

Luis Henrique Caetano Moraes

Análise 3D do Fluxo de Detritos no Rio Príncipe, Teresópolis. Brasil

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de Mestre pelo programa Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão Coorientador: Prof. Anna Laura Lopes da Silva Nunes

> Rio de Janeiro Outubro de 2023



Luis Henrique Caetano Moraes

Análise 3D do Fluxo de Detritos no Rio Príncipe, Teresópolis. Brasil

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão Orientador Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

> Prof^a. Anna Laura Lopes da Silva Nunes Coorientador Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

Prof. Sandro Salvador Sandroni SEA – Sandro Sandroni Engenheiros Associados Ltda

> Prof. Willy Alvarenga Lacerda COPPE/UFRJ

> > Prof. Rogério Luiz Feijó UERJ

Rio de Janeiro, 11 de outubro de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Luis Henrique Caetano Moraes

Graduou-se em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Serra dos Órgãos (UNIFESO) em Teresópolis, Rio de Janeiro, em janeiro de 2021. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em março de 2021.

Ficha Catalográfica

Moraes, Luis Henrique Caetano

Análise 3D do fluxo de detritos no Rio Príncipe, Teresópolis. Brasil / Luis Henrique Caetano Moraes; orientador: Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão; coorientador: Anna Laura Lopes da Silva Nunes. – 2023.

119 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Estabilidade de encosta. 3. Debris Flow. 4. Corrida de detritos. 5. Modelagem numérica 3D. 6. Programa DAN3D. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço a Deus por toda minha vida, por tudo o que tenho e o que sou.

Agradeço aos meus pais, Vânia e Henrique, por terem investido em uma boa educação para mim e para o meu irmão, provendo amor, carinho e atenção. Vocês são tudo para mim. Obrigado por me incentivarem a estudar. Muito amor.

Ao meu irmão Lucas e ao meu primo Bruno por serem meus melhores amigos. Estaremos juntos para sempre.

Agradeço ao professor Sayão pela oportunidade e incentivo em realizar este trabalho, e pela indicação de tema. Por todos os ensinamentos fornecidos dentro e fora de classe. Sempre será uma inspiração profissional e pessoal. Muito obrigado por tudo.

Agradeço a professora Anna Laura por todo o incentivo e ensinamentos passados. É uma honra poder aprender um pouco sobre este tema tão desafiador com você. Também é minha referência! Muito obrigado!

Aos meus amigos e colegas agradeço os momentos de ânimo e encorajamento para seguir em frente. Em especial aos grandes amigos que fiz na PUC-Rio, dos quais tenho muito carinho: Andrea Vecci, Alan Henrique e Priscila.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Moraes, Luis Henrique Caetano; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Orientador). **Análise 3D do Fluxo de Detritos no Rio Príncipe, Teresópolis. Brasil**, 2023. 119 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Brasil tem sido afetado pela ocorrência de movimentos de massa catastróficos, do tipo fluxo de detritos (*debris flow*), cujas consequências estão relacionadas à intensidade das chuvas, volume de material envolvido, nível de energia e área de abrangência do movimento. A pesquisa trata do fluxo de detritos ocorrido no Rio Príncipe, em Teresópolis, durante os trágicos desastres da Região Serrana do Rio de Janeiro, em fevereiro de 2011, após um evento extraordinário de precipitações muito intensas. O trabalho consolida os estudos realizados para o entendimento do fluxo de detritos, com destaque para o uso de expressões empíricas e métodos numéricos disponíveis para modelagem do movimento. Nas análises tridimensionais do fluxo de detritos no Rio Príncipe foi utilizado o programa tridimensional DAN3D, que possibilita o uso de diferentes modelos constitutivos. O programa foi desenvolvido por McDougall e Hungr (2004) e corresponde a uma versão atual do modelo bidimensional DAN-W. Apesar da complexidade do *debris flow* ocorrido no Rio Príncipe, foi possível obter resultados numéricos consistentes e corroborados pelas observações realizadas na área de ocorrência.

Palavras-chave

Fluxo de Detritos; Análise 3D; Acidente na região serrana.

Abstract

Moraes, Luis Henrique Caetano; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor). **3D Analysis of the Rio Príncipe debris flow, in Teresópolis, Brazil**, 2023. 119p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Brazil has been affected by the occurrence of catastrophic mass movements, of the debris flow type, whose consequences are related to the rainfall intensity, the volume of material involved, the level of energy, and the coverage area of the movement. This research deals with the debris flow that occurred in Rio Príncipe, in Teresópolis, during the tragic disasters at the mountainous region of Rio de Janeiro State, in February 2011, after an unusual event of intense precipitation. The paper summarizes the studies carried out to understand the debris flow (or avalanche), with emphasis on the use of available empirical expressions and numerical methods for debris flow modelling. In the three-dimensional analysis of the debris flow, the DAN3D program was used, which allows the use of two constitutive models. The program was developed by McDougall and Hungr (2004), and corresponds to an improved version of the well-known DAN-W model. Despite the complexity of the Rio Príncipe mass movement, it was possible to obtain numerical results which were consistent with the field observations of the debris flow.

Keywords

Debris Flow; 3D Analysis; Accident in mountainous area.

Sumário

1 Introdução	11
2 Revisão Bibliográfica	14
2.1. Movimentos de Massa	14
2.2. Fluxo de Detritos	22
2.2.1. Definição	22
2.2.2. Características	23
2.2.3. Classificações	26
2.2.4. Mecanismos deflagradores	29
2.2.5. Principais parâmetros	30
3 Estudo de caso	58
3.1. Fluxo de detritos do Campo Grande, no trecho do córrego do Prí	ncipe
	59
4 Análises	75
4.1. Parâmetros obtidos por meio de correlações empíricas	75
4.2. Simulações numéricas com DAN3D	77
4.2.1 Elementos de entrada (inputs)	78
4.2.2. Elementos de saída (outputs)	82
4.3. Resultados	83
4.4. Comparação dos resultados de campo, relações empíricas e	
simulações numéricas	103
4.5. Considerações Finais	108
5 Conclusões	110

Lista de figuras

- Figura 3-7 Cicatrizes de *debris flows* nos talvegues a montante da cabeceira do Rio Príncipe e deslizamentos translacionais nas cristas -Trecho 1 (GEOPHI, 2021).
- Figura 3-8 Detalhe da superfície de rocha exposta na cicatriz de ruptura
 e os blocos produzidos que se depositaram na base da cicatriz –
 Trecho 1 (Adapt. GEOPHI, 2021).
- Figura 3-9 Cicatrizes de deslizamentos com exposição de superfície rochosa e canal de *debris flow* com blocos Trecho 2 (Adapt. GEOPHI, 2021). 68
- Figura 3-10 Zonas de transporte e início de deposição do *debris flow* ao longo do Rio Príncipe Trecho 3 (Adapt. GEOPHI, 2021). 69
- Figura 3-11 Vista de montante para jusante do *debris flow* Trecho 3 (GEOPHI, 2021). 69
- Figura 3-12 Zonas de transporte e deposição dos blocos rochosos do *debris flow* com cicatrizes de deslizamentos rotacional e translacional das encostas na margem direita Trecho 4 (GEOPHI, 2021).
- Figura 3-13 Zona de deposição dos blocos rochosos do *debris flow* Trecho 5 (GEOPHI, 2021). 70
- Figura 3-14 Zona de transporte com cicatrizes de rupturas de juntas de alívio produzindo mais blocos e lascas para *debris flow* Trecho 2 (GEOPHI, 2021).
- Figura 3-15 Zona de deposição dos blocos de rocha transportados pelo *debris flow* – Trecho 3 (GEOPHI, 2021). 71

Figura 3-16 - Zona de deposição dos blocos de rocha na cota mais baixa do Rio Iconha – Registro de março de 2013 (GEOPHI, 2021). 72

- Figura 3-17 Locação em planta da Zona de Iniciação.73
- Figura 3-18 Estimativa do Volume Inicial.
- Figura 4-1 Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe Simulação 1 – Modelo Voellmy. 84
- Figura 4-2 Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe Simulação 1 – Modelo Voellmy. 85
- Figura 4-3 Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe Simulação 1 – Modelo Voellmy. 86

74

Figura 4-4 – Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1	500
s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	88
Figura 4-5 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe	e (t =
1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	89
Figura 4-6 – Espessura de erosão do fluxo de detritos Córrego do Prín	cipe
(t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	90
Figura 4-7 – Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1	500
s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	91
Figura 4-8 - Máxima Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego	o do
Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	92
Figura 4-9 – Máxima Deposição do fluxo de detritos Córrego do Príncip	pe (t
= 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	93
Figura 4-10 – Máxima Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Prín	cipe
(t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	94
Figura 4-11 – Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t =	600
s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	96
Figura 4-12 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncip	pe (t
= 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	97
Figura 4-13 – Espessura de Erosão do fluxo de detritos Córrego do Prín	cipe
(t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	98
Figura 4-14 – Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t =	600
s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	99
Figura 4-15 - Máxima Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego	o do
Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	100
Figura 4-16 – Máxima Espessura do fluxo de detritos Córrego do Prínci	pe (t
= 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	101
Figura 4-17 – Máxima Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Prín	cipe
(t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.	102
Figura 4-18 – Área de deposição do fluxo de detritos Córrego do Prínci	pe –
Simulação 2 – Modelo Newton.	106
Figura 4-19 – Volume do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simula	ação
2 – Modelo Newton.	106
Figura 4-20 - Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncip)e –
Simulação 2 – Modelo Newton.	107

Figura 4-21 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego o	lo Príncipe –
Simulação 2 – Modelo Newton.	107
Figura 4-22 - Distância percorrida pelo fluxo de detritos	Córrego do
Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.	108
Figura 4-23 Distância percorrida de deposição pelo fluxo	de detritos
Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.	108

1 Introdução

1.1. Importância do Estudo

Hungr et al. (2001) definem o movimento de massa do tipo *debris flow* (Fluxo de Detritos) como: "fluxo muito rápido a extremamente rápido de detritos não plásticos saturados em um canal íngreme". Reportam que "fluxo de lama" é o termo preferido se o Índice de Plasticidade da matriz (areia e mais fino) for superior a 5%.

Este tipo de movimento de massa é muito problemático nos locais de sua incidência ao redor do mundo por conta de fatores como envolvimento de altas energias, grande volume de materiais e amplas áreas de abrangência. Assim, alguns fatores que podem contribuir para seu desenvolvimento são: chuvas torrenciais curtas, sismos, chuvas moderadas prolongadas e abalos provocados por desmonte a fogo (Nunes e Sayão, 2014).

Ademais, os locais de ocorrência são bem característicos. Normalmente, este tipo de movimento ocorre em regiões de topografia acidentada em talvegues artificiais ou naturais, sendo deflagrados por fatores naturais, ou mesmo pela ação antrópica. Além disso, ocorrem de maneira repentina, apresentam difícil previsão e são muito rápidos. Com o desenvolvimento das técnicas de análises de risco de instabilidade e estudos mais aprofundados da mecânica do fluxo de detritos, diversos trabalhos têm sido publicados, destacando-se Jakob e Hungr (2005), Guzzetti et al. (1999) e Ouyang et al. (2019).

