

ANÁLISE DA RESILIÊNCIA ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES AFETADAS PELAS ENCHENTES DO RIO GRANDE DO SUL (2024): UM ESTUDO APLICADO NOS MUNICÍPIOS DE ELDORADO DO SUL, MUÇUM E ROCA

**STRUCTURAL RESILIENCE ANALYSIS OF BUILDINGS AFFECTED BY THE
FLOODS IN RIO GRANDE DO SUL (2024): AN APPLIED STUDY IN THE
MUNICIPALITIES OF ELDORADO DO SUL, MUÇUM, AND ROCA SALES**

**ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES
AFECTADAS POR LAS INUNDACIONES EN RIO GRANDE DO SUL (2024): UN
ESTUDIO APLICADO EN LOS MUNICIPIOS DE ELDORADO DO SUL, MUÇUM Y
ROCA SALES**

Cristiane Burmester¹, Sergio Fernando Tavares², Foed Neto³

DOI: 10.54899/dcs.v23i96.6830

Recibido: 30/08/2026 | **Aceptado:** 04/09/2026 | **Publicación en línea:** 16/09/2026.

RESUMO

Nos últimos anos, o Brasil tem vivenciado uma crescente ocorrência de desastres naturais, com destaque para eventos hidrológicos extremos que vêm causando impactos severos nas cidades e nas edificações. Um caso emblemático ocorreu no estado do Rio Grande do Sul, em 2024, quando enchentes de grandes proporções atingiram centenas de municípios, provocando a perda de vidas humanas, o colapso de infraestruturas e prejuízos econômicos bilionários. Esse caso evidenciou as fragilidades estruturais críticas nos municípios de Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales, revelando a insuficiência dos padrões construtivos predominantes frente a eventos hidrológicos extremos. Este estudo analisou o desempenho das edificações por meio de levantamento documental, dados hidrológicos, informações geotécnicas e aplicação da Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE), desenvolvida para avaliar robustez, redundância, capacidade de absorção de danos e rapidez de recuperação. Os resultados indicaram níveis de resiliência estrutural muito baixos nos três municípios, com destaque para Muçum, onde a ação hidrodinâmica de alta energia resultou em destruição generalizada. Eldorado do Sul e Roca Sales também apresentaram vulnerabilidades associadas à saturação prolongada, instabilidade geotécnica e ausência de medidas preventivas. Conclui-se que a mitigação de riscos futuros exige revisão das práticas construtivas, atualização normativa e maior articulação entre engenharia, planejamento urbano e gestão de risco.

Palavras-chave: resiliência estrutural; enchentes; vulnerabilidade; edificações.

¹ Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.
E-mail: crisburmester@hotmail.com

² Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.
E-mail: sergioft22@yahoo.com.br

³ Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Tuiuti do Paraná (UTP), Curitiba, Paraná, Brasil.
E-mail: foed.neto@gmail.com

ABSTRACT

In recent years, Brazil has experienced a growing occurrence of natural disasters, particularly extreme hydrological events that have caused severe impacts on cities and buildings. An emblematic case occurred in the state of Rio Grande do Sul in 2024, when large-scale floods affected hundreds of municipalities, causing loss of human lives, collapse of infrastructure, and billions of dollars in economic losses. This case highlighted critical structural weaknesses in the municipalities of Eldorado do Sul, Muçum, and Roca Sales, revealing the inadequacy of prevailing construction standards in the face of extreme hydrological events. This study analyzed the performance of buildings through documentary research, hydrological data, geotechnical information, and application of the Structural Resilience Analysis Matrix (SRM), developed to assess robustness, redundancy, damage absorption capacity, and speed of recovery. The results indicated very low levels of structural resilience in the three municipalities, especially in Muçum, where the high-energy hydrodynamic action resulted in widespread destruction. Eldorado do Sul and Roca Sales also presented vulnerabilities associated with prolonged saturation, geotechnical instability, and a lack of preventive measures. It is concluded that mitigating future risks requires a review of construction practices, updated regulations, and greater coordination between engineering, urban planning, and risk management.

Keywords: structural resilience; floods; vulnerability; buildings.

RESUMEN

En los últimos años, Brasil ha experimentado una creciente ocurrencia de desastres naturales, con énfasis en eventos hidrológicos extremos que han causado impactos severos en las ciudades y edificaciones. Un caso emblemático ocurrió en el estado de Rio Grande do Sul, en 2024, cuando inundaciones de gran magnitud afectaron a cientos de municipios, provocando la pérdida de vidas humanas, el colapso de infraestructuras y perjuicios económicos millonarios. Este caso evidenció las fragilidades estructurales críticas en los municipios de Eldorado do Sul, Muçum y Roca Sales, revelando la insuficiencia de los estándares constructivos predominantes frente a eventos hidrológicos extremos. Este estudio analizó el desempeño de las edificaciones mediante levantamiento documental, datos hidrológicos, informaciones geotécnicas y la aplicación de la Matriz de Análisis de Resiliencia Estructural (MARE), desarrollada para evaluar robustez, redundancia, capacidad de absorción de daños y rapidez de recuperación. Los resultados indicaron niveles muy bajos de resiliencia estructural en los tres municipios, destacándose Muçum, donde la acción hidrodinámica de alta energía resultó en una destrucción generalizada. Eldorado do Sul y Roca Sales también presentaron vulnerabilidades asociadas a la saturación prolongada, la inestabilidad geotécnica y la ausencia de medidas preventivas. Se concluye que la mitigación de riesgos futuros exige una revisión de las prácticas constructivas, actualización normativa y una mayor articulación entre ingeniería, planificación urbana y gestión de riesgos.

