

FORÇAS DE IMPACTO DE FLUXOS DE DETRITOS EM ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO

Leonardo Ferreira^{1,*}, Alberto Sayão² e Anna L. Nunes³

¹*Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional e Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

²*Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

³*Departamento de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Palavras-chave: Forças de Impacto, Fluxos de Detritos, Barragens Sabo, DAN3D, RocFall.

Resumo. O trabalho busca abordar formas de obter as forças de impacto de fluxos de detritos brasileiros, principalmente advindas da parcela referente aos blocos de rocha, parcela não viscosa, do movimento. Propõe-se uma metodologia que utiliza ferramentas numéricas como o DAN3D e o RocFall para se obter as forças de impacto dos blocos rochosos em estruturas de contenção estáticas e dinâmicas. Para obtenção dos resultados buscou-se a aplicação da metodologia em três casos recentes, de importantes fluxos de detritos ocorridos no Brasil, situados na Serra do Mar, mais precisamente nos municípios de Nova Friburgo e Teresópolis no Rio de Janeiro e em São Sebastião em São Paulo.

E-mail addresses: leonardo.ferreira@mdr.gov.br^{*}, sayao@puc-rio.br, annalaura.aln@gmail.com

IMPACT LOADS OF DEBRIS FLOWS ON PROTECTION STRUCTURES

Keywords: Impact Loads, Debris Flows, Sabo Dams, DAN3D, RocFall.

Abstract. The work seeks to address ways of obtaining the impact forces of Brazilian debris flows, mainly arising from the portion referring to rock blocks, a non-viscous portion, of the movement. A methodology is proposed that uses numerical tools such as DAN3D and RocFall to obtain the impact forces of rock blocks in static and dynamic containment structures. To obtain the results, we sought to apply the methodology in three recent cases, of important debris flows that occurred in Brazil, located in Serra do Mar, more precisely in the municipalities of Nova Friburgo and Teresópolis in Rio de Janeiro and in São Sebastião in São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

É de amplo conhecimento as tragédias ocorridas com relativa frequência em território nacional, advindas de movimentos de massa, como em Santa Catarina (2008), Bahia (2010), Região Serrana do Rio de Janeiro (2011, 2022), Pernambuco (2022) e São Paulo (2023) gerando grandes perdas de vidas humanas, além de prejuízos materiais e sociais.

A previsão de determinados tipos de movimentos de massa ou escorregamentos em encostas ainda é um grande desafio para engenheiros geotécnicos, devido às inúmeras variáveis envolvidas neste tipo de fenômeno [22]. No caso específico de fluxo de detritos, estes condicionantes são ainda mais complexos, pois ocorrem em espaços de tempo muito curtos com poucos sinais de instabilidade. São movimentos súbitos de difícil previsão, deflagrados por fortes precipitações, em curtos períodos de tempos ou por precipitações leves em períodos prolongados, ou ainda por sismos.

Como é sabido, de todos os tipos de movimentos de massa, os fluxos de detritos figuram entre os mais destrutivos e catastróficos, envolvendo grandes volumes de mistura de água, solo, detritos e blocos rochosos, atingindo elevadas velocidades e grandes áreas de deposição.

Bem descrito por [24], os casos mais relevantes de fluxos de detritos até 2010 no Brasil eram os da região Serrana de Cubatão em São Paulo e Serra das Araras no Rio de Janeiro. Em janeiro de 2011, devido às intensas precipitações, ocorreu a tragédia na Região Serrana do Rio de Janeiro, com vários movimentos de massas que resultaram em danos catastróficos.

No entanto, cabe ressaltar os eventos altamente impactantes ocorridos em Petrópolis – RJ, ocorrido em fevereiro de 2022 e São Sebastião – SP, em 2023. Ambos os eventos marcados por precipitações pluviométricas recordes no Brasil, além de expressivo número de mortes e amplos prejuízos materiais.

Dentre os principais desafios no conhecimento dos fluxos de detritos estão a estimativa das zonas de risco, previsão da probabilidade de ocorrência de um evento e determinação dos parâmetros para projetar estruturas de proteção.

Simulações numéricas têm sido empregadas para tentar reproduzir os fluxos de detritos, bem como, obter parâmetros básicos. Todavia, a literatura mostra poucos resultados em função da determinação de forças de impacto, essenciais para o dimensionamento de barreiras de proteção, sejam estáticas ou dinâmicas.

Este trabalho busca reunir informações necessárias a respeito: movimentos de massa, com destaque para as corridas ou fluxos de detritos brasileiros, assim como a avaliação e quantificação de suas forças de impacto.

Vislumbrando-se obter relevante ferramenta para um dimensionamento mais preciso de intervenções que atenuem os potenciais danos causado pelos movimentos de massa, neste caso, os fluxos de detritos brasileiros.

O Japão é um país, assim como o Brasil, constantemente afetado por movimentos de massa - fluxo de detritos, tendo nas Barragens Sabo relevante e difundida técnica para mitigação de perdas.

Entretanto, a utilização desta técnica em território nacional, necessita de critérios técnicos específicos que avaliem as forças de impacto dos fluxos brasileiros, para uma melhor tomada de decisão e efetividade do uso desta solução na minimização dos danos causados pelos movimentos de massa desta natureza.

Assim, propõe-se uma metodologia que utiliza ferramentas numéricas como o DAN3D e o RocFall para se obter as forças de impacto dos blocos rochosos em estruturas de contenção estáticas e dinâmicas, levando em consideração parcelas viscosas e forças de atrito, bem como,

compara-se a metodologia proposta com os métodos empíricos já existentes.

