

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Júlio de Mesquita Filho - campus de Ilha Solteira - SP

YASMIN RITER LOPES

Desenvolvimento de soluções habitacionais para zonas de rompimento de barragens :
uma perspectiva sobre casas alternativas

Ilha Solteira - SP

2026

Yasmin Riter Lopes

Desenvolvimento de soluções habitacionais para zonas de rompimento de barragens :
uma perspectiva sobre casas alternativas

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada à
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Júlio
de Mesquita Filho, Ilha Solteira - SP, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Profº Dr. Jorge Luís Akasaki

Ilha Solteira - SP
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L864d Lopes, Yasmin Riter.
Desenvolvimento de soluções habitacionais para zonas de rompimento de barragens: uma perspectiva sobre casas alternativas / Yasmin Riter Lopes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
52 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2026

Orientador: Jorge Luís Akasaki

Inclui bibliografia

1. Segurança de barragens . 2. Resiliência habitacional. 3. Zonas de risco.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluna: **YASMIN RITER LOPES**

Titulo: **DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES HABITACIONAIS PARA ZONAS DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS: UMA PERSPECTIVA SOBRE CASAS ALTERNATIVAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
(Orientador) – UNESP – ILHA SOLTEIRA



Prof. Dr. Marcelo Bortoletto
(Examinador) - UNESP – ILHA SOLTEIRA

gov.br
Documento assinado digitalmente
RODRIGO GAROZI DA SILVA
Data: 16/06/2026 11:11:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Garozi da Silva
(Examinador) – UNICAMP

Ilha Solteira

16/06/2026

Dedico este trabalho de modo especial, a minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me concedido força e discernimento ao longo desta jornada.

Aos meus pais, José e Edna, que mesmo diante das dificuldades, nunca mediram esforços para incentivar meus estudos e acreditar nos meus sonhos. Todo este esforço é também por vocês.

Ao meu irmão, Yghor, pelo auxílio durante a graduação e por me levar para a apresentação do meu TCC.

Ao meu namorado, Michel, por me apoiar no momento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki, pela oportunidade e pelas diretrizes confiadas para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho investiga o desenvolvimento de soluções habitacionais projetadas para mitigar os riscos em zonas de potencial rompimento de barragens. No Brasil, o cenário de segurança de barragens é regido pela Lei nº 12.334/2010, que, embora estabeleça critérios para a gestão de estruturas, ainda apresenta lacunas quanto às diretrizes construtivas para as moradias situadas a jusante, especialmente na Zona de Autossalvamento (ZAS) e na Zona de Segurança Secundária (ZSS). A pesquisa justifica-se pela vulnerabilidade das construções convencionais brasileiras, que não são dimensionadas para suportar os esforços hidrodinâmicos como a pressão hidrostática, forças de arrasto e impacto de detritos, gerados por uma onda de ruptura abrupta. O objetivo geral é propor estratégias habitacionais resilientes que integrem a topografia local e os parâmetros físicos de impacto a edificação. Metodologicamente, o estudo realiza um levantamento documental e bibliográfico, analisando normas técnicas nacionais e referências internacionais de construção adaptada a desastres ambientais. Os resultados apontam que a resiliência habitacional nessas áreas depende não apenas da estrutura, mas de um planejamento que considere a dinâmica da onda de inundação. Conclui-se que o desenvolvimento de critérios técnicos específicos para moradias em zonas de risco é fundamental para a preservação de vidas e a redução do dano potencial associado.

Palavras-Chave: segurança de barragens; resiliência habitacional; zonas de risco.

ABSTRACT

This study investigates the development of housing solutions designed to mitigate risks in areas prone to potential dam failures. In Brazil, the dam safety scenario is governed by Law No. 12,334/2010, which, although establishing criteria for structure management, still presents gaps regarding construction guidelines for dwellings located downstream, especially in the Self-Rescue Zone (ZAS) and the Secondary Safety Zone (ZSS). The research is justified by the vulnerability of conventional Brazilian constructions, which are not designed to withstand hydrodynamic loads such as hydrostatic pressure, drag forces, and debris impact generated by an abrupt breach wave. The general objective is to propose resilient housing strategies that integrate local topography and physical impact parameters into the building design. Methodologically, the study conducts a documentary and bibliographic survey, analyzing national technical standards and international references for construction adapted to environmental disasters. The results indicate that housing resilience in these areas depends not only on the structure but on planning that considers the flood wave dynamics. It is concluded that the development of specific technical criteria for housing in risk zones is fundamental for the preservation of lives and the reduction of associated potential damage.

Keywords: dam safety; housing resilience; risk zones.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Barragem de Terra.	16
Figura 2	Barragem de Terra Homogênea.	17
Figura 3	Barragem de Terra Zonada.	17
Figura 4	Barragem de Enrocamento.	18
Figura 5	Barragem de Enrocamento de núcleo impermeável.	18
Figura 6	Barragem de Enrocamento de face impermeável.	19
Figura 7	Barragem de Concreto de Lajes no ribeirão das Lajes.	19
Figura 8	Ilustração de uma barragem de gravidade.	20
Figura 9	Ilustração de uma barragem de gravidade aliviada.	20
Figura 10	Ilustração de uma barragem de contraforte.	21
Figura 11	Ilustração de barragem de concreto rolado.	21
Figura 12	Ilustração de barragem em arco.	22
Figura 13	Exemplos de instabilizações e falhas em estruturas de contenção:	23
Figura 14	Modos de falha em estruturas de terra:	24
Figura 15	Pressão hidrostática e força de empuxo.	26
Figura 16	Ações hidrodinâmicas e efeitos do fluxo de água em edificações.	27
Figura 17	Ação de cargas de impacto por detritos flutuantes em estruturas.	28
Figura 18	Esforços atuantes em estruturas:	36
Figura 19	Manifestações patológicas e danos geoambientais em edificações:	37
Figura 20	Elementos do projeto estrutural:	39
Figura 21	Manifestações patológicas e danos geoambientais em edificações:	41
Figura 22	Sistemas de proteção contra cheias:	42
Figura 23	Modelo conceitual de resiliência residencial segundo as diretrizes da FEMA. .	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CRI	Categoria de Risco
CRH	Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil
DPA	Dano Potencial Associado
FEMA	Federal Emergency Management Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INAG	Instituto da Água
NBR	Norma Brasileira Registrada
PAE	Plano de Ação de Emergência
PAR	População em Risco
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílio
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de Vinila
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SNISB	Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens
ZAS	Zona de Autossalvamento
ZSS	Zona de Segurança Secundária

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do objeto exposta ao fluxo
C_d	Coeficiente de arrasto
D_d	Força de arrasto
g	Aceleração da gravidade
p	Pressão hidrostática
u	Velocidade do escoamento
y	Profundidade ou carga hidrostática
ρ	Densidade do fluido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivo geral	13
1.4	Objetivos específicos	13
1.5	Estrutura do trabalho	13
2	METODOLOGIA	15
3	BARRAGENS, ROMPIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RISCO .	16
3.1	Tipos de barragens e modos de ruptura	16
3.2	Dinâmica do rompimento e propagação da inundação	24
3.3	Esforços hidrodinâmicos e parâmetros físicos de impacto em áreas habitadas	25
4	ZONAS DE RISCO E OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO	29
4.1	Zona de Autossalvamento (ZAS) e áreas de impacto	29
4.2	Relação entre topografia, hidrografia e inundação	30
4.3	Vulnerabilidade das ocupações existentes	31
5	HABITAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO DE BARRAGENS	33
5.1	Modelo habitacional convencional e sistemas construtivos	33
5.2	Comportamento das edificações frente a inundações extremas	34
6	SOLUÇÕES HABITACIONAIS RESILIENTES EM ÁREAS SUJEITAS AO ROMPIMENTO DE BARRAGENS	38
6.1	Referências técnicas internacionais e construções resilientes em áreas sujeitas a inundações	38
6.2	Estratégias construtivas em áreas sujeitas a inundações	40
7	DISCUSSÃO	44
8	CONCLUSÃO	46
9	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Barragens são estruturas com a finalidade de conter e armazenar substâncias líquidas ou sólidas, formando reservatórios de acumulação seja de água para aproveitamento elétrico, irrigação ou abastecimento, seja de rejeitos minerais e industriais (ANA, 2025). As áreas localizadas a jusante de barragens podem conter zonas rurais e áreas urbanas que se encontram sob risco direto, uma vez que, ao ocorrer uma ruptura, o elevado volume de material retido pode ocasionar, em instantes, inundações, soterramentos, colapso nas estruturas e perda da habitabilidade.

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens de 2024-2025, o Brasil possui 28.085 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB) no ano de 2025. Deste total, 97% são barragens de acúmulo de água, distribuídas entre geração de energia hidrelétrica (5%), abastecimento (8%), irrigação (36%), dessedentação animal (20%); regularização da vazão (12%), agricultura (7%) e outros usos (7%). As barragens destinadas a disposição de rejeitos minerais e industriais representam aproximadamente 5% do total das estruturas cadastradas.

As áreas a jusante de uma barragem são classificadas por zonas. Destaca-se a Zona de Autossalvamento (ZAS), definida como a área de inundação no vale a jusante da barragem correspondente ao trecho percorrido pela onda de inundação nos primeiros 30 minutos após o rompimento da barragem (ANM, 2022). Além desta área de impacto imediato em um cenário de ruptura, o mapa de inundação delimita também a Zona de Segurança Secundária (ZSS) correspondente ao trecho não classificado como ZAS, mas que pode ser atingido pela inundação (BRASIL, 2020).

Nas zonas de risco, é consolidada a ocupação da população por meio de moradias. As construções seguem o padrão construtivo predominante do país, não levando em consideração a topografia e os esforços hidrodinâmicos relacionados a uma possível ruptura.

1.2 JUSTIFICATIVA

A segurança de barragens no Brasil é assegurada por meio de instrumentos legais, tais como a Lei nº 12.334/2010 (alterada pela Lei nº 14.066/2020), que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e o Decreto nº 11.310/2022, que estabelece diretrizes para a delimitação da ZAS e a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE). Esses instrumentos estão direcionados à prevenção de falhas nas estruturas das barragens e à mitigação de riscos associados à sua operação.

No entanto, no contexto nacional, observa-se a deficiência de normas técnicas que proponham

critérios construtivos para moradias que se localizam a jusante de barragens. As legislações vigentes concentram-se na segurança estrutural das barragens e na gestão de emergências, não contemplam diretrizes que orientem a adaptação das edificações frente a cenários de ruptura e às condições hidrodinâmicas.

