

WORKSHOPS DE IDENTIFICAÇÃO DE MODOS DE FALHA:
DOCUMENTOS DE APOIO À APLICAÇÃO DO GUIA

Catálogo para Infraestrutura Viária



Expressamos nossa gratidão ao Japan Special Fund (JSF) por viabilizar esta publicação por meio da cooperação técnica RG-T3528: Implementação da metodologia para fortalecer a resiliência ao risco de desastres e à mudança climática nos projetos do BID.

Coautoria: A produção e disseminação deste Guia Metodológico e seus Catálogos foram coordenadas por Raimon Porta e Ginés Suárez, com as valiosas contribuições de Julia Ciano, María Alejandra Escovar e Adriana Zambrano. O desenvolvimento do conteúdo do Guia e a catalogação dos Modos de Falha foram realizados por Ignacio Escuder, Adrián Morales, Sandra Navarro e Helena Yarritu, equipe técnica da empresa consultora iPresas.

Agradecimentos: O processo de revisão técnica contou com a inestimável colaboração de Melissa Barandiarán, Karen Piñeros e Carolina Rogelis. O desenvolvimento do curso online de capacitação associado a este Guia foi realizado pela empresa TAEC com o apoio da equipe do INDES e o feedback de Álvaro Adam, Leandro Kazimierski e Luis Mora. A produção de conteúdo, sua publicação e difusão foram possíveis graças a Edoardo Brovero, Lara Chinarro, Wilhelm Dalaison, Maricarmen Esquivel, Patricia Henríquez, Sergio Lacambra, Roberto Leal, Katherine López, David Maier, Lidia Marcelino, Pamela Ogando, Harold Rodríguez e Serge Troch.

Design e diagramação: Alejandro Scaff.

Citação sugerida: Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Workshops de Identificação de Modos de Falha. Documentos de apoio à aplicação do Guia. Catálogo para Infraestrutura Viária.

Palavras-chave: modo de falha, infraestrutura, risco, desastre, resiliência, transporte.

Copyright©2025 Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Esta obra está sujeita a uma licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0 CÓDIGO LEGAL) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.pt>). Devem ser cumpridos os termos e condições indicados no link e deve ser feito o devido reconhecimento ao BID.

Qualquer disputa que surja sob esta licença e que não possa ser resolvida de maneira amigável será resolvida de acordo com o seguinte procedimento. Conforme notificação de mediação comunicada por meios adequados por você ou pelo outorgante da licença à outra parte, a disputa será submetida à mediação não vinculativa realizada de acordo com as Regras de Mediação da OMPI. Qualquer disputa que não puder ser resolvida de forma amigável será submetida à arbitragem conforme as regras da Comissão das Nações Unidas para o Direito Comercial Internacional (CNUDCI). O uso do nome do BID para qualquer finalidade que não seja o reconhecimento correspondente, bem como o uso do logotipo do BID, não está autorizado por esta licença e requer um acordo de licença adicional. Observe que o link URL inclui termos e condições que são parte integrante desta licença. As opiniões expressas nesta obra são dos autores e não refletem necessariamente os pontos de vista do Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva ou dos países que representa

Observe que o link URL inclui termos e condições que fazem parte integrante desta licença.

As opiniões expressas nesta obra são exclusivamente dos autores e não refletem necessariamente o ponto de vista do BID, de sua Diretoria Executiva ou dos países que representa.



Documentos de apoio à aplicação do guia: Catálogo para Infraestrutura Viária

Siglas e abreviações	4
1. Introdução	5
2. Características específicas para infraestrutura viária	6
2.1. Participantes	6
2.2. Revisão das informações	7
2.3. Visita técnica	8
3. Modos de Falha	9
3.1. Modos de Falha hidrológicos	11
3.2. Modos de Falha estruturais/sísmicos	24
3.3. Outros Modos de Falha	40
4. Relação de estudos técnico-científicos	46
5. Recomendações e boas práticas	47
Referências	46

Siglas e abreviações

ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i> (Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens)
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Civis)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CDA	<i>Canadian Dam Association</i> (Associação Canadense de Barragens) CCS Divisão de Soluções de Mudança Climática do BID
CPR	Comunidade de Prática de Resiliência do BID
CWC	Central Water Commission (Comissão Central de Água) DRM Unidade de Gestão de Risco de Desastres do BID
ESG	Divisão de Soluções Ambientais e Sociais do BID
ESR	Unidade de Gestão de Riscos Ambientais e Sociais do BID
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (Federal Energy Regulatory Commission) (Comissão Federal de Regulação de Energia dos EUA)
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos)
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i> (Comissão Internacional de Grandes Barragens)
INE	Setor de Infraestrutura e Energia do BID
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
MARDMC	Metodologia de Avaliação de Riscos de Desastres e Mudança Climática do BID (em inglês, DCCRAM)
MF	Modo de Falha
MPAS	Marco de Política Ambiental e Social do BID
OP-704	Política de Gestão de Risco de Desastres do BID
PAE	Plano de Ação de Emergência
PGRD	Plano de Gerenciamento de Riscos de Desastres
SPANCOLD	Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens
WIMF	Workshop de Identificação de Modos de Falha
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i> (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i> (Departamento de Recuperação de Recursos Hídricos dos Estados Unidos)

1. Introdução

O **objetivo** deste documento, junto com o “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, é desenvolver a metodologia dos Workshops de Identificação de Modos de Falha (WIMF) e sua aplicação específica a certos tipos de infraestrutura.

Os Workshops são a principal parte da análise qualitativa **de riscos de desastres e mudanças climáticas em infraestruturas. Por isso, e com o intuito de garantir a correta aplicação do guia, foram elaborados vários documentos de referência que fornecem**, de forma clara e abrangente para cada tipo de infraestrutura, as técnicas, os processos e as ferramentas necessárias para um adequado desenvolvimento dos Workshops de Identificação de Modos de Falha e a posterior tomada de decisão. Vale destacar que falha não significa necessariamente a ruptura da infraestrutura viária, mas também a perda do serviço que ela presta.

Especificamente, este Catálogo busca apoiar e complementar a aplicação do Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de **Modos de Falha em infraestruturas viárias**.

O documento está organizado em quatro seções. A primeira detalha as características particulares das infraestruturas viárias a serem consideradas na realização das sessões de Identificação de Modos de Falha, incluindo quem deve participar, os elementos-chave da revisão de informações e, por fim, a visita técnica.

A segunda seção apresenta exemplos dos **Modos de Falha mais representativos**, classificados segundo o evento desencadeante. Para cada Modo de Falha foi elaborada uma ficha contendo a sua descrição, um esquema e os fatores que influenciam o risco. Esses fatores podem aumentar ou reduzir o risco, dependendo da situação ou das informações disponíveis em cada uma das infraestruturas a serem analisadas. Como será discutido adiante, esses exemplos servem como referência para o leitor, que deverá definir os Modos de Falha e os fatores associados à sua infraestrutura viária ao longo dos Workshops e com a participação de todos os integrantes do grupo de trabalho.

Por fim, a terceira e a quarta seções incluem uma relação de **estudos técnico-científicos e recomendações e boas práticas**, agrupadas segundo a tipologia dos Modos de Falha apresentados na segunda seção. Essas duas últimas seções enriquecem as práticas de intervenção dos Workshops de Identificação de Modos de Falha, com ênfase em aspectos que podem ter menor definição nos projetos ou que apresentam maior relevância para o projeto e operação da infraestrutura.

2. Características particulares para infraestrutura viária

Ao longo deste documento, são apresentadas as características específicas associadas ao Workshop de Identificação de Modos de Falha para infraestruturas viárias. Especificamente, os aspectos que diferem da metodologia geral apresentada no guia estão relacionados com o número mínimo de participantes que devem estar presentes, os conteúdos mínimos a serem considerados na revisão de informações e a viabilidade ou não de realizar a visita técnica de forma online.

2.1. Participantes

As sessões de identificação de Modos de Falha são compostas por um facilitador e um conjunto de participantes. No caso das infraestruturas viárias, recomenda-se que o Workshop conte, no mínimo, com um técnico especialista nos seguintes campos:

- **Projeto da infraestrutura viária.** É recomendável a presença dos técnicos responsáveis pelo projeto e, se for o caso, pela construção, para que compartilhem sua experiência, os problemas enfrentados e possíveis modificações no projeto original, assim como o processo construtivo utilizado. Esses participantes enriquecem os Workshops de Identificação de Modos de Falha, mas não são críticos para seu desenvolvimento, exceto nos projetos em fase de concepção, nos quais são essenciais.
- **Hidrologia e hidráulica.** Em infraestruturas viárias, a hidrologia e a hidráulica são fundamentais para avaliar o dimensionamento das obras de drenagem longitudinais (valetas etc.) e transversais (pontes, bueiros etc.). Recomenda-se convidar o(s) especialista(s) que participaram do estudo hidrológico e hidráulico durante o projeto da infraestrutura viária ou, na ausência destes, um especialista no tema. O especialista em hidrologia e hidráulica é relevante independentemente da fase em que a infraestrutura se encontra no momento do Workshop (projeto, construção ou operação). No caso da fase de projeto, é recomendável que participe o especialista responsável.
- **Técnico com experiência em medidas de adaptação à mudança climática.** Os projetos de infraestrutura viária incluem um estudo hidrológico e/ou hidráulico das obras de drenagem, sendo importante considerar a influência das mudanças climáticas na intensidade das chuvas e nos níveis das cheias para um determinado período de retorno. Por isso, recomenda-se convidar um especialista em riscos relacionados às mudanças climáticas. Independentemente da fase do projeto em que o Workshop seja realizado, recomenda-se a participação deste perfil.
- **Geologia, geotecnia e sismicidade da região.** Recomenda-se convidar o geólogo que participou do estudo geológico-geotécnico da infraestrutura viária ou, na sua ausência, um especialista no tema que possa contribuir com sua visão sobre os materiais de fundação e potenciais deslizamentos em taludes da infraestrutura viária, se for o caso. Além disso, se a infraestrutura estiver em uma zona sísmica, o geólogo deverá ter conhecimento suficiente para identificar se os riscos sísmicos foram analisados e se a infraestrutura foi projetada de acordo com essas solicitações. Independentemente da fase do projeto, recomenda-se a participação deste profissional no Workshop.
- **Manutenção.** Se o projeto estiver em fase de operação, recomenda-se a participação dos técnicos responsáveis pelas inspeções e manutenção da infraestrutura viária, pois sua experiência é valiosa na identificação de potenciais Modos de Falha. Em projetos de nova

infraestrutura, recomenda-se convidar o pessoal técnico da entidade que assumirá a operação e manutenção, pois os resultados dos Workshops os ajudarão a identificar riscos futuros.

- **Gestão de emergências.** Para infraestruturas viárias em operação, recomenda-se convidar para os Workshops o pessoal responsável pela gestão de emergências. Esses participantes ajudam a entender as consequências de falhas ou mau funcionamento da infraestrutura e a compreender como está organizado o sistema de gestão de emergências.
- **Especialistas locais.** Também são relevantes, pois podem fornecer conhecimentos específicos da região importantes para o desenvolvimento do Workshop, por exemplo, sobre quais trechos da via ou da área de implantação sofrem alagamentos durante chuvas intensas.
- **Especialistas externos ao projeto.** É recomendável contar com especialistas independentes, que não apenas trazem vasto conhecimento em infraestrutura viária, mas também uma perspectiva externa, capaz de identificar aspectos que podem passar despercebidos pelos técnicos diretamente envolvidos no projeto.

Embora esses perfis sejam recomendáveis para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha em infraestrutura viária, é necessário analisar cada caso específico para determinar quais perfis da lista são realmente essenciais, bem como avaliar a inclusão de outros participantes relevantes.

2.2. Revisão de informações

Conforme explicado no “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, a revisão e a análise das informações existentes constituem o primeiro passo para a identificação dos Modos de Falha e **devem abranger todos os aspectos-chave** relacionados à gestão da segurança. Essa revisão deve começar pelos elementos referentes às fases de projeto e construção da infraestrutura, passando pela avaliação do sistema, do funcionamento e do estado atual da infraestrutura.

A revisão de informações deve incluir os pontos-chave dos documentos disponíveis. Assim, do ponto de vista conceitual, os elementos fundamentais a serem considerados na análise de infraestruturas viárias durante a revisão de informações estão representados na Figura 1. Vale destacar que alguns dos pontos-chave apresentados nesse esquema podem não ser necessários, dependendo da fase do projeto em que a infraestrutura se encontra. Por exemplo, é previsível que o estado atual da infraestrutura não seja considerado no caso de um projeto que ainda esteja na fase de concepção.

Figura 1. Elementos-chave da revisão de informações



Alguns pontos-chave mencionados neste esquema não serão necessários dependendo da fase em que o projeto da infraestrutura se encontra. Por exemplo, como é previsível, o estado atual não será considerado em uma infraestrutura que ainda está na fase de projeto.

2.3. Visita técnica

A visita técnica é uma das principais etapas dos Workshops, pois permite obter uma visão integral do estado atual da infraestrutura e detectar possíveis danos que possam resultar em falhas.

Essa atividade é recomendável ser realizada de forma presencial, pois possibilita uma inspeção mais detalhada por parte dos especialistas. No entanto, em algumas infraestruturas, pode-se considerar sua realização online, caso a opção presencial não seja viável logisticamente.

Nesta seção, apresenta-se a viabilidade ou não de inspecionar infraestruturas viárias de forma online.

No caso de **rodovias**, é interessante realizar o Workshop de forma **online**, mostrando vídeos e fotos aéreas da infraestrutura obtidos com drones. Isso se deve à grande extensão a ser visitada em projetos de rodovias. Por esse motivo, recomenda-se a realização do Workshop online, já que o vídeo feito com drone oferece rapidamente uma visão geral da infraestrutura.