Palabras clave: resiliencia estructural; inundaciones; vulnerabilidad; edificaciones



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Os desastres hidrológicos registrados no Rio Grande do Sul entre 2023 e 2024 configuraram um dos maiores colapsos socioestruturais já documentados no Brasil, resultando em perdas humanas, econômicas e materiais de grande magnitude. Municípios como Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales foram severamente afetados, apresentando padrões distintos de inundação, saturação prolongada, impacto hidrodinâmico e enchentes repetitivas associadas à instabilidade geotécnica, que expuseram fragilidades históricas das edificações e da infraestrutura urbana. A recorrência e intensidade desses eventos reforçam a necessidade de análises técnicas orientadas ao entendimento da vulnerabilidade estrutural e da capacidade de recuperação das áreas afetadas.

A literatura internacional avança em modelos de resiliência estrutural aplicados a cenários extremos, enquanto o contexto brasileiro carece de diretrizes normativas específicas para avaliar o desempenho de edificações diante de ações como forças hidrodinâmicas, erosão acelerada, impacto de detritos e longos períodos de inundação. Nesse sentido, torna-se essencial desenvolver instrumentos metodológicos capazes de integrar dados hidrológicos, geotécnicos e construtivos, permitindo diagnósticos mais precisos e comparáveis.

Diante desse cenário, o presente artigo apresenta uma análise aplicada da resiliência estrutural em três municípios severamente atingidos pelas enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul. Para isso, foi desenvolvida e empregada a Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE), uma ferramenta multicritério que sintetiza indicadores de robustez, redundância, capacidade de absorção de danos e rapidez de recuperação. A partir de dados oficiais, levantamentos técnicos e análise dos danos observados, o estudo busca identificar padrões de vulnerabilidade, comparar a resposta estrutural entre os municípios e discutir lacunas das normas técnicas brasileiras frente a eventos hidrológicos extremos.

Os resultados apresentados contribuem para ampliar o debate sobre práticas construtivas mais seguras, planejamento urbano resiliente e aprimoramento das políticas públicas voltadas à gestão de risco e mitigação de desastres hídricos no Brasil.

REFERENCIAL TEÓRICO

Conceito de Resiliência Estrutural

Segundo Bruneau et al. (2003), “resiliência representa a capacidade de um sistema em reduzir a probabilidade de falha, minimizar os impactos caso ela ocorra e promover uma recuperação eficiente após eventos adversos”. Na engenharia estrutural, esse conceito refere-se à habilidade das construções de suportarem ações extremas, mantendo suas funções essenciais e retornando a um estado de operação adequado dentro de um tempo aceitável.

É importante destacar que resiliência não deve ser confundida com conceitos clássicos como resistência, ductilidade e robustez. Mainenti e Cavalcanti (2022) explicam que a resistência está relacionada à capacidade de suportar tensões sem colapso; a ductilidade, à habilidade de sofrer deformações permanentes com redistribuição de esforços; e a robustez, à manutenção da integridade estrutural mesmo diante de falhas parciais. A resiliência, por sua vez, integra todos esses elementos, ao considerar desempenho físico, funcionalidade e tempo de resposta.

Moura (2022) acrescenta que a resiliência estrutural envolve não apenas resistência mecânica, mas também fatores como redundância, flexibilidade e adaptabilidade. Já Silva et al. (2021) reforçam que uma estrutura resiliente não é aquela que nunca falha, mas sim a que consegue se adaptar ao impacto, evitando colapso total e permitindo reparos viáveis.

Ferreira (2021) relaciona a resiliência estrutural ao paradigma da engenharia sustentável, destacando que estruturas resilientes tendem a ter ciclos de vida mais longos e custos reduzidos de manutenção. Costa (2022) observa que, no Brasil, a implementação desse conceito ainda é incipiente, enfrentando desafios como ausência de diretrizes específicas e escassez de dados técnicos aplicáveis.

Assim, compreender os fundamentos da resiliência estrutural e integrá-los ao processo de concepção e manutenção das edificações é fundamental para a promoção de cidades mais seguras e sustentáveis, especialmente diante da intensificação dos desastres naturais associados às mudanças climáticas.

Desastres Naturais no Brasil

O Brasil é um país com elevada diversidade climática, geográfica e socioeconômica. Essa

heterogeneidade torna o território nacional particularmente suscetível a diferentes tipos de desastres naturais, como inundações, deslizamentos, vendavais, estiagens e até mesmo incêndios florestais. Segundo o CEMADEN (2022), entre os anos de 2011 e 2021, mais de 2.500 municípios brasileiros registraram pelo menos um tipo de desastre natural significativo.

Oliveira (2019) destaca que as inundações são os eventos mais recorrentes, geralmente associados à ocupação irregular das margens de rios e à insuficiência de drenagem urbana. Já os deslizamentos de terra ocorrem principalmente em encostas urbanizadas sem contenção adequada, representando grande risco à vida humana e à infraestrutura local.

Silva (2021) observa que a vulnerabilidade estrutural é agravada pela utilização de materiais de baixa qualidade e pela ausência de fiscalização técnica. De acordo com a Defesa Civil Nacional (2021), os prejuízos econômicos causados por desastres naturais no Brasil ultrapassaram R\$ 340 bilhões entre 2000 e 2020, além de milhares de mortes e deslocamentos forçados.

Costa (2021) e Moura (2022) defendem maior integração entre planejamento urbano, mapeamento de áreas de risco e critérios de resiliência nos projetos estruturais, como forma de mitigar impactos e proteger populações vulneráveis.