O presente trabalho visa contribuir tecnicamente para o desenvolvimento de soluções construtivas de baixo custo voltadas a adaptação ao risco em zonas sujeitas ao rompimento de barragens.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de soluções habitacionais de baixo custo aplicadas à adaptação ao risco em zonas sujeitas ao rompimento de barragens.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais riscos hidrodinâmicos atuantes sobre edificações em cenários de rompimento de barragens;
- Analisar referências técnicas internacionais relacionadas a construções adaptadas em áreas sujeitas a desastres ambientais;
- Propor soluções habitacionais adaptadas a condição de risco associada ao rompimento de barragens;
- Avaliar sistemas construtivos e materiais de baixo custo que podem ser aplicados em zonas sujeitas ao rompimento de barragens;
- Analisar a ausência de diretrizes construtivas para moradias localizadas em zonas de risco de barragens no contexto brasileiro.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em capítulos, de modo a conduzir a análise de forma progressiva e estruturada. No capítulo 1, são abordados o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo. O capítulo 3 contextualiza os diferentes tipos de barragens e seus respectivos modos de ruptura, abordando, na sequência, a propagação da onda de cheia decorrente do rompimento, bem como os conceitos teóricos relacionados aos esforços hidrodinâmicos atuantes nesse cenário. No capítulo 4, são discutidos os conceitos das zonas de risco, com ênfase na ZAS e na ZSS, além da análise da influência da topografia e das bacias hidrográficas na ocorrência de inundação. Ainda neste capítulo, são abordados aspectos relacionados à vulnerabilidade das edificações inseridas nessas áreas. O capítulo 5 trata das características das edificações convencionais no Brasil, considerando os materiais empregados e outros fatores que contribuem

para a sua vulnerabilidade, bem como o comportamento dessas estruturas frente a eventos de inundação. O capítulo 6 apresenta estratégias de melhoria e adaptação das edificações, com base em manuais técnicos de referência internacional. Por fim, são apresentadas a discussão dos resultados e as conclusões do trabalho.

2 METODOLOGIA

O trabalho baseia-se em levantamento bibliográfico e documental, através da análise de legislações, documentos oficiais e normas técnicas relacionadas à segurança de barragens. Além disso, será realizada uma revisão de referências nacionais e internacionais acerca de construções adaptadas a áreas sujeitas a desastres ambientais.

Serão analisados os principais esforços hidrodinâmicos atuantes sobre moradias em cenários de rompimento de barragens, com foco na proposição de soluções em sistemas construtivos de baixo custo, adaptadas às condições de risco associadas ao rompimento.

3 BARRAGENS, ROMPIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

3.1 TIPOS DE BARRAGENS E MODOS DE RUPTURA

Segundo a Lei nº 12.334/2010 (alterada pela Lei nº 14.066/2020) que institui a PNSB entende-se por barragem a estrutura implantada em corpos d'água ou áreas adjacentes, cuja finalidade é a armazenamento ou contenção de líquidos, podendo envolver líquidos com componentes sólidos. Além disso, quanto a sua finalidade, as barragens podem ser destinadas à acumulação de água, bem como à disposição de rejeitos ou resíduos industriais.

De acordo com Costa (2012), as barragens podem ser diferenciadas quanto à sua tipologia em convencionais, que apresentam maior aderência construtiva, e não convencionais. Dentre as barragens convencionais, destacam-se:

- Barragem de terra

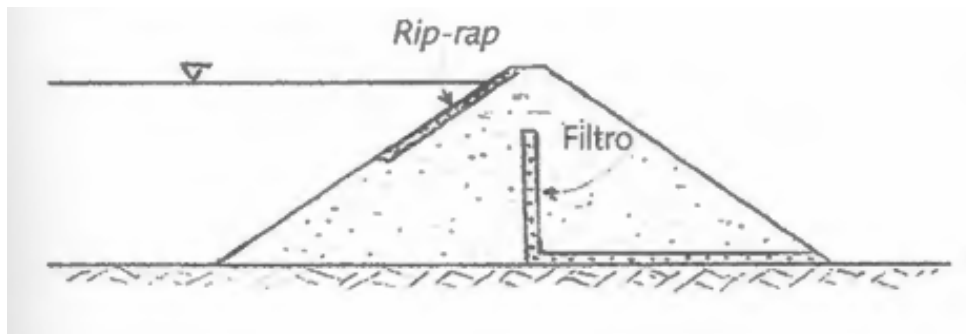
Na barragem de terra, o maciço deve conter predominantemente um solo argiloso, podendo ser classificado como homogêneo, quando é utilizado majoritariamente um único tipo de material em sua composição, ou zonada, onde há um zoneamento de diferentes materiais terrosos dispostos conforme suas características de permeabilidade. O panorama das barragens de terra é apresentado na Figura 1; suas variações estruturais estão detalhadas na Figura 2, que exibe uma barragem homogênea, e na Figura 3, que representa uma barragem zonada.

Figura 1 – Barragem de Terra.



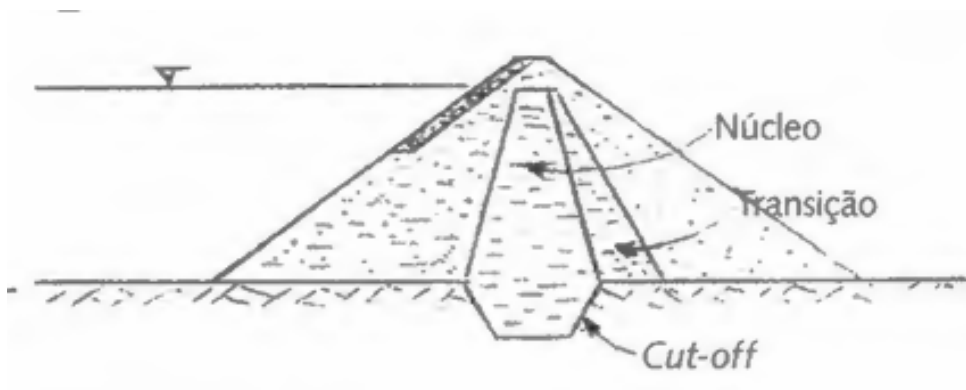
Fonte: ENGENHARIA (2024)

Figura 2 – Barragem de Terra Homogênea.



Fonte: Costa (2012)

Figura 3 – Barragem de Terra Zonada.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem de enrocamento

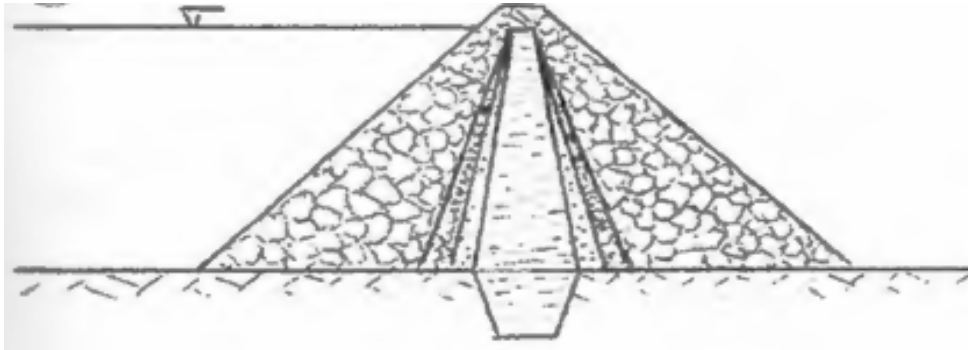
A barragem de enrocamento é constituída predominantemente por material rochoso, podendo apresentar duas configurações principais: com núcleo impermeável, geralmente composto por um núcleo de argila, responsável pela vedação da água, ou com a face de montante impermeável, executada por meio de camadas de materiais como asfalto, concreto ou chapa de aço. A Figura 4 representa uma barragem de enrocamento, enquanto as Figura 5 e Figura 6 ilustram, respectivamente, os modelos com núcleo impermeável e com face impermeável.

Figura 4 – Barragem de Enrocamento.



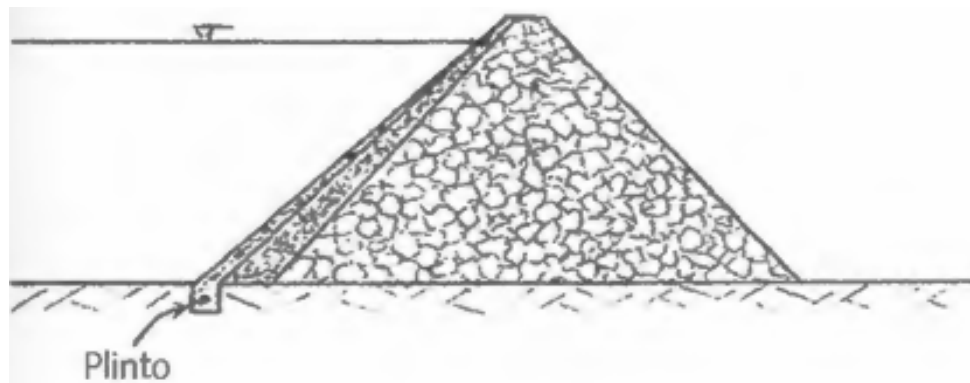
Fonte: Guidicini, Sandroni e Mello (2017)

Figura 5 – Barragem de Enrocamento de núcleo impermeável.



Fonte: Costa (2012)

Figura 6 – Barragem de Enrocamento de face impermeável.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem de concreto

As barragens de concreto são integralmente construídas em concreto e possuem variedades em sua tipologia construtiva.

Figura 7 – Barragem de Concreto de Lajes no ribeirão das Lajes.

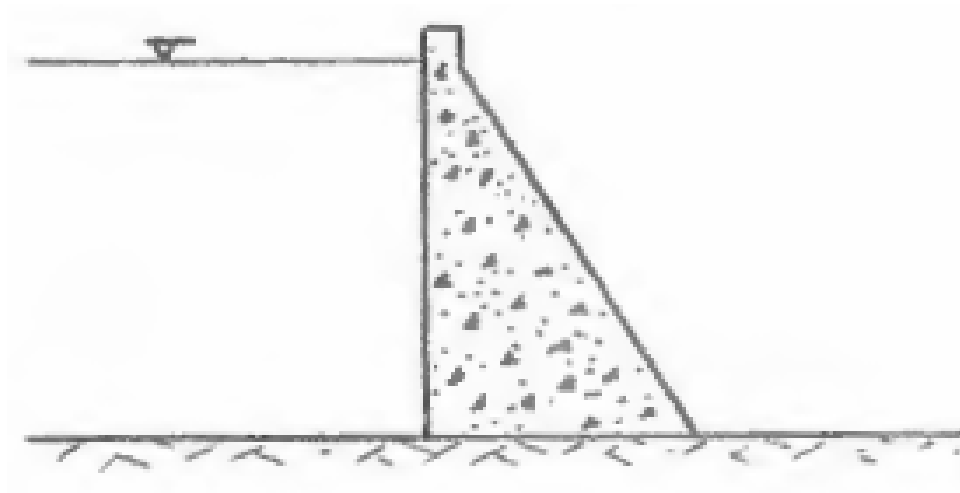


Fonte: Guidicini, Sandroni e Mello (2017)

Dentre as mais comuns, se destacam:

- Barragem de Gravidade: estrutura maciça com pouca armadura, trabalhando apenas com a compressão (Figura 8).