Para obtenção dos resultados buscou-se a aplicação da metodologia em três casos recentes de importantes fluxos de detritos ocorridos no Brasil, situados na Serra do Mar, mais precisamente nos municípios de Nova Friburgo e Teresópolis no Rio de Janeiro e em São Sebastião em São Paulo.

Espera-se contribuir na consolidação acadêmica da verificação das forças de impacto dos fluxos de detritos brasileiros, bem ilustrado na Figura 1, além de fornecer arcabouço teórico e prático para a tomada de decisão a respeito de implantação de medidas mitigadoras de perdas materiais e principalmente de vidas humanas.



Figura 1: Fluxo de Detritos Rio Príncipe, Teresópolis – RJ [6]

2 FLUXOS DE DETRITOS

Os movimentos do tipo fluxo de detritos são originados por diversos fatores que devido a situações extremas resultam em massas compostas por solo, rocha e detritos misturados com água instabilizados pelo efeito da saturação e aumento da poropressão. Fato somado às forças gravitacionais originam movimentos rápidos de grandes volumes de material, conseguindo alcançar grandes extensões e grandes áreas de deposição do material carregado.

Stiny [26] foi um dos primeiros a definir este tipo de movimento como um fluido que se desenvolve em um canal natural, carregando sólidos e sedimentos em suspensão no corpo do fluxo e transportando material erodido no fundo do canal do fluxo. Devido ao aumento da massa em função dos sedimentos carregados, a partir de um determinado momento, o fluxo muda, transformando-se em uma massa viscosa, constituída por água, sólidos, solo, rocha e detritos misturados semelhantes a uma lava num talvegue.

O fenômeno denominado fluxo de detritos não é mais que uma massa inicial acionada por fatores naturais ou externos que se desloca com grande velocidade, variável em função dos diversos fatores envolvidos, carregando e associando detritos e sedimentos ao longo da sua trajetória, até atingir elevadas energias, com grande capacidade de destruição.

Takahashi [27] descreve este tipo de movimento como uma mistura de água e sedimentos

aleatórios comportando-se como um fluido contínuo conduzido por gravidade e que alcança grandes extensões.

2.1 Características dos Fluxos de Detritos

As características destes movimentos variam de acordo com o tipo de material envolvido, a geometria da superfície da trajetória do movimento e de acordo com os fatores que deflagram o movimento.

Os fluxos de detritos também podem ser caracterizados pela área de deposição disponível, em função da geologia e geomorfologia do local.

Alguns autores classificam as corridas de material basicamente em dois tipos: os denominados fluxos de detritos envolvendo materiais de granulometria mais grosserias até blocos de rocha e os denominados fluxos de lama ou de material fino (*Mud Flows*).

Geralmente este tipo de movimento de massa apresenta a configuração mostrada na Figura 2, onde se identifica diferentes zonas da trajetória do movimento: zona de iniciação, onde é originado o movimento, zona de transporte e erosão, onde se desenvolve o movimento e a zona de deposição do material, onde a massa mobilizada inicia seu processo de deposição.

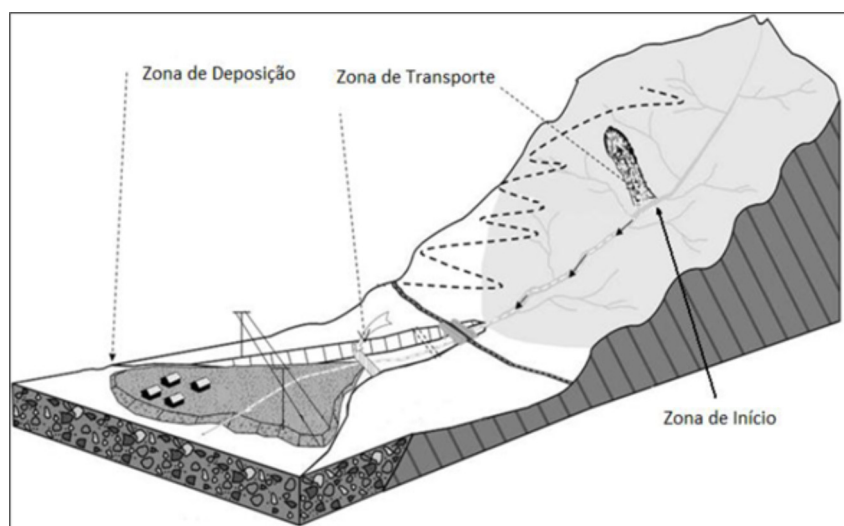


Figura 2: Zonas Características dos fluxos de detritos [8]

Na Figura 3 é apresentada a configuração esquemática proposta por [29] das zonas da trajetória do movimento caracterizadas da seguinte maneira: zona de iniciação com declividades superiores a 25°, transporte e erosão com declividade superior a 15°, a zona de deposição, geralmente com declividades menores a 10°.

2.2 Deflagradores dos Fluxos de Detritos

A formação de fluxos de detritos é um fenômeno complexo, variável de acordo com o conjunto de fatores e condições que caracterizam cada evento, tornando difícil a análise e determinação do comportamento do movimento de massa.

Blackwelder [4] numera algumas condições favoráveis para a formação de fluxos de detritos. Estes são: abundância de água e materiais não consolidados, tornando-se instáveis quando saturados. Na maioria dos casos, encostas escarpadas são suficientes para induzir mobilidade nos materiais. Outro fator deflagrador descrito pelo autor é a existência de pouca ou nula proteção vegetal.