Caso seja necessário obter detalhes de alguma **obra transversal**, como uma ponte, deve-se considerar a possibilidade de uma visita presencial, pois, dependendo da tipologia e das dimensões da ponte, pode-se obter informações relevantes que não seriam possíveis apenas com imagens de drone.

3. Modos de Falha

A seguir, são enumerados os Modos de Falha mais característicos para infraestruturas viárias, bem como uma classificação segundo a tipologia dos Modos de Falha, divididos em: Modos de Falha hidrológicos, estruturais/sísmicos e outros.

3.1. Modos de Falha hidrológicos	11
• Inundação em grande escala e deterioração geral do traçado	11
• Danos e interrupção do tráfego por inundação da via	12
• Erosão do traçado em declive por escoamento superficial	13
• Erosão por insuficiência da capacidade de drenagem	14
• Colmatagem da drenagem longitudinal por sedimentos	15
• Colmatagem da drenagem transversal por sedimentos	16
• Falha das obras de drenagem transversal por falta de capacidade	17
• Falha das obras de drenagem transversal por erosão na base	19
• Nível elevado do curso d'água, falha e ruptura do tabuleiro	19
• Nível elevado do curso d'água e falha ao cisalhamento das pilastras	20
• Nível elevado do curso d'água e erosão do aterro	21
• Nível elevado do curso d'água e arrastamento de veículos	22
• Redução da capacidade hidráulica por detritos e colapso da ponte	23
3.2. Modos de Falha estruturais/sísmicos	24
• Liquefação do solo da via em caso de sismo	24
• Colapso de obra de arte por solicitação sísmica	25
• Erosão em rodovia devido a sismo	26
• Falha do tabuleiro por sismo	27
• Bloqueio da via por instabilidade devido a sismo	28
• Recalque da laje por lavagem de finos na fundação	29
• Recalque da rodovia por formação de cavidades cársticas	30
• Recalque por erosão nos apoios/fundação de pontes	31
• Deslizamento de aterro sob a rodovia	32
• Deslizamento de corte sobre a rodovia	33
• Queda de rochas sobre a rodovia	34
• Falha do talude induzida por erosão	35
• Colapso de gabiões nas margens do curso d'água	36
• Falha da ponte por erosão das fundações	37
• Dano na rodovia por fissuramento	38
• Dano à plataforma por queda de material	39

3.3. Outros Modos de Falha 40

- Material na bacia gerado por incêndios e colapso da ponte 40
- Assentamentos informais em zonas inundáveis 41
- Não abandono das propriedades durante inundações 42
- Falha nos sistemas de alerta à população 43
- Danos na via devido ao arraste de cinzas vulcânicas 44
- Danos a veículos e paralisação de tráfego por queda de granizo 45

A seguir, desenvolvem-se os Modos de Falha mais representativos para infraestruturas viárias e detalham-se os fatores que influenciam o risco de cada Modo de Falha. Tanto os Modos de Falha quanto os fatores estão definidos de forma geral, ou seja, o leitor pode **utilizá-los como referência**, mas deverá desenvolver os seus próprios Modos de Falha ao longo do Workshop e com a participação de todos os integrantes do grupo de trabalho.

Da mesma forma, **os fatores estão redigidos de maneira neutra** para cada Modo de Falha com o objetivo de que o leitor os utilize como referência, devendo ele mesmo decidir, para seu caso específico, se os fatores aumentam ou diminuem o risco do respectivo Modo de Falha.

Existem certos fatores que, de alguma forma, influenciam o risco de todos os Modos de Falha. Por esse motivo, e para evitar repetições nas descrições apresentadas para cada Modo de Falha característico, esses fatores são apresentados na lista a seguir e não se repetem nas tabelas posteriores.

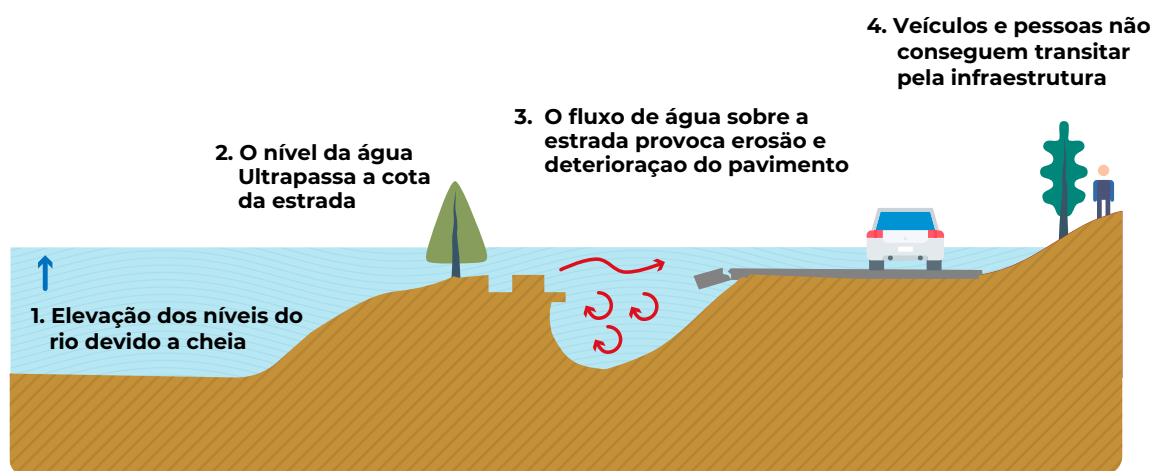
Fatores a considerar em todos os Modos de Falha das infraestruturas viárias:

- Disponibilidade de recursos para a realização de estudos prévios ou de pré-investimento dos projetos de infraestrutura viária.
- Gestão e preservação das informações dos projetos ao longo dos anos.
- Prazos para a realização de estudos prévios e elaboração de projetos de infraestrutura viária.
- Controle de qualidade e supervisão no projeto e na construção de infraestruturas viárias.
- Experiência da empresa construtora e/ou supervisora na construção de infraestruturas viárias.

3.1. Modos de Falha Hidrológicos

INUNDAÇÃO EM GRANDE ESCALA E DETERIORAÇÃO GERAL DO TRAÇADO

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente para elevar os níveis do curso do rio acima da cota do traçado da infraestrutura viária, resultando em sua inundação. O fluxo de água sobre o pavimento provoca um processo de erosão progressiva que, eventualmente, leva à remoção total ou parcial do pavimento da infraestrutura, tornando-a intransitável. Em situações de emergência por inundação, isso pode isolar comunidades locais.



Fatores que influenciam o risco

- Existência de cursos d'água próximos à infraestrutura.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e nos níveis das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência e funcionamento adequado das obras de drenagem longitudinal.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheias mais elevados e tempos de concentração menores.

DANOS E INTERRUPÇÃO DO TRÁFEGO POR INUNDAÇÃO DA VIA

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente que provoca a elevação dos níveis do leito do rio até ultrapassar a cota do traçado da estrada, causando a inundação da mesma. Isso a torna total ou parcialmente intransitável, afetando a população com possíveis interrupções do tráfego. Essa inundação pode provocar o arraste de veículos sobre a via.



Fatores que influenciam o risco

- Existência de cursos d'água próximos à infraestrutura.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência e funcionamento adequado das obras de drenagem longitudinal e transversal.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, carreamento de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Existência de rotas alternativas de passagem.
- Disponibilidade de unidades específicas para a gestão de emergências.

EROSÃO DO TRAÇADO EM DECLIVE POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Num cenário hidrológico, após precipitações de alta intensidade e em trechos do traçado onde a inclinação seja acentuada, as turbulências e as velocidades do fluxo de água geradas pelo escoamento superficial podem provocar uma erosão significativa na infraestrutura, sem que seja necessária uma inundação generalizada devido à elevação dos níveis do rio e mau funcionamento da drenagem longitudinal.



Fatores que influenciam o risco

- Estado do pavimento: asfaltado, não asfaltado ou mal asfaltado.
- Existência e funcionamento adequado das obras de drenagem longitudinal e transversal.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Atividades de manutenção e inspeção das obras de drenagem transversal.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, transporte de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.

EROSÃO POR FALTA DE CAPACIDADE DE DRENAGEM

Num cenário hidrológico, se as obras de drenagem não tiverem capacidade adequada, a água de escoamento superficial pode inundar a estrada. O fluxo de água sobre o pavimento provoca um processo de erosão progressiva, que pode resultar, por fim, na remoção do pavimento da infraestrutura, tornando-a total ou parcialmente intransitável.

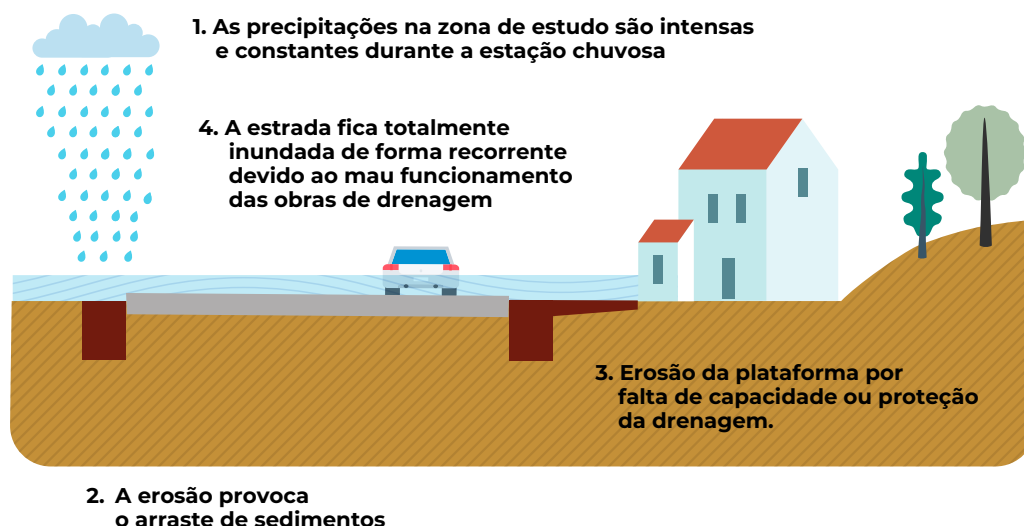


Fatores que influenciam o risco

- Presença de tráfego rodoviário pesado que possa acelerar a deterioração da base.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência e funcionamento das obras de drenagem.
- Existência de estudos geotécnicos que definam o material da fundação.

COLMATAÇÃO DA DRENAGEM LONGITUDINAL POR SEDIMENTOS

Em cenários hidrológicos ou de operação normal, as obras de drenagem longitudinal podem ser bloqueadas pelos sedimentos transportados pela água ou por obstáculos construídos pela população local, aumentando o risco de inundação na área e o tempo de permanência da água sobre o traçado após a ocorrência da inundação.

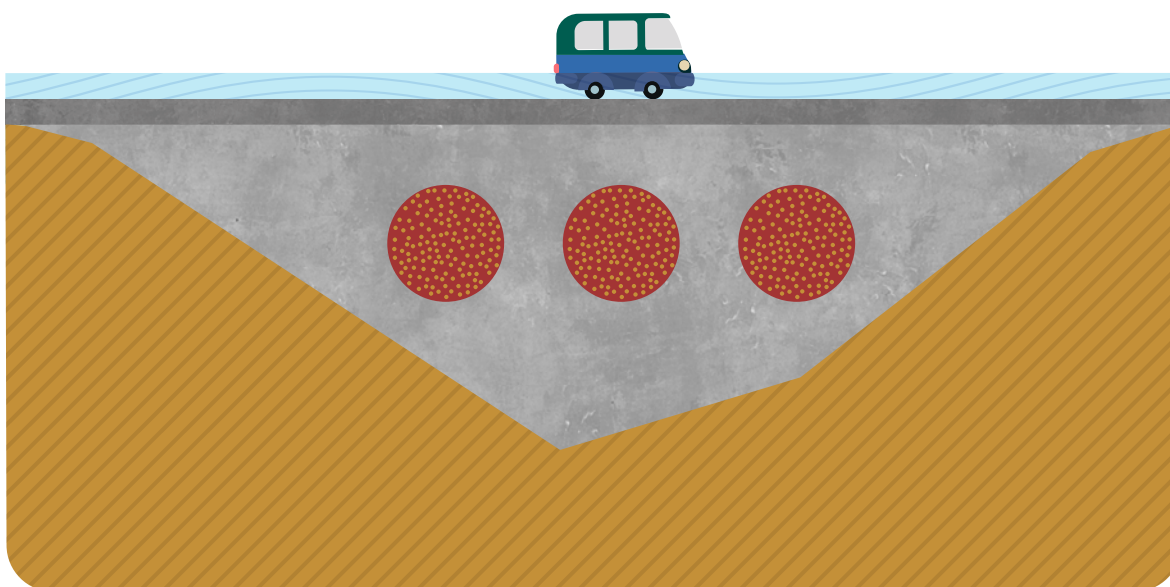


Fatores que influenciam o risco

- Existência de bloqueios em trechos das obras de drenagem longitudinal.
- Funcionamento adequado das obras de drenagem longitudinal.
- Atividades de manutenção e limpeza da infraestrutura viária.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais altos e tempos de concentração mais curtos.

COLMATAÇÃO DA DRENAGEM TRANSVERSAL POR SEDIMENTOS

Num cenário hidrológico, o fluxo de água no leito do rio pode arrastar e transportar sedimentos como troncos, plantas e material sólido provenientes das bacias hidrográficas, os quais podem obstruir as obras de drenagem transversal. Esse bloqueio aumenta o nível da água a montante da obra, provocando o transbordamento e inundando a estrada nesse ponto.