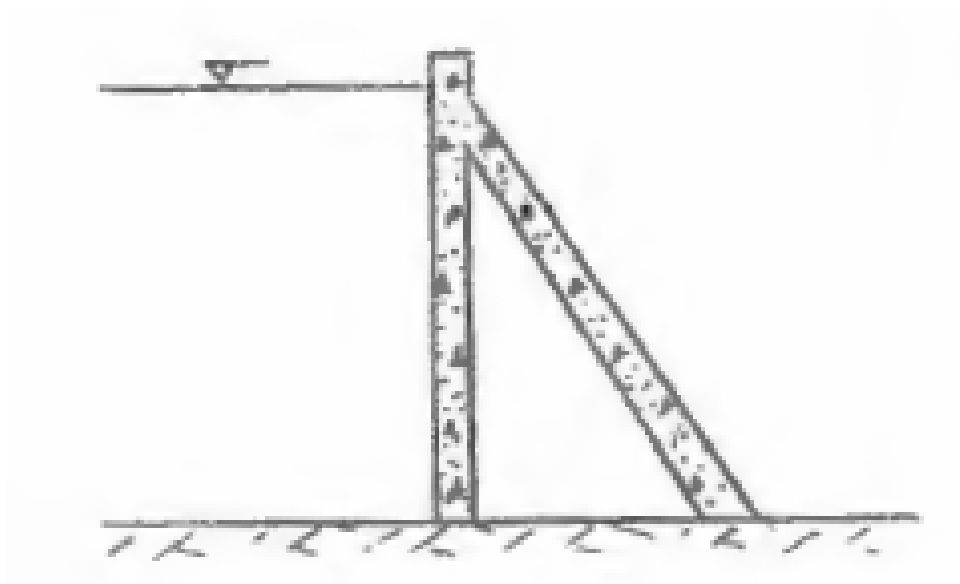
Figura 8 – Ilustração de uma barragem de gravidade.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem de gravidade aliviada: semelhante à de gravidade, porém apresenta uma estrutura mais leve e vazada, com o objetivo de diminuir as pressões transmitidas às fundações. Nesse caso, há maior uso de armaduras para resistir aos esforços de tração (Figura 9).

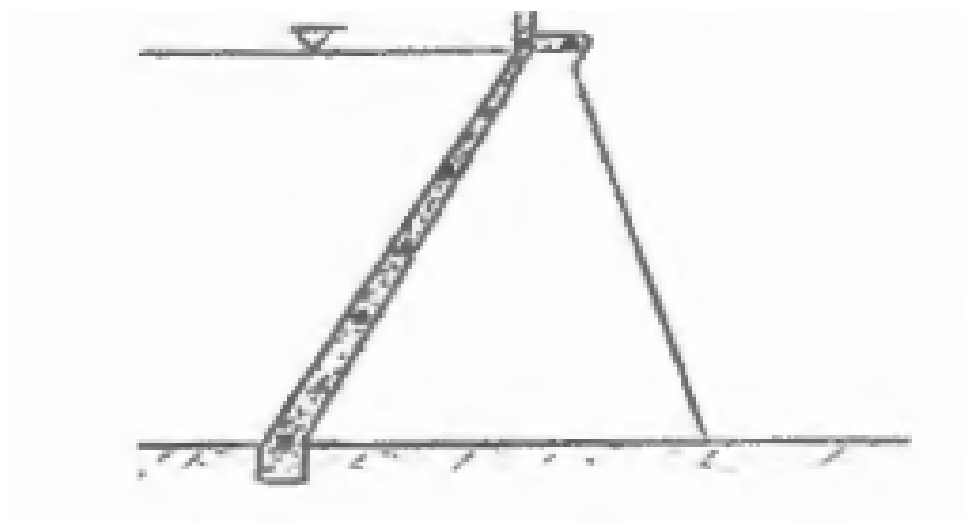
Figura 9 – Ilustração de uma barragem de gravidade aliviada.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem de contraforte: apresenta menor volume de concreto e maior quantidade de armadura, apresentando maior tensão de contato (Figura 10).

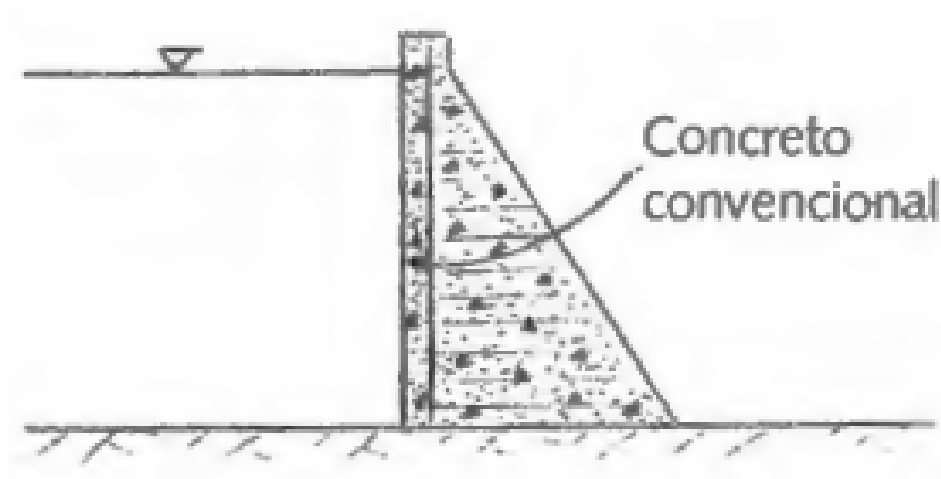
Figura 10 – Ilustração de uma barragem de contraforte.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem de concreto rolado ou compactado: variação da barragem de gravidade executada com concreto compactado, possuindo, camada de concreto convencional na face de montante, para garantir a estanqueidade da estrutura (Figura 11).

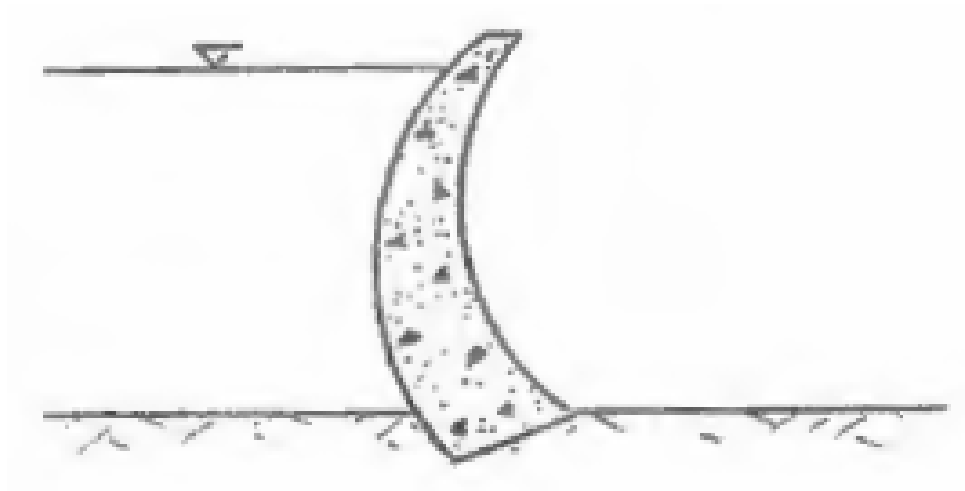
Figura 11 – Ilustração de barragem de concreto rolado.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem em arco (abóbada): possui curvaturas tanto no plano horizontal quanto no vertical, transmitindo as pressões hidráulicas para as ombreiras (Figura 12).

Figura 12 – Ilustração de barragem em arco.



Fonte: Costa (2012)

- Barragem mista

São consideradas barragens mistas aquelas constituídas por mais de um material ao longo da seção transversal, como nas combinações de enrocamento/concreto e terra/enrocamento.

Os modos de ruptura de uma barragem em operação são descritos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (ANA, 2017), na obra *Lições Aprendidas com Acidentes e Incidentes em Barragens e Obras Anexas no Brasil* de Guidicini, Sandroni e Mello (2017), como decorrentes de três mecanismos principais, os quais se diferenciam através do local manifestado. O primeiro mecanismo está associado a percolação, caracterizada pela passagem de água através das fundações ou pelo interior do aterro.

O segundo mecanismo refere-se à instabilidade, que ocorre quando os esforços resistentes são superados pelas cargas atuantes. Em barragens de aterros, manifesta-se predominantemente na forma de deslizamentos. Já nas barragens de concreto, a instabilidade pode atingir tanto a estrutura quanto a fundação, sendo representada por tombamento, deslizamento ou subpressão excessiva. A Figura 13 representa, respectivamente, o deslizamento de um talude em uma barragem de aterro (a) e uma brecha em uma barragem de concreto, momentos antes do colapso do arco (b).

Figura 13 – Exemplos de instabilizações e falhas em estruturas de contenção:



(a) deslizamento do talude de montante em barragem de aterro durante a fase de construção; (b) brecha decorrente de colapso estrutural em barragem de concreto gravidade.

Fonte: Guidicini, Sandroni e Mello (2017)

O terceiro mecanismo está relacionado à erosão, que pode ocorrer de forma externa ou interna. A erosão externa pode se manifestar através do galgamento (*overtopping*), quando a água passa por cima da crista da barragem, provocando a erosão do talude a jusante; pela erosão dos taludes, causada pela ação das ondas no talude de montante e pela água da chuva no talude de jusante; e pela erosão nas estruturas ou em suas fundações, decorrente do impacto das águas ao escoarem pelos órgãos de descarga ou pelas correntes de retorno. A erosão interna, também conhecida como *pipping*, ocorre em barragens de aterros ou em fundações e tem como principal causa a percolação. A Figura 14 representa, respectivamente, os processos de galgamento (a) e de erosão interna (*pipping*) (b) em uma barragem de terra.

Figura 14 – Modos de falha em estruturas de terra:



Fonte: Guidicini, Sandroni e Mello (2017)

Os modos de ruptura podem diferir de acordo com a tipologia da barragem. Para as barragens de terra e de enrocamento, ocorrem predominantemente os mecanismos de percolação, instabilidade e erosão interna. Nas barragens de concreto, destacam-se a erosão externa e a instabilidade das estruturas.

3.2 DINÂMICA DO ROMPIMENTO E PROPAGAÇÃO DA INUNDAÇÃO

Os mecanismos de falha, como percolação, instabilidade e erosão, quando não identificados nas fases iniciais, podem evoluir e ocasionar a perda da capacidade de segurança da barragem, resultando na liberação do volume armazenado no reservatório e, consequentemente, no colapso da barragem.

De modo geral, estes mecanismos são os principais responsáveis pela formação de uma brecha de ruptura, que, de acordo com Collischonn e Tucci (1997), é representada por uma abertura na barragem, caracterizada por uma falha inicial, por onde o conteúdo do reservatório escoar, ocasionando posteriormente, alagamentos a jusante.