Vulnerabilidade Estrutural em áreas de Risco

A vulnerabilidade estrutural diz respeito à suscetibilidade de uma edificação sofrer danos ou colapsar diante de ações externas, especialmente em contextos adversos, como desastres naturais. Essa vulnerabilidade não se limita aos aspectos técnicos do projeto, mas também engloba fatores socioeconômicos, ambientais e urbanos (Oliveira, 2019).

Em áreas urbanas brasileiras, principalmente nas periferias dos grandes centros, é comum encontrar edificações construídas sem acompanhamento técnico, com uso de materiais inadequados e em terrenos instáveis. Essas construções, muitas vezes erguidas em encostas, margens de rios ou áreas de alagamento, tornam-se extremamente frágeis diante de eventos climáticos extremos (Silva, 2021).

A literatura destaca que a combinação entre vulnerabilidade social e deficiência técnica construtiva é um dos principais fatores de risco em desastres naturais (Ferreira, 2021). Em outros termos, edificações precárias em áreas de risco não são apenas fruto da natureza, mas também de falhas humanas no planejamento urbano e na gestão do solo.

Estudos como os de Moura (2022) demonstram que, em regiões atingidas por deslizamentos de terra, boa parte das estruturas colapsadas apresentava ausência de fundações adequadas, sistemas de drenagem precários e ausência de contenção. Esses dados revelam a urgência de intervenções tanto na infraestrutura urbana quanto nas práticas de projeto e execução das edificações.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseou-se em uma abordagem mista, articulando procedimentos qualitativos e quantitativos para avaliar a resiliência estrutural de edificações nos municípios de Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales, severamente afetados pelas enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul. A pesquisa foi conduzida a partir de um estudo de caso múltiplo, escolhido por permitir a comparação direta entre diferentes contextos urbanos submetidos ao mesmo evento hidrológico extremo, possibilitando identificar padrões comuns e especificidades estruturais relevantes.

A coleta de dados foi realizada exclusivamente por meio de fontes oficiais e verificáveis, incluindo relatórios técnicos da Defesa Civil do Rio Grande do Sul, mapeamentos hidrológicos fornecidos pelo CEMADEN, bases georreferenciadas do Mapa Único do Plano Rio Grande, dados demográficos do IBGE e registros fotográficos oriundos de agências de imprensa e equipes de monitoramento. Essas informações foram organizadas e validadas por meio de análise cruzada, garantindo consistência e eliminando duplicidades. Para contextualizar os municípios bem como a distribuição das áreas afetadas pelas enchentes seguem as imagens de satélite, do antes e depois do desastre, para cada um dos municípios.

As figuras 1 e 2, trazem respectivamente, a imagem de satélite de antes e depois das enchentes que atingiram o município de Eldorado do Sul.

Figura 1 – Imagem de satélite de Eldorado do Sul no dia 21/04/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

Figura 2 - Imagem de satélite de Eldorado do Sul no dia 06/05/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

A seguir, as figuras 3 e 4 trazem de maneira respectiva, a imagem de satélite de antes e depois das enchentes que atingiram o município de Muçum.

Figura 3 - Imagem de satélite de Muçum no dia 21/04/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

Figura 4 - Imagem de satélite de Muçum no dia 06/05/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

Por fim, as figuras 5 e 6 trazem respectivamente, a imagem de satélite de antes e depois das enchentes que atingiram o município de Muçum.

Figura 5 – Imagem de satélite de Roca Sales no dia 21/04/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

Figura 6 - Imagem de satélite de Roca Sales no dia 06/05/2024.



Fonte: Autores (2026), com base em Copernicus Browser.

A caracterização dos municípios foi realizada com base na sistematização dos principais indicadores populacionais, territoriais, hidrológicos e de danos estruturais. Essa etapa foi sintetizada em três quadros contendo os dados essenciais referentes a Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales, que devem ser apresentados nesta seção para fornecer ao leitor uma visão clara da dimensão dos impactos e da diversidade dos cenários analisados. Os quadros e figuras a seguir, trazem de maneira respectiva, os indicadores de impacto e a ilustração da característica do impacto da enchentes para cada um dos municípios.

O quadro 1 apresenta os indicadores de impacto das enchentes de 2024 para o município de Eldorado do Sul, enquanto isso, a figura 7 apresenta a vista a cidade de Eldorado do Sul após temporais, ilustrando a característica de impacto identificada.

Quadro 1 - Indicadores de impacto das enchentes de 2024 em Eldorado do Sul.

População total	39.559 habitantes
População atingida	32.509 habitantes
% Da população atingida	82,18%
Endereços totais	20.822 endereços
Endereços atingidos	15.187endereços
% De endereços atingidos	72,94%
% De área urbana inundada	Entre 98% e 100%
Característica do impacto	Inundação lenta por saturação e alagamento prolongado
Patrimônio construído afetado	Praticamente todo o núcleo urbano atingido
Contração econômica	Queda de 36,3% nas atividades econômicas (maio/2024)
Infraestrutura crítica	26 escolas danificadas; colapso de serviços essenciais
Sector produtivo	Paralisação quase total do comércio e serviços
Principal vulnerabilidade	Localização em planície de inundação do Guaíba e Jacuí
Estratégia de resposta	Investimento massivo em habitação; reassentamento urbano

Fonte: Autores (2026), a partir de Mapa Único RS (2024), Defesa Civil RS (2024) e Censo IBGE (2022).

Figura 7 - Vista aérea da cidade de Eldorado do Sul após temporais, indicando alagamento prolongado.