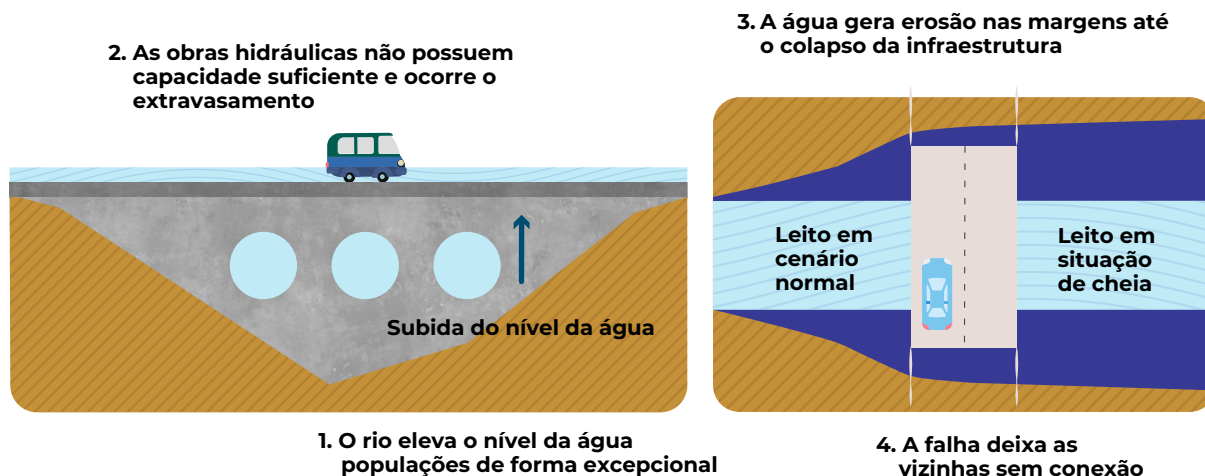


Fatores que influenciam o risco

- Existência de plantações próximas à obra de drenagem transversal.
- Funcionamento adequado das obras de drenagem transversal.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Atividades de manutenção e inspeção das obras de drenagem transversal.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

FALHA DA OBRA DE DRENAGEM TRANSVERSAL POR FALTA DE CAPACIDADE

Num cenário hidrológico, a elevação da vazão do rio pode atingir uma magnitude suficiente para exceder a capacidade das obras de drenagem transversal ao longo da infraestrutura viária. A água se acumula a montante da obra até provocar o transbordamento sobre o pavimento da obra de passagem e suas margens, impossibilitando o tráfego de veículos sobre a infraestrutura. As turbulências e a velocidade da corrente geram erosão na estrutura, podendo, no pior dos casos, levar ao colapso da obra de passagem.



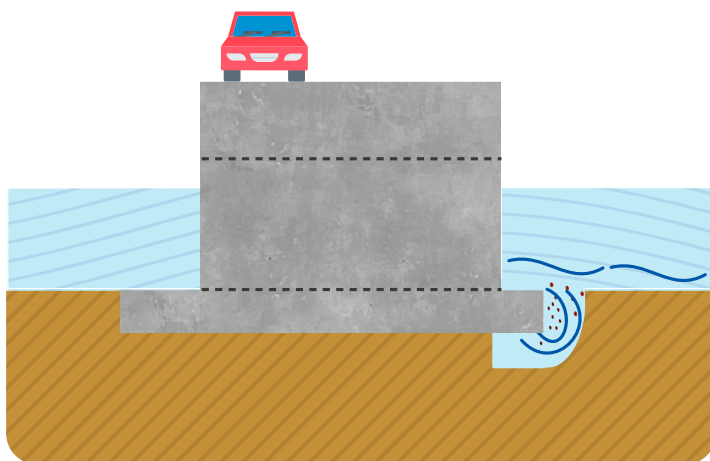
Fatores que influenciam o risco

- Existência e funcionamento adequado das obras de drenagem longitudinal e transversal.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Atividades de manutenção e inspeção das obras de drenagem transversal.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, transporte de sedimentos, picos de cheia mais intensos e tempos de concentração menores.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

FALHA DE OBRAS DE DRENAGEM TRANSVERSAL POR EROSÃO NA BASE

Num cenário hidrológico, a velocidade do fluxo de água e as turbulências geradas na saída da obra de drenagem podem causar erosão na base da fundação das obras de drenagem transversal, caso não estejam devidamente protegidas. Isso provoca o descalçamento da estrutura que, se progredir, pode causar o assentamento e a desestabilização da infraestrutura devido à perda de apoio.

Secção transversal

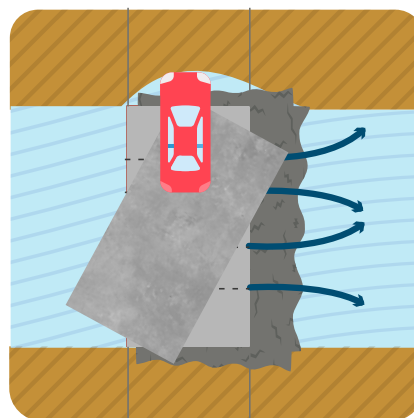


1. O estreitamento da obra de drenagem aumenta a velocidade e a desestabilizando turbulência

2. As turbulências geram erosão na saída da galeria pluvial

Secção transversal

4. Falha por recalque ou desestabilização da obra transversal



3. A erosão pode se desenvolver até os encontros, fundação a estrutura

Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitações, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de estudos hidrológicos/hidráulicos e a relação entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Projeto estrutural da infraestrutura.
- Existência de vias alternativas à obra de passagem transitáveis em caso de falha da via.
- Isolamento da população em caso de falha de uma obra de passagem durante um evento de inundação.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, carreamento de sedimentos, picos de cheia mais elevados e menores tempos de concentração.
- Trabalhos de extração de inertes na área do leito do rio que possam aumentar a velocidade do fluxo e, com isso, o empuxo hidrodinâmico sobre os pilares.

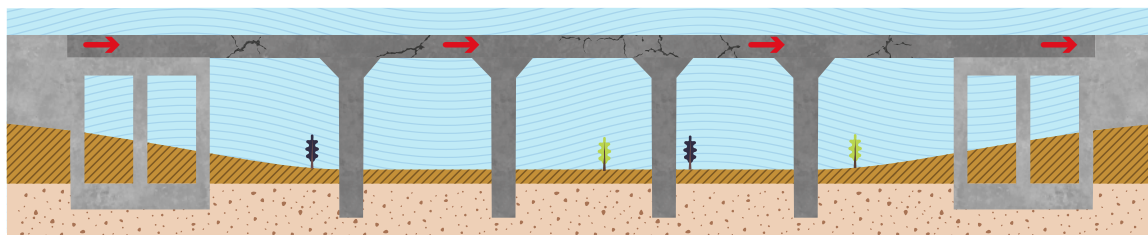
NÍVEL ELEVADO DO LEITO, FALHA E RUPTURA DO TABULEIRO

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de grande magnitude do rio que dificultaria a drenagem da água e/ou uma grande enxurrada e, conseqüentemente, a elevação do nível do leito nas proximidades da ponte, podendo provocar o transbordamento da mesma e, posteriormente, o deslizamento ou a ruptura do tabuleiro da ponte devido ao elevado empuxo hidrostático.

1. Cheia do rio

2. Nível elevado do leito

3. Falha e ruptura do tabuleiro



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitações, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de estudos hidrológicos/hidráulicos e a relação entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Projeto estrutural da infraestrutura.
- Existência de vias alternativas à obra de passagem transitáveis em caso de falha da via.
- Isolamento da população em caso de falha de uma obra de passagem durante um evento de inundação.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, carreamento de sedimentos, picos de cheia mais elevados e menores tempos de concentração.
- Trabalhos de extração de inertes na área do leito do rio que possam aumentar a velocidade do fluxo e, com isso, o empuxo hidrodinâmico sobre os pilares.

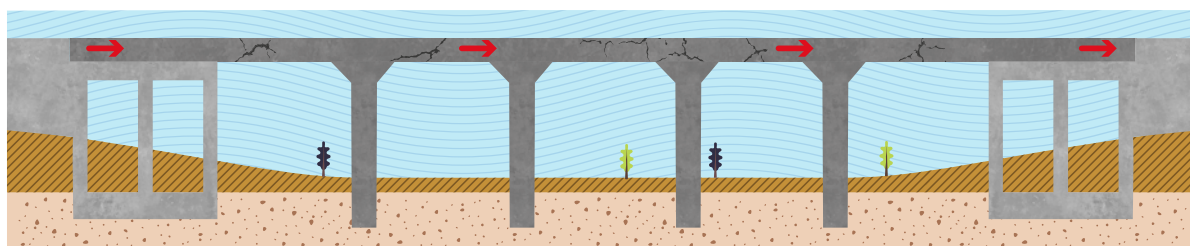
NÍVEL ELEVADO DO LEITO E FALHA POR CISALHAMENTO DOS PILARES

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente no rio que dificulta o escoamento da água e/ou uma grande enxurrada e, conseqüentemente, a elevação do nível do leito, podendo provocar o transbordamento da ponte e, devido ao elevado empuxo hidrostático, a falha por cisalhamento dos pilares, causando a destruição total ou a inviabilidade da infraestrutura.

1. Cheia do rio

2. Nível elevado do leito

4. Falha por cisalhamento nos pilares



3. Empuxo e erosão nos pilares

Fatores que influenciam o risco

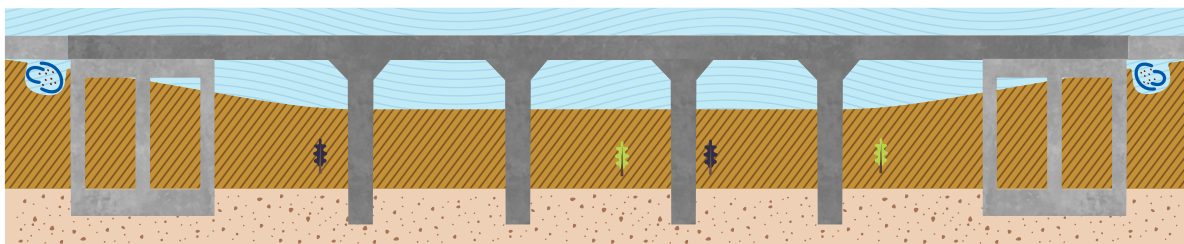
- Projeto estrutural da infraestrutura e esbeltez dos pilares.
- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e nos níveis das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de estudos hidrológicos/hidráulicos e da relação entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.

NÍVEL ELEVADO DO LEITO E EROSÃO DO ATERRO

Num cenário hidrológico, ocorre uma cheia de grande magnitude no rio que dificulta a drenagem da água e/ou uma grande enxurrada e, conseqüentemente, a elevação do nível do leito do rio, podendo provocar erosão nos encontros, na junção entre o tabuleiro e o aterro. Esse fenômeno torna a ponte totalmente inoperante e impede a circulação de veículos sobre ela.

1. Cheia do rio

2. Erosão na junção entre tabuleiro e aterro



3. Impossibilidade de acessar a ponte

Fatores que influenciam o risco

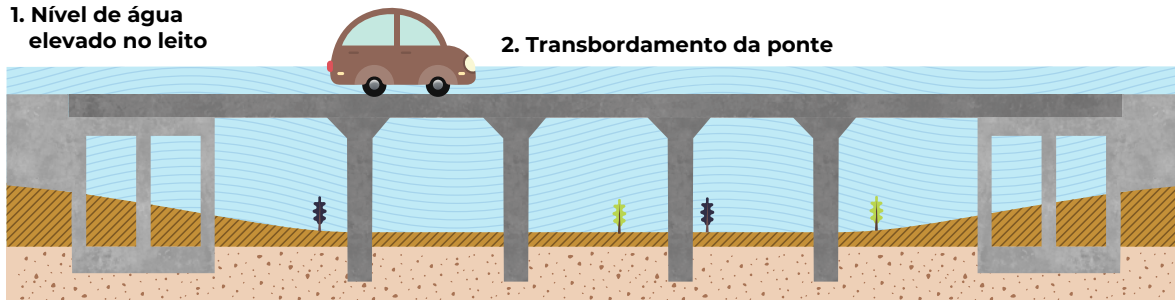
- Existência de proteção nos aterros.
- Trabalhos de manutenção e monitoramento das infraestruturas.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Disponibilidade de estudos hidrológicos/hidráulicos e a relação real entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Disponibilidade de estudos geológicos e geotécnicos da fundação e dos aterros da estrutura.

NÍVEL ELEVADO DO LEITO E ARRASTO DE VEÍCULOS

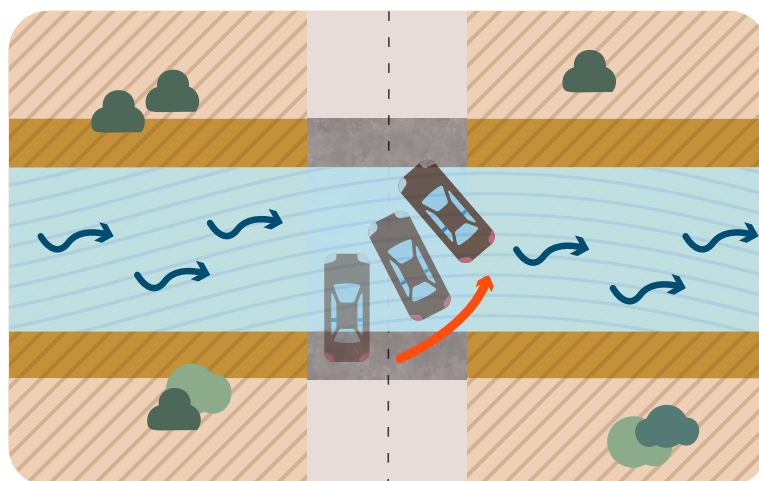
Num cenário hidrológico, ocorre uma elevação do nível do leito do rio, ultrapassando a altura da ponte e podendo provocar a flutuação e o arrasto de veículos que estejam transitando sobre ela, com as consequentes implicações sociais que isso pode acarretar.

