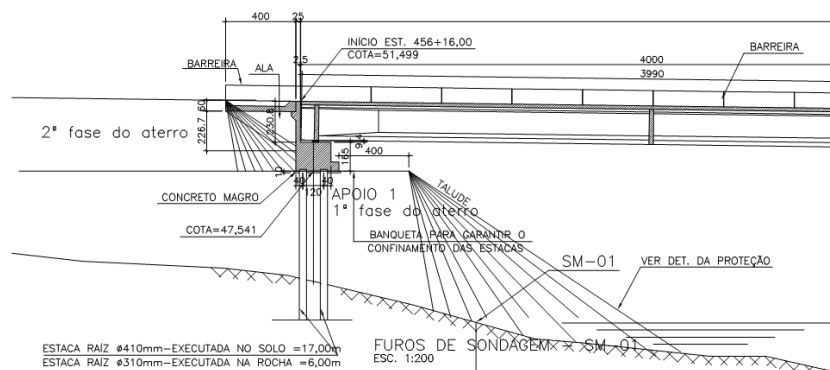


Figura 4.4 - Detalhe do projeto de uma ponte com fundações em estacas cujos taludes dos aterros de acesso foram executados em duas fases. (Fonte: VITÓRIO, 2014)

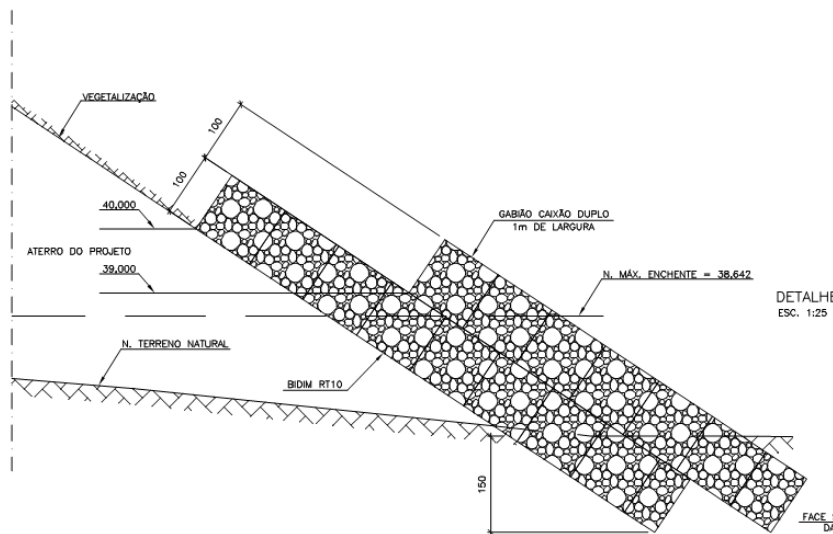


Figura 4.5 - Detalhe da solução adotada para a proteção das bases dos taludes contra a erosão. (Fonte: VITÓRIO, 2014)

A situação seguinte, ilustrada pela figura 4.6, representa os casos típicos de viadutos construídos em vias urbanas onde, na maioria das vezes pela falta de espaço, não existe a possibilidade de os aterros de acesso serem constituídos por um núcleo e dois taludes laterais. Nesses casos, adota-se o sistema de contenção conhecido como terra armada, que elimina totalmente os taludes e representa uma boa solução técnica por eliminar também a possibilidade de erosão nas saias dos aterros, caso sejam executados na forma convencional.

Porém, essa solução que traz como vantagens a rapidez de execução pelo uso de peças pré-moldadas de concreto, a redução do uso de espaços públicos pela ausência de taludes, a possibilidade de conter aterros com até 20m de altura e uma boa durabilidade, desde que com manutenção adequada, também apresenta algumas desvantagens, sendo as mais frequentes o desaprumo das escamas e danos nas arestas, que facilitam a infiltração de água no aterro com perda de compactação e a ocorrência de patologias no concreto das escamas.

Outra desvantagem dessa solução é de natureza social pois, dependendo da extensão das rampas de acesso das contenções em terra armada, existe a sensação de confinamento e isolamento do espaço urbano onde os viadutos são implantados. Isso tem sido motivo de muitas reclamações de comunidades localizadas nas vias marginais dessas obras, que além do problema do confinamento também são obrigadas fazer grandes percursos para chegar ao outro lado da via, como mostra a figura 4.7.