De acordo com Tian et al. (2022), um ponto importante para o gerenciamento de riscos e fornecimento de apoio científico para desastres é a utilização de dados históricos de desastres regionais. Entretanto, o estudo do fluxo de detritos ainda é muito complexo. Hungr e McDougall (2009) citam que uma das grandes dificuldades das análises envolvendo fluxo de detritos é que o material envolvido pode se apresentar como um fluido não newtoniano e isto prejudica a utilização de métodos analíticos que adotam o princípio do fluido newtoniano.

Ademais, existem desafios representados pela previsão da probabilidade de ocorrência de um evento e determinação dos parâmetros para projetar estruturas de proteção, como por exemplo: distância percorrida, magnitude, força de impacto velocidade.

Dado o pouco conhecimento existente sobre os fluxos de detritos em regiões tropicais, o propósito desta pesquisa é ampliar esse entendimento. Além disso, busca-se fornecer bases e subsídios para auxiliar na previsão dos movimentos de massa por meio de simulações numéricas, contribuindo assim para o avanço do conhecimento na área.

1.2. Objetivos

Nesta pesquisa foram realizadas retroanálises para o caso de ocorrência de *Debris Flow* em 2011 no trecho do Córrego do Príncipe, localizado na região do Campo Grande, Teresópolis, Rio de Janeiro. Para tal, foram utilizadas relações empíricas e simulações numéricas por meio do programa DAN3D, desenvolvido pela Universidade de *British Columbia* no Canadá. Dessa forma, as modelagens numéricas possibilitam a determinação de parâmetros típicos do evento de *debris flow* que foram comparados com as características observadas em campo.

Portanto, o objetivo geral da pesquisa é analisar o comportamento e características de fluxo de detritos ocorrido no Córrego do Príncipe por meio de análises numéricas com o auxílio do programa DAN3D e relações empíricas da literatura e comparar os resultados obtidos das análises numéricas e das relações empíricas com as características reais, observadas em campo. Esse processo de comparação permite avaliar a precisão e a eficácia das simulações numéricas utilizadas, bem como a validade das relações empíricas utilizadas no estudo. Essa análise comparativa é fundamental para aferir a confiabilidade dos resultados e a utilidade do programa de simulação como ferramenta preditiva para o estudo de fluxos de detritos em regiões tropicais.

Os objetivos específicos correspondem a:

i. Investigação dos parâmetros e mecanismos típicos de fluxos de detritos;

 ii. Compilação das principais relações empíricas da literatura para estimativa de parâmetros dos fluxos de detritos; iii. Análise do movimento e comportamento do *debris flow* ocorrido no Córrego do Príncipe e avaliação dos parâmetros envolvidos passíveis de medidas após a ocorrência do evento.

1.3. Estrutura da Dissertação

Este documento de dissertação de mestrado foi dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 introduz o tema da pesquisa, e inclui os objetivos e a organização da pesquisa.

O Capítulo 2 trata da Revisão Bibliográfica e apresenta os diferentes tipos de movimentos de massa e principais características dos fluxos de detritos. São descritas as diferentes classificações de fluxos de detritos propostas na literatura, além das medidas de mitigação e convivência com este tipo de movimento de massa. O capítulo também apresenta diversos métodos empíricos e analíticos, destacando-se o programa numérico DAN3D, para determinação dos principais parâmetros dos fluxos de detritos.

O Capítulo 3 apresenta o objeto de estudo com a caraterização do *debris flow* no trecho do Córrego do Príncipe, localizado na região do Campo Grande, em Teresópolis, Rio de Janeiro. O local escolhido foi fortemente afetado pelo fluxo de detritos ocorrido em janeiro de 2011.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos por meio das análises empíricas e numéricas dos casos de estudo, utilizando as relações da literatura e programa DAN3D para determinação dos principais parâmetros dos fluxos de detritos, tais como: área de impacto, volume, velocidade de pico, descarga de pico, espessura do depósito, distância percorrida. Apresenta também a comparação entre resultados numéricos, empíricos e parâmetros reais medidos e observados do *debris flow*.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Movimentos de Massa

Cruden (2003) reporta que o termo movimento de massa foi registrado pela primeira vez no livro *Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass-Movements of Soil and Rock*, de autoria de Sharpe em 1938.

Movimentos de massa são fenômenos geológicos caracterizados por uma série de processos que resultam no deslocamento para fora e para baixo de um declive, envolvendo diversos materiais, tais como rochas naturais, solos, aterros ou uma combinação desses elementos. Esses deslocamentos podem ser causados por fatores como a gravidade, mudanças climáticas, atividades humanas, entre outros. Esses eventos podem variar em escala e velocidade, indo desde deslizamentos de pequenas proporções até grandes deslocamentos de terra e rochas, conhecidos como "deslizamentos de massa". Esses fenômenos podem ter impactos significativos em paisagens, comunidades e infraestruturas próximas às áreas afetadas. Por isso, o estudo e a compreensão dos movimentos de massa são essenciais para a gestão do risco de instabilidade e para a prevenção de desastres naturais.

Varnes (1978) cita que as principais causas para os movimentos de massa podem ser o aumento da tensão ao cisalhamento e/ou a redução da resistência ao cisalhamento do maciço. Dentre alguns fatores que aumentam a tensão ao cisalhamento tem-se a remoção do suporte lateral, sobrecargas e tensões transitórias no maciço. Por outro lado, os fatores que reduzem a resistência ao cisalhamento podem estar associados às características inerentes do material e ações que promovem a alteração do seu estado natural.

Ainda existe o gatilho, também conhecido como "trigger", considerado como causador do deslizamento. Por definição, o gatilho é um estímulo externo como chuvas intensas, sismos provocados por terremotos, erupções vulcânicas, ondas de tempestade ou erosão rápida do córrego, os quais são responsáveis pela quase imediata movimentação de massa por meio do repentino aumento das tensões ou redução da resistência do talude. Importante notar que os gatilhos

normalmente ocorrem de maneira rápida, e em alguns casos, inesperadamente, dificultando a sua identificação (Turner e Schuster, 1996).

O primeiro trabalho que apresentou uma classificação para os movimentos de massa foi proposto por Dana (1876), que divide os movimentos em três grupos: detritos, espalhamentos de terra e escorregamentos de rocha.

Outra classificação importante é a proposta por Varnes (1978) que divide os movimentos em cinco grupos: deslizamentos, quedas, tombamentos, corridas, espalhamentos laterais. Faz-se ressaltar que Varnes classifica como fluxo todos os movimentos que envolvem os fatores representados por grande distorção interna ou deslizamento sem limites definidos. Entretanto, uma dificuldade é determinar qual destes dois fatores é o dominante em um caso particular (Hungr, 2001). A Tabela 2-1 apresenta esta classificação.

Tipo de Movimento		Tipo de Material			
		Booha	Solo		
			Rocha	Grosseiro	Fino
Queda	IS		Blocos de rocha	Detritos	De Terra
Tombamentos		De blocos de rocha	Detritos	De terra	
tos	Rotacionais	Poucas unidades	Desmoronamento de rocha	Desmoronamento de detritos	Desmoronamento de terra
Escorregamen	Translacionais	Muitas unidades	Deslizamento de blocos de rocha	Deslizamento de detritos	Deslizamentos de terra
Espalhamentos laterais		De blocos de rocha	De detritos	De terra	
Corridas/escoamentos		De rocha (rastejo	De detritos	De terra	
			(rastejo de solo)		

Tabela 2-1 -	 Classificação 	dos movimentos	de massa	(Mod.Varnes,	1978).
--------------	-----------------------------------	----------------	----------	--------------	--------

ombinação de dois ou mais dos principiais tipo de movimentos Complexo

Hutchinson (1988) propôs uma classificação adicional para os movimentos de massa, que inclui, além dos tipos descritos por Varnes (1978), os rebotes, o creep e o sagging. Hungr (2001) cita que Hutchinson (1988) refere-se a todo esse conjunto como "movimentos de fluxo de detritos", evitando, assim, comprometerse com um modelo cinemático específico e adotando uma abordagem não taxonômica. Essa classificação mais abrangente permite considerar uma variedade de fenômenos de deslocamento de materiais, ampliando o escopo de estudo e possibilitando uma melhor compreensão dos diferentes processos que podem ocorrer em movimentos de massa.

Ortigão e Sayão (2004) apresentam outros tipos de classificação dos movimentos de massa em função da velocidade de movimento (Tabela 2-2), condições de perturbação (Tabela 2-3) e drenagem (Tabela 2-4).

Nesse sentido, outra classificação comumente utilizada no Brasil é a proposta por Augusto Filho (1992), a qual engloba a velocidade do movimento, materiais envolvidos e planos de ruptura e é apresentada na

Tabela 2-5.

Tabela 2-2- Classificação dos movimentos de massa de acordo com a velocidade de movimento (Adapt. Ortigão e Sayão, 2004 apud Cruden e Varnes, 1996).

Classe de Velocida	ade Descrição	Velocidade	Velocidade típica
7	Extremamente rápido	>5 x 10 ³	Ι
6	Muito rápido	5 x 10 ³	m/s
5	Rápido	5 x 10 ¹	m/min
4	Moderado	5 x 10 ⁻¹	m/h
3	Devagar	5 x 10 ⁻³	m/mês
2	Muito devagar	5 x 10 ⁻⁵	m/ano
1	Extremamente devagar	5 x 10 ⁻⁷	mm/ano

Tabela 2-3 - Classificação dos movimentos de massa de acordo com a perturbação (Adapt. Ortigão e Sayão, 2004).

Movimentos de massa virgens	Ocorrem em solos não perturbados com resistência de pico ao cisalhamento
Movimentos de massa reativados	Ocorre em solos perturbados na superfície de deslizamento com resistência residual ao cisalhamento

Drenada (longo prazo)	Poropressões devido ao fluxo de infiltração no solo. Sem poropressões durante o cisalhamento ou elas são
	completamente dissipadas.
Parcialmente drenado (médio prazo)	Poropressões geradas durante o cisalhamento são parcialmente dissipadas
Não drenada (curto prazo)	Ocorre em solos com baixa permeabilidade com geração de poropressão no cisalhamento

Tabela 2-4 - Classificação dos movimentos de massa de acordo com a drenagem (Adapt. Ortigão e Sayão, 2004).

Tabela 2-5 - Classificação utilizada no Brasil para movimentos de massa (Adapt. Augusto Filho, 1992).