1. Nível de água elevado no leito

2. Transbordamento da ponte



Vista em planta da ponte



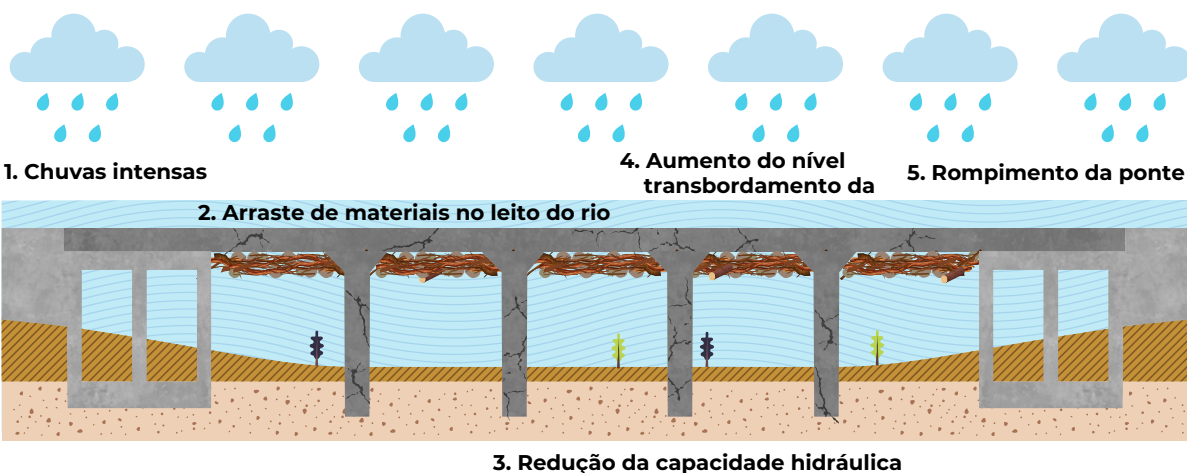
3. Arrasto do veículo

Fatores que influenciam o risco

- Existência de protocolos de atuação frente a emergências (interrupção de acessos e evacuação de pessoal).
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e nos níveis das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Disponibilidade de estudos hidrológicos/hidráulicos e da relação real entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, o que pode gerar erosão, transporte de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração mais curtos.

REDUÇÃO DA CAPACIDADE HIDRÁULICA POR ARRASTOS E ROMPIMENTO DA PONTE

Num cenário hidrológico, devido ao arraste de materiais, estes podem se acumular sob a ponte, obstruindo-a e reduzindo sua seção. Isso diminui consideravelmente a capacidade hidráulica, podendo provocar níveis elevados no leito do rio que, devido ao empuxo hidrostático, podem causar o colapso e o rompimento do tabuleiro da ponte, o cisalhamento das pilastras ou a erosão na união entre o tabuleiro e o aterro junto aos encontros, entre outros.



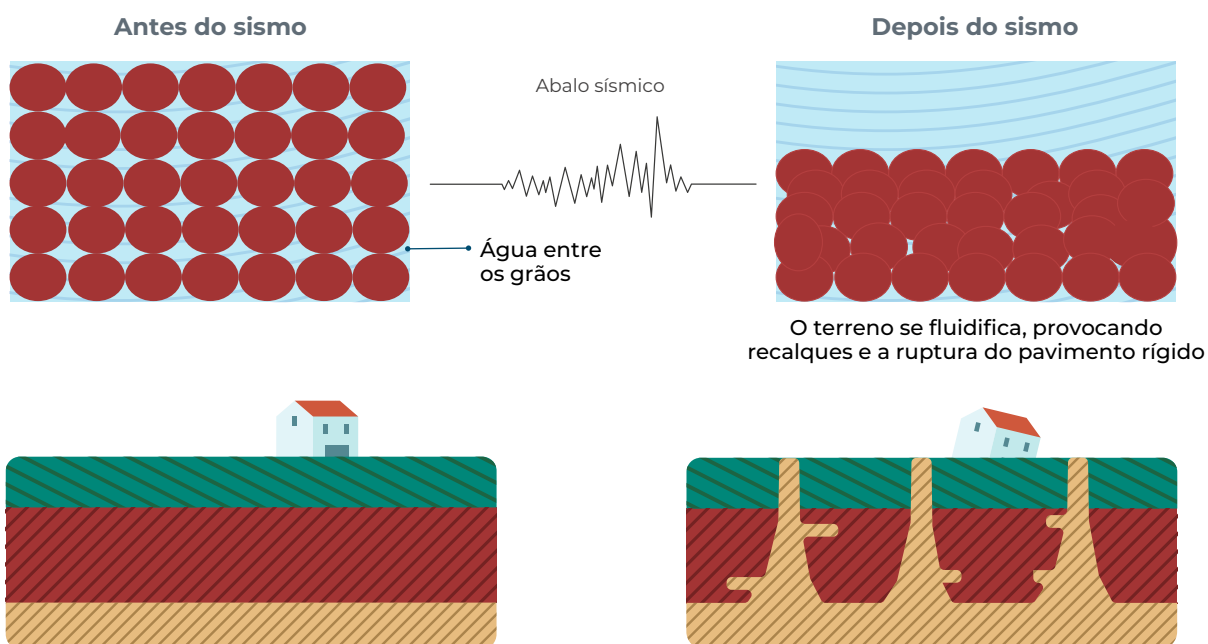
Fatores que influenciam o risco

- Consideração do empuxo dos materiais arrastados no cálculo estrutural.
- Consideração da perda de capacidade hidráulica devido a materiais arrastados no cálculo hidráulico.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Disponibilidade de estudos hidrológicos/hidráulicos e a relação real entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração mais curtos.

3.2. Modos de Falha estruturais/sísmicos

LIQUEFAÇÃO DO SOLO DA VIA EM CASO DE SISMO

Num cenário sísmico, a vibração em um material não consolidado (geralmente areias ou siltes) e normalmente saturado induz à perda de resistência ao esforço cortante e rompe sua estrutura granular ao reduzir a pressão intergranular. O solo passa a se comportar como um fluido, e ocorre a falha da via assentada sobre ele, provocando grandes recalques, a deterioração do material pavimentado menos flexível e impossibilitando o tráfego de veículos sobre ela.

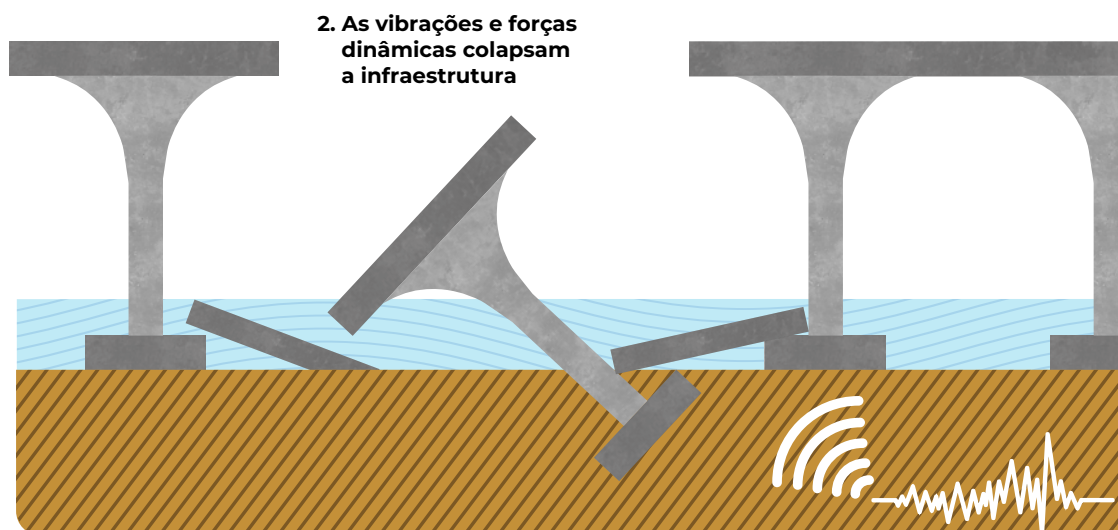


Fatores que influenciam o risco

- Sismicidade da região.
- Caracterização geodinâmica para determinar a presença de solos com risco de liquefação.
- Presença de água que satura os solos durante a estação chuvosa.
- Traçado com aterros e cortes em solos não consolidados.
- Caracterização do risco sísmico na área de localização da infraestrutura viária.
- Isolamento de populações em caso de emergência sísmica.
- Existência de estudos geotécnicos.

DESABAMENTO DE OBRA DE TRAVESSIA POR SOLICITAÇÃO SÍSMICA

Num cenário sísmico, as vibrações induzidas geram acelerações e forças próximas à fundação dos pilares e encontros. Caso não estejam dimensionados para esse tipo de evento, a intensidade das forças dinâmicas pode desestabilizar os apoios, provocando o desabamento total ou parcial dos apoios e do tabuleiro da infraestrutura. O desabamento impossibilita o tráfego na via, isolando populações que podem ter sido afetadas pelo terremoto.



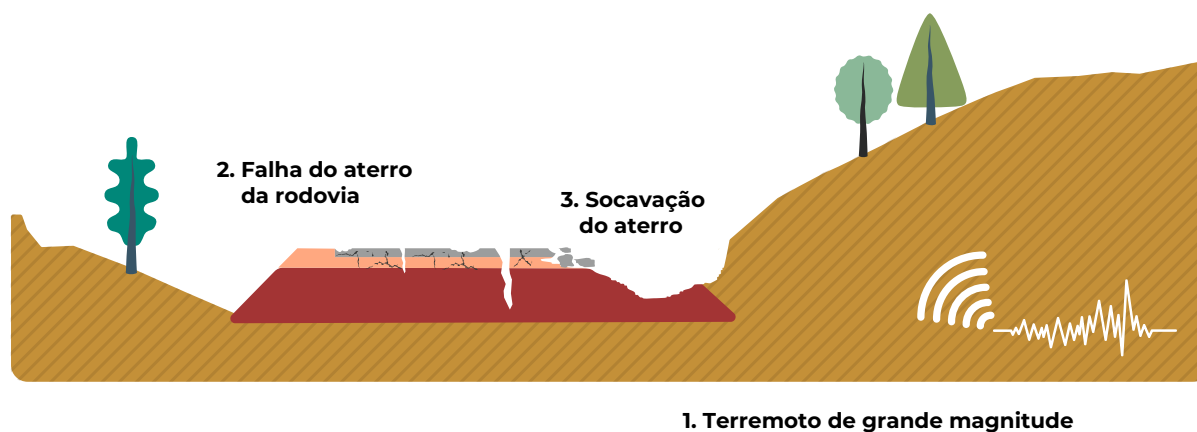
1. Os sismos ocorrem devido à proximidade com uma falha tectônica

Fatores que influenciam o risco

- Sismicidade da região.
- Caracterização geodinâmica para determinar a existência de solos com risco de liquefação.
- Isolamento de populações em caso de emergência sísmica.
- Caracterização do risco sísmico na área de localização da infraestrutura viária.
- Existência de estudos geotécnicos.
- Dimensionamento das obras de arte especiais para resistência a sismos.

EROSÃO NA RODOVIA DEVIDO A SISMO

Num cenário sísmico, devido à vibração do terreno, ocorre a falha do aterro da rodovia por perda de resistência estrutural, provocando grandes recalques e/ou subsidências, tornando impossível o tráfego de veículos sobre a via.

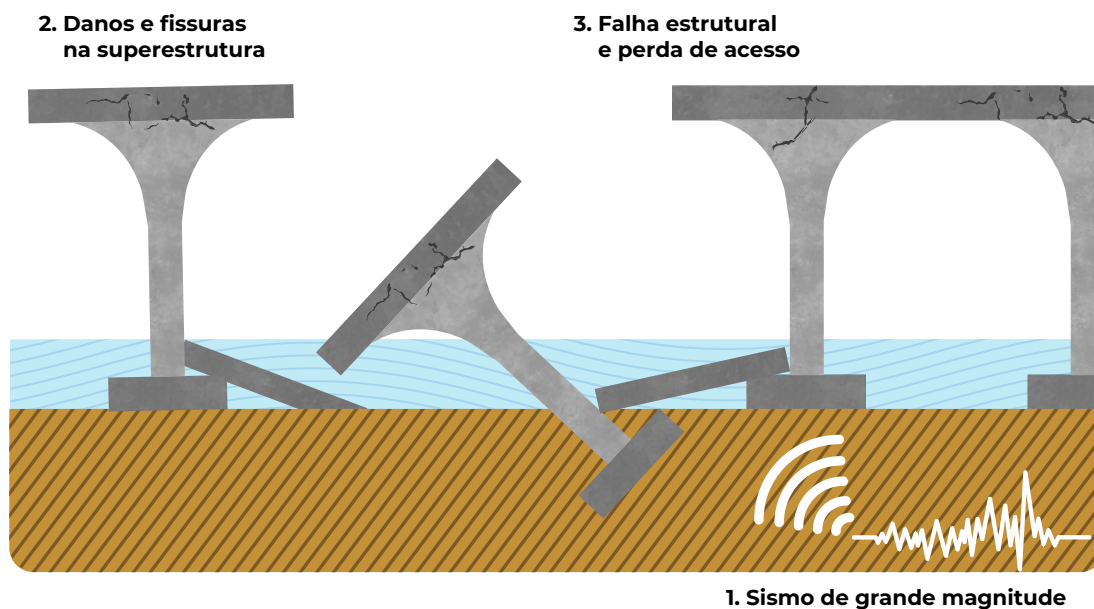


Fatores que influenciam o risco

- Sismicidade da região.
- Isolamento de populações em caso de emergência sísmica.
- Caracterização do risco sísmico na localização da infraestrutura viária.
- Dimensionamento da infraestrutura viária frente a eventos sísmicos.
- Disponibilidade de estudos geotécnicos.