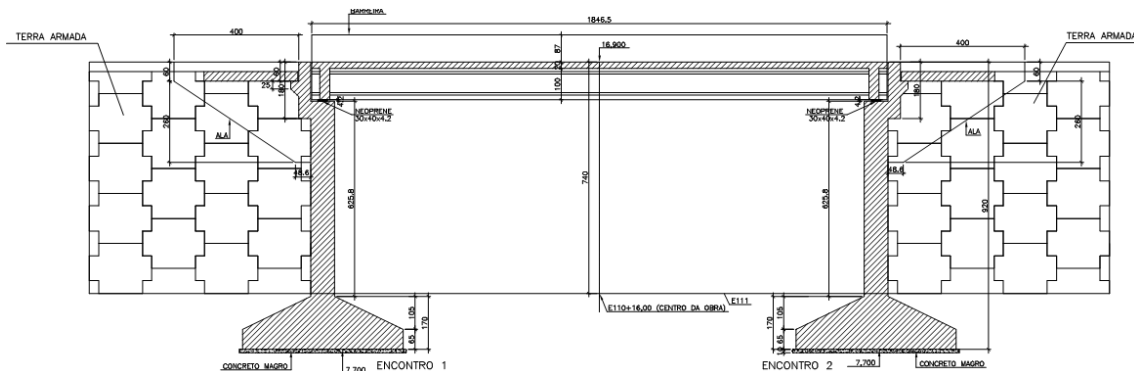


Figura 4.6 - Detalhe de um viaduto urbano com sistema de contenção dos aterros de acesso em terra armada. (Fonte: VITÓRIO, 2012)



Figura 4.7 - Grande extensão de uma contenção de aterro de um viaduto urbano com terra armada, gerando a sensação de confinamento aos moradores das vias marginais. Observa-se também o surgimento de vegetação e outras patologias decorrentes de infiltrações e de falhas na fixação das escamas de concreto. (Fonte: acervo do autor)

4.1 - Principais problemas relacionados aos aterros de acesso

Observa-se com certa frequência, a ruptura parcial ou total dos aterros nas extremidades das pontes. Isso ocorre devido a perturbações do equilíbrio das terras junto a tais descontinuidades do maciço estradal, à infiltração de água entre o terrapleno e a deficiências na proteção e na drenagem dos taludes.

Os aterros de acesso são, portanto, elementos vulneráveis e que muito contribuem para a ocorrência de acidentes estruturais nos quais são evidenciadas falhas construtivas, de projeto e de manutenção como:

- Falta de adequada compactação do maciço e dos taludes;
- Deficiências (ou até a ausência) da proteção e da drenagem dos taludes;
- Locação inadequada da ponte;
- Desvios do leito original do rio;
- Concepção inadequada dos encontros;
- Ausência ou insuficiências de lajes de transição, cortinas e alas nas extremidades das pontes.

Tais questões tornam-se ainda mais graves nos casos das pontes sem encontros e com as extremidades em balanços, cujos aterros de acesso se tornam mais deficientes pela má compactação do maciço e a fragilidade dos taludes, muitas vezes construídos dentro da calha do rio. As saias dos aterros sofrem erosões ao longo do tempo e são geralmente destruídas durante grandes precipitações e cheias. Outro fator que contribui para o surgimento de danos é a deformação dos balanços do tabuleiro sobre o maciço, ocasionando vibrações e deslocamentos.

4.2 - Exemplos de danos e colapsos em aterros de acesso

A seguir são relacionados e comentados casos de pontes que sofreram as consequências da destruição dos aterros de acesso, que variaram desde a interdição do tráfego até o colapso total, inclusive com a perda de vidas humanas em alguns desses acidentes.

Um dos casos de desabamento mais conhecidos e comentados no Brasil foi o da ponte sobre a represa do Rio Capivari-Cachoeira, na rodovia federal Regis Bittencourt (BR 116/PR) ocorrido em janeiro de 2005, que causou a morte de uma pessoa e ferimentos em outras três.

A causa do colapso estrutural de um dos vãos da ponte foi a ruptura do aterro de acesso na transição entre a ponte e a rodovia, mostrado na figura 4.8. Ficou demonstrado que o aterro não passava por manutenções havia muito tempo, não tinha a devida proteção, nem uma drenagem adequada e ainda sofria a ação de erosão. Essas combinações de deficiências fez com que o

aterro rompesse durante a ocorrência de fortes chuvas, devido ao súbito aumento da erosão e da infiltração de água no maciço.

Ao romper, o aterro transmitiu uma força de grande intensidade aos pilares adjacentes, que entraram em colapso e fizeram um trecho da ponte desabar no exato instante em que passava um caminhão, cujo motorista morreu.

Na época, o Ministério Público Federal do Paraná propôs uma ação de improbidade administrativa contra os coordenadores do DNIT naquele Estado pela ausência de manutenção da ponte.