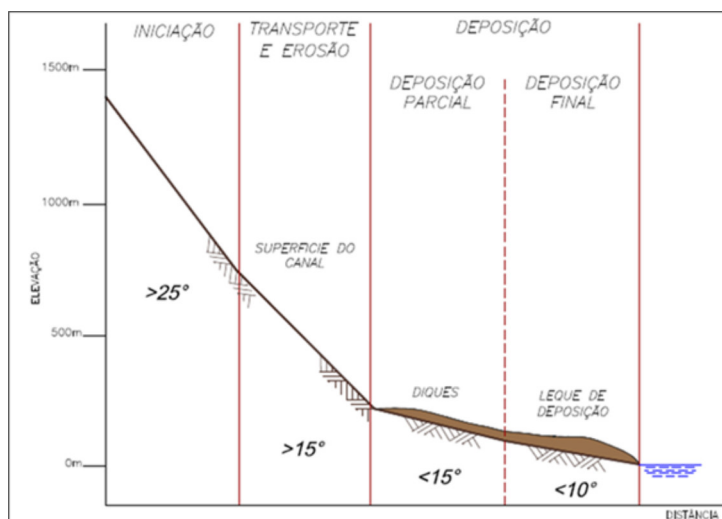


Figura 3: Zonas da trajetória com fluxo canalizado [29]

Os principais fatores deflagradores de fluxos de detritos correspondem a fatores essencialmente naturais, seguido da ação do antrópica em áreas susceptíveis.

Os principais fatores deflagradores dos fluxos de detritos, portanto, são: condições de geologia e geomorfologia da encosta: as diversas condições geomorfológicas e climáticas, iniciadas por uma variedade de mecanismos [19].

Os condicionantes definidos pela topografia, geomorfologia e tipo de material definirão o comportamento: intensidade, magnitude, entre outros. Gramani [10] também descreve que algumas das condições favoráveis para a ocorrência de corridas de detritos são as encostas íngremes (acima de 25°), e partículas e detritos de solos e/ou rochas inconsolidados. As superfícies das encostas e os canais de drenagem correspondem às duas feições geomorfológicas, nas quais é comum as ocorrências de fluxos de detritos.

Comumente o termo ravine é utilizado para descrever a trajetória em drenagens naturais e slope para encostas. Esses aspectos influenciam de maneira distinta o comportamento da massa, devido às diferenças de energia geradas.

Fatores naturais e externos: fenômenos como sismos, chuvas intensas, ações vulcânicas, enchentes, entre outros, são condicionantes nos movimentos do tipo fluxo de detritos;

Vegetação: o tipo de vegetação pode influenciar no grau de susceptibilidade de uma determinada área, no entanto, [2] descreve que uma proteção vegetal escassa não corresponde a um fator de deflagração importante;

Ação antrópica: estas estão relacionadas às atividades humanas, principalmente aquelas que envolvem uso de explosivos (geração de sismos induzidos) e remoção da cobertura vegetal, escavações, podem iniciar o processo de mobilização de grandes quantidades de solo, criando condições para o desenvolvimento de fluxos de detritos quando as áreas coincidem com locais susceptíveis a esses processos.

Alguns autores afirmam que a umidade e a distribuição granulométrica são consideradas os fatores mais importantes durante a formação de fluxos de detritos. Entre outros aspectos, a quantidade de água na massa de solo pode influenciar nas propriedades mecânicas dos materiais.

Por outro lado, em muitos casos, fatores associados à ocupação desordenada do solo, rompimento de barragens artificiais e naturais, ações sísmicas e vulcânicas também podem ser deflagradores de fluxos de detritos. Inspeções periódicas de campo devem ser realizadas em áreas susceptíveis para evitar que estes deflagradores sejam ativados. Atualmente, leis de ocupação

do solo estão sendo elaboradas/revisadas em países da América e da Europa para determinar limites de zonas susceptíveis. Pode-se afirmar que ainda há muito trabalho a ser realizado.

3 MEDIDAS DE CONTENÇÃO E/OU CONVIVÊNCIA

Medidas ativas de proteção atuam diretamente no ator deflagrador, no transporte e no processo de deposição, buscando intervir diretamente na magnitude e frequência do movimento, conforme ilustram as Figuras 4 e 5. Estas medidas também podem ser responsáveis pela mudança na probabilidade de ocorrência do movimento [13].



Figura 4: Fluxo de Detritos em 1982, Susukizuca – Japão [16]

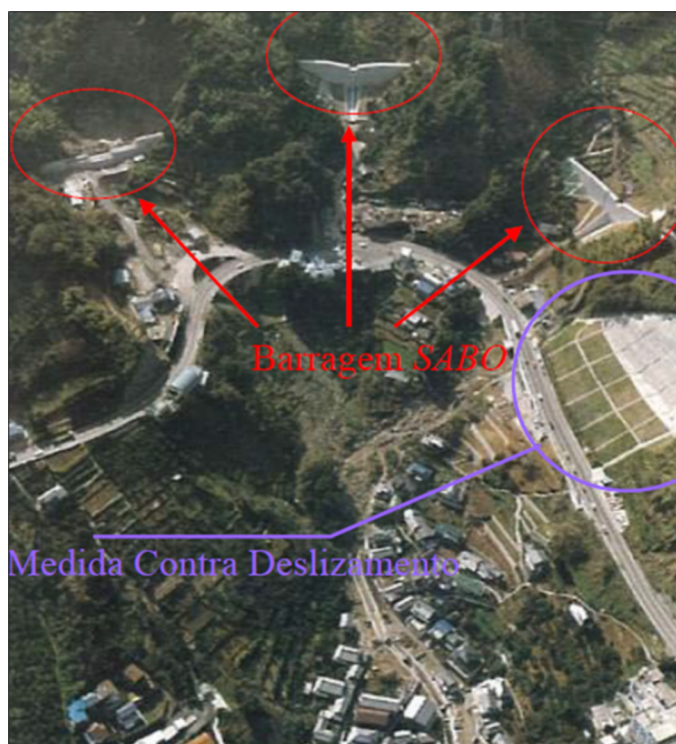


Figura 5: Medidas Ativas em 1983, Susukizuca – Japão [16]