FALHA DO TABULEIRO POR SISMO

Num cenário sísmico, as obras de arte, especialmente as pontes, podem sofrer danos e fissuras na superestrutura, o que pode levar à ruptura do tabuleiro e, consequentemente, à perda de acesso.

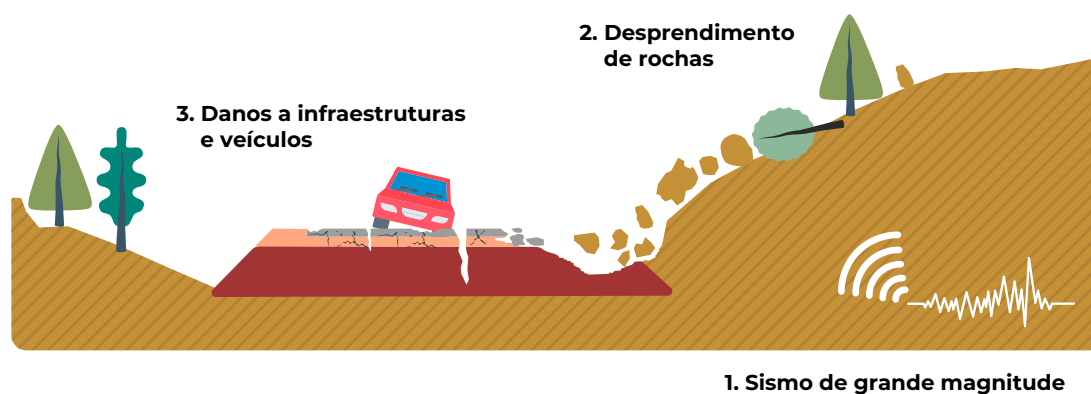


Fatores que influenciam o risco

- Sismicidade da região.
- Isolamento de populações em caso de emergência sísmica.
- Dimensionamento das obras de arte frente a sismos.
- Disponibilidade de estudos geotécnicos.
- Caracterização do risco sísmico no local da infraestrutura.

BLOQUEIO DA VIA POR INSTABILIDADE DEVIDO A SISMO

Num cenário sísmico, pode ocorrer um deslizamento de rochas e sua posterior queda sobre o traçado da estrada. Isso pode danificar parte da via, tornando-a temporariamente intransitável ou danificar algum dos veículos que a estejam utilizando.

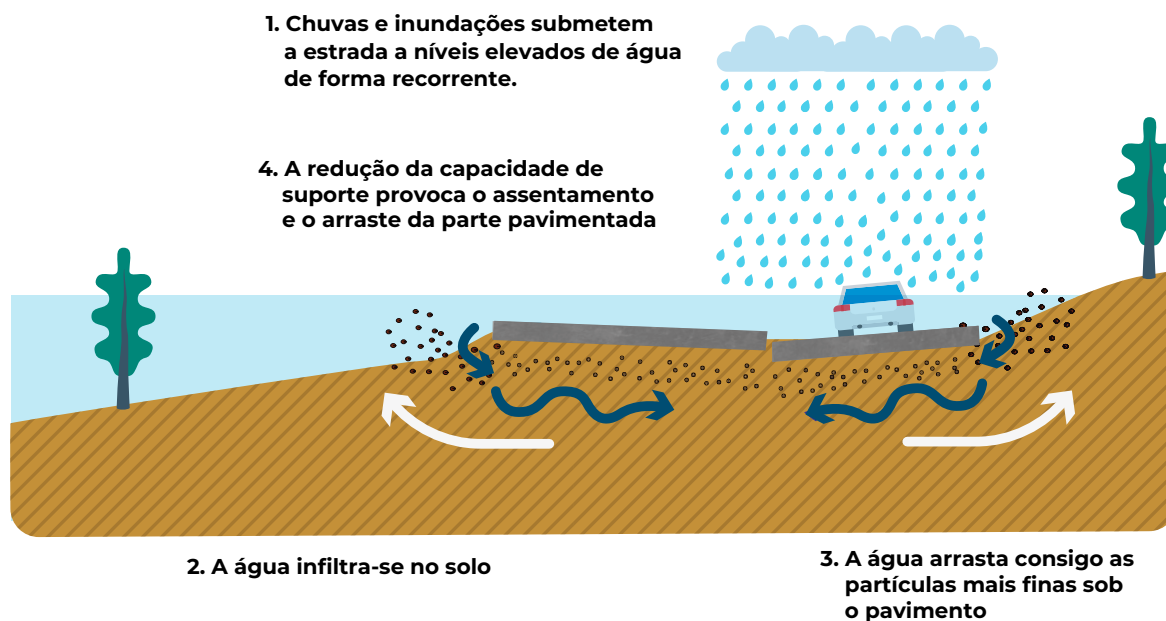


Fatores que influenciam o risco

- Sismicidade da região.
- Dimensionamento das infraestruturas para eventos sísmicos.
- Isolamento de populações em caso de emergência sísmica.
- Disponibilidade de estudos geotécnicos.
- Caracterização do risco de terremoto na localização da infraestrutura viária.
- Atividades de manutenção e monitoramento.

ASSENTAMENTO DA BASE DE APOIO POR LAVAGEM DE FINOS NA FUNDAÇÃO

Num cenário hidrológico, se no interior de alguma das camadas do solo natural granulado existir um fluxo de água, esse fluxo pode arrastar os agregados finos. Esse transporte leva à diminuição da massa do solo e ao assentamento da base asfáltica mais rígida devido ao surgimento de vazios onde antes havia areia, silte ou outras partículas de pequeno tamanho, o que facilita a deterioração da estrada e seu posterior arraste pela correnteza.

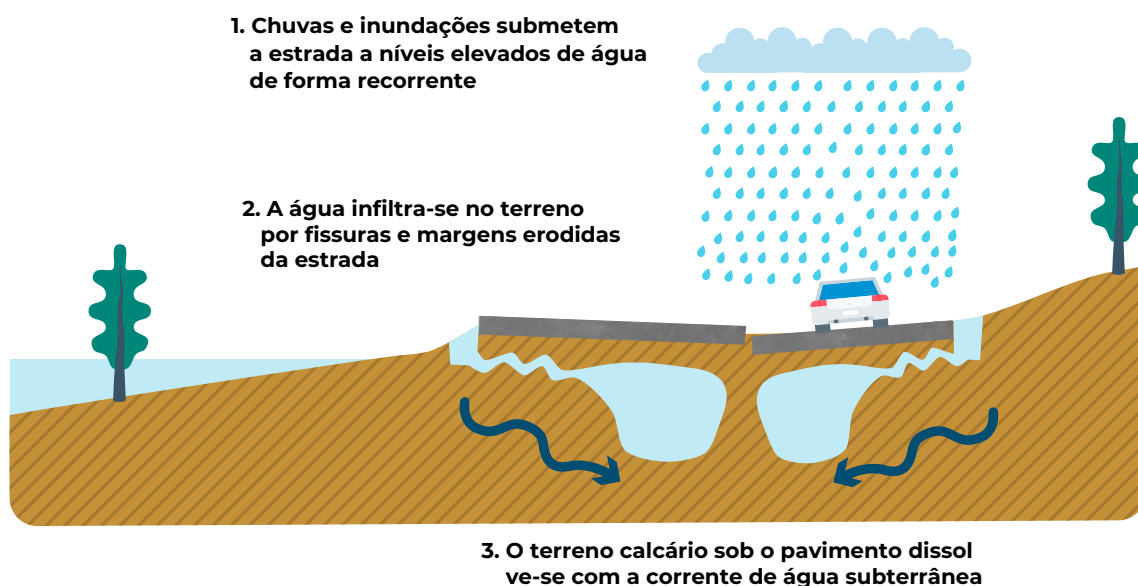


Fatores que influenciam o risco

- Existência e funcionamento das obras de drenagem longitudinal.
- Existência de estudos geotécnicos que definam o material da fundação.
- Existência de cursos d'água próximos à infraestrutura.
- Presença de tráfego rodoviário pesado que possa acelerar o desgaste da base.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

ASSENTAMENTO DA ESTRADA POR FORMAÇÃO DE CAVIDADES CÁRSTICAS

Num cenário hidrológico ou de operação normal, caso a estrada esteja assentada sobre um terreno calcário e exista uma corrente de água no interior de algum dos estratos, pode ocorrer a dissolução do calcário pela ação da água. Essas cavidades podem provocar o afundamento da estrada em parte de seu traçado.



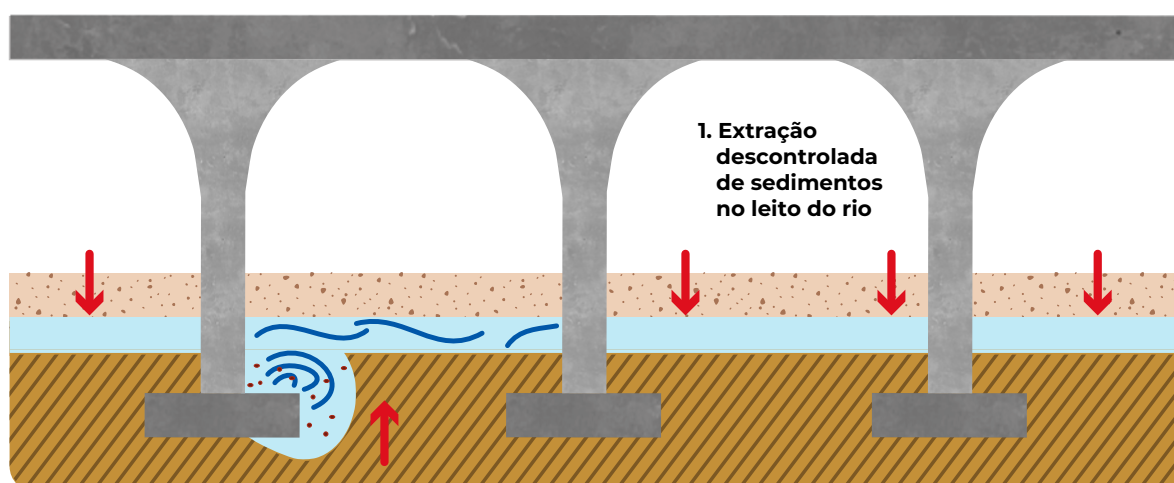
Fatores que influenciam o risco

- Existência e funcionamento das obras de drenagem longitudinal.
- Existência de estudos geotécnicos que definam o material da fundação
- Existência de solo calcário na localização da infraestrutura.
- Existência de cursos d'água próximos à infraestrutura.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, o que pode reduzir a interceptação da chuva e aumentar a infiltração de água no solo.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

ASSENTAMENTO POR EROSÃO EM APOIOS/FUNDAÇÃO DE PONTES

Num cenário de operação normal, se a velocidade do fluxo for suficientemente elevada, o solo granular natural que envolve a fundação das pontes pode ser arrastado. A erosão (ou socavamento) pode gerar o assentamento de toda a infraestrutura. A perda de apoio acaba provocando deslocamentos do tabuleiro, prejudicando a passagem de tráfego sobre a ponte devido ao deslizamento.

2. A velocidade da água aumenta durante as cheias devido às mudanças climáticas, desmatamento e extração de sedimentos



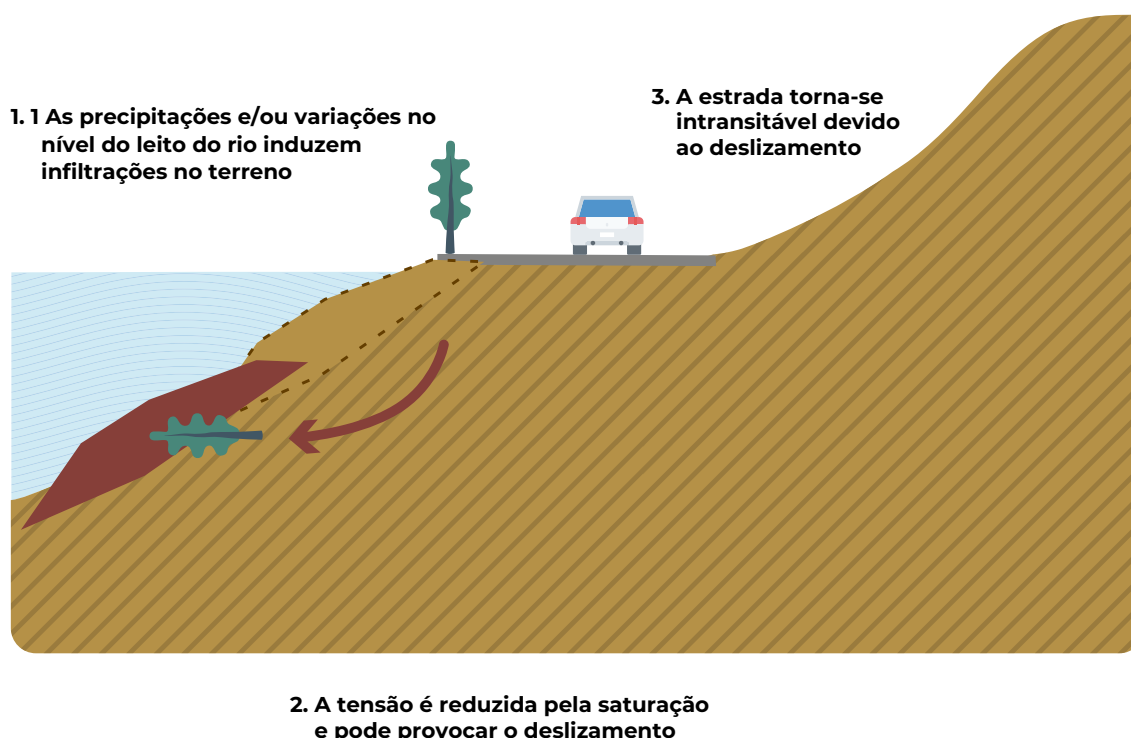
3. Erosão localizada e escorregamento dos apoios da ponte, causando assentamento e desestabilização da estrutura

Fatores que influenciam o risco

- Trabalhos de manutenção e inspeção da infraestrutura.
- Presença de materiais não coesivos e facilmente erodíveis.
- Existência de estudos geotécnicos que definam o material da fundação.
- Existência de vias alternativas à obra de travessia, transitáveis em caso de falha da via.
- Extração de sedimentos na área do leito do rio que possa aumentar a velocidade do fluxo e o risco de erosão das obras hidráulicas.
- Isolamento da população em caso de falha de uma obra de travessia durante um evento de inundação.