Movimento	Características	
Rastejo ou fluência	Ausência de um plano de ruptura Superfície de ruptura bem definida Movimentos sazonais ou intermitentes Velocidades muito baixas a baixas e decrescentes com a profundidade Solo, depósitos, rocha alterada	
Escorregamentos	Planos de ruptura bem definidos Em cunhas em solos e rochas com dois planos de fraqueza Pequenos a grandes volumes de material Velocidades médias Geometrias e materiais variáveis	
Quedas	Sem planos de deslocamento Movimentos em queda livre ou em plano inclinado Pequenos a médios volumes	

Velocidades muito altas		
	Geometria variável	
	Rolamento	
	Tombamento	
Γ	Muitas superfícies de deslocamento	
	Movimento semelhante a de líquido viscoso	
	Desenvolvimento ao longo das calhas naturais	
	de drenagem	
Corridas	Grandes volumes de material	
	Velocidades de médias a altas	
	Mobilização de solo, rocha, detritos e água	
	Extenso raio de alcance, inclusive em áreas	
	planas	

Um exemplo de classificação bastante abrangente é a proposta por Hungr et al. (2014), a qual revisa a classificação anterior de Varnes (1978), ampliando os 5 grupos de movimentos para 32 tipos de instabilidade O principal objetivo dessa classificação é modificar a definição dos materiais que compõem os deslizamentos de terra, para torná-la compatível com as terminologias geotécnicas e geológicas de rochas e solos. A Tabela 2-6 apresenta a classificação modificada com a identificação dos 32 tipos de deslizamentos.

Entretanto, a nova Classificação Modificada de Varnes não tem sido amplamente adotada pela engenharia geotécnica, conforme se constata pela ausência de citação em publicações da literatura internacional e nacional. Nunes (2023) considera que a nova classificação com 32 tipos de movimentos tem uso muito restrito devido à dificuldade inerente de identificar as características de instabilidades reais com aquelas estabelecidas na classificação modificada.

Tipo de movimento	Rocha	Solo
Queda	1. Queda de rochas/gelo*	2. Queda de pedregulho/ detrito/ silte*
Tombamento	 3. Tombamento de bloco de rocha* 4. Tombamento a flexão de rocha 	5. Tombamento de cascalho /areia /silte*
Deslizamento	 6. Escorregamento rotacional de rocha 7. Escorregamento planar de rocha* 8. Escorregamento em cunha de rocha 9. Escorregamento combinado de rocha 10. Escorregamento irregular de rocha* 	 11. Escorregamento rotacional de argila/silte 12. Escorregamento planar de argila/silte 13. Escorregamento de pedregulho/ areia/ detrito* 14. Escorregamento composto de argila/silte
Espalhamento lateral	15. Espalhamento de talude de rocha	16. Espalhamento de areia/silte liquefeito* 17. Espalhamento de argila sensitiva*
Fluxo	18. Avalanche de rocha/gelo*	 19. Fluxo seco de areia/ silte/ detrito 20. Corrida úmida de areia/ silte/ detrito* 21. Fluxo úmido de argila sensitiva* 22. Corrida de detritos* 23. Corrida de lodos* 24. Inundação de detritos 25. Avalanche de detritos* 26. Fluxo de terra 27. Fluxo de turfa
Deformação de talude	28. Deformação de talude de montanha 29. Deformação de talude de rocha	31. Deformação de talude de solo 32. Rastejo de solo
*: Tipos de movimenos rápidos que atingem velocidades extremamente altas conforme definido por Cruden e Varnes (1996).		

Tabela 2-6 - Classificação proposta por Hungr et al. (2014).

Dentro do tema de fluxo, diversas classificações têm ganhado destaque ao longo do tempo, tais como as de Varnes (1978), Cruden e Varnes (1996), Croussot e Meunier (1996) e Hungr et al. (2001).

Hungr et al. (2001) propõem definições mais precisas para fluxo de detritos, avalanche de detritos e corrida de lama. Ademais, apresentam uma nova classificação (Tabela 2-7) para deslizamentos, baseada em aspectos morfológicos ao invés de limites arbitrários de tamanho dos grãos. Os autores ainda indicam classificação do movimento em função da origem, granulometria e tipo dos materiais envolvidos nos fluxos (Tabela 2-8).

Material	Conteúdo de Água ⁽¹⁾	Condição Especial	Velocidade	Nome
Silte, Areia, Cascalho, Detrito	seco, úmido ou saturado	- sem excesso de poropressão - volume limitado	variada	Corrida de areia não liquefeita
Silte, Areia, Detritos, Rocha Fraca ⁽²⁾	saturado no conteúdo da superfície de ruptura	- material liquefeito - constante de água ⁽³⁾	Extremamente rápida	Corrida de areia
Argila Sensitiva	Acima do limite de liquidez	- liquefação <i>in situ</i> ⁽³⁾ - conteúdo constante de água ⁽⁴⁾	Extremamente rápida	Corrida de argila
Turfa	saturado	- excesso de poropressão	Lenta para muito rápida	Corrida de turfa
Argila ou Terra	perto do limite de plasticidade	- movimento lento - fluxo de plugue	< Rápida	Corrida de terra
Detritos	saturado	- canal estabelecido ⁽⁵⁾ - aumento do conteúdo de água ⁽⁴⁾	Extremamente rápida	Corrida de detritos
Lama	no ou acima do	- grãos finos de	> Muito rápida	Corrida de

Tabela 2-7 - Classifica	ação dos mov	imentos de	massa do t	tipo fluxo	(Adapt.
Hungr et al., 2001).					

	limite de liquidez	corrida de detritos		lama
Detritos	sem presença de água	- enchente ⁽⁶⁾	Extremamente rápida	Corrida de detritos
Detritos	parcialmente ou totalmente saturado	- sem canal estabelecido ⁽⁵⁾ - relativamente raso - origem íngreme	rápida	Avalanche de detritos
Rocha Fragmentada	vários, principalmente secos	rocha intacta na origem - volume grande ⁽⁷⁾	rápida	Avalanche de rocha

Obs. : ⁽¹⁾ :Teor de água na vizinhança da superfície de ruptura no momento da ruptura; ⁽²⁾ : Altamente poroso, rocha fraca; ⁽³⁾ : A presença de liquefação in situ total ou parcial do material de origem da lâmina de fluxo pode ser observada ou implícita; ⁽⁴⁾ : Em relação ao material *in situ;* ⁽⁵⁾ : Presença ou ausência de um canal definido em grande parte do caminho e forma de relevo de deposição estabelecida (leque). O fluxo de detritos é um fenômeno recorrente dentro de sua trajetória, enquanto a avalanche de detritos não é; ⁽⁶⁾ : Descarga de pico da mesma ordem que a de uma grande inundação ou uma inundação acidental. Forças de tração significativas de água corrente. Presença de detritos flutuantes; ⁽⁷⁾ : Volume superior a 10000 m^3 aproximadamente. Fluxo de massa, contrastando com queda de rocha fragmentada.

Tabela 2-8 - Materiais envolvidos nos movimentos de massa do tipo fluxo (Adapt. Hungr et al., 2001).

Origem	Caráter	Condição ⁽¹⁾	Nome
	Não coesivo		Cascalho
	(Limite de Plasticidade	Seco ou Saturado	Areia
Ordenado (marinho,	< 5%)		Silte
lacustre, vulcânico, antropogênico, eólico)	Coesivo (Limite de	Plástico $(I_L < 0,5)$	Argila
	Plasticidade > 5%)	Líquido $(I_L < 0,5)$	Argila Sensitiva
Não ordenado (residual, coluvial, glacial, vulcânico, antropogênico)	Não coesivo (Limite de Plasticidade < 5%)	Seco ou Saturado	Detrito ⁽²⁾
	Coesivo (Limite de	Plástico $(I_L < 0,5)$	Terra

	Plasticidade < 5%)	Líquido $(I_L < 0,5)$	Lama
Turfa	Orgânico	Saturado	Turfa
Rocha	Fragmentado	Seco ou Saturado	Rocha

Obs.: ⁽¹⁾: Relacionado ao material encontrado nas proximidades da superfície de ruptura, se puder ser determinado. Em muitos casos, a condição do material deve ser deduzida a partir do comportamento do deslizamento, principalmente da velocidade; ⁽²⁾: Detritos podem conter uma proporção considerável de material orgânico.

2.2. Fluxo de Detritos

2.2.1. Definição

As primeiras definições para os fluxos de detritos começaram a surgir na metade do século XX. Um dos primeiros autores a abordar o tema foi Stiny (1910), que classificou esse tipo de movimento como um fluido que se desenvolve em um canal natural, transportando sólidos e sedimentos em suspensão no corpo do fluxo e carregando material erodido no fundo do canal. Com o aumento da quantidade de massa transportada, em determinado momento, ela se transforma em uma massa viscosa contendo uma mistura de solo, água, rocha, areia e árvores (Valverde Sancho, 2016).

De acordo com Hungr et al. (2001), os detritos podem ser definidos como materiais soltos e não selecionados de baixa plasticidade, como produzidos por processo de intemperismo (solo residual), perda de massa (colúvio), vulcanismo explosivo (depósitos piroclásticos granulares), transporte de geleiras (depósitos de lavoura ou contato com gelo), ou resíduos antropogênicos não selecionados. Os detritos também podem conter uma proporção significativa de material orgânico. Além disso, eles contêm menos de 30% de silte e partículas mais finas.

Takashi (2007) define que o movimento de detritos envolve uma mistura de sedimentos e água, assemelhando-se a um fluxo contínuo de fluido impulsionado pela gravidade, o qual alcança uma alta mobilidade em espaços vazios saturados com água ou lama.

Nunes e Sayão (2014) apontam que o *debris flow* é um mecanismo de ruptura que pode se manifestar em decorrência do aumento das pressões neutras em descontinuidades por conta de chuvas intensas e prolongadas ou até mesmo por sismos, acarretando a diminuição da resistência do maciço. Massad *et al.* (1998) salientam que as corridas de detritos são desastres naturais, uma vez que apresentam alto poder destrutivo e podem provocar danos ao patrimônio e às instalações urbanas. Ademais, os autores indicam que elas também são chamadas de avalanche e erosões violentas.

2.2.2. Características

Segundo Massad *et al.* (1998), os fluxos de detrito apresentam algumas características importantes, tais como: ocorrem em períodos extremamente curtos; possuem altas velocidades de deslocamento (entre 5 e 20 m/s); transportam detritos variados, como galhos, cascalho, lama e troncos de árvores, a grandes distâncias, mesmo em terrenos com baixas declividades; possuem uma elevada capacidade de causar destruição e erosão; e ocorrem geralmente após longos períodos chuvosos.

Cabe enfatizar que o fluxo de detritos é o movimento mais complexo e destrutivo. Sua complexidade decorre da necessidade de estudo em três zonas distintas: a zona de iniciação, onde o movimento tem início; a zona de transporte e erosão, onde o movimento se desenvolve; e a zona de deposição do material, onde a massa mobilizada inicia seu processo de assentamento (conforme ilustrado na Figura 2.1). Além disso, sua natureza destrutiva é evidente devido ao envolvimento de grandes volumes de material, ocasionando desastres significativos e sendo considerado uma ameaça de magnitude moderada a alta (Nunes e Sayão, 2014).

VanDine (1996) reporta que a iniciação geralmente requer uma declividade do canal maior que 25° (47%); o transporte geralmente requer uma declividade superior a 15° (27%); e a deposição geralmente com declividades menores que 10° (18%), conforme esquematizado na Figura 2.2.