Medidas ativas de proteção podem também ser denominadas como Medidas de Controle [29]

pelo caráter de alteração do movimento que possuem. Os tipos de estruturas de controle a adotar depende das condições de contorno como: características topográficas, de depósito e estrutura local para a realização da obra. Em geral se dividem dois grupos: estruturas abertas e fechadas. As estruturas abertas têm o objetivo de confinar o fluxo e canalizando-o, enquanto as estruturas fechadas possuem o objetivo de contê-lo. A seguir observa-se algumas medidas de controle ou ativas.

3.1 Estruturas Rígidas/Semi-rígidas de Impacto ou Estáticas (Barragens Sabo)

Estruturas associadas a uma área plana, na qual o movimento é contido na face interna (tardoz) do muro ou montante da barragem, destinado ao amortecimento do impacto e contenção total ou parcial dos materiais do fluxo de detritos. As dimensões da área de amortecimento e do muro devem ser determinadas por métodos numéricos, ou empíricos, que simulem ou estimem a energia e a trajetória do movimento. Podem ser executadas em solo, solo reforçado, gabião, concreto armado, concreto, mistas em concreto e perfis de aço, desde que mantenham sua integridade frente ao impacto esperado. As Figuras 6 e 7 apresentam algumas estruturas rígidas, comumente chamadas de Barragens Sabo (com seção plena e vazada).



Figura 6: Barragens Sabo plena, Nagano – Japão [16]



Figura 7: Barragens Sabo vazada, Nagasaki – Japão [16]

Vale ressaltar a importância em se determinar as forças de impacto geradas pelo movimento ao se colidir com as estruturas rígidas, uma vez que, a falha de uma barragem desta pode resultar em um considerável incremento de detritos ao fluxo.

Para [17], comparando-se com o caso de bloco de rocha único, a massa viscosa de detritos pode induzir um efeito de amortecimento para a força de impacto do bloco para o fluxo de detritos dissipando sua energia.

3.2 Estruturas Flexíveis ou Dinâmicas

São soluções de convivência cada vez mais utilizadas em regiões montanhosas, para a proteção de ferrovias, rodovias e áreas urbanizadas. Os sistemas de barreiras flexíveis vêm sendo aprimorados ao longo dos anos, principalmente com a cooperação entre institutos de pesquisa e as empresas fabricantes.

As principais evoluções apresentam-se no aumento da capacidade de absorção de impactos por meio da utilização e alteração de novos componentes estruturais, como argolas mais resistentes, estaios e amortecedores.

Por exemplo, em 1985 as barreiras eram capazes de suportar blocos cuja energia de impacto não ultrapassassem 250 kJ, enquanto hoje as barreiras possuem energia de impacto que atingem 10.000 kJ.

Estes sistemas mantêm suas características básicas, ou seja, alta flexibilidade, alta capacidade de absorção de energias e melhor distribuição de cargas ao longo da superestrutura [23], além de permitir a passagem de água, uma vez que somente ocorre retenção do material sólido.

Necessitam de manutenção na remoção dos sedimentos e troca de elementos avariados pela utilização e intemperismo no decorrer de sua vida útil, vide Figura 8.



Figura 8: Barreira Dinâmica ou Flexível, Rio de Janeiro [20]

4 MODELOS DE FORÇAS DE IMPACTO

Para se obter efetividade na contenção de movimento de massa, como fluxo de detritos, faz-se necessário estimativas de diversos parâmetros, bem como a demarcação da área suscetível e um bom projeto.

Existem alguns parâmetros que podem ser estimados com acurácia por meio de investigações geológicas e por análises de fluxos de detritos que ocorreram no passado, tais como volume total, magnitude do evento, composição dos sedimentos e chuvas deflagradoras.

Entretanto, outros parâmetros são mais complexos de determinação e necessitam do auxílio de relações empíricas e complexas simulações numéricas. Dentre os parâmetros mais complexos encontram-se a vazão, a velocidade do fluxo e, especialmente, as forças de impacto.

O projeto e dimensionamento das estruturas de proteção contra os fluxos de detritos exige o conhecimento da força de impacto. [1] reclama da ausência de informação na literatura tendo em vista o interesse e a importância do problema. Afirma que as estruturas de proteção como barreiras (barragens sabo), *debris racks* e *debris breakers* precisam ser projetadas considerando os impactos dinâmicos.

As forças de impacto geradas pelos fluxos de detritos são muito difíceis de se estimar principalmente porque dependem de muitos fatores que são igualmente difíceis de se obter.

Hübl *et al.* [15] enfatizam o uso de parâmetros como velocidade, densidade e altura do fluxo e sugerem que não é possível desenvolver modelos de força de impacto baseados em considerações teóricas.

Forças de impacto causadas por eventos reais de fluxos de detritos foram medidas por alguns pesquisadores [5, 7, 12, 30, 31].

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas em laboratórios com modelos em escala reduzida, porém, uma grande desvantagem é propriamente o efeito de escala. A Figura 9 apresenta modelos de força de impacto de fluxos de detritos.