Fonte: Defesa Civil do RS.

Abaixo, o quadro 2 apresenta os indicadores de impacto das enchentes de 2024 para o município de Muçum, já a figura 7 apresenta a vista do cemitério municipal de Muçum destruído pela enchente, ilustrando a força hidrodinâmica destrutiva.

Quadro 2 - Indicadores de impacto das enchentes de 2024 em Muçum.

População total	4.601 habitantes
População atingida	3.638 habitantes
% Da população atingida	79,07%
Endereços totais	2.810 endereços
Endereços atingidos	2.199 endereços
% De endereços atingidos	78,26%

% De área urbana inundada	Próximo de 100%
Característica do impacto	Força hidrodinâmica destrutiva e impacto de detritos
Patrimônio construído afetado	Mais de 290 residências totalmente destruídas
Contração econômica	Queda aproximada de 10% na receita municipal
Infraestrutura crítica	Escolas reconstruídas após 2023 destruídas novamente
Setor produtivo	Colapso parcial do curtume (500 empregos)
Principal vulnerabilidade	Ocupação imediata da margem do Rio Taquari
Estratégia de resposta	Realocação urbana; acordos com empresas privadas

Fonte: Autores (2026), a partir de Mapa Único RS (2024), Defesa Civil RS (2024) e Censo IBGE (2022).

Figura 8 - Vista do cemitério municipal de Muçum destruído pela enchente, ilustrando a força hidrodinâmica destrutiva.



Fonte: MACEDO, Carlos. 29 set. 2024. Agência Pública.

Na sequência, o quadro 3 apresenta os indicadores de impacto das enchentes de 2024 para o município de Roca Sales em conjunto com a figura 7, que apresenta a foto de uma casa soterrada por deslizamento de terra no município, ilustrando a característica de impacto identificada.

Quadro 3 - Indicadores de impacto das enchentes de 2024 em Roca Sales.

População total	10.418 habitantes
População atingida	5.680 habitantes
% Da população atingida	54,52%
Endereços totais	5.609 endereços
Endereços atingidos	3.221 endereços
% De endereços atingidos	57,43%
% De área urbana inundada	Próximo de 100%
Característica do impacto	Enchentes repetitivas e deslizamentos associados
Patrimônio construído afetado	Centro urbano destruído; pontes e vias colapsadas
Contração econômica	Queda de 40% na arrecadação municipal
Infraestrutura crítica	Desabamento da ponte da ERS-130
Setor produtivo	Prejuízos superiores a R\$ 350 milhões; granjas destruídas
Principal vulnerabilidade	Solo instável e alta recorrência de eventos extremos
Estratégia de resposta	Realocação de cerca de 40% da área urbana

Fonte: Autores (2026), a partir de Mapa Único RS (2024), Defesa Civil RS (2024) e Censo IBGE (2022).

Figura 9 - Casa soterrada por deslizamento de terra em Roca Sales.



Fonte: Schneider, Maira. Grupo A Hora, 30 abr. 2024.

A partir dessa sistematização inicial, foram consolidados três grupos de parâmetros fundamentais para a análise: (a) parâmetros hidrológicos, como altura da inundação, velocidade do fluxo e tempo de permanência da água; (b) parâmetros geotécnicos, abrangendo estabilidade de taludes, presença de escorregamentos e processos erosivos; e (c) características construtivas predominantes, incluindo tipologias estruturais, fundações utilizadas e nível de manutenção. Esses elementos foram organizados em quadros comparativos para facilitar a leitura e o entendimento do comportamento estrutural dos municípios durante o evento extremo.

A seguir, o quadro 4 agrupa os dados referentes aos parâmetros hidrológicos dos eventos de 2024 nos municípios estudados.

Quadro 4 – Parâmetros hidrológicos dos eventos de 2024 nos municípios estudados.

Parâmetro	Eldorado do Sul	Muçum	Roca Sales
Cota máxima observada	5,35 m (Estação Arquipélago – Guaíba)	25,57 m (Estação Muçum – Rio Taquari)	33,66 m (Estação Encantado – Rio Taquari)
Tempo de subida	Lento	Muito rápido	Rápido
Tempo de permanência	Prolongado (vários dias)	Curto a moderado	Curto, porém recorrente
Velocidade da correnteza	Baixa	Alta	Alta
Tipo de enchente	Inundação por saturação e alagamento prolongado	Enchente hidrodinâmica destrutiva	Hidrodinâmica com deslizamentos associados

Fonte: Autores (2026), a partir de CEMADEN (2024), CPRM/ANA (2024), Defesa Civil RS (2024).

Enquanto isso, o quadro 5, apresentado abaixo, compila os parâmetros geotécnicos dos municípios estudados.

Quadro 5 – Parâmetros geotécnicos dos municípios estudados.

Parâmetro	Eldorado do Sul	Muçum	Roca Sales
Tipo de solo predominante	Sedimentos finos e orgânicos de planície	Depósitos coluviais e aluviais	Solos coluviais, argilosos e material inconsolidado
Escorregamentos registrados	Baixa ocorrência	Presentes em encostas adjacentes	Alta ocorrência
Erosão marginal	Moderada	Alta	Muito alta
Saturação do solo	Muito elevada	Elevada	Muito elevada
Falhas em contenções	Recalques e fissuração	Falhas localizadas	Falhas extensas; colapso de pontes e estruturas lineares

Fonte: Autores (2026), a partir de CEMADEN (2024), SEDUR-RS (2024), Defesa Civil RS (2024).