Ainda segundo os autores, durante o processo de rompimento de uma barragem associado à formação de brecha, são geradas ondas que se propagam em sentidos opostos. A jusante da barragem, propagam-se ondas positivas, que podem elevar o nível d'água à medida que o tempo e o deslocamento avançam, enquanto a montante são propagadas ondas negativas no interior do reservatório, caracterizadas pela diminuição do nível d'água ao longo do tempo. No caso de um rompimento gradual, o comportamento do reservatório se assemelha a uma abertura de comportas, reduzindo os efeitos causados pelas ondas. Em rompimentos abruptos, as principais variáveis causais estão associadas a topografia, ao hidrograma de ruptura e às condições iniciais

do curso d'água. Havendo energia suficiente, a liberação do volume armazenado pode originar uma onda abrupta, que, segundo Pasinato (1991) resulta de variações bruscas da vazão.

Segundo Cruz (2019), uma onda de cheia, ao se propagar a jusante, tende a expandir-se para áreas planas e amplas. No caso de um rompimento de barragem, essa onda de cheia diferencia-se das cheias naturais, principalmente em função da profundidade atingida, potencializando os efeitos destrutivos.

Além disso, conforme Braga (2022), a classificação dos solos exerce influência direta na propagação da onda de cheia, uma vez que a variedade da cobertura dos solos apresenta permeabilidades distintas. Esta influencia pode ser compreendida por meio dos processos de infiltração descritos por Tucci (2001), segundo o qual a infiltração da água nas camadas superficiais do solo promove o umedecimento das camadas de forma progressiva, alterando o perfil de umidade ao longo da profundidade da camada. Durante este processo, a saturação ocorre inicialmente nas camadas mais próximas a superfície e, à medida que a saturação avança em camadas mais profundas, a capacidade de infiltração do solo é reduzida, favorecendo a geração de escoamento superficial.

3.3 ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS E PARÂMETROS FÍSICOS DE IMPACTO EM ÁREAS HABITADAS

Em áreas sujeitas a inundações, as edificações podem estar expostas a diversas cargas resultantes do contato e da interação com a água, incluindo cargas hidrostáticas, cargas hidrodinâmicas, forças de flutuabilidade e impactos causados pelo transporte de detritos (FEMA, 2011).

Conforme Chadwick, Mrfett e Borthwick (2013) a hidrostática corresponde ao estudo dos fluidos em repouso. A carga hidrostática ocorre quando o elemento construtivo se encontra submerso, de modo que o fluido exerce pressão perpendicular sobre toda a superfície do objeto. Considerando que essa pressão aumenta proporcionalmente com a profundidade, quanto maior a profundidade da inundação, maior será a pressão hidrostática atuante sobre o objeto. Essa pressão pode ser determinada pela seguinte relação:

$$p = \rho \cdot g \cdot y \quad (1)$$

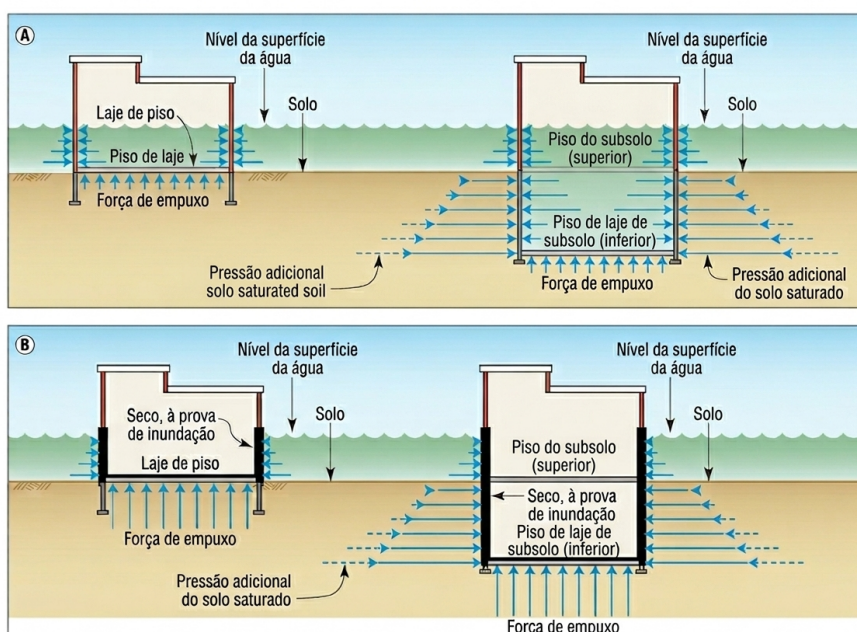
Em que p representa a pressão hidrostática, ρ corresponde à densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade e y representa a profundidade medida a partir da superfície do fluido.

Nesse contexto, em cenários de inundações, essas pressões geram forças atuantes sobre as edificações. De acordo com a FEMA (2011), as cargas hidrostáticas correspondem às forças exercidas diretamente pela água de inundação, podendo atuar de forma lateral ou vertical. As forças laterais estão associadas à pressão da água exercida horizontalmente sobre superfícies verticais, principalmente quando há diferença de nível entre os lados de uma estrutura. Já no caso das cargas verticais, estão relacionadas ao fenômeno da flutuabilidade, no qual a água

exerce uma força sobre elementos submersos, podendo provocar a flutuação de componentes cuja densidade é inferior à da água. De acordo com Chadwick, Mrfett e Borthwick (2013), essa força ascendente resulta da diferença de pressões que atuam em superfícies do corpo imerso e equivale ao peso do fluido deslocado, sendo denominada empuxo.

A Figura 15 ilustra graficamente a atuação dessas pressões, destacando a distribuição das forças laterais e a aplicação da força de empuxo na base das edificações.

Figura 15 – Pressão hidrostática e força de empuxo.



Fonte: Adaptado de FEMA (2013)

As forças hidrodinâmicas, conforme aborda Naudascher (1991), correspondem às forças que atuam sobre uma estrutura imersa em um fluido em movimento. Essas forças podem atuar na direção do escoamento, sendo denominadas força de arrasto, ou podem atuar perpendicularmente ao fluxo, sendo chamadas de força de sustentação ou força lateral. Segundo Hunt (1995), a força resultante exercida pelo fluxo sobre um objeto pode ser decomposta em duas componentes principais: uma paralela ao escoamento, denominada arrasto, e outra normal ao fluxo, denominada sustentação. Essas forças resultam da distribuição da pressão e das tensões de cisalhamento que atuam ao redor do objeto. A força de arrasto pode ser expressa pela seguinte equação:

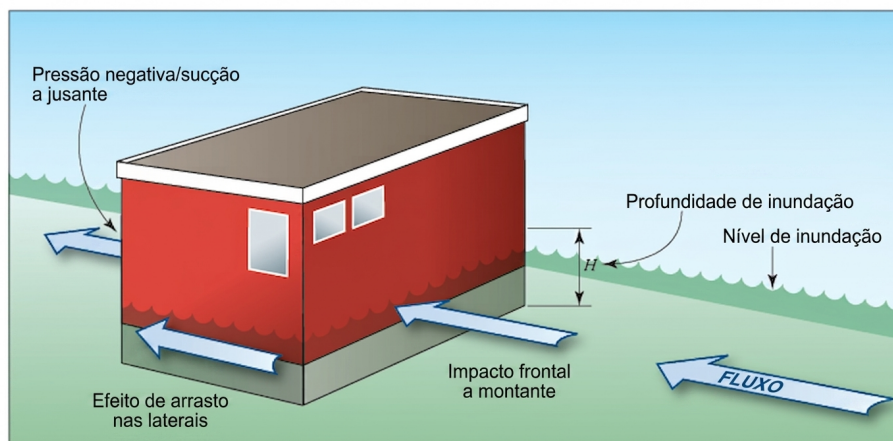
$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot u^2 \quad (2)$$

Em que F_d representa a força de arrasto, C_d é o coeficiente de arrasto, ρ é a densidade do fluido, A corresponde à área projetada do objeto exposta ao fluxo e u^2 representa a velocidade do escoamento.

No caso das cargas hidrodinâmicas, a FEMA (2011), conceitua que essas cargas ocorrem devido ao movimento do escoamento de água contra objetos. Como consequência desse movimento, ocorre pressão frontal positiva nas faces voltadas para o fluxo, forças de arrasto nas laterais da estrutura e pressão negativa no lado localizado a jusante.

A Figura 16 ilustra a atuação dessas forças hidrodinâmicas sobre uma edificação.

Figura 16 – Ações hidrodinâmicas e efeitos do fluxo de água em edificações.

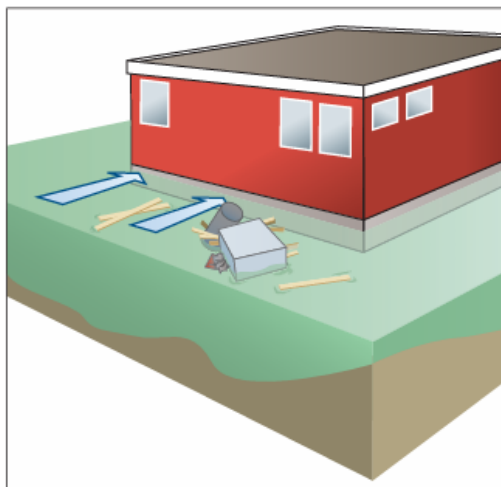


Fonte: Adaptado de FEMA (2013)

Além dessas ações, devem ser consideradas as forças do impacto de detritos nas edificações, causados por objetos transportados pelo escoamento. A magnitude desses impactos depende do tamanho, da forma e do peso do objeto, que variam de acordo com a natureza da região e a velocidade do escoamento (FEMA, 2011). Conforme afirma Tucci (2001), o material erodido é transportado pelo escoamento e as partículas mais pesadas, junto ao fundo da lâmina d'água por arraste, também conhecida como descarga sólida de fundo, enquanto as mais leves, se deslocam por suspensão.

A Figura 17 exemplifica a incidência de cargas de impacto por detritos sobre a estrutura.

Figura 17 – Ação de cargas de impacto por detritos flutuantes em estruturas.



Fonte: FEMA (2013)

Esses mecanismos físicos associados ao escoamento e à interação da água com estruturas constituem a base para compreender o comportamento das edificações em áreas sujeitas a inundações, tema discutido no Capítulo 5.

4 ZONAS DE RISCO E OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO

4.1 ZONA DE AUTOSSALVAMENTO (ZAS) E ÁREAS DE IMPACTO

A ZAS é definida pela Lei nº 12.334/2010 (alterada pela Lei nº 14.066/2020) como a área localizada a jusante da barragem, na qual, em caso de emergência, não há tempo para a intervenção das autoridades públicas. Conforme a Resolução ANM nº 95/2022, essa zona é delimitada considerando o tempo de chegada da onda de inundação, geralmente adotado como aproximadamente 30 minutos, ou uma distância de até 10 km a jusante da barragem.

De acordo com o Manual de Orientações aos empreendedores ANA (2016), deve ser realizado um estudo que considere a possibilidade de ruptura da barragem e a delimitação da área inundável localizada a jusante. Como forma de descobrir a região afetada, realiza-se um estudo por meio da modelagem da cheia de ruptura, a partir do qual são determinados os locais que afetam a população, o meio ambiente e as infraestruturas. Geralmente, são realizados por meio de modelos hidrodinâmicos, que simulam a formação e a propagação da cheia em toda a área a jusante.