Figura 4.8 - Aspectos do desabamento da ponte sobre a represa do Rio Capivari na BR 116/PR. (Fonte: Internet)

O caso mostrado na figura 4.9 refere-se a uma ponte sem encontros na rodovia Pe-096 que teve os dois aterros de acesso totalmente destruídos durante uma cheia do rio Una, que atingiu os taludes que se encontravam totalmente desprovidos de proteção e de drenagem. A ruptura dos aterros causou a interdição do tráfego que só foi restabelecido após a colocação de pontes provisórias pelo exército. Posteriormente os aterros foram reconstruídos de acordo com os procedimentos técnicos adequados para as obras de terra, mas a ponte continuou vulnerável pelo fato de o projeto original ter sido concebido com uma tipologia que torna as extremidades da ponte incompatíveis com o bom desempenho dos aterros de acesso à erosão.



Figura 4.9 - Destruição de aterro de acesso de ponte sem encontros e com o restabelecimento temporário do tráfego através de ponte provisória. (Fonte: acervo do autor)

A destruição parcial da saia do talude do aterro de uma ponte na rodovia PE-097, mostrada na figura 4.10 representa uma situação típica das pontes com extremidades em balanço, uma das tipologias mais utilizadas no Brasil. Nesses tipos de pontes geralmente ocorrem erosões nas saias dos aterros, mesmo quando existe algum tipo de revestimento, como é o caso dessa ponte cujo talude revestido com alvenaria de pedras sofreu erosão que teve uma grande influência da alteração do traçado da calha original do rio pela construção de uma pequena barragem à montante. A solução para o problema envolveu estudos hidrológicos e a retificação da calha para o restabelecimento das condições para as quais a ponte foi projetada.



Figura 4.10 - Destrução do talude devido a alterações no leito do rio. (Fonte: acervo do autor)

No caso a seguir, da ponte sobre rio Tapacurá na rodovia PE-050 mostrado na figura 4.11, houve a ruptura de todo o maciço do aterro de acesso em uma das extremidades da obra durante uma grande cheia em 2005. O colapso do aterro causou um acidente automobilístico no qual morreram quatro pessoas.

Pela simples visualização da figura é possível perceber que a ponte foi projetada com comprimento insuficiente e que os aterros das extremidades estavam localizados dentro da calha do rio, condição que os tornaram ainda mais vulneráveis aos efeitos da cheia. A ponte deveria ter sido projetada com o comprimento ampliado para se adequar às condições do rio, porém, infelizmente, mesmo após a ocorrência do acidente isso não foi feito. Os aterros de acesso foram reconstruídos da forma original antes do acidente e a ponte continuou com o mesmo nível de vulnerabilidade à ação das cheias.



Figura 4.11 - Destrução total do aterro de acesso executado dentro da calha do rio. (Fonte: acervo do autor)

A ponte sobre o rio Una na cidade de Palmares-PE, com 90m de extensão e extremidades em balanços teve os dois aterros de acesso destruídos por uma cheia em 2010. Um estudo preliminar após o acidente indicou que havia um estrangulamento da calha do rio e que o comprimento da obra (5 vãos de 16m + 2 balanços de 5m) era insuficiente, pois os dois aterros de acesso, mesmo protegidos por gabiões, ocupavam aproximadamente 45m dentro do canal do rio, de modo que a ponte deveria ter sido construída com pelo menos 135m de extensão.

Outro fator que contribuiu para o aumento da intensidade da pressão dinâmica da água foi a grande quantidade de pilares dentro do rio.

Foi proposta uma solução visando aumentar o comprimento da ponte em 45m e evitar os aterros dentro do rio, porém a recomendação não foi acatada, os aterros foram reconstituídos conforme eram originalmente e a ponte continuou com a mesma condição de vulnerabilidade que tinha antes.

Na figura 4.12 pode ser observada a destruição de um dos aterros e da retenção de detritos pelos pilares da ponte, o que aumentou a intensidade e os efeitos da pressão da água. A figura 4.13 mostra uma vista aérea da ponte após a destruição dos aterros de acesso.



Figura 4.12 - Destruição dos aterros de acesso e retenção de material sólido pelos pilares da ponte. (Fonte: acervo do autor)



Figura 4.13 - Vista aérea da ponte após a destruição dos aterros de acesso pela cheia. (Fonte: G1, 2010)

4.3 - Algumas soluções para recuperação dos aterros de acesso danificados

Os problemas anteriormente relacionados, contribuíram diretamente para os danos e colapsos de aterros de acesso que depois de danificados ou destruídos, necessitaram ser adequadamente reconstruídos para restabelecer as condições de tráfego das pontes e também evitar, ou pelo menos minimizar, repetições das falhas que causaram os colapsos dos maciços de terra.