DESLIZAMENTO DE ATERRO SOB RODOVIA

Num cenário de operação normal, após a ocorrência de uma precipitação persistente ou de uma rápida descida do nível da água após uma inundação, a água infiltra-se e percola no subsolo através de poros e fissuras, saturando-o, diminuindo a tensão efetiva e reduzindo a resistência ao cisalhamento. Isso pode desencadear um deslizamento sob o traçado, tornando-o temporariamente intransitável.



Fatores que influenciam o risco

- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção do aterro.
- Existência de proteção ou vegetação no aterro.
- Inclinação do talude.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

DESLIZAMENTO DE CORTE SOBRE A RODOVIA

Em cenário hidrológico ou de operação normal, após uma precipitação persistente sobre o corte, a água infiltra-se e percola no subsolo por meio de poros e fissuras, saturando-o, reduzindo a tensão efetiva e diminuindo a resistência ao cisalhamento. Isso pode desencadear um deslizamento sobre o traçado, tornando-o temporariamente intransitável. Essa falha também pode ocorrer sem necessidade de chuva prévia, sempre que as inclinações forem instáveis ou após um sismo.

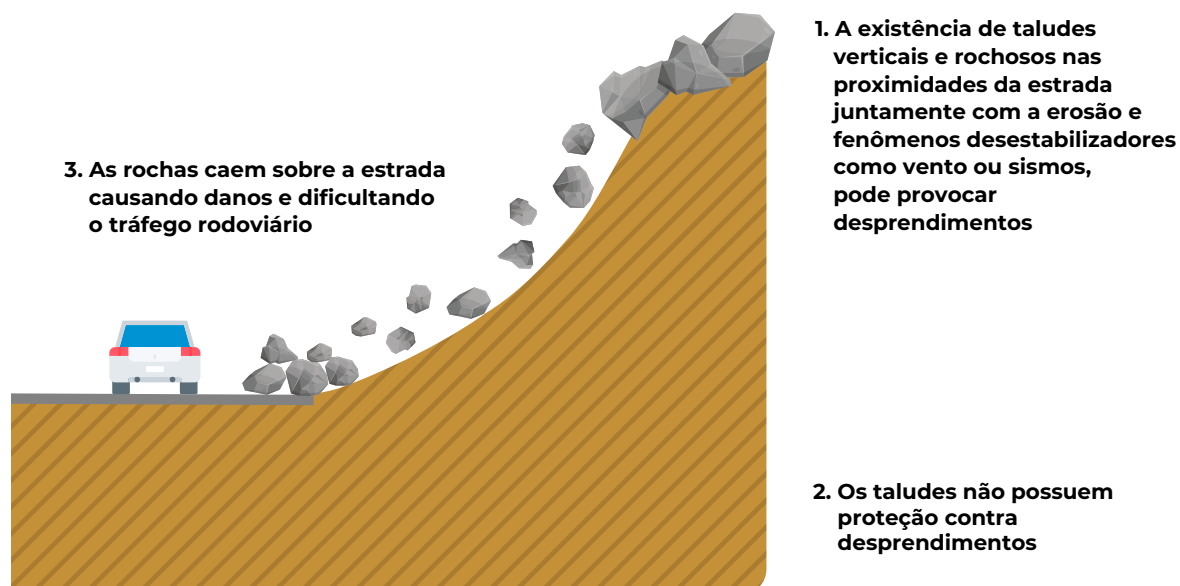


Fatores que influenciam o risco

- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção.
- Inclinação das encostas e sua estabilização.
- Atividades de manutenção e inspeção.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de proteção das encostas e presença de redes de contenção contra deslizamentos.
- Existência de rotas alternativas de passagem.

QUEDA DE ROCHAS SOBRE A RODOVIA

Num cenário de operação normal ou em caso de sismo, pode ocorrer o desprendimento de rochas e sua posterior queda sobre o traçado da rodovia, podendo danificar parte da via, torná-la temporariamente intransitável ou causar danos a veículos que a utilizam.



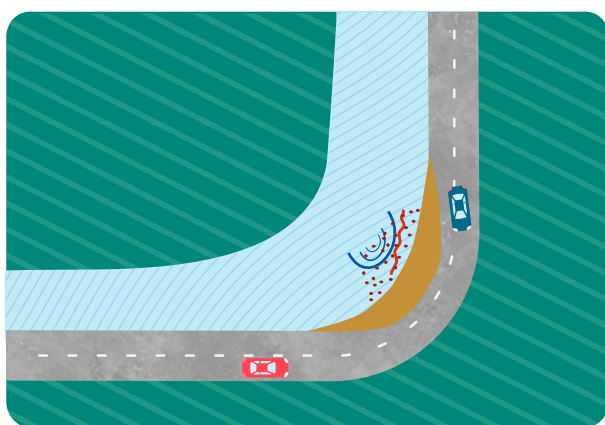
Fatores que influenciam o risco

- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção.
- Inclinação das encostas e grau de estabilização.
- Existência de proteção ou vegetação nas encostas.
- Estudos sobre a ação dos ventos na região.
- Sismicidade da região.
- Existência de um plano de gestão de emergências.
- Realização de atividades de manutenção e inspeção.

FALHA DO TALUDE INDUZIDA POR EROSÃO

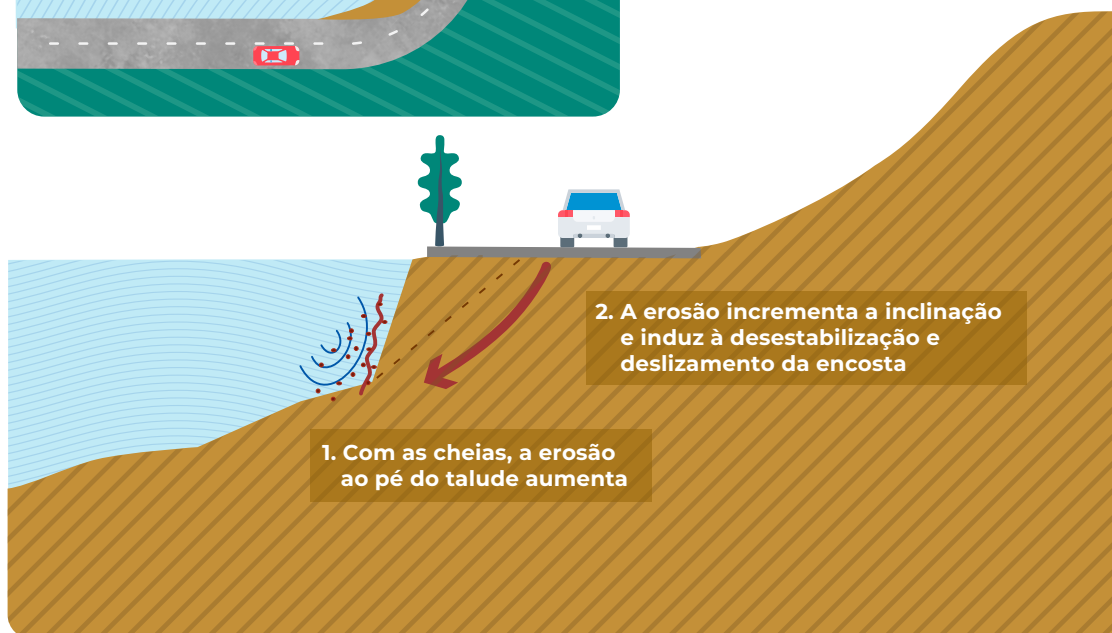
Num cenário hidrológico, a velocidade do fluxo pode induzir à erosão das margens do rio, sendo estas partes do talude (aterro) do próprio traçado viário. A erosão é mais intensa no trecho externo das curvas do leito. Essa erosão ao pé do talude pode induzir ao deslizamento do terreno nesse ponto, o que pode afetar a circulação normal de veículos na rodovia. No caso de uma rápida queda dos níveis de água após uma inundação, a saturação do aterro pode aumentar o risco deste Modo de Falha.

Vista em planta



4. A erosão se acentua na margem externa dos trechos com curvatura

3. O deslizamento pode impedir total ou parcialmente o tráfego na rodovia



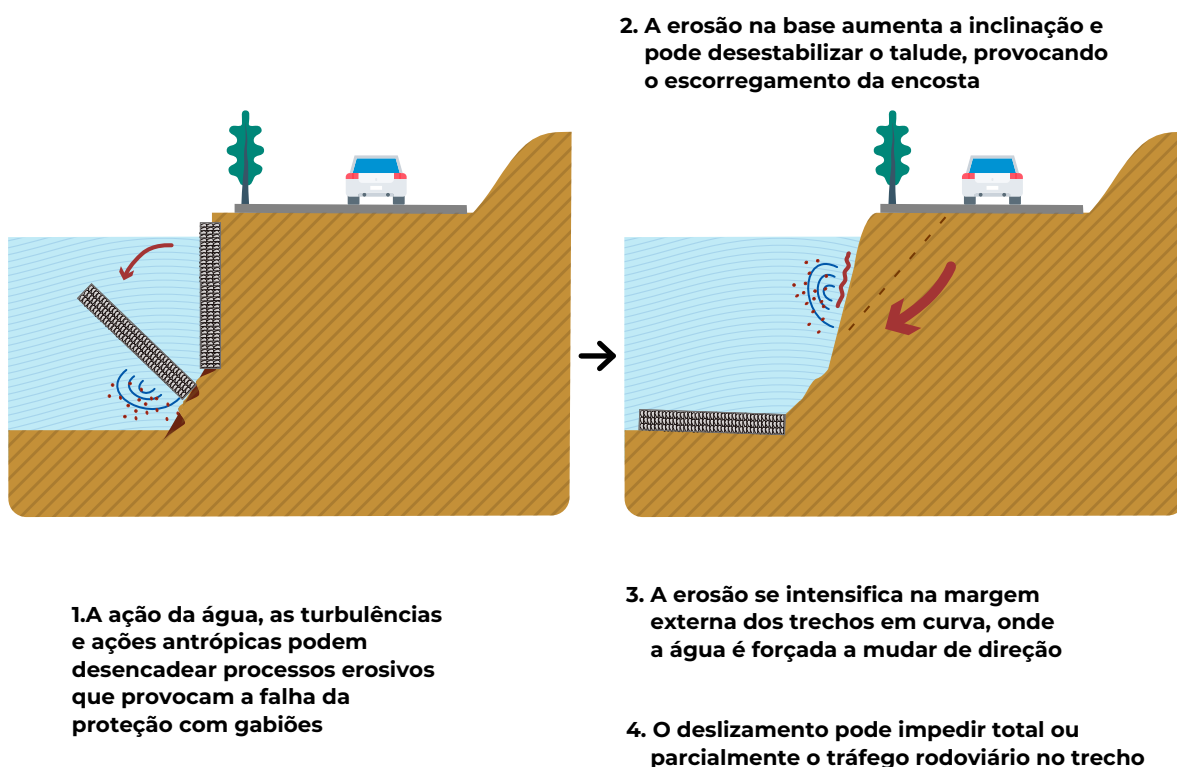
Vista transversal

Fatores que influenciam o risco

- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção.
- Existência de proteção contra erosão ou vegetação nas margens do rio.
- Atividades de extração de sedimentos no leito do rio que possam aumentar a velocidade do fluxo e, conseqüentemente, agravar a erosão nas margens.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

DESABAMENTO DE GABIÕES NAS MARGENS DO LEITO

Num cenário de operação normal, a velocidade do fluxo pode induzir a erosão das margens do rio, que em algumas partes estão protegidas por gabiões. Se a velocidade e o nível da água forem suficientes, essa proteção pode falhar e desabar por erosão na base ou por ações antrópicas, como o corte das malhas para a retirada de pedras grandes. O desabamento dos gabiões deixa o talude desprotegido, iniciando-se a erosão que, por fim, leva ao colapso.



Fatores que influenciam o risco

- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Conscientização da população.
- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção
- Existência de desmatamento na bacia, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais altos e tempos de concentração menores.

FALHA DA PONTE POR EROSÃO DAS FUNDAÇÕES

Num cenário hidrológico ou de operação normal, se a velocidade do fluxo for suficientemente elevada, o terreno natural granular que envolve a fundação das pontes pode ser arrastado. A escavação pode causar o rebaixamento de toda a infraestrutura. Assim a perda de apoio acaba provocando deslocamentos do tabuleiro e comprometendo a passagem do tráfego sobre a estrutura.