O manual também estabelece a necessidade da elaboração do mapa de área inundável, no qual são analisados os perfis correspondentes a diferentes seções transversais ao longo do curso d'água. Para cada perfil analisado, devem ser apresentadas informações hidrodinâmicas da onda de inundação, compreendendo: o tempo de chegada da onda, o tempo de ocorrência do pico da cheia, a duração da cheia, a velocidade máxima da onda, a altura máxima da lâmina d'água, a vazão máxima, o nível máximo alcançado e o hidrograma da onda de inundação em função do tempo (ANPC; INAG, 2009).

Neste contexto, a Resolução ANA nº 121, de 9 de maio de 2022, determina como área afetada a região a jusante ou a montante que possa ser eventualmente impactada em decorrência da ruptura da barragem. Por sua vez, a Lei nº 14.066/2020 define como ZSS a área do mapa de inundação a jusante não classificada como ZAS, mas que também está sujeita a inundação.

Para a delimitação da área de inundação, da ZAS e da ZSS, é necessário dispor de informações cartográficas detalhadas, incluindo as infraestruturas potencialmente atingidas, a definição de rotas de fuga e pontos de encontro, conforme diretrizes adotadas no PAE (CODEVASF, 2021).

- Os pontos de encontro são locais definidos, considerados seguros, para os quais a população deve se dirigir em caso de rompimento da barragem. Esses locais são identificados por meio de placas e devem ser amplamente divulgados. Para os indivíduos que habitam na ZAS, é essencial o pleno conhecimento desses pontos, em função da necessidade de autossalvamento.
- As rotas de fuga são os percursos estabelecidos em cenários de emergência para orientar o deslocamento da população até o ponto de encontro mais próximo.

Algumas informações devem ser apresentadas para a ZAS, conforme o Guia de Orientação e Formulários para Elaboração do PAE da ANA (2016), tais como: a estimativa da população potencialmente afetada; o levantamento das infraestruturas existentes, incluindo instalações que contenham substâncias perigosas, edificações de uso coletivo e instalações estratégicas; as estruturas de apoio à defesa civil, como unidades do Corpo de Bombeiros, unidades de saúde e serviços municipais; bem como a identificação e o mapeamento dos locais de refúgio em caso de emergência.

Portanto, a modelagem da ruptura e a delimitação das zonas de impacto, como as ZAS e a ZSS, constituem instrumentos fundamentais para o planejamento emergencial, assim como a adoção de medidas preventivas voltadas a proteção da população a jusante, incluindo testes dos sistemas de alerta e notificação, e exercícios de simulação do evento (ANA, 2016).

4.2 RELAÇÃO ENTRE TOPOGRAFIA, HIDROGRAFIA E INUNDAÇÃO

Os escoamentos são influenciados diretamente pela topografia, uma vez que características do relevo, como altura, rugosidade e forma, condicionam o comportamento do fluxo da água (TASSEFF et al., 2019).

Durante eventos de cheia, ocorre a formação de ondas que se propagam de montante para jusante ao longo do curso d'água. Ao longo desse percurso, fatores como a declividade, a largura e a profundidade do canal podem modificar o escoamento, reduzindo a vazão máxima e aumento o tempo de base do hidrograma (NASCIMENTO, 2018).

Conforme destaca Tucci (2001), quando o solo se encontra saturado e perde a capacidade de infiltrar a água precipitada, ocorre o extravasamento do escoamento e, conseqüentemente, a inundação das áreas adjacentes. Esse escoamento desloca-se por ação da gravidade em direção as cotas mais baixas do relevo, superando as forças de resistência do solo e ajustando-se a topografia local. Com o tempo, o fluxo pode promover a erosão do solo, contribuindo para a formação e o desenvolvimento de redes de drenagem orientadas em direção aos cursos d'água mais estáveis.

O autor também enfatiza que as redes de drenagem integram o sistema hidrográfico da bacia, a qual é definida como a área da superfície terrestre limitada por divisores de relevo, onde os escoamentos convergem por meio de cursos d'água conectados até um ponto único de saída, comumente chamado de exutório. Em bacias que apresentam grande área de inundação, o escoamento tende a ser regularizado devido à declividade baixa do terreno e à capacidade de armazenamento temporário de água nas planícies alagáveis, reduzindo a velocidade do escoamento e amortecendo os picos de vazão. Por outro lado, em bacias urbanizadas, onde ocorre a remoção da cobertura vegetal e a conseqüente impermeabilização do solo, há aumento do escoamento superficial, intensificando a ocorrência de inundações.

Conforme a FEMA (2013), os riscos de inundação estão associados a fatores como precipitação, vazão dos rios, topografia, falhas em barragens, medidas de controle de cheias e mudanças decorrentes do desenvolvimento. Destaca-se ainda que a zona de inundação, correspondente

à área a jusante potencialmente afetada por uma barragem, pode ser maior do que as áreas atingidas por cheias naturais de rios, sendo as inundações decorrentes de falhas em barragens geralmente mais violentas.

4.3 VULNERABILIDADE DAS OCUPAÇÕES EXISTENTES

A vulnerabilidade está associada a ocorrência de incidentes e a desastres, sejam eles de origem ambiental, antrópica ou de caráter socioeconômico (SILVA, 2025). Diante disso, a PNSB (Lei nº 14.066/2020) tem como objetivo garantir a segurança de barragens e reduzir acidentes nas áreas a jusante, onde se encontram populações e estruturas vulneráveis.

O Manual de Orientações aos empreendedores da ANA (2016) estabelece a elaboração do PAE, documento a ser acionado em situações de emergência, o qual contempla procedimentos para a identificação de possíveis rupturas de barragens, a caracterização de cenários emergenciais e a definição dos responsáveis por cada ação, bem como os contatos a serem acionados.

Este documento também exige a descrição e a localização da população e das infraestruturas situadas na área de risco. Entre as informações requeridas estão a classificação do tipo de povoamento existente, entre rural, urbano, misto ou disperso, a estimativa do número de habitantes, distinguindo-se entre residentes e ocupantes temporários, bem como a caracterização do uso e ocupação do solo sob os aspectos sociais e econômicos (setores primário, secundário e terciário). Devem ainda ser identificadas as infraestruturas relevantes, como rodovias, ferrovias e instalações de produção ou armazenamento de substâncias perigosas, além de áreas naturais sob proteção especial e bens com valor histórico e cultural.

Além disso, o manual destaca a importância do sistema de alerta nas áreas potencialmente afetadas, os quais podem ser acionados por diferentes meios de comunicação, sirenes, rádios, televisão, telefones e celulares, contribuindo para a redução da vulnerabilidade das populações expostas.

A PNSB (Lei nº 14.066/2020) estabelece que as barragens sejam classificadas segundo as Categoria de Risco (CRI), pelo volume do reservatório e também pelo Dano Potencial Associado (DPA). O DPA corresponde ao conjunto de danos que podem ocorrer em decorrência do rompimento da barragem, considerando potenciais perdas de vidas humanas, impactos nas áreas atingidas de cunho ambiental e socioeconômico.

Sobre o primeiro fator, potencial de perdas de vidas humanas também conhecido como População em Risco (PAR), corresponde ao número de pessoas presentes na área de potencial rompimento da barragem (ANA, 2012). Uma forma de estimar a quantidade de pessoas por estrutura é adotar o número médio de membros por domicílio. Segundo o Censo de 2022 do (IBGE) a média de moradores por domicílio é 2,79.

No que se refere aos impactos ambientais, consideram-se principalmente as áreas legalmente protegidas que possam ser atingidas, bem como aquelas que podem sofrer descaracterização total em decorrência do rompimento.

Os danos associados ao fator socioeconômico referem-se aos prejuízos materiais, incluindo danos a propriedade de uso residencial, comercial, agrícola, industrial e turístico, além dos potenciais perdas econômicas (ANA, 2012).

5 HABITAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO DE BARRAGENS

5.1 MODELO HABITACIONAL CONVENCIONAL E SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Conforme orienta a Cartilha Habitação PF, consideram-se sistemas construtivos convencionais aqueles que utilizam processos tradicionais de execução adotados no país, empregando materiais e técnicas que estejam em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (CAIXA, 2025). No Brasil, a construção tradicional caracteriza-se pelo emprego do concreto armado associado à alvenaria (GONÇALVES, 2023).

Segundo os dados do censo de 2022 pela Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílio (PNAD), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE 84,8% da população brasileira habita em residências do tipo "casa", enquanto apenas 12,5% vivem em apartamentos, e 2,4% em casas do tipo "vila ou em condomínio". Os índices restantes distribuem-se entre “casa de cômodos ou cortiço” (0,2%) e “habitações indígenas sem paredes ou maloca” (0,1%). Esses números evidenciam que a alvenaria é o método construtivo predominante no país, com 99% das moradias.

A alvenaria consiste na execução de paredes por meio do assentamento de unidades de tijolos ou blocos, que podem ser cerâmicos ou de concreto, unidos por argamassa. Quando essas paredes não exercem função estrutural, são comumente chamadas de alvenaria de vedação, cuja finalidade está na repartição de ambientes. Em contrapartida, na alvenaria estrutural, as paredes assumem a função de transferir as cargas horizontais e verticais às fundações (CELESTINO, 2014). Segundo Santos (2021), no sistema de alvenaria estrutural, os elementos convencionais de concreto armado, como pilares e vigas, são dispensados, de modo que as próprias paredes desempenham as funções estrutural e de vedação.

No sistema convencional, também denominado concreto armado, a estrutura é composta por pilares, vigas e lajes responsáveis pela sustentação da residência, enquanto as paredes exercem a função de vedação (ARAÚJO; OLIVEIRA, 2022). Segundo Junior e Rodrigues (2025), esses componentes estruturais são responsáveis por suportar as cargas atuantes na edificação, sendo necessário o emprego do aço estrutural em sua composição. A alvenaria, composta por blocos e argamassa, apresenta baixa resistência a tração. Quando submetida a tensões decorrentes da combinação de cargas verticais e horizontais, podem surgir tensões de tração que, ao ultrapassarem a capacidade resistente, ocasionam fissuração (ANDRADE, 1998).

Segundo o Guia para a Família Beneficiária do Programa Reforma Casa Brasil (2023), os elementos fundamentais de uma moradia são:

- Fundação: elemento responsável por transferir as cargas da edificação para o solo;
- Estrutura: formada por pilares, lajes e vigas, geralmente em concreto armado, podendo também ser executada em estrutura metálica ou em madeira;

- Cobertura: composta por telhas em chapas onduladas, cerâmica ou concreto;
- Aberturas: consistem em portas e janelas;
- paredes internas e externas: que delimitam a divisória da casa;
- instalações elétricas e hidrossanitárias: responsáveis pela distribuição de energia, abastecimento de água, coleta de esgoto e drenagem pluvial.

As unidades habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida apresentam características construtivas semelhantes às demais residências brasileiras de interesse social, tais como piso cerâmico nas áreas molhadas e piso cimentado, nos demais ambientes. As paredes recebem reboco externo e interno com pintura em tinta Acetato de Polivinila (PVA). As esquadrias são de ferro ou alumínio, enquanto as portas são confeccionadas em madeira. Os forros podem ser executados em laje de concreto ou em Policloreto de Vinila (PVC) e a cobertura é composta por telhas cerâmicas.