Mesmo assim, considerando as suas vulnerabilidades à ação das águas e aos efeitos da erosão, especialmente durante as cheias, os problemas ainda continuarão a existir por se tratarem de elementos com fragilidades conceituais. Para o restabelecimento dos aterros destruídos algumas soluções têm sido adotadas com razoáveis eficiências, mas qualquer alternativa utilizada para a recuperação dos aterros danificados ou destruídos deverá constar de uma boa compactação, proteção dos taludes e de um eficiente sistema de drenagem a ser estudado em cada caso, que certamente deverá ter canaletas na base e no topo dos taludes e outros dispositivos como drenos, dissipadores de energia, etc.

A proteção vegetal é a solução mais usual, por ser a de menor custo, porém, pela própria natureza, a que requer manutenção e reposição mais constante, o que dificilmente acontece com as pontes no Brasil. As soluções que têm sido utilizadas com maior êxito e que apresentam boa durabilidade, são as proteções dos taludes com uma camada de concreto moldada no local, com placas pré-moldadas de concreto ou com gabiões.

A figura 4.14 mostra a reconstrução dos taludes destruídos utilizando proteção com concreto moldado no local; a figura 4.15 apresenta uma solução com gabiões para recompor um aterro também destruído por uma cheia.



Figura 4.14 - Reconstrução de aterro de acesso protegido por concreto moldado no local.
(Fonte: acervo do autor)



Figura 4.15 - Reconstrução de aterro de acesso com proteção em gabões. (Fonte: acervo do autor)

Muitas vezes a destruição dos aterros de acesso de uma ponte não acontece durante uma cheia ou por causa de uma grande precipitação pluviométrica, que destrói os taludes desprotegidos. Existem situações, como a mostrada a seguir nas figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 nas quais a destruição acontece precocemente, sem que aconteçam grandes chuvas ou cheias e é provocada por falhas de projetos, como é o caso de uma ponte com extremidades em balanço, cuja concepção de projeto contribuiu de forma determinante para a destruição dos aterros que tiveram que ser recompostos com a utilização de gabões.

A figura 4.16 mostra um corte longitudinal da ponte com os balanços curtos e os taludes com inclinação completamente fora dos padrões. Na figura 4.17 pode ser vista a fuga do material do aterro sob as cortinas de alturas insuficientes nas extremidades dos balanços, com uma forma precária de contenção provisória, pois o pavimento já começava a ceder na ligação entre a ponte e a rodovia, desestabilizando o talude e começando a destruir a base do pavimento asfáltico.

A figura 4.18 ilustra a primeira alternativa para solucionar o problema com muro de contenção em gabião tipo caixa, que mesmo sendo uma solução eficiente, apresentou custos muito altos. Optou-se então por uma segunda concepção, mostrada na figura 4.19 utilizando-se gabião tipo manta e colchão reno que foi a escolhida, por se tratar de uma recomposição dos taludes com a inclinação adequada e revestidos com material flexível e com capacidade de absorver as deformações dos taludes sob a ponte e nas laterais, com um menor custo. Essa solução também foi adotada para 17 pontes do trecho, que tinham a mesma tipologia e os mesmos problemas.

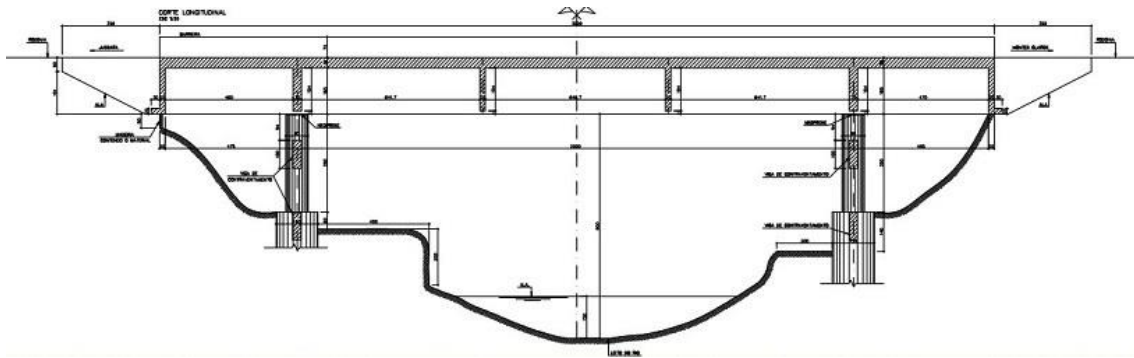


Figura 4.16 - Perfil longitudinal da ponte mostrando os taludes irregulares e fora dos padrões, além ausência de lajes de transição e alas e cortinas insuficientes. (Fonte: VITÓRIO, 2017)



Figura 4.17 - Fuga do material do talude sob as cortinas, nas extremidades dos balanços, cujas alturas são insuficientes, desestabilizando o aterro de acesso e o pavimento. (Fonte: acervo do autor)