Figura 2-1 - Zonas presentes no fluxo de detritos (Nunes e Sayão, 2014).



Figura 2-2 - Zonas presentes dos fluxos de detritos canalizados (VanDine, 1996)

Zona de Iniciação

A ruptura ocorre geralmente na parte alta da encosta ou na lateral de um talude ou canal principal (Hungr, 2005). O início da ruptura é o processo pelo qual uma massa aparentemente rígida de bloco de rocha, solo, ou sedimento passa de um estado estático para um fluxo de detritos (Costa, 1984; Takahashi e Nakagawa, 1991; Shelby, 1993; Iverson, 1997). A mobilização requer o deslocamento da massa, água suficiente para saturá-la, a transformação de

energia potencial gravitacional para energia cinemática capaz de mudar o tipo do movimento de deslocamento para fluxo e a mobilização requer o deslocamento da massa, água suficiente para saturá-la (Costa, 1984; Takahashi e Nakagawa, 1991; Shelby, 1993; Iverson, 1997).

Zona de Transporte e erosão

A zona de transporte e erosão diz respeito à área percorrida pelo fluxo de detritos. Durante o trajeto, o volume de material pode ser incrementado devido à erosão ou ao carreamento do material depositado em movimentos pretéritos. A taxa de erosão depende das características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo (Hungr, 2005).

Zona de Deposição

A zona de deposição corresponde à área onde a massa mobilizada começa a se depositar, tomando a forma de um leque de detritos. Nessa região, a deposição geralmente ocorre como resultado da combinação de redução da inclinação do terreno e perda de confinamento. Quando ocorre a perda de confinamento, a parte principal da onda de detritos, situada atrás da frente, desmorona, privando-a do impulso hidráulico que a impulsionava para a frente. Consequentemente, a frente desacelera, inclina-se e pode ser parcialmente direcionada para as margens do canal, onde acumula cumes alongados ou diques compostos por material mais grosseiro. Esse processo de deposição ocorre quando toda a energia cinética da massa mobilizada é transformada em energia de repouso (Hungr, 2005; Iverson, 1997).

Em relação à inclinação, diversos autores propõem valores diferentes. Por exemplo, Hungr et al. (1984) sugerem valores de ângulos de deposição variando de 8 a 12° para movimentos em canais "confinados" e de 10 a 14° para canais "abertos" (Pelizoni, 2014).

De acordo com Hungr (2005), os fluxos de detritos movem-se em ondas (*surge*) distintas ou sucessivas. O mecanismo de crescimento das ondas pode variar (Takahashi, 1991). Algumas ondas podem resultar da instabilidade causada pela ordenação longitudinal. O corpo principal da onda é composto por uma massa fina de detritos liquefeitos. Já a cauda é composta por um fluxo diluído e turbulento de água carregada de sedimentos, semelhante a uma inundação de detritos (Hungr, 2005). A Figura 2.3 representa a configuração de um fluxo de detritos possuindo uma frente rochosa.



Figura 2-3 - Configuração da frente de uma onda de fluxo de detritos com uma frente rochosa (Mod. Pierson, 1986).

2.2.3. Classificações

Diferentes autores apresentam diferentes classificações para *debris flow* (Takahashi, 2007; Jakob, 2005; Hungr et al, 2001). Dessa forma, Takahashi (2007) classifica os fluxos de detritos em: *Stony-type debris flow, Turbulent-muddy-type debris flow e Viscous debris flow.*

Dessa forma, o *debris flow* do tipo *Stony* apresenta características distintas em sua frente, que se assemelha a um furo, e na sua profundidade, que subitamente se torna grande, após um período de praticamente nenhum fluxo anterior. Além disso, esse tipo de fluxo é caracterizado por conter uma acumulação de pedras maiores e uma quantidade reduzida de água. A parte frontal do *debris flow Stony* dura apenas alguns segundos, enquanto a parte seguinte perdura por um tempo maior, assemelhando-se a um fluxo de lama com uma descarga gradualmente decrescente.

A velocidade aparente do *debris flow* é distribuída nas laterais, sendo que o centro do fluxo se assemelha a um *plug* no fluxo do tipo fluido Bingham, onde a velocidade é maior. Nas laterais, a velocidade é praticamente nula. Essas características tornam o *debris flow Stony* um fenômeno complexo e de comportamento peculiar, demandando análises detalhadas para sua compreensão e mitigação de seus impactos.

Por outro lado, o tipo *Turbulent-muddy-type debris flow* é comum em regiões vulcânicas, onde o magma ao solidificar-se devido à ejeção de cinzas, resulta em uma espessa cobertura montanhosa, a qual pode ser erodida por chuva moderada. Assim, essa erosão das cinzas causa fluxo de detritos. Apesar de conterem pedregulhos grandes compostos principalmente de cinzas finas, o

comportamento do fluxo difere-se do *Stony-type debris flow*. O fluxo é muito turbulento da frente para a retaguarda. Por fim, apresenta grandes blocos dispersos no fluxo e não concentrados na porção frontal (Pelizoni, 2014).

Já o *Viscous debris flow* caracteriza-se por ser intermitente. De acordo com Takahashi (2007), dezenas e centenas de ondas (*surges*) são geradas em pequenos intervalos de tempo (algumas dezenas de segundos a alguns minutos). As ondas rolam e rugem como uma onda na costa do mar. Devido ao fato de não possuir blocos no corpo do fluxo, este tipo apresenta um fluxo laminar com turbulência que decresce gradualmente.

Jakob (2005) cita uma classificação para o tamanho dos fluxos de detritos com base no volume total, na descarga de pico e na área inundada pelos detritos. Essa classificação é justificada pela sua contribuição no manejo de riscos e desastres, pois auxilia na compreensão das magnitudes e consequências em caso de uma eventual corrida de detritos. O autor divide essa classificação em nove classes.

A Figura 2.4 ilustra seis dessas classes, as quais são descritas detalhadamente na Tabela 2-9, fornecendo informações sobre o volume total, a descarga de pico e a área inundada pelos detritos em cada uma delas. Essa classificação é de suma importância para os estudos de prevenção, preparação e resposta diante de potenciais eventos de fluxos de detritos, proporcionando uma base sólida para a gestão de riscos e a tomada de decisões em áreas suscetíveis a esse tipo de desastre natural.



Figura 2-4 - Classificação dos fluxos de detritos de acordo com a magnitude do movimento (Jakob, 2005).

Тіро	Volume (<i>m</i> ³)	Vazão de Pico (<i>m³/s</i>)	Área Afetada (<i>m</i> ²)	Consequências
1	<10 ²	<5	<4 x 10 ³	Dano localizado, já ocasionou morte de trabalhadores florestais em pequenos talvegues, danos em construções pequenas.
2	10 ² - 10 ³	5 - 30	4 x 10 ² - 2 x 10 ³	Soterramento de carros, destruição de construções menores e árvores, descarrilamento de trens.
3	10 ³ - 10 ⁴	30-200	2 x 10 ³ - 9 x 10 ³	Destruição de edifícios de maior porte, danos em pilares de pontes de concreto, rodovias e dutos.
4	10 ⁴ - 10 ⁵	200-1500	9 x 10 ³ - 4 x 10 ⁴	Destruição de aldeias, corredores de infraestrutura, pontes, obstrução de riachos
5	10 ⁵ - 10 ⁶	1500-12000	4 x 10 ⁴ - 2 x 10 ⁵	Destruição de partes das cidades e florestas de 2 km² de área. Obstrução de riachos e pequenos rios
6	10 ⁵ - 10 ⁶	N/A	> 2 x 10 ⁵	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km² de área. Bloqueio de rios.
7	10 ⁶ - 10 ⁷	N/A	N/A	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km² de área. Bloqueio de grandes rios.
8	10 ⁷ - 10 ⁸	N/A	N/A	Destruição de grandes cidades e inundação de vales até 100 km² de área. Bloqueio de grandes rios.
9	10 ⁸ - 10 ⁹	N/A	N/A	Vasta e completa destruição de centenas de km².
10	> 10 ⁸	N/A	N/A	Vasta e completa destruição de centenas de km ² .

Tabela 2-9 - Classificação de fluxos de detritos (Mod. Jakob, 2005).

2.2.4. Mecanismos deflagradores

Os mecanismos que desencadeiam os fluxos de detritos são diversos, sendo o mais estudado o aumento das pressões neutras resultante de precipitações intensas e de longa duração ou do degelo. O aumento nas poropressões reduz a resistência ao cisalhamento, levando à liquefação do solo e transformando-o em um fluido viscoso (Campbell, 1974; Costa, 1984). Essa liquefação é um fenômeno crucial no desencadeamento dos fluxos de detritos, tornando o solo instável e capaz de se comportar como um fluido, o que é altamente perigoso em áreas suscetíveis a esse tipo de evento.

Starkel (1979) destaca que a chuva crítica é determinada pela combinação da intensidade e duração das precipitações. Na literatura, diversos autores propuseram diferentes relações entre a intensidade e duração das chuvas, tais como Caine (1980), Govi e Sorzana (1980), Wieczorek e Sarmiento (1983 e 1988), Crozier (1997), Kanji et al. (1997), Marchi et al. (2002), Bacchini e Zannoni (2003), Jakob e Weatherly (2003), Motta (2014) e Nunes e Sayão (2014). Essas propostas são importantes para entender a relação entre a chuva e a ocorrência de fluxos de detritos, sendo relevantes para o estabelecimento de critérios de alerta e medidas de mitigação em regiões suscetíveis a esses eventos naturais.

Outro aspecto relevante é que fatores como a espessura da camada de solo, a porosidade do solo e a sua permeabilidade desempenham um papel crucial na determinação dos efeitos das chuvas críticas. Além disso, a interface entre solos permeáveis e substratos relativamente impermeáveis, juntamente com as pressões ocasionadas pelo artesianismo, são fatores que desencadeiam a ruptura do solo (Motta, 2014).

Nunes e Rios Filho (2009) afirmam que os fatores que desencadeiam os fluxos de detritos são intensas precipitações em períodos curtos ou precipitações médias de longa duração. Esses eventos podem ser originados tanto por deslizamentos como por quedas de rochas. Além disso, a mobilização inicial e as características específicas da área onde o movimento se desenvolve são essenciais para determinar se o movimento será simples ou complexo.

Blackwelder (1928) destaca algumas condições favoráveis para a ocorrência de fluxos de detritos, que incluem: a presença de materiais não consolidados, grande quantidade de água, encostas íngremes que são capazes de mobilizar os materiais e, adicionalmente, proteção vegetal escassa ou inexistente.

Conforme destacado por Motta (2014), os fluxos de detritos são impulsionados por dois tipos de fatores: os condicionantes e os deflagradores. Os fatores condicionantes têm a capacidade de reduzir a resistência do terreno, tornando-o mais suscetível ao movimento, embora não sejam suficientes por si só para desencadear a ocorrência do fluxo. Por outro lado, os fatores deflagradores são aqueles que, isoladamente, iniciam o movimento dos detritos.