Os tipos de fundação mais utilizados em residências são os do tipo rasa, como *radier* e sapatas, em razão da menor demanda de mão de obra e da maior rapidez de execução (SOUZA; SANTOS; GARCIA, 2020). A ABNT NBR 6122 (2019) define fundação rasa como o elemento estrutural que transmite as cargas ao solo através da superfície de apoio, apresentando pequena profundidade de assentamento, menor que duas vezes a sua menor dimensão da base. São classificadas como fundação rasa os blocos, as sapatas, sejam do tipo associadas, isoladas ou corridas, os *radier* e as vigas de fundação.

Conforme Junior e Rodrigues (2025), a fundação tem como função distribuir o peso e as cargas da estrutura de forma uniforme ao solo. Tratando-se de fundação rasa, a carga é transferida diretamente ao solo pela base do elemento estrutural. Os autores ainda enfatizam que a escolha do tipo de fundação deve considerar as características e a resistência do solo, a topografia, o nível do lençol freático e a profundidade até uma camada resistente.

Portanto, o modelo habitacional predominante no Brasil caracteriza-se pela utilização do sistema convencional em concreto armado, com o emprego de elementos estruturais e fundações rasas. Tal predominância deve-se à ampla disponibilidade de mão de obra e a utilização de insumos de menor custo em relação a outros sistemas construtivos (FREITAS, 2010). Assim, torna-se necessário compreender o comportamento dessas estruturas frente a ações externas, como no caso de inundações extremas.

5.2 COMPORTAMENTO DAS EDIFICAÇÕES FRENTE A INUNDAÇÕES EXTREMAS

A compreensão dos esforços hidrodinâmicos descritos no Capítulo 3.3 é fundamental como ferramenta de avaliação da integridade das edificações. Enquanto os sistemas construtivos tradicionais de concreto armado e alvenaria, abordados no Capítulo 5.1, são dimensionados para suportar cargas gravitacionais verticais, apresentam vulnerabilidade quando expostos a forças

horizontais decorrentes de um rompimento de barragem. Esta fragilidade é manifestada por meio de mecanismos de falhas que comprometem as estruturas, destacando-se:

- Falha por Pressão Diferencial;
- Colapso Estrutural por Arrasto;
- Efeito de Flutuabilidade (Empuxo);
- Erosão da Fundação.

Conforme enfatiza a FEMA (2017), edificações e seus respectivos elementos construtivos localizados em áreas sujeitas a inundações, independentemente da origem do evento, devem ser projetados para resistir às diferentes combinações de ações simultâneas associadas a esse tipo de fenômeno. Entre essas ações destacam-se as pressões hidrostáticas, as forças hidrodinâmicas, a flutuabilidade e o impacto de detritos, discutidas no Capítulo 3.3. Além dessas ações, a erosão também se apresenta como um mecanismo resultante da interação da água com o solo e com edificações durante eventos de inundação (IBAPE-RS, 2024).

As pressões hidrostáticas atuam sobre as edificações quando entram em contato com a água de inundação. Em situações nas quais ocorre diferença entre os níveis de água no interior e no exterior da edificação, estabelece-se uma pressão resultante capaz de provocar deformações, deslocamentos de pisos de concreto e madeira, e danos em paredes e outros elementos estruturais (FEMA, 2017).

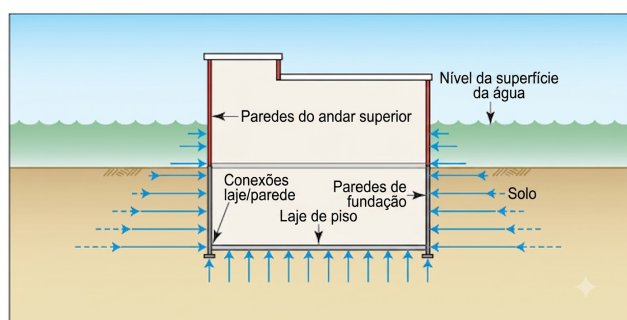
De acordo com Jansen (2019), as paredes estruturais apresentam elevada resistência a compressão, sendo dimensionadas para suportar cargas gravitacionais e ações do vento. No entanto, essas paredes são vulneráveis a esforços de tração, que podem ocorrer sob a ação de cargas laterais mais intensas, como em casos de inundação, resultando em fissuração e ruptura frágil do elemento.

As forças verticais associadas à flutuabilidade podem atuar sobre edificações durante eventos de inundação, especialmente quando estão parcialmente ou totalmente submersas. Em edificações apoiadas sobre fundações rasas, essas forças podem provocar danos, como o levantamento da estrutura. Além disso, edificações que estejam mal ancoradas podem sofrer o desprendimento de suas fundações (FEMA, 2011). Segundo Jansen (2019), a pressão decorrente dessas forças sobre elementos como pisos em residências pode causar o levantamento em estruturas de madeira não ancoradas e o rompimento dos pisos. Além disso, a água pode penetrar nos materiais da edificação ou no solo por capilaridade, gerando esforços adicionais que eventualmente reduzem a resistência da estrutura.

No cenário de inundação, as edificações e seus respectivos elementos construtivos podem sofrer ações do escoamento em movimento por meio de forças hidrodinâmicas, capazes de provocar danos às fundações por meio da erosão do solo, destruir paredes e comprometer a estabilidade estrutural. Além disso, a velocidade da água pode favorecer o transporte e o impacto

de detritos (FEMA, 2017). Segundo a FEMA (2011), este impacto pode provocar perfuração e ruptura de paredes e outros elementos construtivos. A Figura 18 ilustra os esforços verticais e horizontais gerados pela ação hídrica (a), bem como o consequente colapso de uma residência devido a essas solicitações (b).

Figura 18 – Esforços atuantes em estruturas:



(a) diagrama de pressões hidrostáticas verticais e empuxos horizontais em paredes de fundação;



(b) colapso estrutural de uma edificação residencial decorrente de esforços hidráulicos.

Fonte: (a): Adaptado de FEMA (2011); (b): FEMA (2013).

Com relação à erosão de fundações estruturais, estudos recentes indicam que o aumento das velocidades e do nível do escoamento durante eventos de inundação amplia a profundidade das erosões no solo (FAN et al., 2025). Esse processo, denominado erosão local, ocorre pela remoção de partículas do solo, formando cavidades que reduzem a capacidade de suporte e comprometem a estabilidade estrutural das edificações.

Nesse contexto, fundações rasas, como sapatas, apresentam maior suscetibilidade a esse tipo de processo, uma vez que transferem as cargas das edificações para as camadas superficiais do solo (WUTHRICH et al., 2023). Assim, a remoção dessas camadas pela ação erosiva da água pode expor os elementos estruturais e provocar o surgimento de falhas na estrutura.

Além desses esforços e parâmetros físicos, devem ser consideradas as forças de impacto geradas por detritos transportados pelas águas de inundação. Esses materiais podem incluir partes de edificações danificadas, como toldos, escadas e outros elementos construtivos. Durante os eventos de enchente, esses objetos podem colidir com as estruturas, causando danos às paredes de alvenaria, elementos estruturais e outros componentes das edificações, além de ficarem presos a elas. Quando retidos em partes das estruturas, os detritos podem transmitir cargas adicionais da inundação para fundações elevadas. A intensidade desses impactos pode ser ampliada pela presença de árvores e outros objetos transportados pelo escoamento (FEMA, 2017). A Figura 19 exemplifica os principais impactos físicos associados à dinâmica de processos superficiais em áreas urbanas. A imagem (a) ilustra o avanço da erosão do solo no terreno de uma residência,

resultando na perda de suporte da fundação. Em contrapartida, a imagem (b) expõe os danos estruturais gerados pelo impacto direto de um fluxo de detritos contra a edificação.

Figura 19 – Manifestações patológicas e danos geoambientais em edificações:



(a) processo de erosão e perda de suporte do solo em lote residencial;



(b) danos estruturais decorrentes do impacto de um fluxo de detritos.

Fonte: FEMA (2011).

Considerando as residências tradicionais brasileiras construídas em alvenaria, Jansen (2019) afirma que paredes de concreto e alvenaria são pouco resistentes a forças de tração, o que resulta em fissuração. Com a intensidade das ações, as fissuras se ampliam, podendo levar ao deslocamento e à falha estrutural. Quando os elementos verticais de uma estrutura falham em decorrência de cargas horizontais associadas à inundação, pode ocorrer o colapso estrutural.

Frente ao exposto, observa-se que os mecanismos apresentados pelo manual do IBAPE-RS (2024) e FEMA (2017) atuam de forma simultânea e combinada, resultando na vulnerabilidade estrutural das residências. Em edificações de padrão popular, caracterizadas por fundações rasas e paredes de alvenaria, esses esforços podem comprometer os elementos estruturais, gerando instabilidade e podendo levar ao colapso.

6 SOLUÇÕES HABITACIONAIS RESILIENTES EM ÁREAS SUJEITAS AO ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Neste capítulo, serão propostas soluções voltadas à construção resiliente de habitações, visando viabilizar a permanência segura da população e mitigar danos em ZAS e ZSS. Estas soluções, pautadas pelo baixo custo, fundamentam-se em quatro pilares estratégicos:

- Estratégias de Inundação Consentida: adoção de aberturas estruturais e a destinação do pavimento térreo para usos não habitáveis, permitindo a passagem do fluxo da água;
- Materiais Resistentes: seleção de componentes que garantem a integridade da edificação após o contato direto com a água e detritos;
- Elevação da Cota da Soleira: estabelecimento do nível do piso habitável acima da cota máxima de inundação prevista no projeto;
- Ancoragem Estrutural: reforço das fundações e conexões estruturais que auxiliam na resistência aos esforços mecânicos.

6.1 REFERÊNCIAS TÉCNICAS INTERNACIONAIS E CONSTRUÇÕES RESILIENTES EM ÁREAS SUJEITAS A INUNDAÇÕES

O conceito de construções resilientes baseia-se na capacidade das edificações de resistirem, adaptarem-se ou transformarem-se frente a problemas e impactos, garantindo sua funcionalidade no ambiente construído (BORTOLI, 2018). Nesse contexto, a magnitude dos danos provocados por inundações está diretamente relacionada ao padrão de uso e ocupação do solo, às características do evento de cheia e às condições socioeconômicas da comunidade atingida (JONOV, 2012).

Diretrizes internacionais abordam estratégias construtivas voltadas à implantação de casas resilientes em áreas suscetíveis a inundações, servindo como referência para cenários associados ao rompimento de barragens, especialmente em áreas já consolidadas com a ocupação urbana. Conforme recomenda Department of Energy (2022), a implantação de edificações em áreas com possibilidade de inundações deve ocorrer em níveis superiores as cotas previstas de cheia, associada a adaptação dos pavimentos localizados no térreo. Nesse sentido, recomenda-se uma destinação do pavimento térreo para usos não habitáveis, bem como a elevação do piso dos ambientes interno, além da previsão de aberturas que permitam a passagem da água no pavimento térreo. Para o adequado funcionamento, torna-se necessária a adoção de alturas internas dos tetos superiores as convencionais.