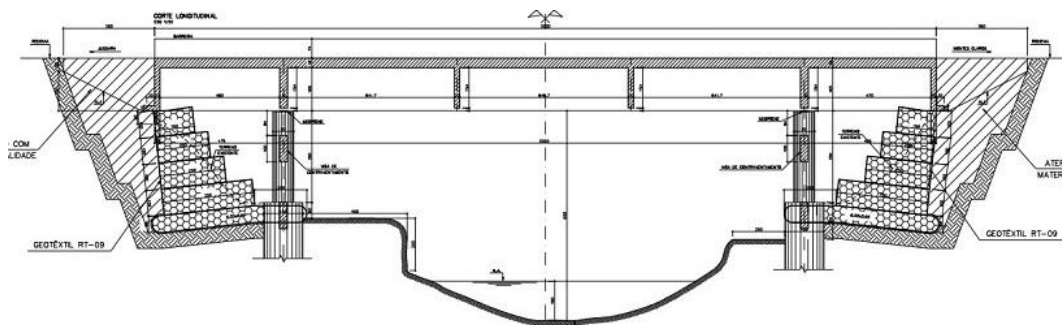


Figura 4.18 - Primeira alternativa de solução com muros de contenção em gabiões caixa. (Fonte: VITÓRIO, 2017)

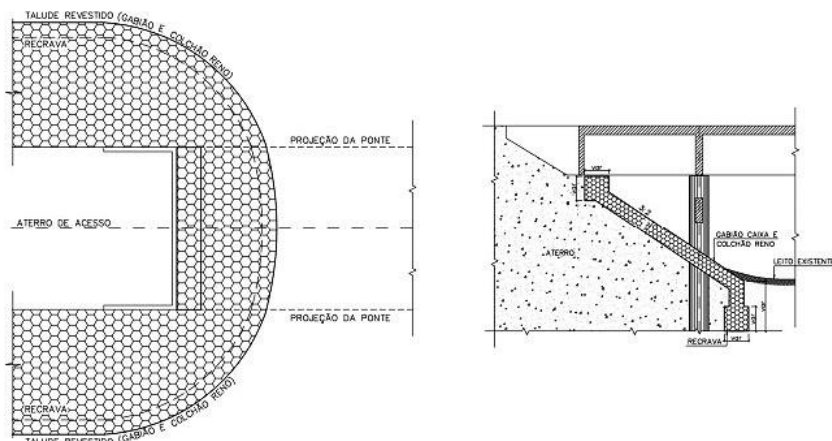


Figura 4.19 - Segunda alternativa de solução (a escolhida) com colchão reno e gabião tipo caixa. (Fonte: VITÓRIO, 2017)

4.4 - Aterros de acesso sobre solo mole

Os aterros das extremidades das pontes exercem sobre o solo natural um acréscimo de carga que pode gerar esforços nas fundações por causa dos deslocamentos transversais.

De modo geral, nos solos de boa qualidade, esses esforços não são considerados no dimensionamento estrutural pelo fato de apresentarem valores insignificantes.

Porém, quando o aterro é executado sobre determinados tipos de solos, conhecidos como solos moles, os efeitos de tais esforços necessitam ser analisados com muito cuidado para que não causem problemas relacionados à segurança da ponte.

Os solos moles se caracterizam pela grande compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento; têm geralmente a presença de material orgânico, como turfa e argila orgânica. Em tais situações são adotadas soluções para garantir a estabilidade e diminuir os recalques dos aterros, destacando-se o uso de geogrelhas, geodrenos, pré-carregamento, reforço com geossintéticos, bermas de equilíbrio e aterros estaqueados. Também se faz necessário estudar com profundidade as fundações das pontes para resistirem aos esforços horizontais decorrentes da movimentação das camadas de solo mole.

A figura 4.20 mostra o esquema da extremidade de uma ponte cujo aterro de acesso está sobre camada de solo compressível, com as cargas transmitidas pelo aterro e os esforços sobre as estacas verticais que atravessam a camada de solo mole, que são o atrito negativo (AN) que corresponde a um acréscimo de carga axial devido a um recalque da camada de solo mole, e as pressões horizontais nas estacas (Ph), que precisam ser bem avaliadas e dependem dos seguintes fatores (ALONSO, 2006):

- Características da camada compressível;
- Grandeza da carga unilateral;
- Rigidez relativa entre o solo e a estaca;
- Geometria do estaqueamento e condições de contorno;
- Posição relativa entre a estaca e a sobrecarga;
- Tempo a partir da instalação das estacas.