Por fim, o quadro 6 concatena os dados referentes as características construtivas que predominam em cada um dos municípios estudados.

Quadro 6 – Característica construtivas predominantes nos municípios estudados

Parâmetro	Eldorado do Sul	Muçum	Roca Sales
Tipologia predominante	Alvenaria convencional	Alvenaria + madeira	Alvenaria unifamiliar e edificações rurais
Altura média das edificações	1–2 pavimentos	1–2 pavimentos	1–2 pavimentos
Estado de manutenção pré-evento	Variado	Regular a deteriorado	Regular a deteriorado
Proteções contra enchentes	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Conformidade normativa	Baixa	Baixa	Baixa
Vulnerabilidade estrutural-chave	Saturação prolongada e recalques	Arraste lateral e impacto hidrodinâmico	Erosão, instabilidade de taludes e colapso

Fonte: Autores (2026), a partir de Mapa Único RS (2024), Defesa Civil RS (2024), SEDUR-RS (2024).

Com base nesses parâmetros, desenvolveu-se a Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE), construída a partir de referências nacionais e internacionais, como ABNT NBR 6118, NBR 6122, NBR 15575, FEMA P-55 e FEMA P-58, que orientaram a seleção dos indicadores estruturais. A matriz organiza treze indicadores distribuídos em quatro categorias essenciais: robustez estrutural, redundância, capacidade de absorção de danos e rapidez de recuperação. Cada indicador recebeu um peso específico atribuído segundo o método

multicritério Weighted Criteria Rating Method (WCRM), assegurando coerência na hierarquização das variáveis. O quadro 7 apresenta a estrutura geral utilizada na MARE.

Quadro 7 – Estrutura geral da Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE).

Categoria de Resiliência	Indicador Avaliado	Descrição Técnica do indicador	Peso Relativo (W)
1. Robustez estrutural	Desempenho das fundações	Capacidade de manter estabilidade frente à erosão, socavamento, saturação e perda de capacidade de carga.	0,12
	Estabilidade das alvenarias	Resistência da alvenaria a esforços hidrostáticos e hidrodinâmicos; comportamento frente à pressão lateral da água.	0,10
	Integridade do sistema de cobertura	Resistência da cobertura a ventos, impacto de detritos e infiltrações prolongadas.	0,07
2. Redundância	Sistema alternativo de transferência de cargas	Existência de múltiplos caminhos estruturais capazes de redistribuir esforços durante cenário de instabilidade.	0,09
	Redundância de acessos e infraestruturas críticas	Presença de acessos alternativos, fontes secundárias de energia ou rotas de evacuação.	0,08
3. Capacidade de absorção	Resistência à saturação prolongada	Desempenho dos materiais e da estrutura submetidos à imersão prolongada.	0,09
	Resistência a esforços hidrodinâmicos	Comportamento frente à correnteza, impacto de troncos, detritos e velocidade do fluxo.	0,12
	Estabilidade do terreno/interação solo-estrutura	Suscetibilidade a escorregamentos, liquefação, recalques diferenciais e erosão severa.	0,10
4. Rapidez de recuperação	Tempo de reocupação estimado	Intervalo necessário para tornar a edificação habitável após o evento.	0,08
	Necessidade de intervenções estruturais relevantes	Grau de reparos exigidos: leves, moderados ou severos.	0,07
	Condições das infraestruturas conectadas	Dependência de sistemas externos (energia, água, mobilidade) para recuperação plena.	0,08
Peso total da matriz (soma)	—	—	1

Fonte: Autores (2026), com base em Bruneau et al. (2003); FEMA (2010; 2024); ABNT NBR 15575 (2013); CEMADEN (2023).

Posteriormente, os três municípios foram avaliados individualmente por meio do preenchimento operacional da matriz, utilizando uma escala de 0 a 5 pontos para cada indicador, de modo a representar desde ausência total de desempenho estrutural até desempenho considerado adequado. A nota de cada indicador foi multiplicada pelo seu respectivo peso, resultando na pontuação final de cada categoria e, conseqüentemente, na obtenção do Índice Final de Resiliência Estrutural (IFRE).

O quadro 8 apresenta o preenchimento integral da MARE para o município de Eldorado do Sul, caracterizado por um cenário de inundação lenta, saturação prolongada e colapso urbano generalizado.

Quadro 8 – Tabela Operacional da MARE para Eldorado do Sul.

Categoria	Indicador	Peso	Nota (0–5)	Nota × Peso
Robustez estrutural	Desempenho das fundações	0,12	2	0,24
	Estabilidade das alvenarias	0,10	2	0,2
	Integridade da cobertura	0,07	3	0,21
Redundância	Transferência alternativa de cargas	0,09	2	0,18
	Acessos e infraestrutura redundante	0,08	1	0,08
Capacidade de absorção	Resistência à saturação prolongada	0,09	1	0,09
	Resistência a esforços hidrodinâmicos	0,12	1	0,12
	Estabilidade do terreno	0,10	3	0,3
Rapidez de recuperação	Tempo de reocupação	0,08	1	0,08
	Necessidade de reparos estruturais	0,07	2	0,14
	Dependência de infraestruturas externas	0,08	1	0,08
Total	—	1	—	1,72

Fonte: Autores (2026), com base em Bruneau et al. (2003); FEMA (2010; 2024); ABNT NBR 15575 (2013); CEMADEN (2023); dados consolidados nos Quadros 1 a 6.

O quadro 9 reúne a aplicação da MARE ao município de Muçum, cujo núcleo urbano foi afetado predominantemente por impacto hidrodinâmico de alta intensidade, incluindo destruição total de edificações, erosão severa e transporte de detritos.