O *National Emergency Management Agency* do governo da Austrália recomenda, por meio do manual *Construction of Buildings in Flood Hazard Areas* ABCB (2012), a adoção de fundações adequadas ancoradas no solo, como estacas, de forma a evitar danos estruturais às residências

durante eventos de inundação. O documento também orienta a construção de casas com dois pavimentos e a elevação do piso habitável em, no mínimo, 300 mm acima do nível de cheia de projeto. Ademais, destaca que o projeto estrutural deve considerar as características do local, bem como o tamanho e a forma da edificação, contemplando os efeitos da flutuabilidade, os esforços hidrodinâmicos e os impactos de detritos transportados pela água. O cenário estrutural recomendado é ilustrado na Figura 20. A imagem (a) apresenta a concepção de uma edificação residencial de dois pavimentos, enquanto a imagem (b) detalha o sistema de fundação profunda, composto pelo arranjo de estacas dimensionadas para a transferência de cargas ao solo competente.

Figura 20 – Elementos do projeto estrutural:



(a) representação da edificação de dois pavimentos recomendada;



(b) sistema de fundação profunda por estacas.

Fonte: (a): FEMA (2011); (b) INFRA (2026).

No que se refere a materiais construtivos, a FEMA (2014) indica que os materiais empregados no sistema construtivo brasileiro constituem soluções adequadas para o aumento da resiliência das edificações em cenários de inundação. O manual recomenda o uso de pedra, concreto e bloco de alvenaria no pavimento térreo, devido a maior resistência desses materiais aos esforços da água, configurando-se como alternativa para habitações em zonas de risco.

No que se refere às habitações em áreas sujeitas a riscos, observa-se que diretrizes nacionais e internacionais não tratam a proibição como única estratégia para prevenção de desastres, priorizando abordagens baseadas no planejamento e na gestão do risco. Conforme o *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*, da *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* Undrr (2015), as diretrizes concentram-se na formulação de políticas públicas voltadas ao uso e ocupação do solo, ao planejamento urbano e ao monitoramento de mudanças climáticas, ambientais e demográficas, além do mapeamento de áreas suscetíveis a desastres.

Assim como no âmbito internacional, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) estabelece diretrizes voltadas para o ordenamento da ocupação do solo, com o objetivo de manter a vegetação nativa e os recursos naturais, combater ocupações em áreas

de risco, promover e realocar a população residente e estimular a permanência da população em locais seguros (Lei nº 12.608/2012, atualizada pela Lei nº 14.750/2023). Com base nesse contexto, observa-se que a redução dos riscos pode ser alcançada por meio do planejamento territorial e a adequada gestão do uso e ocupação do solo.

6.2 ESTRATÉGIAS CONSTRUTIVAS EM ÁREAS SUJEITAS A INUNDAÇÕES

As estratégias construtivas para mitigação de inundações variam conforme diretrizes estabelecidas em cartilhas e manuais técnicos internacionais, com o objetivo de reduzir danos e perdas. De acordo com a FEMA (2013), um dos principais elementos aplicados em edificações residenciais é o uso de barreiras de proteção, instaladas tanto em aberturas (como portas e portões) quanto no entorno das edificações, por meio de muros de contenção.

No caso das barreiras aplicadas em aberturas, diferentes materiais podem ser utilizados conforme as características do evento e da abertura a ser protegida. Chapas de aço são indicadas para aberturas maiores e situações de inundação de longa duração, devido à sua elevada resistência. Chapas de alumínio são amplamente empregadas, especialmente em portas, por serem mais leves e resistentes à corrosão; contudo, podem sofrer deformações quando submetidas a elevadas pressões hidrostáticas, exigindo reforços estruturais. Já o compensado naval constitui uma alternativa para pequenas aberturas e eventos de curta duração, apresentando, entretanto, menor resistência mecânica e maior suscetibilidade à deterioração e deformação, o que demanda manutenção periódica.

Essas barreiras podem ser configuradas como sistemas deslizantes ou articulados por dobradiças, sendo necessário prever espaço adequado para sua movimentação. Em geral, seu acionamento é manual, caracterizando sistemas ativos. Em contrapartida, em aberturas de maiores dimensões, podem ser empregados sistemas mecânicos ou elétricos, acionados pelo nível da água, configurando soluções passivas. A Figura 21 ilustra os dispositivos de proteção contra inundações ou fluxos superficiais, caracterizados por barreiras temporárias de contenção instaladas nas portas das residências afetadas para mitigar a entrada de água e detritos.

Figura 21 – Manifestações patológicas e danos geoambientais em edificações:



(a) processo de erosão e perda de suporte do solo em lote residencial;



(b) danos estruturais decorrentes do impacto de fluxo de detritos.

Fonte: FEMA (2013).

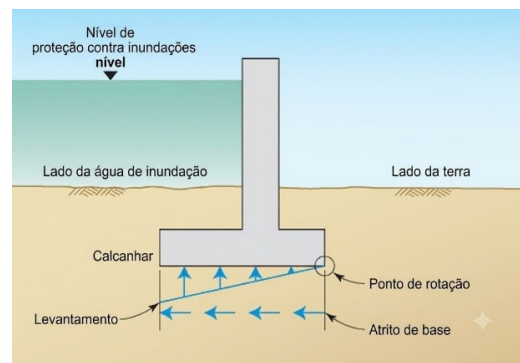
Os muros de contenção são implantados no entorno das edificações, sendo geralmente construídos em concreto armado ou alvenaria. Sua principal função é proteger a estrutura contra as ações hidrostáticas e hidrodinâmicas da água, sendo dimensionados para resistir à combinação dessas cargas durante eventos de inundação. Para um desempenho adequado, esses elementos são posicionados a uma certa distância da edificação, podendo circundar completamente a residência ou serem implantados apenas nos pontos mais suscetíveis, como áreas topograficamente mais baixas.

São necessárias fundações mais robustas caso o solo do muro seja coesivo. Caso contrário, um solo mais arenoso possibilita uma melhor rede de drenagem na fundação; além disso, a alta permeabilidade do solo pode facilitar a infiltração da água, comprometendo o muro. A Figura 22 exemplifica a aplicação de estruturas de proteção contra cheias e alagamentos. Na imagem (a), observa-se o muro de inundação construído no entorno da edificação, atuando como uma barreira física impermeável contra a água. Na imagem (b), o esquema técnico detalha os esforços mecânicos atuantes na estrutura sob a ação da água, destacando os fatores de estabilidade como o ponto de rotação, o atrito de base e a subpressão (levantamento).

Figura 22 – Sistemas de proteção contra cheias:



(a) aplicação prática de muro de inundação no entorno de edificação;



(b) representação esquemática dos esforços estruturais e pressões hidráulicas atuantes.

Fonte: FEMA (2013).

De acordo com o manual técnico da FEMA (2011), as edificações em áreas sujeitas a inundações devem ser projetadas de forma elevada em relação ao terreno. Nesse sistema, o piso não entra em contato direto com o solo, sendo sustentado por fundações, geralmente do tipo estacas. Essa configuração contribui para reduzir os efeitos da flutuabilidade e minimizar danos estruturais durante eventos de inundação.

Além disso, em edificações elevadas, são previstas aberturas específicas para a passagem da água, que permitem o alívio das pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, reduzindo os esforços atuantes sobre a estrutura. Destaca-se ainda que, no caso da adoção de fundações em estacas, estas devem ser dimensionadas com profundidade adequada, de modo a transferir as cargas para camadas mais resistentes do solo, minimizando os efeitos da ação da água e dos processos erosivos que afetam as camadas superficiais. A Figura 23 exemplifica as diretrizes de projeto recomendadas pela FEMA para a mitigação de riscos de inundação em áreas residenciais.

Figura 23 – Modelo conceitual de resiliência residencial segundo as diretrizes da FEMA.



Fonte: FEMA (2011)

Por fim, conforme as diretrizes do manual da FEMA (2017), é fundamental que as instalações elétricas sejam posicionadas acima da cota de inundação do projeto. Esta medida visa evitar danos aos componentes do sistema, que podem ocasionar incêndios durante o evento, além de prevenir atrasos no processo de reocupação do domicílio após o recuo da água.

7 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam que as edificações localizadas em áreas sujeitas ao rompimento de barragens, como a ZAS e a ZSS, apresentam elevada vulnerabilidade estrutural. O modelo habitacional predominante no Brasil, caracterizado pelo uso de alvenaria e fundações rasas, em geral não considera, em seu dimensionamento, a atuação de ações hidrodinâmicas e hidrostáticas associadas a eventos de inundação.

Conforme o relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (CRH) no ano de 2025, da ANA (2026), que abordou a catástrofe do Rio Grande do Sul em 2024, as chuvas intensas provocaram a elevação dos níveis dos rios e aumentaram o risco associado às barragens da região, resultando em danos nas estruturas das edificações.

Adicionalmente, o Serviço Geológico do Brasil (SGB), por meio da Nota Técnica Explicativa das Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações de Bitar (2014), destaca que o planejamento do uso e ocupação do solo deve ser conduzido pelos municípios, a fim de evitar a expansão urbana desordenada e, conseqüentemente, a formação de novas áreas de risco.

Este cenário demonstra que características como a ocupação inadequada do solo e a intensificação de eventos extremos, como cheias, são elementos determinantes para a ampliação dos danos em edificações localizadas em áreas suscetíveis. É importante enfatizar que as edificações não são vulneráveis apenas por sua característica construtiva, mas pelo contexto territorial e ambiental em que estão inseridas.

As inundações decorrentes do rompimento de barragens caracterizam-se pela liberação de grandes volumes de água, associada a falhas estruturais geralmente relacionadas a eventos de chuvas intensas. Esse tipo de ocorrência apresenta elevada velocidade e energia de propagação, formando ondas de cheia capazes de impactar as edificações por meio de ações hidrodinâmicas, impactos de detritos e arraste estrutural.

Segundo enfatiza Ghaderi et al. (2025), eventos climáticos podem intensificar o risco de falhas em barragens, tornando essencial o planejamento de ações de mitigação. Os autores destacam que as ondas geradas nesses eventos apresentam elevado potencial destrutivo, em decorrência da velocidade com que se formam e se propagam, sendo influenciadas principalmente pelo volume do reservatório e pelas características da topografia a jusante.

Por outro lado, as inundações associadas a eventos de cheia, decorrentes do transbordamento dos cursos d'água, apresentam uma elevação gradual do nível d'água, com menor velocidade de escoamento e ação de pressão hidrostática. Conforme aponta Pereira (2021), essas inundações são processos naturais dos sistemas fluviais, nos quais o rio, em eventos de precipitações intensas, ocupa as áreas adjacentes ao seu leito, denominadas leito maior. Em áreas urbanas, quando não associadas ao rompimento de barragens, as inundações são intensificadas pela impermeabilização do solo, pela redução da capacidade de infiltração e pelo aumento do escoamento superficial.