Existem vários métodos pra avaliar as pressões horizontais nas estacas como os empíricos, entre os quais se destacam os de Tschebotarioff (1973) e o de De Beer – Wallays (1972). Ambos os métodos adotam simplificações que eram válidas na época em que foram propostos, mas que atualmente não mais representam a realidade dos fenômenos envolvidos. Por isso, a norma DNER-PRO 381/98 recomenda que seja realizada uma análise numérica de tensões e deformações sobre o aterro de solo mole com o uso de modelos em elementos finitos.

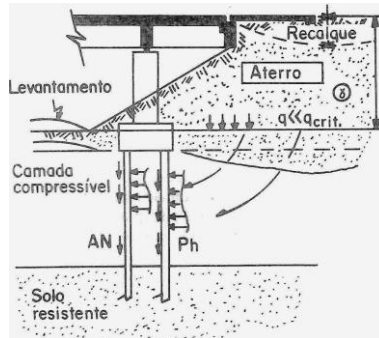


Figura 4.20 - Esquema do comportamento do conjunto e dos esforços atuantes nas fundações em estacas, em uma situação de aterro sobre solo mole na extremidade de uma ponte. (Fonte: ALONSO, 2006)

Um exemplo dos danos causados pela presença de solo mole nos aterros de acesso de uma Obra de Arte Especial é mostrado a seguir nas paredes de contenção em terra armada de um viaduto sobre linha férrea.

No local onde o viaduto foi construído existe uma camada de argila orgânica com espessura variável e a solução adotada para as fundações foi estacas metálicas adequadamente dimensionadas e atravessando a camada de argila até uma camada existente, de modo que não aconteceu qualquer problema estrutural no viaduto. Acontece que o projeto da terra armada para os aterros de acesso, elaborado por outro profissional/empresa, adotou para as fundações das escamas uma sapata corrida insuficiente para atender aos deslocamentos causados pela camada de solo mole, o que evidentemente causou recalques de tal magnitude que danificaram as escamas e causaram uma acentuada rotação em uma laje de transição que danificou o console de apoio e a cortina, como mostram as figuras 4.21 e 4.22.



Figura 4.21 - Vista da contenção em terra armada com a rotação da laje de transição causada pela deformação do aterro sobre camada de solo mole. (Fonte: acervo do autor)



Figura 4.22 - Graves danos causados na cortina e no console pela rotação da laje de transição.
(Fonte: acervo do autor)

Uma solução bastante eficaz para garantir a estabilidade dos aterros sobre solo mole junto aos encontros de pontes é o aterro estaqueado (ou laje estaqueada) que transfere a carga do aterro diretamente às camadas mais resistentes do subsolo, aliviando assim a camada compressível, evitando o recalque e minimizando os esforços adicionais nas estacas da ponte, originados pelo movimento da camada de solo mole.

O método consiste no emprego de uma malha, geralmente quadrada, de estacas que recebe no topo um capitel de concreto armado, ou uma laje esbelta com capitéis em torno das estacas. Após a conclusão da laje estaqueada o aterro compactado é executado de forma convencional.

Essa solução, ilustrada na figura 4.23, foi adotada em duas pontes na BR 101/PE: Ponte sobre o Canal de Goiana e Ponte sobre o Rio Tracunhaém. Os projetos das lajes estaqueadas foram elaborados por Vitório & Melo Projetos Estruturais e Consultoria Ltda. em 2009.

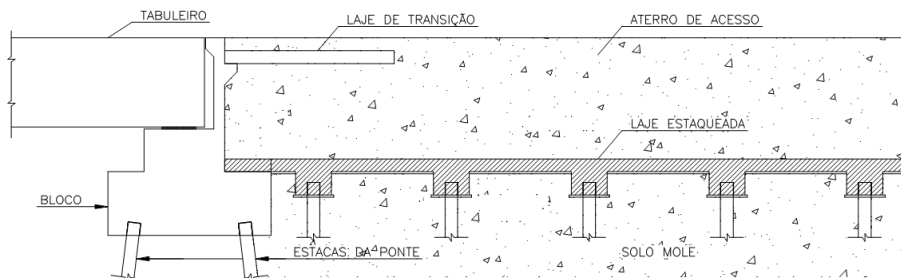


Figura 4.23 - Projeto de laje estaqueada para aterro de acesso sobre camada de solo mole em duas pontes da BR 101/PE. (Fonte: VITÓRIO, 2009)

Outra solução que também é muito adotada para o reforço de solos moles nos aterros junto aos encontros de pontes é a utilização de geosintéticos, como é o caso das geogrelhas, conforme a figura 4.24, que mostra uma ponte na BR 101/SC.



Figura 4.24 - Aplicação de geogrelha para reforço de solo no aterro de acesso de uma ponte.
(Fonte: MACCAFERRI).