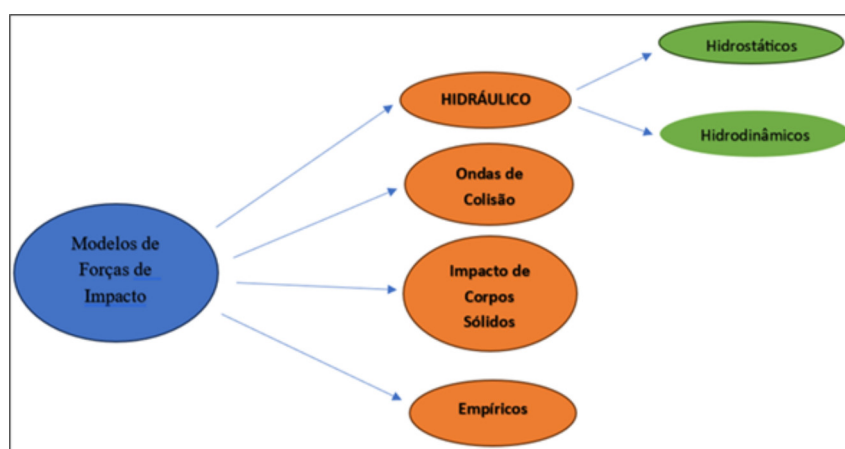


Figura 9: Modelos de Forças de Impacto de Fluxos de Detritos

5 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS SOFTWARES DAN3D E ROCFALL

O DAN3D considera características importantes como a complexidade da reologia, a heterogeneidade, a rigidez interna e a capacidade de incluir o material arrastado pelo fluxo de detritos ao longo do trajeto.

Os programas possuem uma abordagem semiempírica, baseada no conceito do fluxo equivalente, onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas [14].

Algo não menos importante, referente à reologia da base e seus parâmetros, corresponde ao fato deles não poderem ser estimados em laboratório nem considerados como aparentes, pois são selecionados com base na calibração empírica por meio de retro análise de movimentos

de massa. Algumas características importantes do programa DAN3D são elencadas por [21], conforme a seguir:

- simula fluxos complexos em superfícies em 3D;
- permite uma distribuição dos esforços não hidrostáticos e anisotrópicos;
- simula a erosão do material;
- permite a escolha de diferentes modelos reológicos (Atrito, Voellmy, Bingham, Inelástico e Newtoniano); e
- processa a modelagem sem malha de elementos, eliminando os problemas relativos à distorção durante grandes deslocamentos.

O RocFall é uma ferramenta computacional desenvolvida pela Rocscience, que realiza análise estatístico-probabilística de queda de blocos rochosos em encostas. Entrega envoltórias de energia e de velocidade para toda a trajetória da queda de blocos, bem como, a localização de parada do corpo que tenha se movimentado.

É possível a inserção de barreiras rígidas e flexíveis e analisa seu desempenho em relação à energia cinética de impacto, para posteriormente determinar o tamanho, capacidade e localização da barreira.

O programa adota o bloco como uma massa pontual e os possíveis tipos de movimentação, como: deslizamento, rolamento, tombamento, queda livre e trajetória parabólica. Os movimentos são calculados lançando-se mão das leis do movimento e as leis referentes às colisões de partículas.

Sabe-se que a reprodução analítica da trajetória do movimento de queda de blocos é muito difícil, pois o movimento associa diversas condições de contorno, além de fatores que devem ser criteriosamente determinados, as quais estão entre as propriedades dos blocos, as características iniciais do movimento e as propriedades dos materiais da encosta.

6 FLUXOS DE DETRITOS ESTUDADOS

Pose-se afirmar que os fluxos de detritos são os movimentos de massas mais catastróficos que conhecemos, com grande potencial de danos materiais, econômicos e por consequência perdas de vidas humanas.

As corridas de detritos se destacam devido a sua grande competência para exercer o trabalho geomorfológico, representado pelo seu alto potencial de transporte de materiais diversos por longas distâncias, velocidade e raio de alcance [11, 25, 28].

No Brasil, acontecem incontáveis eventos de fluxos de detritos, entretanto, devido a forma de ocupação das cidades, estes desastres têm atingido cada vez mais seus habitantes e resultado em mais observações e registros.

Afirma-se que na imensa maioria dos acontecimentos, o principal gatilho são chuvas intensas. Os primeiros registros de fluxo de detritos, que temos conhecimento no País, datam de 1967 na Serra das Araras no Estado do Rio de Janeiro e em Caraguatatuba no Estado de São Paulo.

Ambas as Regiões, Serrana do Estado do Rio de Janeiro e Litorânea do Estado de São Paulo, situadas à Serra do Mar, guardam semelhanças em suas características geológicas, geomorfológicas, uso ocupacional do solo e pluviometria, favorecendo sobremaneira para a alta susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massas, inclusive fluxo de detritos.

Os Fluxos de Detritos objetos desta pesquisa estão localizados em três municípios brasileiros, dois do Estado do Rio de Janeiro e um do Estado de São Paulo, sendo: Córrego D'Antas em Nova Friburgo e Rio Príncipe em Teresópolis, ambos na Região Serrana do Rio de Janeiro

e Toque-toque Grande em São Sebastião no Litoral Paulista. As Figuras 10 e 11 mostram o potencial destrutivo destas corridas de massas.