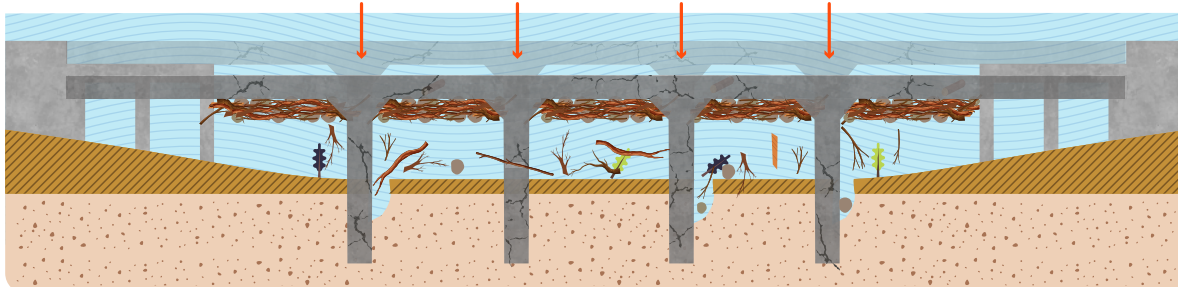
1. Chuvas de alta intensidade



2. Grandes vazões

4. Recalques da ponte

5. Inabilitação da ponte



3. Erosão e escavação das fundações

Fatores que influenciam o risco

- Trabalhos de manutenção e inspeção da infraestrutura.
- Presença de materiais não coesivos e facilmente erodíveis.
- Presença de chuvas frequentes e inundações recorrentes na área.
- Existência de estudos geotécnicos que definam o material da fundação.
- Existência de vias alternativas à obra de passagem, transitáveis em caso de falha da mesma.
- Trabalhos de extração de inertes na zona do leito que possam aumentar a velocidade do fluxo e o risco de erosão das obras hidráulicas.
- Isolamento da população em caso de falha de uma obra de passagem durante um evento de inundação.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

DANO NA ESTRADA POR FISSURAMENTO

Num cenário normal, devido às grandes variações de temperatura entre o dia (calor) e a noite (geadas), a água existente nas fissuras das infraestruturas ou entre as rochas dos taludes pode congelar, aumentando o fissuramento das mesmas ou até provocando o desprendimento de rochas, o que pode causar danos na estrada.

1. Fortes variações de temperatura



Fatores que influenciam o risco

- Zona com temperaturas extremas.
- Influência das mudanças climáticas na variação de temperaturas.
- Existência de proteção contra erosão ou vegetação nas margens da infraestrutura e nas encostas dos taludes.
- Existência de proteção contra erosão ou vegetação nos taludes.

DANO À PLATAFORMA POR QUEDA DE MATERIAL

Dum cenário com ventos fortes, pode ocorrer um processo erosivo que provoque a queda de material proveniente de taludes secos sobre o traçado da estrada, podendo danificar parte da infraestrutura. Isso torna-a temporariamente intransitável ou pode causar danos a veículos que trafegam por ela.

1. Geração de ventos fortes



2. Queda de material de taludes secos



3. Danos à infraestrutura/veículos

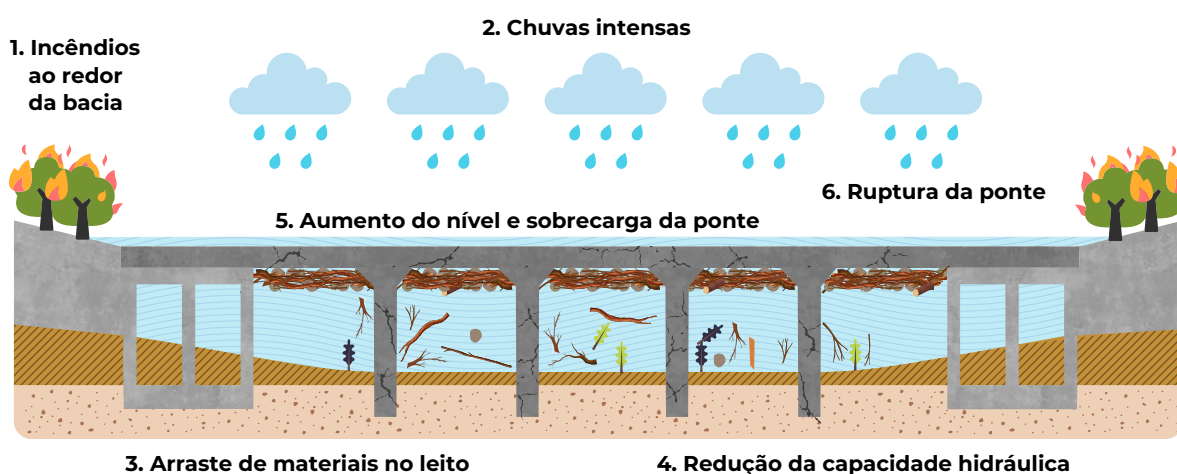
Fatores que influenciam o risco

- Zona com ventos de grande intensidade.
- Existência de estudos geotécnicos prévios à construção.
- Existência de proteção contra erosão ou vegetação nos aterros.
- Existência de proteção contra erosão ou vegetação nas margens da infraestrutura e nas encostas dos aterros.

3.3. Outros Modos de Falha

MATERIAL NA BACIA GERADO POR INCÊNDIOS E RUPTURA DA PONTE

Num caso de ocorrência de incêndios ao redor da bacia hidrográfica, podem ser geradas grandes quantidades de material que, após episódios de chuvas intensas, podem acabar sendo transportadas para o leito do rio, obstruindo-o e reduzindo sua seção. Como consequência, podem ocorrer níveis elevados no leito, que, devido ao empuxo hidrostático, podem causar a falha e ruptura do tabuleiro da ponte, a ruptura por cisalhamento dos pilares ou erosão na união entre o tabuleiro e o aterro nos encontros da ponte, entre outros.



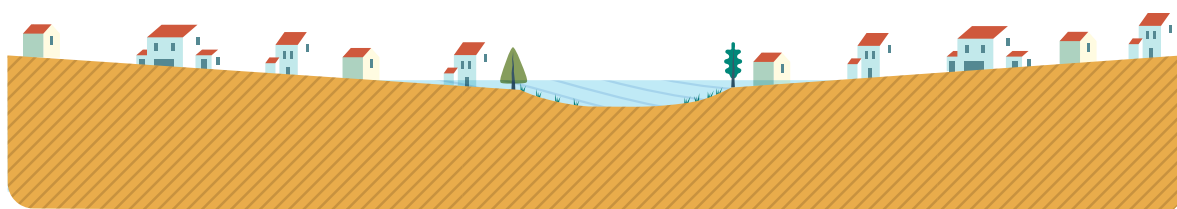
Fatores que influenciam o risco

- Consideração do empuxo dos materiais arrastados no dimensionamento estrutural.
- Consideração da perda de capacidade hidráulica por arraste de materiais no dimensionamento hidráulico.
- Disponibilidade de estudos hidrológicos/hidráulicos e a relação real entre os níveis na ponte e os períodos de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração mais curtos.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.

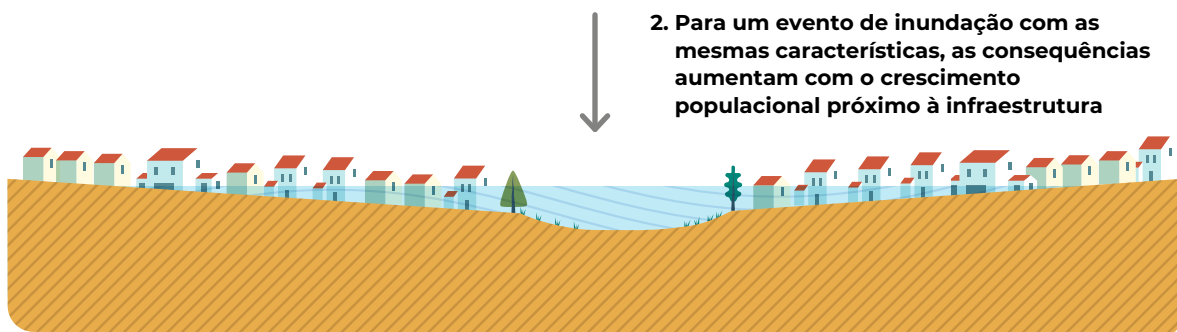
OCUPAÇÕES INFORMAIS EM ZONAS INUNDÁVEIS

Após a construção da infraestrutura viária, desenvolvem-se moradias e atividades comerciais e turísticas nas zonas inundáveis ao redor da estrada, devido à relevância da atividade econômica nas proximidades da infraestrutura. Num cenário hidrológico, ocorre a inundação fluvial dessas áreas povoadas, com aumento dos danos à população e prejuízos econômicos devido a esses assentamentos.

1. Novas ocupações informais em zonas inundáveis próximas à rodovia



2. Para um evento de inundação com as mesmas características, as consequências aumentam com o crescimento populacional próximo à infraestrutura

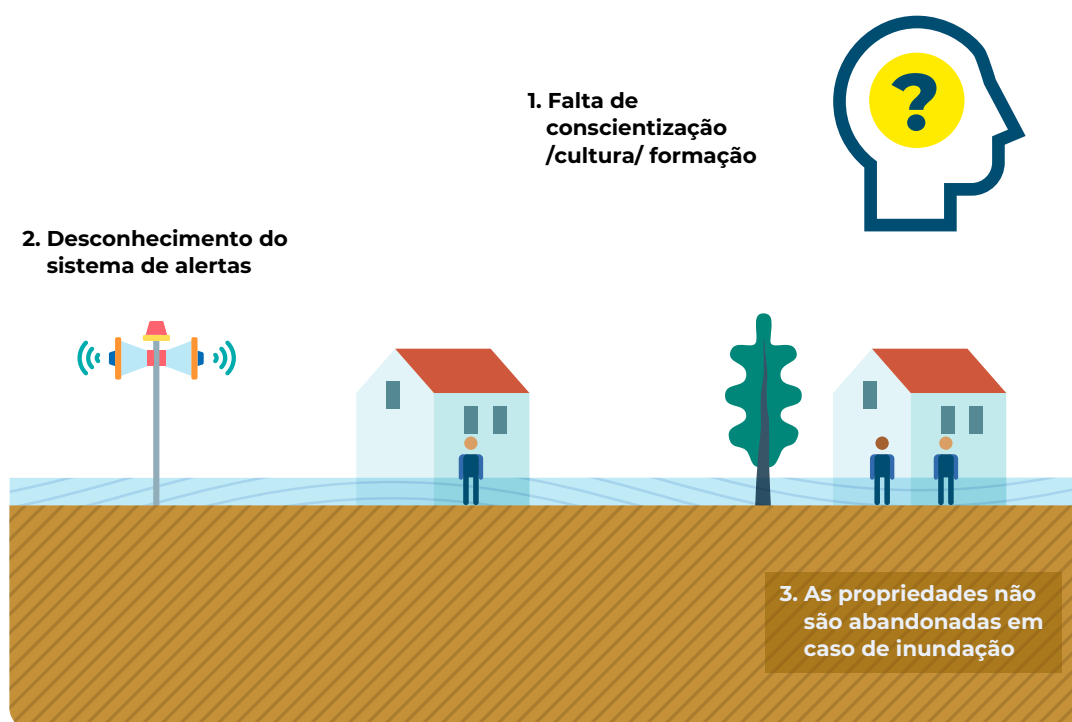


Fatores que influenciam o risco

- Existência de uma faixa de proteção para evitar o desenvolvimento urbano ao redor da infraestrutura.
- Ocupações habitacionais em zonas inundáveis.
- Acompanhamento social nas fases de pré-investimento, projeto e construção, para que os beneficiários conheçam o projeto.
- Campanhas de informação e conscientização da comunidade sobre a importância de manter em bom estado a bacia hidrográfica a montante.
- Existência de bloqueios em trechos da infraestrutura viária.
- Existência e funcionamento adequado de obras de drenagem longitudinal e transversal.
- Estado de conservação da bacia hidrográfica onde se localiza a infraestrutura.

NÃO ABANDONO DAS PROPRIEDADES EM INUNDAÇÕES

Num cenário hidrológico, ocorre a inundação pluvial ou fluvial de alguns trechos da rodovia. Devido à falta de conscientização e formação da população residente quanto aos riscos de inundação, os cidadãos desconhecem os protocolos de atuação e os sistemas de alerta, razão pela qual não abandonam suas residências para buscar uma zona segura quando a inundação se aproxima. Por esse motivo, as inundações causam maiores perdas humanas.

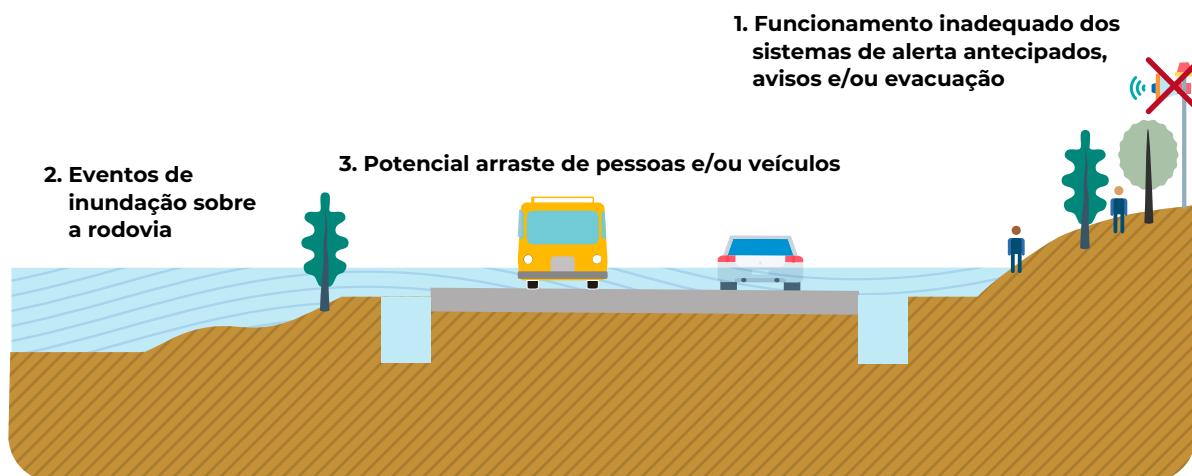


Fatores que influenciam o risco

- Manutenção e realização de testes dos sistemas de alerta à população.
- Existência de Planos de Ação de Emergência.
- Conhecimento, por parte da população, dos planos, campanhas e normas.
- Campanhas de informação e conscientização da comunidade sobre a importância e os riscos relacionados às inundações.