Quadro 9 - Tabela Operacional da MARE para Muçum.

Categoria	Indicador	Peso	Nota (0–5)	Nota × Peso
Robustez estrutural	Desempenho das fundações	0,12	1	0,12
	Estabilidade das alvenarias	0,10	1	0,1
	Integridade da cobertura	0,07	2	0,14
Redundância	Transferência alternativa de cargas	0,09	1	0,09
	Acessos e infraestrutura redundante	0,08	1	0,08
Capacidade de absorção	Resistência à saturação	0,09	1	0,09
	Resistência hidrodinâmica	0,12	0	0
	Estabilidade do terreno	0,10	2	0,2
Rapidez de recuperação	Tempo de reocupação	0,08	0	0
	Necessidade de reparos	0,07	1	0,07
	Dependência de infraestrutura externa	0,08	0	0
Total	—	1	—	0,89

Fonte: Autores (2026), com base em Bruneau et al. (2003); FEMA (2010; 2024); ABNT NBR 15575 (2013); CEMADEN (2023); dados consolidados nos Quadros 1 a 6.

O quadro 10 apresenta os resultados da MARE para Roca Sales, município que sofreu efeitos combinados de enchentes repetitivas, instabilidade geotécnica e deslizamentos.

Quadro 10 - Tabela Operacional da MARE para Roca Sales.

Categoria	Indicador	Peso	Nota (0–5)	Nota × Peso
Robustez estrutural	Desempenho das fundações	0,12	2	0,24
	Estabilidade das alvenarias	0,10	2	0,2
	Integridade da cobertura	0,07	3	0,21
Redundância	Transferência alternativa de cargas	0,09	2	0,18
	Acessos e infraestrutura redundante	0,08	1	0,08
Capacidade de absorção	Resistência à saturação	0,09	2	0,18
	Resistência hidrodinâmica	0,12	1	0,12
	Estabilidade do terreno	0,10	1	0,1
Rapidez de recuperação	Tempo de reocupação	0,08	1	0,08
	Necessidade de reparos	0,07	2	0,14
	Dependência de infraestrutura externa	0,08	1	0,08
Total	—	1	—	1,61

Fonte: Autores (2026), com base em Bruneau et al. (2003); FEMA (2010; 2024); ABNT NBR 15575 (2013); CEMADEN (2023); dados consolidados nos Quadros 1 a 6.

A partir desse conjunto de dados, foram gerados dois gráficos a serem apresentados na seção de resultados: um gráfico comparativo dos IFREs dos três municípios e um gráfico de desempenho por categoria da MARE.

Essa metodologia estruturada permitiu uma avaliação rigorosa da resiliência estrutural dos municípios estudados, integrando dados hidrológicos, geotécnicos e construtivos em um modelo multicritério consistente, capaz de esclarecer os fatores que condicionaram os padrões de danos observados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da aplicação da Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE) aos municípios de Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales revelam padrões consistentes de vulnerabilidade estrutural, diretamente relacionados à natureza do evento hidrológico e às condições construtivas predominantes. A análise integrada dos indicadores permitiu identificar tendências comuns aos três municípios, mas também particularidades que explicam diferenças significativas nos danos registrados.

A primeira etapa da análise consistiu na interpretação dos quadros 1, 2 e 3 que trazem a caracterização dos impactos das enchentes, em cada um dos municípios estudados. Esses quadros demonstram que, embora o volume de população afetada seja expressivo em todos os casos, a dinâmica dos eventos hidrológicos foram substancialmente distintas. Em Eldorado do Sul, predominou a inundação lenta e de longa duração; em Muçum, a força hidrodinâmica extrema;

e em Roca Sales, a recorrência de eventos acompanhada por instabilidade geotécnica. Essas diferenças explicam a distribuição desigual das notas atribuídas na matriz.

A seguir, a figura 10 apresenta a classificação para interpretação dos resultados obtidos para o Índice Final de Resiliência Estrutural – IFRE.

Figura 10 - Classificação dos resultados do IFRE.

Faixa do IFRE	Classificação
0,00 – 1,00	Resiliência Estrutural Extremamente Baixa
1,01 – 2,00	Resiliência Estrutural Muito Baixa
2,01 – 3,00	Resiliência Estrutural Moderada
3,01 – 4,00	Resiliência Estrutural Alta

Fonte: Autores (2026).

A interpretação dos resultados dos parâmetros hidrológicos, geotécnicos e construtivos, organizados nos quadros 4, 5 e 6, reforça os padrões observados em campo. Eldorado do Sul apresentou tempos prolongados de permanência da água e saturação do solo, conferindo maior peso aos danos em alvenarias, fundações e pavimentos térreos. Já Muçum registrou velocidades elevadas do fluxo e impacto direto de detritos, cenário no qual estruturas rígidas e sem reforço não possuem capacidade de dissipar energia. Por fim, Roca Sales evidenciou um quadro híbrido, caracterizado por saturação do solo, erosão, escorregamentos e perdas acumuladas ao longo de múltiplas enchentes.

A compilação dos quadros 8, 9 e 10, em um único quadro comparativo, mostra que todos os municípios apresentaram baixo desempenho nas categorias de redundância e rapidez de recuperação, refletindo dificuldades estruturais e urbanas em responder ao desastre. Entretanto, é possível observar que o município de Muçum obteve as menores notas globais, sobretudo nos indicadores relacionados à resistência hidrodinâmica e integridade das edificações, condizente com a destruição quase total do núcleo urbano.