Iverson et al. (1997) estabelecem que os principais mecanismos deflagradores são a liquefação da massa de solo pela elevação das pressões neutras, transformação da energia de um deslizamento translacional em energia interna da massa deslizante e ruptura generalizada da massa mobilizada.

2.2.5. Principais parâmetros

A obtenção dos parâmetros é de extrema importância, uma vez que permite estimar o potencial de dano, dimensionar medidas ativas e passivas de mitigação, projetar convivência com essas estruturas e também caracterizar os efeitos secundários dos fluxos de detritos (Nunes e Sayão, 2014). Dentre os parâmetros essenciais destacam-se a velocidade média do fluxo, o volume de material mobilizado, a vazão de pico, a distância total percorrida e a área de deposição.

A Tabela 2-10 apresenta os valores típicos dos principais parâmetros dos fluxos de detritos.

A literatura especializada em *debris flow* apresenta algumas relações empíricas que possibilitam a obtenção desses parâmetros. Essas relações são fundamentais para uma avaliação mais precisa e abrangente dos impactos dos fluxos de detritos, auxiliando na formulação de estratégias efetivas de gerenciamento de riscos e medidas de proteção em regiões susceptíveis a esses eventos naturais.

Propriedades	Símbolo	Valores típicos	
Propriedades das partículas sólidas			
Peso Específico (kN/m ³)	ρs	25 - 30	
Diâmetro da partícula (m)	δ	10 ⁻⁵ - 10	
Ângulo de atrito (°)	ø	25 - 45	
Coeficiente de restituição	е	0,1 - 0,5	
Propriedades da fração líquida	Propriedades da fração líquida		
Densidade (Kg/m ³)	ρr	1000 - 1200	
Viscosidades (Pa s)	μ	0,001 - 0,1	
Propriedades da Mistura	•		
Fração solida em relação ao volume total	Us	0,4-0,8	
Fração liquida em relação ao volume total	υ _r	0,2-0,6	
Permeabilidade Hidráulica (m ²)	k	10 ⁻¹³ - 10 ⁻⁹	
Condutividade Hidráulica (m/s)	ĸ	10 ⁻⁷ - 10 ⁻²	
Modulo de elasticidade (Pa)	E	10 ³ - 10 ⁵	
Ângulo de atrito (°)	Ø	25 - 45	

Tabela 2-10 - Valores típicos dos principais parâmetros de fluxo de detritos (Pelizoni, 2014, apud Iverson, 1997).

Velocidade

A determinação da velocidade do fluxo é extremamente complexa e sua estimativa pode ser realizada em visitas de campo após o ocorrido, por meio de medidas indiretas usando da superelevação, representada pela elevação causada pelo impacto em estruturas ou por meio de características do canal (Rickermann,1999; Jakob, 2005). Devido à dificuldade, geralmente é estimada por meio de correlações empíricas e medidas de ensaios realizados em laboratório.

De acordo com a classificação de velocidade proposta por Cruden e Varnes (1996), os fluxos de detritos podem ocorrer de forma extremamente rápida a lenta.

As relações empíricas para a estimativa da velocidade são apresentadas na Tabela 2-11 e assumem que: (i) o quadrado da velocidade numa área de seção transversal média pode ser substituído pela velocidade média; (ii) a inclinação é constante e (iii) a altura do canal é muito menor que o raio de curvatura do mesmo (Pelizoni, 2014).

Referência	Equação	Observações
Chow (1959)	$v = (g \cdot r \cdot \cos \theta \cdot \tan \alpha)^{0,5}$ $v = (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{0,5}$	Expressão com inclinação do canal constante, estreito
Fairchield e Wigmosta (1983)	$v = (1,21 \cdot g \cdot \Delta h)^{0,5}$	Expressão semi empírica baseada em ensaios de flume e teoria de fluxo laminar viscoso
Hungr et al. (1985)	$v = (\gamma \cdot S / K \cdot \mu) \cdot h^2$	Expressão baseada no modelo de fluxo newtoniano
Rickenmann (1999)	$v = 2,1 \cdot Q^{0,33} \cdot S^{0,33}$	Expressão baseada em fluxo de água turbulento em leitos pedregulhos e casos históricos
McClung (2001)	$v = (\mathbf{r} \cdot \mathbf{g} / K) \cdot (\Delta h / \mathbf{b})$	-
Motta (2014)	$v max = 120,99 \cdot V^{-0,2}$	Fluxo de detritos, mundiais, 56 eventos, <i>R</i> ² = 0,78, limite superior
Motta (2014)	$v max = 0,15 \cdot V^{-0,25}$	Fluxo de detritos, mundiais, 56 eventos, R^2 = 0,97, limite inferior

Tabela 2-11 – Correlações empíricas para estimativa da velocidade (Mod. Nunes e Sayão, 2014).

Obs.: r: raio de curvatura do canal (m); α : inclinação do canal (graus); θ : gradiente de superelevação (graus); Δ h: altura da superelevação (m); S: inclinação do canal (graus); γ : peso específico do material (kN/m³); h: espessura do fluxo (m); K: fator de forma do canal; V: volume de fluxo de detritos (m³); g: gravidade (m²/s); y: altura média do fluxo (m); μ : viscosidade dinâmica da corrida; k: fator de correção; b:largura do canal.

Volume Total

O volume total, por definição, representa a totalidade do material transportado durante um fluxo de detritos até a sua zona de deposição. Algumas vezes, o termo "magnitude" é utilizado como sinônimo para descrever esse parâmetro. Sua importância é inegável, pois está correlacionado com outros

parâmetros relevantes, tais como distância total percorrida, distância de desvio na área de deposição e vazão de pico.

Por meio da Tabela 2-12 é possível observar algumas correlações empíricas para a sua estimativa (VanDine, 1906; Rickenmann, 1999; Takahashi e Nakagawa, 1991; Marchi e D'Agostino, 2004; Kanji et al., 2007; Gramani, 2001; Polanco, 2010; Motta, 2014). Entretanto, estas correlações podem superestimar o volume real dos detritos em até 100 vezes, de acordo com o estudo realizado por Rickenmann (1999), o qual avaliou cerca de 200 fluxos de detritos.

Referência	Equação	Região
Takahashi (1991)	$V = (665 \cdot Qp)^{0,85}$	Japão
Corominas (1996)	$V = (L / H \cdot 1,03)^{0,105}$	Espanha
Rickenmann (1999)	$V = (L / 1, 19 \cdot H^{0,83})^{1/0,16}$	Mundial
Gramani (2001)	$V = (1,87 \cdot L / H)^{1/0,105}$	Brazil
Marchi e D´Agostino (2004)	$V = 70000 \cdot A_C$	Alpes italianos (Volume máximo)
Marchi e D´Agostino (2004)	$V = 1000 \cdot A_c^{0,3}$	Alpes italianos (Volume máximo)
Polanco (2010)	$V = 252,84 \cdot (L/H)^{4,72}$	Mundial
Motta (2014)	$V = (L/2,72)^{1/0,37} \cdot (1/H)$	Mundial

Tabela 2-12 – Correlações empíricas para estimativa do volume total (Mod. Nunes e Sayão, 2014).

Obs.: V: volume; Ac: área de contribuição; L: distância total percorrida (m); Qp: vazão de pico (m^3 / s); H: altura ou diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final de deposição (m).

Portanto, uma avaliação geomorfológica do material em campo das áreas de risco potencial de deslizamentos é mais recomendada. Polanco (2010) cita que nesta avaliação, os fluxos de detritos são considerados como fluxos hiperconcentrados.

Outras técnicas que podem ser utilizadas são a fotogrametria, estimativas com a utilização de mapas dos depósitos indicando a superfície de interseção entre o terreno original e o ocupado pelo evento (Jakob, 2005). Ainda, também podem ser utilizados os radares de penetração e outras técnicas sísmicas (Motta, 2014).

Descarga de Pico

Segundo Jakob (2005), a descarga de pico (Qp) é uma medida que representa a área máxima da seção transversal do fluxo multiplicada pela velocidade durante uma fração de tempo (t). Sua avaliação é crucial, pois desempenha um papel importante na determinação da capacidade de transporte ao longo dos canais, o impulso, a velocidade máxima, entre outros fatores relevantes. Além disso, a descarga de pico está diretamente relacionada ao potencial destrutivo do fluxo.

Sendo assim, é considerada uma variável de entrada para o projeto de obras de canalização, pontes e travessias de dutos, uma vez que determina a área transversal necessária para o fluxo de projeto passar. Porém, é importante lembrar a dificuldade da obtenção direta de parâmetros como vazão, velocidade e área máxima, visto que são medidas obtidas durante os eventos de fluxo de detritos (Costa, 1988; Rickenmann, 1999; Mizuyama et al., 1992; Bovis e Jakob, 1999; Hungr et al., 1984). A Tabela 2-13 apresenta as principais correlações empíricas para a estimativa da descarga de pico.

Referência	Equação	Observações
Costa (1988)	$Qp = (0,293 \cdot Vm)^{0,56}$	Ruptura de barragens
Costa (1988)	$Qp = (0,016 \cdot Vm)^{0,64}$	Degelo
Takahashi (1991)	$V = (665 \cdot Qp)^{0.85}$	Fluxo de detritos, Japão
Mizuyama e Kobashi (1992)	$Qp = (0,0188 \cdot V)^{0,790}$	Fluxo de lama

Tabela 2-13 - Correlações empíricas para estimativa da descarga de pico (Mod. Nunes e Sayão, 2014).

Mizuyama e Kobashi (1992)	$Qp = (0,0135 \cdot V)^{0,780}$	Fluxo de detritos
Massad et al. (1997)	$V = 500 \cdot Qp$	Fluxo de detritos, Japão e Canadá
Bovis e Jakob (1999)	$Qp = (0,04 \cdot V)^{0,9}$	Fluxo de detritos granular
Bovis e Jakob (1999)	$Qp = (0,003 \cdot V)^{1,01}$	Fluxo de detritos vulcânicos
Rickenmann (1999)	$Qp = (0,1 \cdot V)^{0,83}$	Fluxo de detritos
Motta (2014)	$Qp = (0,29 \cdot V)^{0,51}$	Fluxo de detritos brasileiros
Motta (2014)	$Qp = (0,14 \cdot V)^{0,59}$	Fluxo de detritos, mundiais, 34 eventos, $R^2 = 0,71$
Obs.: Qp: vazão (m³/s)	: V: volume.	i

Distância Total Percorrida e Ângulo de Viagem

Polanco (2010) cita que o conhecimento da distância total percorrida (L) é fundamental para a elaboração do mapeamento de zonas de risco. Ela geralmente é correlacionada pelo produto entre a elevação máxima, ou altura (H) do movimento, e o volume mobilizado (V). Três parcelas compõem a soma da distância total percorrida, elas são: comprimento do deslizamento inicial; comprimento percorrido durante o desenvolvimento do evento; comprimento do depósito. Ela pode ser obtida por meio de medições em campo, fotogrametria e pela interpolação das coordenadas inicial e final do movimento, obtidas com GPS (Motta, 2014; Nunes e Sayão, 2014).