Devido a esses fatores, é fundamental que os projetos de edificações em áreas de risco considerem as ações hidrodinâmicas associadas aos eventos de inundação. No contexto brasileiro, observa-se a ausência de diretrizes específicas que orientem o dimensionamento de edificações frente a esse tipo de solicitação, diferentemente do que ocorre em documentos técnicos internacionais, como os elaborados pela *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), que apresentam recomendações construtivas voltadas à redução de danos causados por inundações.

Conforme a FEMA (2011), no documento *Coastal Construction Manual*, as edificações devem ser projetadas ou adaptadas de modo a resistir às cargas hidrodinâmicas e hidrostáticas da água, evitando a ocorrência de flutuação, deslocamento lateral e colapso estrutural.

Desta forma, evidencia-se a existência de uma lacuna normativa no Brasil, uma vez que não há diretrizes específicas que estabeleçam critérios para o dimensionamento de edificações considerando sua inserção em áreas de risco. Em contraste, normas e documentos técnicos internacionais, como os elaborados pela FEMA, que contemplam essas exigências de forma explícita. Nesse contexto, essa ausência contribui para a manutenção da vulnerabilidade das edificações expostas a eventos de inundação.

8 CONCLUSÃO

Diante dos pontos discutidos, evidencia-se que a vulnerabilidade das edificações brasileiras situadas em ZAS e ZSS decorre da combinação entre as falhas do planejamento territorial e o emprego de métodos construtivos incompatíveis com o risco local. A predominância da alvenaria convencional e de fundações rasas torna as estruturas suscetíveis ao colapso sob o impacto de ações hidrodinâmicas e ao transporte de detritos, decorrentes do rompimento de barragens.

Em síntese, os resultados apontam que o contexto ambiental e os riscos de inundação são negligenciados no momento da construção. Essa fragilidade é acentuada pela lacuna de manuais e diretrizes técnicas nacionais que orientem o dimensionamento de moradias em áreas inundáveis, seguindo o exemplo de documentos internacionais, como os da FEMA.

Portanto, é necessário que o país desenvolva diretrizes e manuais de orientação construtiva acessíveis tanto à população quanto aos profissionais, integrando-os a um planejamento urbano que priorize a segurança frente à intensificação dos eventos climáticos extremos. É importante ressaltar que, embora tais medidas aumentem a resiliência das habitações e possam mitigar danos em inundações graduais, elas possuem limites físicos. Em casos de ondas de cheia com elevada velocidade e energia, os métodos construtivos podem não ser suficientes para evitar o colapso estrutural, reforçando a importância primordial da desocupação de áreas de alto risco.

9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho evidenciou a severa lacuna normativa e a escassez de diretrizes nacionais na engenharia civil do país voltadas ao estabelecimento de critérios e recomendações construtivas para habitações em áreas de risco de rompimento de barragens. Diante desse cenário de vulnerabilidade regulatória, torna-se fundamental aprofundar os aspectos teóricos e práticos abordados neste estudo, servindo como subsídio para o desenvolvimento de soluções habitacionais tecnicamente resilientes.

Com intuito de dar continuidade à linha de pesquisa estabelecida neste estudo, recomendam-se as seguintes vertentes para investigações futuras:

- **Desenvolvimento Normativo:** Elaboração de um manual técnico de diretrizes construtivas que possa ser submetido à discussão junto à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), visando suprir as lacunas regulatórias nacionais quanto ao dimensionamento e à adaptação de moradias localizadas em áreas de risco;
- **Modelagem Numérica Fluido Estrutura (CFD):** Desenvolver modelos computacionais para simular a interação e o impacto das ondas de ruptura de barragens sobre as estruturas residenciais propostas neste trabalho;
- **Estudo de Viabilidade Econômica e Orçamentação:** Elaboração de composições de custos unitários e orçamentos detalhados, realizando uma análise comparativa financeira direta entre as habitações convencionais e as soluções habitacionais adaptadas propostas.

REFERÊNCIAS

- ABCB. *Construction of buildings in flood hazard areas: information handbook*. Version 2012.3. AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD, Canberra: [s.n.], 2012.
- ABNT NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019.
- ANA. *Serviços analíticos e consultivos em segurança de barragens: Produto 4: classificação de barragens*. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas, 2012.
- ANA. *Manual do empreendedor sobre segurança de barragens: volume IV: guia de orientação e formulários do plano de ação de emergência – PAE*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico Brasília, DF: [s.n.], 2016.
- ANA. *Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil*. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas, 2017. Organizadores: Guido Guidicini, Sandro S. Sandroni e Luiz Guilherme de Mello.
- ANA. *Relatório de segurança de barragens 2024 - 2025*. Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, 2025.
- ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos do Brasil 2025: relatório síntese*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília, DF, 2026.
- ANDRADE, A. A. *Comportamento estrutural das paredes de alvenaria: influência das propriedades dos componentes*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- ANM. *Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Estabelece as normas de segurança de barragens de mineração*. Agência Nacional de Mineração, Brasília, DF, 2022.
- ANPC, A. N. de P. C.; INAG, I. da Água. *Guia de orientação para elaboração de planos de emergência internos de barragens*. Portugal, Carnaxide: ANPC, 2009. (Cadernos Técnicos PROCIV, 2).
- ARAÚJO, C.; OLIVEIRA, M. A. de. *Análises comparativas entre os sistemas construtivos de paredes de concreto, alvenaria convencional, alvenaria estrutural e light steel frame*. *E-Acadêmica*, 2022.
- BITAR, O. Y. *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000: nota técnica explicativa*. São Paulo; Brasília, DF, 2014.
- BORTOLI, K. C. R. d. *Avaliando a resiliência no ambiente construído: adequação climática e ambiental em habitações de interesse social no Residencial Sucesso Brasil (Uberlândia/MG)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- BRAGA, T. C. *Simulação da propagação de onda de cheia decorrente do rompimento de uma barragem de rejeitos industriais de fertilizantes em Arraias, Tocantins*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2022.

BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)*. Brasília, DF: [s.n.], 2020.

BRASIL. *Coletânea melhoria habitacional sustentável: guia para a família beneficiária*. Brasília, DF: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, 2023.

CAIXA. *Habitação - PF: construção, conclusão, reforma e ampliação de unidades habitacionais isoladas: orientações para clientes e responsáveis técnicos*. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL Brasília, DF: [s.n.], 2025.

CELESTINO, E. J. *Alvenaria estrutural, compatibilização, vantagens x desvantagens*. Recife: [s.n.], 2014.

CHADWICK, A.; MRFETT, J.; BORTHWICK, M. *Hydraulics in civil and environmental engineering*. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

CODEVASF. *Plano de Segurança da Barragem: Barragem Bico da Pedra – Volume VI: Plano de Ação de Emergência (PAE)*. Brasília, DF: Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 191–206, 1997.

COSTA, W. D. *Geologia de barragens*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, D. C. d. *Identificação de áreas potencialmente inundáveis associadas à ruptura hipotética da barragem Santa Maria em decorrência de piping*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

Department of Energy. *Design and retrofit for flood protection*. 2022. UNITED STATES, Building America Solution Center, 10 ago. 2022.

ENGENHARIA, A. *Dicas de segurança de barragens*. 2024. <https://agralengenharia.com.br/dicas-de-seguranca-de-barragens/>. Acesso em: 25 jun. 2026.

FAN, G. et al. Study on scour simulation and boundary condition conversion technology for a shallow foundation bridge. *Scientific Reports*, v. 15, n. 4581, 2025.

FEMA. *Coastal construction manual: principles and practices of planning, siting, designing, constructing, and maintaining residential buildings in coastal areas*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2011. FEMA P-55, v. 1.

FEMA. *Floodproofing non-residential buildings. FEMA P-936*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2013.

FEMA. *P-312: Homeowner's Guide to Retrofitting: Six Ways to Protect Your Home From Flooding*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2014.

FEMA. *Protecting building utility systems from flood damage: principles and practices for the design and construction of flood resistant building utility systems. FEMA P-348*. 2. ed. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2017.

- FREITAS, C. A. C. d. *Sistemas construtivos para habitações populares*. 2010. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- GHADERI, A. et al. Hydraulic response of dam-break flood waves to converging channel geometries: a numerical investigation. *Water*, v. 17, n. 17, p. 2593, 2025.
- GONÇALVES, A. L. V. *Moradia popular no Brasil: estratégias para construções flexíveis*. Ouro Preto: [s.n.], 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- GUIDICINI, G.; SANDRONI, S. S.; MELLO, F. M. d. *Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil*. 2017.
- HUNT, B. *Fluid mechanics for civil engineers*. Christchurch: University of Canterbury, 1995.
- IBAPE-RS. *Revista Técnica IBAPE-RS*. Porto Alegre: [s.n.], 2024.
- INFRA, C. *Tipos de estacas: saiba quais são e suas características*. 2026. <https://ctcinfra.com.br/tipos-de-estacas/>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- JANSEN, L. *Structural damage to Dutch terraced houses due to flood actions*. Dissertação (Mestrado) — Delft University of Technology, Delft, 2019.
- JONOV, C. M. P. *Avaliação dos danos às edificações causados por águas de inundações e estudo de alternativas de proteção para tornar as edificações mais resilientes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- JUNIOR, F. A. dos S.; RODRIGUES, L. A. *Estudo de viabilidade dos métodos construtivos de alvenaria convencional e alvenaria estrutural*. 2025.
- NASCIMENTO, S. C. d. *Estudo da propagação de ondas de cheia ao longo dos rios do Pantanal Mato-Grossense*. João Pessoa: [s.n.], 2018.
- NAUDASCHER, E. *Hydrodynamic forces: hydraulic structures design manual*. Rotterdam: A.A. Balkema; IAHR, 1991.
- PASINATO, H. D. *Escoamento com ondas de frente abrupta*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- PEREIRA, L. R. *Estudo de viabilidade entre uma solução convencional e outra sustentável para drenagem urbana em uma instituição de ensino*. Rio Verde: [s.n.], 2021.
- SANTOS, I. A. P. *Alvenaria estrutural e uma análise comparativa entre blocos cerâmicos e de concreto*. Pombal: [s.n.], 2021.
- SILVA, T. d. S. *Índice de vulnerabilidade a desastres relacionados com fenômenos naturais nos municípios do Sertão do Pajeú, Pernambuco, Brasil*. João Pessoa: [s.n.], 2025.
- SOUZA, A. A. M.; SANTOS, J. A. J.; GARCIA, W. L. Comparação de custo benefício de fundações nas cidades de cristalina-go e paracatu-mg. In: *Anais do 3º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 657–667.
- TASSEFF, B. et al. *Optimization of structural flood mitigation strategies*. 2019. ArXiv:1803.00457v2, 2 abr. 2019.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2001. 2. reimpr.

Undrr. *Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030*. UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, Geneva: [s.n.], 2015.

WUTHRICH, D. et al. Field survey assessment of flood loads and related building damage from the july 2021 event in the ahr valley (germany). *Journal of Flood Risk Management*, v. 16, n. 4, p. e12936, 2023.