Figura 10: Cachoeira do Toque-Toque Grande, local de iniciação do fluxo de detritos, 2023



Figura 11: Residência atingida pelo fluxo de detritos de Toque-Toque Grande, 2023

Os três municípios estudados apresentam índices pluviométricos próximos a 2.000mm/ano, todavia, Nova Friburgo e Teresópolis em 2011 tiveram chuvas da ordem de 300 milímetros em 8 horas, já São Sebastião em 2023 teve precipitações de 400 milímetros em 6 horas e cerca de 680 milímetros em 24 horas, de acordo com dados de pluviômetros digitais do Centro Nacional de Previsão de Monitoramento de Desastres (CEMADEN).

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras 12, 13 e 14 correspondem a forças de impacto pela distância para Barreiras Flexíveis e as Figuras 15, 16 e 17 para Barreiras Rígidas, mostrando os resultados obtidos para

os três fluxos de detritos estudados tanto com o DAN3D com reologia de Voellmy ou reologia Newtoniana (somente para o Rio Príncipe), quanto com o RocFall com reologia de Atrito.

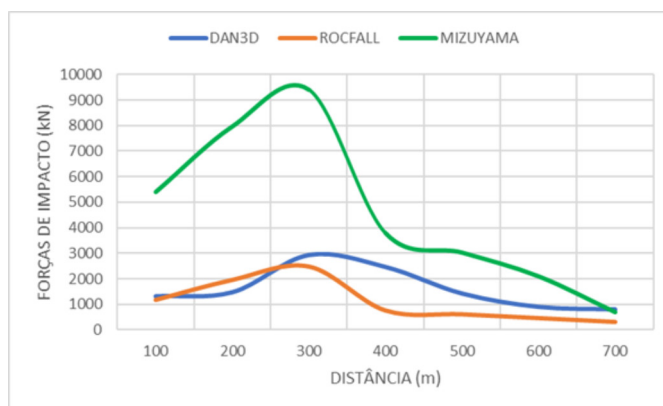


Figura 12: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Toque-Toque Grande

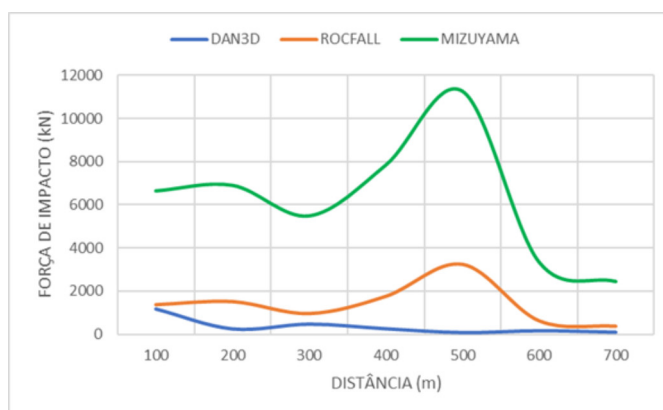


Figura 13: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Córrego D'Antas

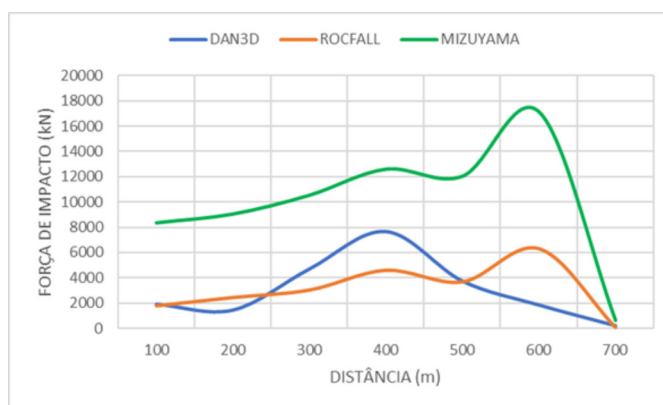


Figura 14: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Rio Príncipe

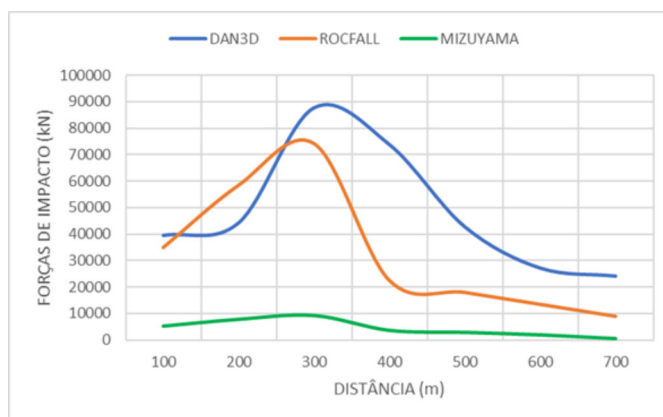


Figura 15: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Toque-Toque Grande