Além disso, a distância percorrida serve como indicador do processo de transformação de uma massa deslizada em um fluxo de detritos. Caso a distância seja muito pequena, menor que a distância inicial L do movimento, o mesmo não será transformado. Por outro lado, caso a distância seja maior, a massa deslizada terá o comportamento de um fluxo de detritos (Bhuwani, 2004).
A Tabela 2-14 apresenta algumas correlações empíricas para a estimativa da distância final percorrida.

Referência	Equação	Observações
Heim (1932)	$L = H / \tan \alpha$	Fluxo de detritos
Rickenmann (1995)	$L = 350 \cdot V^{0,25}$	Valor máximo
Rickenmann (1995)	$L = 3,6 \cdot V^{0,45}$	Valor mínimo
Corominas (1996)	$L = 1,03 \cdot V^{0,105} \cdot H$	Fluxo de detritos, Espanha
Corominas (1996)	$tan H / L = 0.92 \cdot 10^{-0.10 \cdot L \cdot V}$	Fluxo de detritos não canalizados, Espanha
Rickenmann (1999)	$L = 1,9 \cdot V^{0,16} \cdot H^{0,83}$	Fluxo de detritos, Suíça
Garcia-Ruiz <i>et al.</i> (1999)	$L = 7,13 \cdot (V \cdot H)^{0,271}$	Fluxo de detritos, Itália
Crosta et al. (2001)	$L = 7,136 \cdot V^{0,215}$	Fluxo de detritos, Itália
Budetta e Riso (2004)	$L = 1711,5 \cdot log V - 6094,1$	Fluxo de detritos, Itália
Budetta e Riso (2004)	$log H / L = -0.18 \cdot log V - 1.19$	Fluxo de detritos, Itália
Polanco (2010)	$H/L = 3,23 \cdot V^{-0,212}$	Fluxo de detritos brasileiros

Tabela 2-14 - Correlações empíricas para estimativa da distância percorrida (Mod. Nunes e Sayão, 2014).

Polanco (2010)	$L = 106,61 \cdot V^{0,2591}$	Fluxo de detritos brasileiros
Motta (2014)	$L = (H / 3,55)^{0,2591}$	Fluxo de detritos, $R^2 = 0,76$
Motta (2014)	$H/L = -0.83 \cdot ln V + 11.2$	Limite Superior, fluxo de detritos, mundiais, 160 eventos, R^2 = 0,91
Motta (2014)	$H/L = -0,06 \cdot ln V - 0,52$	Limite Inferior, fluxo de detritos, mundiais, 160 eventos, <i>R</i> ² = 0,92
Motta (2014)	$L = 2,29 \cdot V^{0,17} \cdot H^{0,75}$	Fluxo de detritos, mundiais, 136 eventos, R^2 = 0,71
Obs.: L: distância total percorrida, H: elevação máxima ou altura do movimento; V: volume mobilizado		

De acordo com Heim (1932), o ângulo de viagem (α) pode ser definido como a diferença entre o ponto mais alto (zona de iniciação) e o ponto mais baixo (zona de deposição). Outras denominações para o ângulo de viagem são *fahrböschung* (Heim, 1932) e ângulo de trajetória (Hunter e Fell, 2003).

O ângulo de *fahrböschung* é mais fácil de ser utilizado em comparação com o ângulo de viagem, pois este último depende do centro de massa do material inicial e final. Em contraste, o ângulo de *fahrböschung* pode ser obtido no campo por meio de observações diretas. Essa relação é ilustrada na Figura 2.5, conforme apresentada por Valverde Sancho (2016).



Figura 2-5 - Classificação dos fluxos de detritos de acordo com a magnitude do movimento (Jakob, 2005).

Área de Deposição

A área de deposição, assim como a distância total percorrida, desempenha um papel fundamental no mapeamento de riscos em uma região. Diversos autores têm se dedicado ao estudo desse tema e um dos principais pesquisadores nessa área foi Richard Iverson. Inicialmente, ele desenvolveu seus estudos para lahars, que são corridas de detritos originadas em regiões vulcânicas. De acordo com Iverson et al. (1998), existem duas definições importantes relacionadas à área:

- A área de seção transversal (A) é a região do canal de fluxo de detritos que é inundada pelo fluxo na descarga de pico. Essa área varia ao longo do canal, influenciada pela força de arraste dos detritos, a velocidade do fluxo e a quantidade de água na mistura (Berti e Simoni, 2007);
- A área planimétrica de deposição (B) representa a área coberta pela deposição do fluxo de detritos e é medida por meio de fotos aéreas e auxílio de GPS.

A Tabela 2-15 e Tabela 2-16 apresentam as correlações empíricas da literatura para estimativas das áreas de seção transversal e planimétrica de deposição, respectivamente. Essas informações são cruciais para a compreensão e avaliação dos riscos associados a eventos de fluxo de detritos.

Referência	Equação	Observações
Iverson et al. (1998)	$A = 0,05 \cdot V^{2/3}$	Lahars, EUA
Berti e Simoni (2007)	$A = 0,08 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Alpes, Itália
Berti e Simoni (2007)	$A = 0,19 \cdot V^{0,57}$	Fluxo de detritos, Alpes, Itália
Griswold e Iverson (2007)	$A = 0,10 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos
Griswold e Iverson (2007)	$A = 0,22 \cdot V^{0,59}$	Fluxo de detritos
Motta (2014)	$A = 0,10 \cdot V^{0,57}$	Fluxos de detritos, mundiais, 69 eventos, R^2 = 0,87

Tabela 2-15 - Correlações empíricas para estimativa da área de deposição (Mod. Nunes e Sayão, 2014).

Obs.: A: Área de seção transversal de deposição; V: volume do fluxo de detritos.

Tabela 2-16 - Correlações empíricas	para estimativa da área da seção
transversal (Mod. Nunes	e Sayão, 2014).

Referência	Referência Equação	
lverson et al. (1998)	$B = 200 \cdot V^{2/3}$	Lahars, $R^2 = 0,90$
Waytomas et al. (2000)	$B = 91,8 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de lama vulcânica (Alasca), 10 eventos, R ² = 0,90
Capra et al. (2003)	$B = 55 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos e deslizamento, México, 6 eventos, R^2 = 0,79
Crosta e Dal Negro (2003)	$B = 6,2 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Itália, 91 eventos, R^2 = 0,96
Griswold (2004)	$B = 19,9 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, R^2 = 0,91

Yu et al. (2006)	$B = 28.8 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Tailândia, 6 eventos, <i>R</i> ² = 0,94
Berti e Simoni (2007)	$B = 17 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Alpes, Itália, 24 eventos
Berti e Simoni (2007)	$B = 6,8 \cdot V^{0,76}$	Fluxo de detritos, Alpes, Norte da Itália, 24 eventos
Griswold e Iverson (2007)	$B = 20 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, R^2 = 0,91
Griswold e Iverson (2007)	$B = 10 \cdot V^{0,73}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, R^2 = 0,92
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 17,3 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Alemanha, 44 eventos, R^2 = 0,59
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 28,1 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Suíça, 34 eventos, R^2 = 0,70
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 32 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça, 8 eventos, R^2 = 0,42
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 44,7 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, fluxos de detritos, Alpes, Áustria, 12 eventos, R^2 = 0,67
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 56,1 \cdot V^{2/3}$	Sedimentos fluviais e fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 27 eventos, R^2 = 0,85

Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 13,5 \cdot V^{0,79}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça (1987), 12 eventos, <i>R</i> ² = 0,68
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 323.8 \cdot V^{0.44}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça (2005), 8 eventos, R^2 = 0,58
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 47,8 \cdot V^{0,68}$	Fluxo de detritos, Alpes, Sul da Alemanha, 27 eventos, R^2 = 0,85
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 57,2 \cdot V^{0,59}$	Fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 34 eventos, <i>R</i> ² = 0,72
Scheidl e Rickenmann (2010)	$B = 7,4 \cdot V^{0,77}$	Fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 44 eventos, <i>R</i> ² = 0,60
Polanco (2010)	$B = 7 \cdot V^{0,66}$	Fluxo de detritos, mundiais
Motta (2014)	$B = 187,67 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, mundiais, 118 eventos, R^2 = 0,90
Motta (2014)	$B = 24,37 \cdot V^{0,77}$	Fluxo de detritos, mundiais, 118 eventos, R^2 = 0,79
Obs.: B: Área planimétrica de deposição: V: volume do fluxo de detritos.		

Taxa de erosão

Existe uma dependência do material incorporado ao fluxo de detritos com a capacidade de erosão do material nas margens e no leito do canal. Conforme citado anteriormente, na zona de transporte e erosão, durante o trajeto, o volume de material pode ser incrementado devido à erosão ou ao carreamento do material depositado em movimentos pretéritos. A taxa de erosão dependerá das

características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo (Hung et al., 2005).

De acordo com Valverde Sancho (2016), os canais onde os fluxos são mobilizados estão geralmente cobertos por depósitos superficiais com alta concentração de água (Figura 2.16). O aumento do material durante a trajetória é devido à instabilidade do fundo e erosão da base do canal, perda de resistência devido ao carregamento não drenado e forças de arraste que atuam na base do fluxo (Hungr et al., 2005).



Figura 2-6 - Classificação dos fluxos de detritos de acordo com a magnitude do movimento (Jakob, 2005).

IPT (1988) propõe relação que permite estimar o grau de erosão, dada por:

$$Grau \ de \ erosão \ (GE) \ = \ \mathbf{Y}_f \cdot \mathbf{R}_h \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{\Theta} \tag{2.1}$$

Onde:

 Y_f : seção transversal do fluxo (m²);

 R_h : raio hidráulico (m);

- Θ : ângulo de inclinação do canal (°);
- g : aceleração gravitacional (g/m²).

A taxa de erosão dependerá do material no leito do canal, inclinação das margens laterais do canal, altura das margens laterais, material nas margens laterais, área tributárias de drenagem, largura e profundidade, ângulo de inclinação da encosta e estabilidade das margens laterais (Hungr et al., 1984).

Rickenmann e Zimmermann (1993) propõem uma relação entre a declividade de deposição (*Sd*) e a taxa de erosão média do percurso (E) definida por:

2.3. Métodos de análises dos principais parâmetros

A previsão do movimento de massa e seus efeitos, também conhecida como *runout analysis*, é muito útil, uma vez que possibilita avaliar os riscos de deslizamento, fornecer informações importantes sobre a ocupação de uma região, e desenvolver de estratégias de mitigação. Fica claro, dessa forma, que dados como a extensão da área de impacto potencial, o nível de destruição e a possibilidade de efeitos secundários são imperativos (McDougall, 2006).