O quadro 11 apresenta a síntese dos índices além da principal vulnerabilidade identificada, a partir da análise da MARE, para os três municípios do estudo.

Quadro 11 - Tabela Consolidada da MARE (Comparativa dos três municípios).

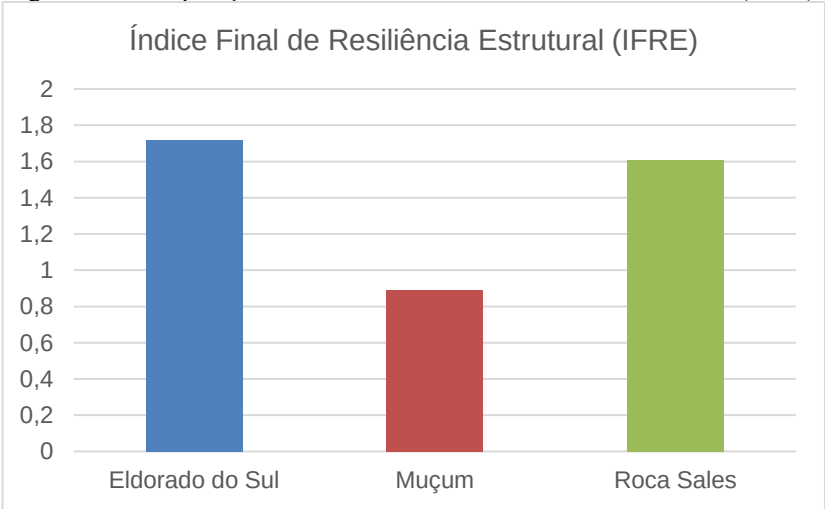
Município	IFRE	Classificação	Principal Vulnerabilidade Estrutural
Eldorado do Sul	1,72	Muito baixa	Saturação prolongada e colapso urbano
Muçum	0,89	Extremamente baixa	Força hidrodinâmica destrutiva
Roca Sales	1,61	Muito baixa	Repetição de eventos e instabilidade do solo

Fonte: Autores (2026), com base nas Tabelas Operacionais da MARE.

Utilizando a consolidação dos dados, foram gerados dois gráficos, facilitando ainda mais a leitura integrada dos dados, mostrando que a categoria “capacidade de absorção de danos” é o ponto mais crítico em Muçum, enquanto “rapidez de recuperação” e “redundância” apresentam baixos desempenhos generalizados. A visualização gráfica também evidencia que Eldorado do Sul, apesar de manter maior estabilidade geotécnica, demonstra forte fragilidade em sistemas externos e na recuperação pós-evento.

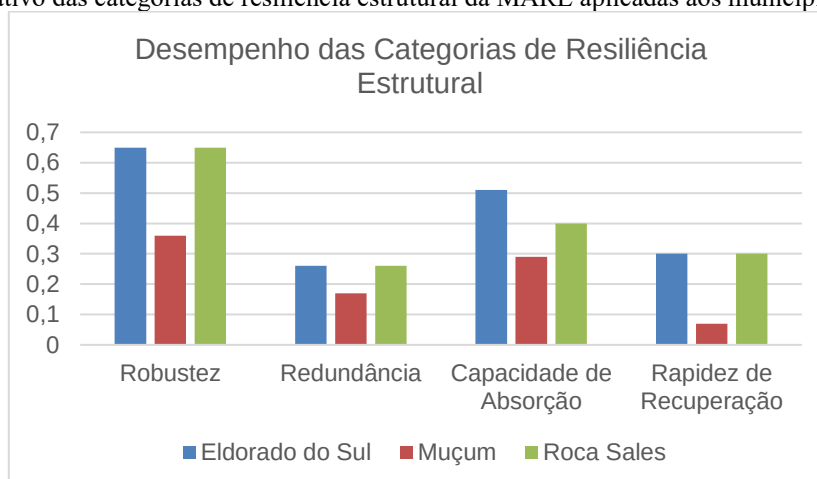
A figura 11, que apresenta o desempenho global do IFRE, evidenciando o forte contraste entre Muçum e os demais municípios, revelando a influência da intensidade hidrodinâmica na destruição de edificações. Enquanto isso, a figura 12 representa o desempenho das categorias da MARE, reforça padrões recorrentes: baixa redundância, baixa rapidez de recuperação e insuficiência estrutural frente à saturação e à dinâmica hidrológica.

Figura 11 - Comparação dos Índices Finais de Resiliência Estrutural (IFRE).



Fonte: Autores (2026), a partir da aplicação da Tabela Consolidada da MARE.

Figura 12 - Comparativo das categorias de resiliência estrutural da MARE aplicadas aos municípios estudados.



Fonte: Autores (2026), a partir dos dados dos Quadros 8, 9 e 10.

A discussão desses resultados permite compreender que a resiliência estrutural não depende apenas da qualidade dos materiais ou da tipologia das edificações, mas também da adequação entre ocupação urbana e ambiente natural. Em Eldorado do Sul, a localização em cota extremamente baixa ampliou a exposição à inundação prolongada. Em Muçum, a urbaniza o consolidada na margem imediata do Rio Taquari colocou edifica es em posi o vulnerável a forças hidrodinâmicas intensas. Em Roca Sales, o processo cumulativo e a instabilidade do solo foram determinantes para a amplia o dos danos.

Em síntese, a análise demonstra que nenhum dos três municípios apresenta desempenho estrutural compatível com eventos extremos, reforçando a necessidade de revisão das diretrizes de ocupa o e das práticas de projeto. Os resultados apontam lacunas significativas entre o que as normas técnicas brasileiras atualmente exigem e o desempenho necessário frente aos novos padrões de variabilidade climática, tema aprofundado nas conclusões do artigo.