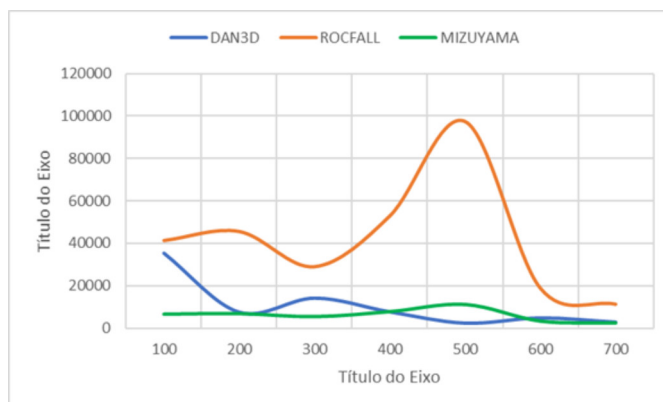


Figura 16: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Córrego D'Antas

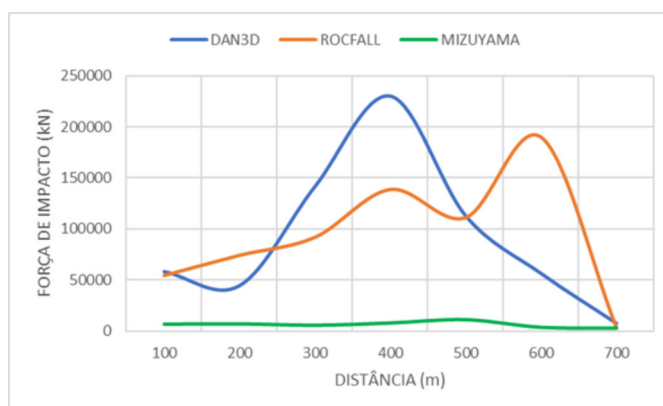


Figura 17: Força de Impacto simulada no DAN3D, RocFall e Mizuyama em função da distância percorrida, Rio Príncipe

Ao se estudar as forças de impacto, primeiramente percebe-se a necessidade de distinguir dois tipos de estrutura de anteparo onde os fluxos de detritos colidirão. Se estruturas flexíveis, que deformam ou defletem para auxiliar na distribuição de energias absorvidas ou se estruturas rígidas que são teoricamente indeformáveis ou minimamente deformáveis.

Estruturas flexíveis, barreiras dinâmicas, usualmente deformam-se algo entre 2 m a 7 m ao

interceptarem um movimento de massa, dissipando parte da energia com a deformação de seus diversos elementos, como amortecedores, estaios e anéis.

Quando se verifica o comportamento de estruturas rígidas, como barragens Sabo por exemplo, não se percebe dissipação da energia por deflexão, ou seja, há uma tendência de majoração das forças de impacto, vez que a deflexão da barragem tende a zero.

Para comprovar tais comportamentos no cálculo das forças de impacto em função da energia adotou-se uma deflexão padrão de 3 m para barreiras flexíveis e de 0,10 m para barreiras rígidas. Mesmo sabendo que a deflexão de uma estrutura rígida pode ter deformação nula, o que levaria as forças de impacto, matematicamente, tenderem ao infinito.

Foram comparados os valores das forças de impacto com as energias encontradas com base nos softwares DAN3D e RocFall, além do modelo proposto por [18].

As curvas dos gráficos de forças de impacto pela distância revelaram-se assintóticas (bastante próximas) em sua maioria, tanto para estruturas rígidas, quanto flexíveis.

Todavia, as forças de impacto encontradas para estruturas rígidas são cerca de trinta vezes maiores que para estruturas flexíveis.

Os valores máximos de forças de impacto para as estruturas flexíveis ficaram compreendidos entre 9.000 kN e 17.000 kN. Já para estruturas rígidas o valor máximo encontrado foi de aproximadamente 230.000 kN.

Destaca-se que para os três fluxos de detritos alvo desta pesquisa, foram encontrados grande densidade de blocos de rocha envolvidos na massa viscosa de fluidos/lama. Incrementando sobremaneira as forças de impacto destes movimentos.

8 CONCLUSÕES

Especificamente, este trabalho procurou avaliar métodos e modelos capazes de fornecerem forças de impacto de fluxo de detritos.

A determinação de forças e energias de impacto é essencial para o adequado dimensionamento de estruturas de proteção ou de convivência com fluxos de detritos. Buscou-se cumprir investigação da literatura técnica nacional e internacional para a seleção de métodos e modelos de esforços de impacto, os quais foram analisados e comparados.

Os eventos de fluxos de detritos do Córrego D'Antas, Nova Friburgo – RJ (2011), Rio Príncipe, Teresópolis – RJ (2011) e Toque-Toque Grande, São Sebastião – SP (2023) foram eleitos como casos de referência para este estudo. Enorme é o desafio da previsibilidade de ocorrência de corridas de massa com a precisão requerida para adotar as medidas de evacuação de populações por meio da emissão de alertas (medidas não estruturais).

Contudo, com investimentos em mapeamento de áreas susceptíveis a ocorrência de fluxos de detritos, além de estudos que correlacionem limites pluviométricos para deflagração de movimentos de massa, ao menos em municípios historicamente atingidos, pode resultar em ferramenta poderosa para a gestão de desastres de grandes magnitudes.

Um exemplo de movimento de massa de difícil previsão de iniciação (em alusão ao fluxo de detritos) ocorre na Noruega, país que cerca de 11% de seu território está sobre solo metaestável *quick clay*, como descreve [3]. As autoridades governamentais norueguesas exigem, para novos empreendimentos, que sejam apresentados mapas de suscetibilidade de ocorrência de flow slide na área de construção, impedindo a ocupação e/ou exigindo obras de proteção da infraestrutura e edificações.

Analogamente, no Brasil existem legislações federais que impedem construções em áreas susceptíveis a movimentos de massa. Entretanto, a gestão territorial cabe aos municípios, que alegam ausência de recursos para gestão sócio territorial. Além de privilegiarem, em muitos ca-

sos, ações populistas e de omissão que permitem às pessoas ocuparem áreas inadequadas para moradia, expondo populações de maneira dolosa aos riscos geológicos-geotécnicos dos movimentos de massas. Outra questão problemática na gestão sócio territorial brasileira consiste no imenso passivo de ocupações em áreas inadequadas, com elevada suscetibilidade de desastres com movimentos de massa.