As análises quantitativas e qualitativas auxiliam na previsão do movimento e seus efeitos. O método qualitativo mais simples é estimar a direção potencial do movimento em um mapa topográfico seguindo a direção de descida mais acentuada da área de origem e contabilizando subjetivamente a propagação, superelevação e possível avulsão em curvas de canal. Por outro lado, os métodos quantitativos são menos subjetivos e podem ser classificados como empíricos ou analíticos.

Os métodos empíricos são baseados em dados históricos obtidos da avaliação e observação de eventos pretéritos de corridas de detritos. Dessa forma, como resultado obtém-se as correlações empíricas, as quais foram apresentadas no Capítulo 2.2. De acordo com Nunes e Sayão (2014), as correlações são utilizadas para estimar os parâmetros necessários para dimensionar e definir estruturas de convivência e mitigação, além de avaliar as áreas potencialmente atingidas. Em suma, esses métodos fornecem apenas uma estimativa e apresentam dispersão dos dados e alto grau de incerteza.

Por outro lado, os métodos analíticos baseiam-se na mecânica e envolvem a solução de um sistema governante de equações de movimento. Modelos dinâmicos solucionam numericamente de forma temporal as equações de movimento e avançam a localização do escorregamento simulado de forma incremental. Assim, o modelo analítico mais simples é o modelo clássico de blocos deslizantes. Esse modelo é empregado nos métodos contínuos combinados com o método para explicar a deformação interna que é baseado na teoria hidrodinâmica. Neles, o espalhamento é impulsionado simplesmente por gradientes de tensão internos. Ademais, ao mesmo tempo, as relações que governam as tensões internas podem ser modificadas para levar em conta a resistência e saturação do material usando a teoria de pressão de terra. O método não é muito complexo. Em sua forma mais simples, um modelo dinâmico contínuo de deslizamento de terra pode ser governado por apenas dois parâmetros de base física: os ângulos de atrito basal e interno (McDougall, 2006).

Segundo McDougall (2006), os modelos baseados na mecânica dos meios contínuos, são classificados em:

1. modelos com enfoque euleriano vs lagrangiano;

2. modelos por meio de topografia 2D vs 3D;

3. modelos que requerem parâmetros medidos vs modelos que utilizam de parâmetros calibrados.

De forma semelhante, as corridas são modeladas ao fluxo em canais abertos, utilizando a solução das equações de Saint-Venant. Estas equações correspondem ao caso específico da integração das equações de Navier-Stokes usadas para descrever o movimento geral dos fluxos viscosos (Valverde Sancho, 2016).

Em suma, os principais métodos disponíveis no mercado são os analíticos, empíricos e numéricos. Hungr (2005) apresenta uma consolidação das principais características de cada método (Tabela 2-17).

Tabela 2-17 – Principais características dos métodos numéricos (Adapt. Hunger, 2005).

Dimensão	Tipo de método	Inputs	Outputs
1D	Métodos Empíricos: - Heurístico -Ângulo de viagem -Massa variável	-Estimativa do volume -Seção topográfica -Interpretação de imagem -Estudos geomorfológicos	-Distância máxima -Área de deposição -Profundidade do fluxo
1D	Métodos analíticos:	-Parâmetros reológicos -Seção topográfica	-Distância máxima -Velocidade
1D	Métodos numéricos	-Parâmetros reológicos -Seção topográfica -Volume	-Distância máxima -Velocidade -Pressões de impacto -Profundidade do fluxo
2D	Métodos de fluxo canalizado	-DEM (Digital Elevation Image)	Pxy= probabilidade de que a partícula seja afetado pelo fluxo -Trajetórias do fluxo e extensão dos depósitos
2D	Métodos numéricos	-DEM -Parâmetros reológicos -Volume	 Extensão do depósito Velocidade Profundidade do fluxo Pressões de impacto

2.4. Programas Comerciais

Atualmente existem diversos programas no mercado, sendo a maioria baseados na mecânica dos meios contínuos e resolvidos numericamente por meio de elementos finitos e diferenças finitas. A Tabela 2.17 apresenta alguns programas numéricos utilizados para a simulação da propagação de fluxos de detritos.

Programa	Análise	Referência	Método	Reologia
FLO-2D	2D	O'Brien et al. (1993)	Euler	Voellmy
DAN-W	1D	Hungr (1995)	Lagrange	Frictional Voellmy Bingham
TITAN2D	2D	Pitman e Le (2005)	Lagrange	Atrito
DAN3D	3D	McDougall e Hungr (2004)	Lagrange	Frictional Voellmy Bingham
MADFLOW	3D	Chen e Lee (2000)	Lagrange	Atrito
KANAKO 1	2D	Nakatani et al. (2007)	Lagrange	Atrito
RAMMS	3D	WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF (2010)	Lagrange	Voellmy
MassMov2D	3D	Begueria et al. (2009)	Euler	Voellmy Bingham

Tabela 2-18 - Programas numéricos utilizados para a simulação dapropagação de fluxos de detritos.

Os primeiros programas desenvolvidos foram essencialmente modelos desenvolvidos para estudos de inundação devido a ruptura de barragens com reologias basais modificadas. Lang et al. (1979) modificaram um modelo

hidrodinâmico euleriano 2D existente para incluir resistência ao atrito, além da viscosidade cinemática clássica. Esse procedimento foi realizado para o programa AVALNCH.

O'Brien et al. (1993) propuseram o FLO-2D, o qual é euleriano e apresenta reologia de Voellmy, sendo capaz de dar conta de várias combinações de resistências plásticas/friccionais, viscosas e turbulentas/dispersivas.

Pitman et al. (2003a) desenvolveram o programa TITAN2D, que utiliza um modelo 3D Euleriano baseado na teoria de Savage-Hutter para fluxos granulares secos. O modelo (TITAN2D) foi projetado para fornecer alta resolução usando um método numérico de malha adaptativa.

Nakatani et al. (2007) propuseram o programa KANAKO. Ele utiliza do método das diferenças finitas. Inicialmente, ele foi desenvolvido para avaliar o desempenho de barragens do tipo *sabo* para contenção de sedimentos e o controle de erosão. O modelo utiliza de 16 parâmetros, dentre eles o diâmetro do material, peso específico do material da base, tempo de simulação, peso específico do fluxo, coeficiente de Manning, coeficiente de erosão etc.

2.5. Programas DAN-W e DAN3D utilizados na pesquisa

O programa DAN-W foi apresentado por Hungr em 1995. Ele consiste de um modelo bidimensional lagrangiano que inclui recursos para explicar a resistência interna, arrastamento e reologia do material envolvido. Além disso, é fundamentado na teoria de Savage – Huntter, na qual o comportamento da massa segue o modelo constitutivo de atrito e se deforma plasticamente segundo a teoria de Rankine.

O movimento de massa dentro do programa é modelado como sendo um material hipotético governado por leis reológicas basais. Ademais, ele incluiu uma seleção de reologias, que podem ser atribuídas a diferentes zonas dentro do deslizamento de terra e/ou diferentes segmentos ao longo do caminho. O usuário também pode especificar a profundidade do material do caminho erodível em cada segmento e a massa e transferência de momento durante o arrastamento foram contabilizados explicitamente (McDougall, 2006).

Tanto o programa bi-dimensional DAN-W quanto o programa tri-dimensional DAN3D são considerados semiempíricos, pois requerem uma calibração de eventos anteriores e, além disso, utilizam diferentes soluções analíticas para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. A Figura 2.7 apresenta o funcionamento do fluxo equivalente para uma avalanche de rochas.



Figura 2-7 - Funcionamento do fluxo equivalente para uma avalanche de rochas (Mod. Hungr, 1995).

Por outro lado, o programa DAN3D foi criado por McDougall (2006) como sendo uma atualização do DAN-W, por meio de uma formulação lagrangeana tridimensional e incorporando o método numérico de SPH (*Smooth Particle Hydrodinamics*). Os programas DAN3D e DAN-W apresentam duas restrições: não fornecem energia de impacto, que é muito importante para o dimensionamento de estruturas de contenções; e consideram o movimento como um fluxo equivalente, onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas, o que significa uma severa restrição para obtenção da energia de impacto de fluxo de detritos.

Devido ao fato do fluxo de detritos, especialmente em regiões tropicais, apresentar blocos de rocha, as análises podem ser complementadas com a utilização de um programa de queda de blocos, como por exemplo o Rocfall, da Rocscience (Sacoto, 2017).

De acordo com Pelizoni (2014), o programa DAN-W considera a modelagem de fluxo confinado e a reologia do material pode ser escolhida. Por outro lado, o DAN-3D apresenta as seguintes características: mais de um material pode ser considerado durante a modelagem; diferentes reologias podem ser selecionadas numa mesma modelagem; a erosão pode ser modelada; todos os parâmetros de saída são acompanhados de valores a cada instante de tempo considerado na modelagem em adição aos valores máximos, os resultados são apresentados em mapas e formato GRD e de texto, o permite exportar resultados a outros programas (*Cad, Excel, Surfer*).

Além disso, do DAN3D apresenta outras características interessantes, a saber: simula a erosão do material; permite a escolha de diferentes modelos

reológicos (atrito, Voellmy, Bhingam, inelástico e Newtoniano); permite a distribuição dos esforços não-hidrostáticos e anisotrópicos; processa a modelagem sem malha de elementos, eliminando os problemas relativos à distorção durante grandes deslocamentos; e simula fluxos complexos em superfícies em 3D (Pelizoni, 2014).

2.5.1. Equações governantes de DAN-W e DAN3D

O programa DAN-W assegura a continuidade por meio de um sistema de blocos deformáveis de volume fixo, interpolando a partir de funções de suavização (*smoothing functions*). Já o programa DAN3D utiliza o método SPH (*smooth particle hydrodynamics*), que permite a simulação do movimento por meio de uma topografia real em três dimensões, sem que haja problemas de distorção das malhas de elementos e restrições associadas às grandes deformações. Este método divide o volume total em partículas distribuídas em colunas de referência que podem incrementar seu volume devido ao arraste (McDougall e Hungr, 2009). O método SPH adotado no programa DAN3D é esquematizado na Figura 2.8.



Figura 2-8 – Método SPH (Mod. Hungr, 1995).

Considerando o equilíbrio dinâmico nas direções x e y, as equações de balanço de momento são baseadas nas equações de profundidade média de Saint-Venant e de águas rasas para a coluna de referência. Desse modo, nas direções x e y, respectivamente, tem-se:

$$\rho h \frac{D v_x}{D t} = \rho h g_x - k_x \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_{zx} - \rho v_x E$$
(2.3)

$$\rho h \frac{D v_y}{D t} = \rho h g_y - k_y \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x}$$
(2.4)

Onde, os termos à esquerda da equação são acelerações locais da coluna de referência. Os termos à direita das equações são: i) primeiro termo: componente da força da gravidade; ii) segundo e terceiro termos: relacionados com as pressões; iii) quarto termo: só aparece na direção x (direção do fluxo) e corresponde à resistência ao cisalhamento na base e o arraste gerado pelo movimento.

Para o DAN-W, as colunas de referências representam blocos com um volume fixo. Por outro lado, no DAN3D as colunas de referência são distribuídas ao longo da massa que se movimenta.