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos que envolvem o fenômeno da erosão, e os seus efeitos sobre as pontes rodoviárias apresentados neste texto, fazem parte da literatura internacional disponível sobre esse tema que tem sido objeto de estudos por pesquisadores em muitos países do mundo, mas no Brasil ainda existe uma lacuna de literatura técnica especializada, com algumas exceções. Isso mostra que se faz necessário ampliar a produção do conhecimento em uma área que passa por uma constante atualização, exigida principalmente pelo processo de mudanças climáticas e ambientais que tem interferido nos regimes dos rios, nos períodos recorrência e nas intensidades das cheias.

Nesse sentido, os problemas causados pela erosão nas estruturas e nos aterros de acesso de pontes típicas localizadas em rodovias federais, estaduais e municipais que foram mostrados neste trabalho, representam apenas uma pequena amostra das questões que envolvem a ação do fenômeno sobre as Obras de Arte Especiais que compõem a malha viária brasileira.

Mesmo considerando a complexidade que envolve os efeitos da erosão e das cheias, que muitas vezes extrapolam as previsões sobre capacidade de causar danos nas pontes, ficou evidente que as obras apresentadas já sinalizavam a existência de vulnerabilidades quanto à possibilidade de colapso, da estrutura e/ou dos aterros de acesso.

Isso pôde ser constatado nos casos em que foram elaborados laudos de inspeções para determinar as causas dos acidentes estruturais e também dos estudos que se fizeram necessários para a elaboração de projetos de reforço e recuperação das obras danificadas, ou até para a substituição daquelas que colapsaram e não puderam ser recuperadas.

De modo geral, as obras apresentavam há muito tempo sinais de erosões nas fundações, além de deficiências ou ausência de drenagem e de adequada proteção dos taludes dos aterros. Na maioria dos casos também existiam não conformidades relacionadas à insuficiência da seção de vazão. Por se tratarem de pontes antigas, executadas com as limitações de projetos e de construções da época, tinham grande quantidade de pilares dentro dos rios o que se constituiu em um fator agravante e, muitas vezes até determinante para a ocorrência de erosões localizadas e estrangulamentos da seção de vazão.

Uma questão que se mostrou bastante evidente nos casos apresentados neste trabalho foi a maior vulnerabilidade das pontes com extremidades em balanço, cujos aterros de acesso se constituem em elementos de grande sensibilidade aos efeitos danosos da erosão. Considerando que dados do DNIT publicados por MENDES (2009) mostram que entre as pontes cadastradas nas rodovias federais 50% possuem um vão e dois balanços, é de se esperar que exista também um percentual significativo de tal tipologia nas rodovias estaduais e municipais. Isso significa que, além dos aspectos relacionados à ausência de manutenção, uma grande quantidade das

pontes rodoviárias antigas foi projetada com uma tipologia estrutural conceitualmente frágil aos efeitos da erosão nos aterros de acesso.

Porém, a questão dos efeitos da erosão sobre as estruturas das pontes só será abordada adequadamente se analisada no contexto de uma visão mais abrangente, que considere a prática da manutenção das Obras de Arte Especiais como um todo que, infelizmente representa um problema crônico e de consequências altamente danosas para o setor produtivo e para a sociedade em geral.

Sabe-se que a adoção de providências bastante simples, como a realização de inspeções periódicas para verificar a ocorrência de erosões nas margens dos rios e a realização de correções para evitar a evolução do processo (que muitas vezes só necessita de algum tipo de proteção nas margens), já contribuiria para pelo menos minimizar o problema enquanto não fossem realizadas intervenções definitivas.

Medidas preventivas bastante simples também podem ser adotadas para estabilizar as saias dos aterros de acesso com a utilização de enrocamentos, gabiões, rip raps, etc.

Uma das principais origens da ação erosiva que provoca o colapso de pontes é o estrangulamento da seção de vazão sob a obra, muitas vezes decorrente de um erro na etapa de projeto, causado pela busca da economia a qualquer custo que às vezes leva à diminuição do comprimento da ponte. Esse erro geralmente é amplificado pela falta de um acompanhamento periódico do assoreamento, da retenção de sólidos, das alterações do eixo e do regime do rio.

Sabe-se que no Brasil a busca desenfreada pela economia na elaboração dos projetos de pontes, que começa com a má remuneração dos projetistas, chega ao ponto de diminuir até a quantidade das sondagens geotécnicas que seriam necessárias para melhor identificar o solo de fundação. Isso, associado ao descaso com a conservação, traz consequências danosas para os usuários que pagam por esses bens públicos e muitas vezes são obrigados a utilizá-los sem as condições mínimas de funcionalidade e estabilidade, conforme comprova o significativo aumento dos acidentes estruturais com pontes e viadutos ocorridos nos últimos anos, alguns deles com perdas de vidas humanas.