Por fim, [9] afirma que a obtenção de parâmetros de fluxos de detritos traz um grande desafio para dimensionamento de estruturas para mitigação e convivência com os potenciais danos do movimento, em especial a obtenção dos esforços de impacto. Todavia, a modelagem numérica mostrou-se bastante confiável na obtenção de parâmetros dos fluxos de detritos, principalmente quando comparada a levantamentos realizados em eventos ocorridos preteritamente.

Vale ressaltar que as forças de impacto obtidas são fundamentais para o dimensionamento das estruturas de proteção e convivência com tais movimentos de massa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PUC-Rio, à Capes e ao MIDR pelo apoio ao desenvolvimento da tese do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Armanini. *Recent developments on debris flows*, capítulo On the dynamic impact of debris flows, p. 208–226. Springer, 1997.
- [2] P. P. Bhuwani. *Landslide Gravitative Debris Flow in Natural terrain*. Dissertação de Mestrado, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, 2004.
- [3] L. Bjerrum, T. Loken, S. Heiberg e R. Foster. A field study of factors responsible for quick clay slides. In *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, p. 531–540. Mexico, 1969.
- [4] E. Blackwelder. Mudflow as a geological agent in semi-arid mountains. *Geological Society of America, Bulletin*, 1928.
- [5] L. Bugnion, B. Mcardell, P. Bartelt e C. Wendeler. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, 9(2):179–187, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0294-4>.
- [6] M. Conq, C. S. Silveira e F. Dourado. Processos geomorfológicos e danos derivados da corrida de detritos de janeiro 2011 na bacia do córrego do príncipe, teresópolis – região serrana do rio de janeiro. *Ciência e Natura*, 37(1), 2015.
- [7] J. S. DeNatale, R. M. Iverson, J. J. Major, R. G. LaHusen, G. L. Fliegel e J. D. Duffy. *Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows (Open-File Report 99-205)*. USGS Publications Warehouse, 1999. <https://doi.org/10.3133/ofr99205>.
- [8] District of North Vancouver. *Understanding Debris Flow*. DNV, North Vancouver – BC, Canada, 2013.
- [9] L. A. Ferreira. *Forças de impacto de fluxos de detritos e barragens Sabo*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2023.
- [10] M. F. Gramani. *Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos no Brasil e comparação com alguns casos internacionais*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), São Paulo – SP, Brasil, 2001.
- [11] C. M. Guidicini, G.; Nieble. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Edgard Blücher, 1983.

- [12] K. Hu, F. Wei e Y. Li. Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at jiangjia ravine, china. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(9):1268–1278, 2011. <https://doi.org/10.1002/esp.2155>.
- [13] J. Huebl e G. Fiebigler. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, capítulo Debris-flow mitigation measures, p. 445–487. Praxis–Springer, 2005.
- [14] O. Hungr. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32:610–623, 1995.
- [15] H. J., J. Suda, D. Proske, R. Kaitna e C. Scheidl. Debris flow impact estimation. In P. C. e J. M., editores, *Eleventh international symposium on water management and hydraulic Engineering*, v. 1, p. 137–148. 2009.
- [16] Japan International Cooperation Agency. *Training in Japan Project to Strengthen the National Integrated Management Strategy Risks in Natural Disasters*. Nagasaki Prefecture, Nagasaki – Kyushu, Japan, 2015.
- [17] G. Luo, Y. Zhao, S. Weigang e M. Wu. Dynamics of bouldery debris flow impacting onto rigid barrier by a coupled sph-dem-fem method. *Computers and Geotechnics*, 150, 2022.
- [18] T. Mizuyama. Evaluation of impact of debris flow on check dams. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 32(1):40–49, 1995.
- [19] B. A. Morgan, G. F. Wieckoreck, R. H. Campbell e P. L. Gori. *Debris flow hazards in areas affected by June 27, 1995 storms in Madison County, Virginia (Open File Report 97-438)*. USGS Publications Warehouse, 1997.
- [20] A. L. L. S. Nunes. Convivência com rupturas – barreiras contra quedas de blocos. In *Anais da VI Conferência Brasileira de Encostas*, p. 41–73. 2013.
- [21] A. B. Pelizoni. *Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2014.
- [22] L. S. E. Polanco. *Correlações empíricas para fluxos de detritos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2010.
- [23] A. Roth, A. Kästli e T. Frenez. Debris flow mitigation by means of flexible barriers. In *Internacionales Symposium Interpraevent 2004 – Riva/Trient*, p. 289–300. 2004.
- [24] C. A. G. Sacoto. *Análise dos esforços de impacto de debris flows*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2017.
- [25] M. Shelby. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, 2 edição, 1993.
- [26] J. Stiny. *Die Muren*. Verlag der Wagnerschen Universitats Buchhandlung Innsbruck, Austria, 1910.
- [27] T. Takahashi. *Mechanisms of sediment runoff and countermeasures for sediment hazards*. Kinmirai Sha, 2006.
- [28] T. Takahashi. *Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor and Francis Group, 2007.
- [29] D. VanDine. *Debris flow control structures for forest engineering*. Ministry of Forests Research Program, Victoria – BC, Canada, 1996.
- [30] C. Wendeler, A. Volkwein, M. Denk, A. Roth e S. Wartmann. *Debris-flow hazards mitigation mechanics, prediction and assessment*, capítulo Field measurements used for numerical modelling of flexible debris flow barriers. Millpress, 2007.
- [31] S. Zhang. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in china. *Natural Hazards*, 7:1–23, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00595676>.