CONCLUSÃO

Os resultados da análise evidenciaram que os municípios de Eldorado do Sul, Muçum e Roca Sales apresentam níveis críticos de vulnerabilidade estrutural diante de eventos hidrológicos extremos. A aplica o da Matriz de Análise de Resiliência Estrutural (MARE) demonstrou que, embora existam diferenças nas características locais — como satura o prolongada em Eldorado do Sul, força hidrodinâmica destrutiva em Muçum e deslizamentos

associados em Roca Sales —, todos compartilham fragilidades estruturais que comprometem a segurança das edificações e a capacidade de recuperação urbana.

Esse diagnóstico reforça a necessidade de revisão profunda das práticas construtivas e da atualização das normas técnicas brasileiras, de modo a incorporar critérios de resiliência estrutural que contemplem não apenas resistência mecânica, mas também redundância, adaptabilidade e rapidez de recuperação. Além disso, a integração entre engenharia, planejamento urbano e gestão de risco deve ser fortalecida, garantindo que políticas públicas sejam orientadas por evidências técnicas e voltadas à mitigação de desastres futuros.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui para ampliar o debate sobre a resiliência estrutural em cenários de enchentes, oferecendo uma metodologia aplicável a diferentes contextos urbanos e rurais. Do ponto de vista prático, os resultados podem subsidiar gestores públicos, engenheiros e planejadores urbanos na formulação de estratégias de prevenção, reassentamento e reconstrução mais seguras e sustentáveis.

Por fim, conclui-se que a construção de cidades resilientes exige não apenas investimentos em infraestrutura, mas também uma mudança de paradigma: compreender que desastres naturais não são eventos isolados, mas fenômenos recorrentes que devem ser enfrentados com planejamento integrado, inovação tecnológica e compromisso social. Somente assim será possível reduzir perdas humanas e materiais, proteger o patrimônio construído e promover comunidades mais seguras e preparadas para os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15575: Edificações Habitacionais** - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AGÊNCIA BRASIL. **Morador tenta recuperar bicicleta em área destruída em Muçum (RS)**. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/>. Acesso em: 2 out. 2025.

ALVES, C. A. **Resiliência urbana e vulnerabilidade socioambiental**: um estudo sobre as enchentes em Belo Horizonte. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

ARAÚJO, M. L. M. **A biomimética como ferramenta para o desenvolvimento de edificações resilientes e produção de abrigos para os refugiados climáticos**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/>. Acesso em: 18 set. 2025.

AUDI, A. Desastre no RS: a segunda morte dos mortos de Muçum. **Agência Pública**, 29 set. 2024. Disponível em: <https://apublica.org/2024/09/desastre-no-rs-a-segunda-morte-dos-mortos-de-mucum/>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). **Nota Técnica nº 469/2024: Mapeamento das manchas de inundação do desastre RS 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/>. Acesso em: 14 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul** - Novembro de 2024. Brasília: MDR, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D.; REINHORN, A. M.; SHINOZUKA, M.; TIERNEY, K.; WALLACE, W. A.; VON WINTERFELDT, D. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. **Earthquake Spectra**, v. 19, n. 4, p. 737-738, 2003.

CEMADEN. **Relatório de ocorrências e atendimento emergencial** - Enchentes RS 2024. São José dos Campos: CEMADEN, 2024. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

DEFESA CIVIL DO RS. **Relatório de danos e impactos** - Enchentes maio de 2024. Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/>. Acesso em: 11 jul. 2025.

FEMA. **Seismic Rehabilitation Training for One- and Two-Family Dwellings** - FEMA 774. Washington: FEMA, 2010. Disponível em: <https://www.fema.gov/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

G1. **Casa soterrada por deslizamento em Roca Sales (RS)**. 30 abr. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/04/30/casa-soterrada-deslizamento-roca-sales.ghtml>. Acesso em: 12 out. 2025.

GOVERNO DO RS. **Relatório SISPERDAS** - Evento enchentes em maio de 2024. Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GRUPO A HORA. **Casa é soterrada por deslizamento de terra em Roca Sales**. 30 abr. 2024. Disponível em: <https://grupoahora.net.br/conteudos/2024/04/30/casa-e-soterrada-por-deslizamento-de-terra-em-roca-sales/>. Acesso em: 12 out. 2025.

MAPA ÚNICO DO PLANO RIO GRANDE (MUP-RS). **Base de dados de municípios afetados pelas enchentes de 2024**. Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MOURA, D. **Gestão estratégica de resiliência organizacional**: trazendo o conceito para a prática. 2022. 163 f. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/58530/58530.PDF>.

SILVA, C. T.; CORRÊA, M. M. A.; CORRÊA, R. C. Cidades resilientes e gestão do risco de desastres: o papel da engenharia. In: ENTAC 2017. **Anais [...]**. São Paulo: ANTAC, 2017. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/>. Acesso em: 2 out. 2025.

DA SILVA, D. F.; LIMA, M. J. S.; SOUZA NETO, P. F.; GOMES, H. B.; SILVA, F. S.; ALMEIDA, H. R. R. C.; *et al.* Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.

SOUZA, K. A. *et al.* Resiliência estrutural e sustentabilidade em edificações frente aos desastres naturais. In: ENSUS 2017. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

UOL. **Drone registra Eldorado do Sul após enchentes de maio de 2024**. 14 maio 2024. Disponível em: <https://uol.com.br/>. Acesso em: 28 set. 2025.