Os exemplos apresentados neste texto mostram que o Brasil ainda está muito longe de alcançar um estágio aceitável no que se refere à manutenção das obras de infraestrutura fundamentais para o desenvolvimento do país. Basta lembrar que mais de 50% da malha viária encontra-se em estado deficiente, ruim ou péssimo e esse índice certamente deve ser ainda maior para as pontes e viadutos, pelo estado de deterioração que pode ser observado nas partes visíveis de suas estruturas. Muito provavelmente, os danos nas partes pouco visíveis podem ser ainda de maior magnitude.

Diante desse quadro, torna-se necessário o estabelecimento de metas voltadas para a boa qualidade das Obras de Arte Especiais do sistema viário brasileiro, como a elaboração de projetos baseados em estudos e dados consistentes, vários deles relacionados neste texto, e a realização de manutenções periódicas das pontes existentes como parte de um sistema mais amplo de gestão baseado em procedimentos técnicos apropriados, que contemple um rigoroso cadastro das obras com os danos identificados e inspeções feitas por profissionais devidamente treinados e qualificados.

Isso certamente irá garantir que essas importantes obras de infraestrutura sejam técnica e economicamente viáveis, com maior durabilidade, vida útil e principalmente funcionalidade e segurança para os usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACTION COST TU 1406. **Technical Report**, 2018.

ALONSO, U. R. **Dimensionamento de fundações profundas**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

BURGOS, R. D.F. VITÓRIO, J. A. P. **Ação das cheias sobre pontes rodoviárias da região da zona da mata-sul do Estado de Pernambuco**. Artigo publicado na Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife, 2017.

CALDAS, N.R.M.T. **Estudo numérico de um mecanismo de proteção contra a erosão em pilares de pontes**. Dissertação de Mestrado na Universidade do Porto, Portugal, 2015.

CARDOSO, R. A. F. **Infraescavação em pilares de pontes**. Dissertação de Mestrado na Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.

D.T.M.R. **Bridge scour manual**. State of Queensland, 2013

DNER. **Manual de projeto de Obras de Arte Especiais**, Rio de Janeiro, 1996.

DNER-PRO 381/98. **Projeto de aterros sobre solos moles**. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**, Rio de Janeiro, 2004.

FAEL, C. M. S; CARDOSO, A. H. **Métodos convencionais de proteção contra erosões localizadas junto de pilares e encontros de pontes**. Revista Recursos Hídricos, Volume 34, Nº 1, Lisboa, 2013.

FONSECA, M. I. J. **Estudos das erosões localizadas junto de grupos de estacas cilíndricas**. Dissertação de Mestrado na Universidade da Beira Interior, Portugal, 2011.

GUITELMAN, E. C.I. **Monitoreo de la erosion y sedimentacion de puentes**. XVI Congreso Argentino de Validad de Transito, Córdoba, 2012.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações de pontes – Hidráulica e Geotécnica**. Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

MACCAFERRI. **Aterro sobre solos moles**. Jundiaí, São Paulo.

MENDES, P. T. C. **Contribuição para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. Tese de Doutorado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NBR 7187. **Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto**. Rio de Janeiro, 2021.

NCRP REPORT 653. **Effects of debris on pier scour**. United States, 2006.

PERBONI, J. P. **Analises de estabilidade e de compressibilidade de aterro sobre solos moles – Caso dos aterros de encontros da Ponte sobre o Rio dos Peixes (BR 381)**. Dissertação de Mestrado na Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Minas Gerais, 2003.

PFEIL, W. **Pontes – Curso básico**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1983.

PFEIL, W. **Pontes em concreto armado**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1978.

VASQUEZ, J.A. LIMA, G. **Modelagem numérica bidimensional aplicada à hidrologia de pontes**. XVII Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

VITÓRIO, J. A. P. **Identificação e análise dos problemas causados pela erosão nas fundações de pontes com base em parâmetros hidrológicos, geotécnicos e estruturais**. XIII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, São Paulo, 2022.

VITÓRIO, J. A. P.. **Acidentes estruturais em pontes rodoviárias: Causas, diagnósticos e soluções**. II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2007.

VITÓRIO, J. A. P.. **Erosões nas fundações e aterros de acesso – Ação das cheias sobre as estruturas das pontes**. Notas de aula, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

VITÓRIO, J. A. P.. **Pontes rodoviárias – Fundamentos, conservação e gestão**. Livro editado pelo CREA-PE, Recife, 2002.

VITÓRIO, J. A. P.. **Reforço de fundações de pontes e viadutos rodoviários**. Seminário Pernambucano de Estruturas de Fundações, Recife, 2014.

VITÓRIO, J. A. P.; BARROS, R. M. M. C.. **Reforço de fundações de pontes e viadutos – Três casos reais**. V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2012.