FALHA NOS SISTEMAS DE ALERTA À POPULAÇÃO

Em cenários de previsão de inundações, pode ocorrer a inexistência de procedimentos de alerta ou o funcionamento inadequado dos mesmos, de modo que os veículos continuariam a transitar pela estrada e as pessoas permaneceriam em suas casas, sendo afetadas quando a inundação atingir a região.

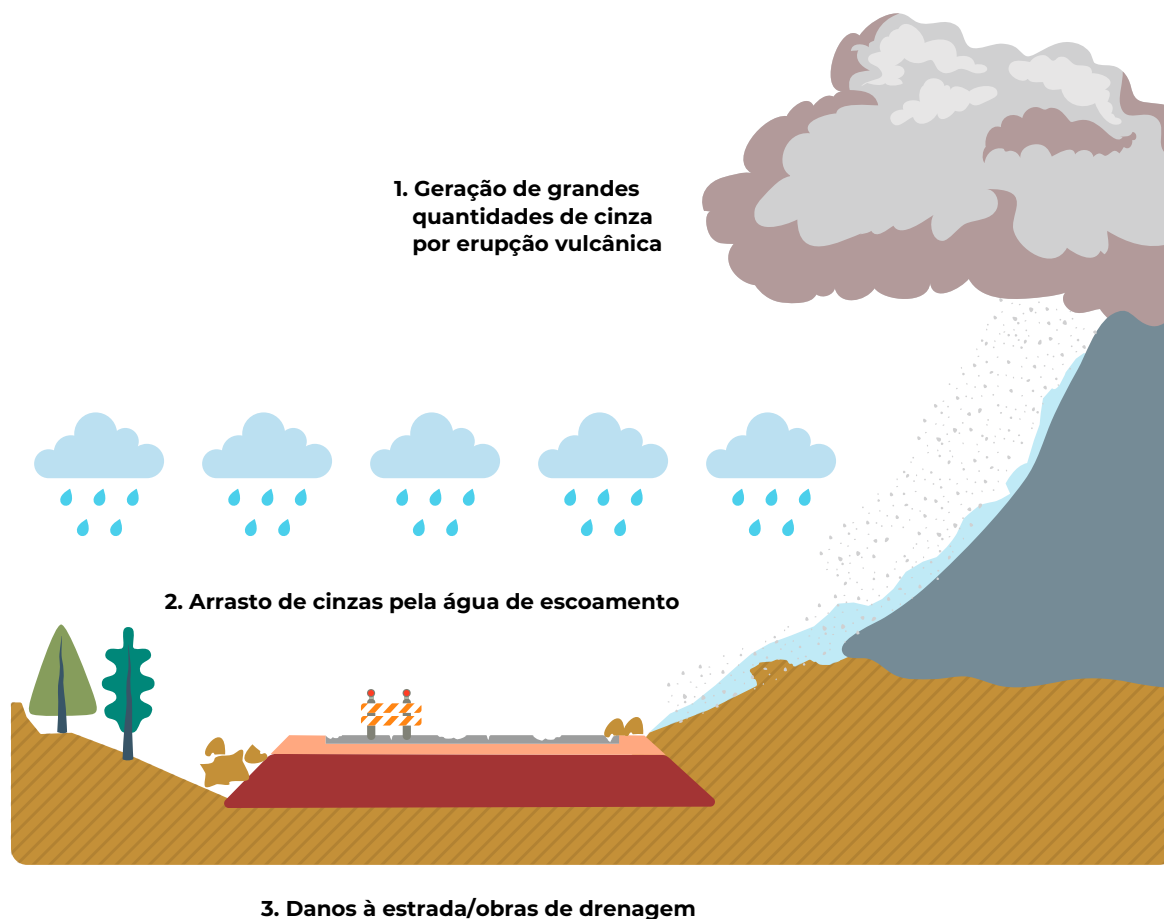


Fatores que influenciam o risco

- Manutenção e realização de testes dos sistemas de alerta à população.
- Existência de Planos de Ação de Emergência.
- Campanhas de informação e conscientização da comunidade sobre a importância e os riscos relacionados as inundações.

DANOS NA VIA POR ARRASTO DE CINZAS VULCÂNICAS

Em cenário sísmico, o vulcão pode gerar grandes quantidades de cinzas vulcânicas, que posteriormente são arrastadas pela água de escoamento, causando danos à estrada e às obras de drenagem.



Fatores que influenciam o risco

- Proximidade do traçado a um vulcão.
- Dimensionamento das infraestruturas frente a sismos.
- Isolamento de populações em caso de emergência por erupção vulcânica.
- Disponibilidade de estudos geotécnicos.

DANOS A VEÍCULOS E PARALISAÇÃO DE TRÁFEGO POR QUEDA DE GRANIZO

Em cenário hidrológico, em altitudes elevadas, ocorrem tempestades de granizo que paralisam a via e podem causar danos aos veículos que nela transitam, assim como interrupções no tráfego devido à baixa visibilidade.



2. Danos à infraestrutura/veículos

Fatores que influenciam o risco

- Zona com temperaturas baixas.
- Disponibilidade de dados de precipitação, rede de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações para um determinado período de retorno.

4. Relação de estudos técnico-científicos

Neste item são mencionados uma série de estudos técnico-científicos, conforme a tipologia dos Modos de Falha, que devem ser considerados para reduzir o risco dos Modos de Falha e diminuir a incerteza para melhorar o projeto das infraestruturas.

MODO DE FALHA HIDROLÓGICO

- Levantamento de dados meteorológicos.
- Considerar eventos extremos devido às mudanças climáticas.
- Estudo hidráulico.
- Considerar as atividades na bacia que possam influenciar a infraestrutura.
- Plano de gestão da bacia.
- Plano de Ação de Emergência.

MODO DE FALHA ESTRUTURAL/SÍSMICO

- Estudo estrutural da infraestrutura.
- Estudo geológico e geotécnico da fundação.
- Estudo da ameaça sísmica.

MODO DE FALHA POR OUTRAS TIPOLOGIAS

- Planos de ordenamento urbano em zonas sujeitas a inundações.
- Protocolos de alerta à população em caso de inundação.
- Plano de Ação de Emergência.

5. Recomendações e boas práticas

A seguir, são reunidas uma série de recomendações e boas práticas de intervenção segundo as tipologias de Modos de Falha.

MODO DE FALHA HIDROLÓGICO

Para reduzir o risco dos Modos de Falha de tipologia hidrológica, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Quando se trata de infraestruturas viárias que cruzam cursos d'água, como pontes, devem ser determinados os hidrogramas das cheias previstas, junto com a caracterização estatística de suas probabilidades de ocorrência. Também devem ser analisadas e levadas em consideração as cheias históricas. Considerar o conhecimento disponível sobre as possíveis mudanças a longo prazo nas condições hidrológicas da bacia e os possíveis efeitos das mudanças climáticas.
- Os gabaritos e o vão livre entre os pilares das pontes devem ser projetados para permitir a passagem de elementos flutuantes que possam ser arrastados pelo curso d'água.
- Caso haja escassez de dados de precipitação no país devido à baixa densidade da rede de estações meteorológicas e à alta variabilidade geográfica da precipitação, deverão ser realizadas análises e ajustes pertinentes das séries históricas.
- Caso a rede de medição de vazões seja muito pouco densa, poderá ser estudada a possibilidade de instalar estações adicionais de medição para o projeto.
- Deve-se considerar a incerteza nos dados de precipitação existentes devido a problemas no registro de dados e na manutenção da rede.
- Não realizar modificações durante a construção da infraestrutura viária sem reavaliar seu comportamento hidráulico.
- Realizar visitas técnicas ao local onde a infraestrutura está implantada, para detectar possíveis aspectos não considerados no projeto ou identificar as causas do mau funcionamento da infraestrutura e das obras de drenagem.
- Elaborar um manual de operação e manutenção da infraestrutura viária, com o objetivo de dispor dos procedimentos e do pessoal necessário para a realização da operação e manutenção da via. Recomenda-se que o manual inclua: tarefas a serem realizadas (inspeções, medições, manutenção de instrumentação, revisões de segurança etc.), os responsáveis por cada tarefa, a periodicidade de cada uma e o departamento/administração local ao qual estão vinculadas.

MODO DE FALHA ESTRUTURAL/SÍSMICO

Para reduzir o risco dos Modos de Falha de tipologia estrutural ou sísmica, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Devem ser analisadas as características topográficas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do terreno onde será implantada a infraestrutura viária. O escopo das investigações e estudos a serem realizados deverá permitir a caracterização dos terrenos afetados pela obra e a obtenção dos parâmetros de cálculo necessários para determinar a resistência, deformabilidade, permeabilidade e estabilidade físico-química do solo.
- Os parâmetros de resistência a serem utilizados nos cálculos devem ser justificados com um número suficiente de ensaios, além de outros métodos indiretos que aumentem a robustez da estimativa.
- A estabilidade do conjunto infraestrutura–terreno será verificada considerando suas características geomorfológicas, geotécnicas e tectônicas, em especial todas as peculiaridades que a fundação possa apresentar.
- O projeto deverá definir os materiais a serem utilizados, determinar sua procedência, localização geográfica e volumes disponíveis, estabelecer as características que devem cumprir e especificar os procedimentos para sua verificação e controle. Os materiais deverão ser ensaiados e as unidades de obra executadas conforme as especificações do projeto.
- Nos cálculos de verificação serão utilizados os valores característicos dos parâmetros de resistência dos materiais. Caso não exista base estatística suficiente para estabelecer tais valores, estes deverão ser definidos por meio de estimativas conservadoras com base nos dados disponíveis.
- Devem ser consideradas as ações sísmicas sobre a infraestrutura, de acordo com a atividade sísmica da região onde está localizada.
- No caso de estruturas de concreto, a execução do concreto deve ser realizada de forma adequada para evitar a segregação dos seus agregados.
- Para estruturas de concreto, é recomendável a inclusão de juntas, de modo que a dissipação do calor durante a cura não gere fissuras no concreto.
- Deve-se investigar se, nas margens da infraestrutura viária, existem terrenos com risco de instabilidade que possam provocar deslizamentos de encostas. Nesse caso, devem ser estudadas as condições de estabilidade das encostas, particularmente em situações de chuvas intensas, analisando-se a possível obstrução da via pelo material deslizado.
- A infraestrutura, suas fundações e margens devem contar com equipamentos de instrumentação adequados para permitir a análise periódica do seu comportamento e a detecção de anomalias que possam afetar sua segurança.
- Proteger os equipamentos de monitoramento com ferramentas voltadas à detecção e

MODO DE FALHA – OUTRAS TIPOLOGIAS

Para reduzir o risco dos Modos de Falha de outras tipologias, deverão ser considerados os seguintes aspectos:

- Os equipamentos e sistemas de comunicação devem ser projetados de forma a garantir operação permanente e contar com redundância.
- Quando se tratar de questões sociais, será considerada a opinião da população, realizando-se reuniões para buscar consensos.
- Serão criados sistemas de alerta para incêndios, bem como elaborados planos de evacuação e procedimentos de atuação dos serviços de emergência.
- Será elaborado um plano ambiental que especifique os usos e as limitações do solo.

Referências

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Resumen ejecutivo de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático del BID*. 2018.

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID*. 2019.

International Standardization Organization (ISO). *Risk Management – Principles and Guidelines*. ISO 31000. 2009.

International Electrotechnical Commission. *Analysis Techniques for System Reliability – Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. International Standard. 2006.

Mecca, S., y Masera, M. *Technical Risk Analysis in Construction by Means of FMEA Methodology*. 1999.

Kim, J. H., H. Y. Jeong, y J. S. Park. *Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for Railroad Systems*. 2009.

Aguilar Otero, J., Torres Arcique, R., y Magaña Jiménez, D. *Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. 2010.

Zeng, S. X., Tam, C. M., y Tam, V. W. Y. *Integrating Safety, Environmental and Quality Risks for Project Management using a FMEA Method*. 2010.

Carlson, C. S. *Effective FMEAs. Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. 2012.

SPANCOLD. *Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Guía Técnica N° 8 de Explotación de Presas y Embalses. Análisis de Riesgos aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses*. 2012.

Hwang, H., Lansey, K., y Quintanar, D. R. *Resilience-based Failure Mode Effects and Criticality Analysis for Regional Water Supply System*. 2015.

Rasoul, Y. y Hanewinkel, M. *Climate Change and Decision-Making Under Uncertainty*. 2016.

Marchau, Vincent A.W.J., Warren E. Walker, Pieter J.T.M. Bloemen, y Steven W. Popper. *Decision Making Under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. 2019.

Ministério do Meio Ambiente e Água - Bolívia. *Medidas de protección y mitigación para reducir riesgos para eventos de inundación y crecidas en áreas agrícolas y urbanas en cuencas Alta y Baja*. 2021.