Em relação ao material erodido, ambos os programas permitem considerálo pela passagem do fluxo no canal na modelagem. O DAN-W simula o material de arraste do dado de entrada referente à profundidade de erosão. O programa DAN3D simula o material de arrastre por meio da taxa de erosão estabelecida como dado de entrada, que pode ser obtida por tentativa e erro.

2.5.2. Reologia dos materiais

O DAN3D considera quatro modelos constitutivos para a representação do comportamento do material: plástico, atrito, Bingham, Voellmy e o programa DAN-W considera oito modelos constitutivos: plástico, newtoniano, turbulento, atrito, atrito Coulomb, lei da força, Voellmy e Bingham. Nesta pesquisa foram adotadas as reologias de atrito, Newtoniana e Voellmy para as modelagens do evento de fluxos de detritos no Córrego Rio Príncipe.

Modelo de atrito

O comportamento de atrito é comumente observado em materiais granulares. A resistência basal de atrito é proporcional à tensão normal do leito efetiva na base, que é a diferença entre a tensão normal ao leito total na base e a poropressão, dada por:

$$\tau_{ZX(z=b)} = -(\sigma_Z - u)_{(z=b)} \tan \varphi = -\sigma'_{Z(z=b)} \tan \varphi$$
(2.5)

Onde $_{\phi}$ é o ângulo de atrito basal dinâmico.

A poropressão pode ser relacionada com o esforço total usando a razão de poropressão, resultando em:

$$\tau_{ZX(z=b)} = -\sigma'_{Z(z=b)}(1-r_u)_{(z=b)}\tan\phi$$
(2.6)

A Equação 2.6 pode ainda ser simplificada incluindo somente uma variável dependente, o ângulo de atrito dinâmico ϕ_b , onde $\tan \phi_b = (1 - r_u)_{(z=b)} tan \phi$, obtendo-se:

$$\tau_{ZX(z=b)} = -\sigma'_{Z(z=b)} \tan \phi \tag{2.7}$$

O uso de uma razão de pressão de poros constante ou ângulo de atrito basal em massa assume resposta de carga que é intermediária entre as respostas puramente drenadas e não drenadas. As relações entre os vários parâmetros de atrito são mostradas na Figura 2.9.



Figura 2-9 – Modelo de Atrito.

De acordo com Pelizoni (2014), retroanálises dos eventos simulados demonstraram que, em muitos casos, a reologia de atrito superestima as velocidades e a extensão da deposição do material. Além disso, quando o atrito controla o fluxo, o movimento é lento e as partículas estão em colisão durante toda a trajetória.

Voellmy

Este modelo foi desenvolvido por Voellmy (1955) com o intuito de simular o comportamento de avalanches de neve. O modelo de resistência de Voellmy combina os modelos de turbulência e atrito. A resistência é calculada por:

$$\tau_{ZX} = -\left(\sigma'_Z \cdot f + \frac{p \cdot g \cdot v_X^2}{\xi}\right) \tag{2.8}$$

Onde σ_z : tensão total na base do fluxo; f : coeficiente de atrito; ρ : densidade do material; g : aceleração da gravidade; v_x : velocidade do fluxo na profundidade média; ξ : Fator de turbulência.

Dois parâmetros são utilizados, eles são o coeficiente de atrito f e um fator de turbulência ξ , que depende do quadrado da velocidade e da densidade do fluxo de detritos e que considera os fatores de resistência do fluxo dependentes da velocidade.

Em comparação com o modelo de Atrito, o modelo de Voellmy fornece melhores resultados de velocidade e distribuição da área de deposição (McKinnon et al., 2008). Para utilizar este modelo é necessário conhecer e/ou aproximar os parâmetros de peso específico, tensão cisalhante, viscosidade, ângulo de atrito interno e profundidade máxima de erosão (Valverde Sancho, 2016).

2.5.3. Características do DAN-W

O programa DAN-W usa um modelo unidimensional lagrangiano para a solução das equações de fluxo ao longo de um canal bidimensional definido pelo usuário. Os dados de entrada (*inputs*) necessários são:

- Parâmetros de controle: número de materiais, número de elementos e fator de forma de acordo com a seção transversal do canal (Valverde Sancho, 2016);
- ii. Topografia: perfil de elevação-distância que inclua duas linhas: o trajeto do movimento de massa e a superfície do material definindo o topo da camada instável. O perfil inserido no programa deve ser razoavelmente simplificado e conter entre 15 e 25 pontos para evitar instabilidade do modelo resultando em estimativas erradas dos parâmetros. A largura do canal também pode ser indicada para cada distância ou selecionar um canal unitário (Valverde Sancho, 2016);
- iii. Materiais: indicação da localização de cada material e suas propriedades de acordo com a reologia selecionada em cada caso (Valverde Sancho, 2016).

Os parâmetros de saída (outputs) são:

- i. Dados sobre o número de elementos;
- ii. Intervalo de tempo utilizado;
- iii. Tempo transcorrido desde o início da corrida;

iv. Tipo de configuração e fator de forma inserido.

De acordo com Valverde Sancho (2016), o programa também gera arquivos com informações de velocidade máxima, velocidade máxima na frente, 70 deslocamentos na frente, deslocamento traseiro, centro de gravidade, ângulo de viagem, *fahrböschung*, volume final, área inicial e área final. Além disso, os resultados podem ser utilizados para gerar gráficos que representam a simulação do movimento.

2.5.4. Características do DAN3D

O programa DAN3D é tridimensional e é uma extensão do DAN-W. Os dados de entradas considerados no programa são divididos em parâmetros de controle, materiais e topografia.

Os parâmetros de controle englobam a taxa de erosão, número de partículas, número de materiais, coeficiente de suavização de velocidade e coeficiente de resistência, coeficiente de suavização, tempo máximo da simulação, número de elementos computacionais.

Já os parâmetros de materiais incluem a inserção de arquivo com extensão. grd com a localização dos materiais escolhidos na análise e as respectivas propriedades reológicas (Valverde Sancho, 2016).

Por outro lado, os parâmetros de topografia consideram o modelo de elevação digital (MED) do local de estudo e a profundidade e localização da massa que se desloca. Estes arquivos devem ser inseridos com extensão.Grd.

Os parâmetros de saída são o volume final da massa envolvida, a velocidade do movimento, o ângulo de viagem, a espessura da camada erodida, e a distância total percorrida. Silva (2015) cita que dois relatórios são gerados, output.txt e finaloutput.txt e um conjunto de isocurvas, as quais contém o resultado das principais variáveis em cada um dos intervalos de tempo durante a modelagem e os valores máximos obtidos durante a simulação, o que torna possível obter indiretamente a área de deposição do fluxo analisado.

Os gráficos fornecidos pelo programa incluem a erosão, espessura máxima de deposição, espessura local do fluxo no nó analisado, velocidades máximas, vazão de pico, entre outros. Além disso, são obtidos gráficos de vazão, velocidade, e profundidade para cada intervalo de tempo definido na simulação, assim como da área de impacto.

2.6. Medidas de mitigação

As medidas de mitigação são fundamentais, uma vez que os desastres provocados pelos fluxos de detritos afetam a área povoada por meio dos processos de geração dos fenômenos causadores e sua propagação. Ademais, são capazes de reduzir o risco existente até um nível de risco residual. Morles (2009) cita que a primeira medida a ser feita para a prevenção dos efeitos dos fluxos de detritos catastróficos é a identificação das áreas que podem ser afetadas.

De acordo com Takahashi (2007), as áreas suscetíveis ao desastre de fluxo de detritos são, em geral, estreitas e não adequadas para instalação de grandes estruturas, sendo assim, faz-se importante uma integração das medidas ativas e passivas. A Figura 2.10 apresenta alguns exemplos dessas medidas.



Figura 2.10 – Exemplos de medidas passivas e ativas (Adap. Nunes e Rios Filho, 2009).

2.6.1. Medidas ativas

As medidas ativas agem no fator deflagrador, transporte e deposição, acarretando mudanças na magnitude e frequência. VanDine (1996) classifica as medidas em dois grupos: estruturas abertas e estruturas fechadas.

Nesse sentido, as medidas abertas incluem áreas de deposição não confinadas, impedimentos ao fluxo (*baffles*), paredes laterais (bermas), paredes de deflexão (bermas) e paredes terminais, bermas ou barreiras. A escolha de qual estrutura adotar dependerá de vários fatores tais como tipo de depósito e da estrutura local para a realização da obra, além das características topográficas. As estruturas abertas têm o objetivo de confinar o fluxo e canalizá-lo, enquanto estruturas fechadas possuem o objetivo de contê-lo. A Tabela 2.18 apresenta alguns exemplos de medidas ativas.

Função	Medida	
Redução de escoamento (<i>runoff</i>)	Reflorestamento Controle de descarga	
Redução de Erosão	Reflorestamento Uso de bioengenharia Drenagem Estabilização do talude Alargamento de canal Estabilização de leito de canal Desvio de <i>runoff</i>	
Controle de Descarga	Criação de reservatórios Alargamento de canal	
Controle de <i>Debris</i>	Bacia de deposição de detritos Bermas de deflexão Barreiras permeáveis ou interrompidas Túneis para detritos Túneis falsos para proteção Barragens permeáveis Barreiras rígidas e flexíveis	

Tabela 2-19 – Medidas ativas para mitigação de fluxo de detritos.



Figura 2.11 – Barragem Sabo impermeável (Fernandes, 2018).



Figura 2.12 – Barragem Sabo permeável (Mizuyama, 2018).



Figura 2.13 – Barreira Flexível - Campo Grande, Teresópolis, RJ.



Figura 2.14 – Estrutura auxiliar para contenção de blocos de rocha e troncos.

2.6.2. Medidas passivas

As medidas passivas não utilizam de estruturas físicas para prevenção, entretanto reduzem os impactos e consequências de uma eventual ruptura de níveis elevados de força e energia. As mesmas não evitam a ruptura, mas convivem com ela. Algumas dessas medidas são: relocação de infraestruturas e moradores, educação, sistemas de alerta, adoção de critérios de zoneamento e ocupação da área e mapeamento de áreas de risco de corridas de detrito (Nunes e Sayão, 2014).

Além disso, essas medidas são tanto técnicas quanto políticoadministrativas, logo, faz-se mister a utilização de normas e regulamentos territoriais, cartas de risco, planejamento local e regional do uso da terra, ademais, do plano emergencial.

Tanto as medidas passivas quanto as ativas devem ser utilizadas de forma complementar. Cada caso deve ser analisado particularmente, uma vez que nem sempre uma mesma solução será a mais adequada para casos parecidos.

3 Estudo de caso

Os deslizamentos de terra estão entre os agentes mais efetivos na construção da superfície terrestre. Presentes em regiões montanhosas de quase todas as partes do mundo, estes mecanismos apresentam grande importância nos movimentos de solo de relevos mais elevados até regiões mais planificadas. Os fluxos de detrito apesar de representarem um evento catastrófico, geram enorme curiosidade por parte dos pesquisadores.

Nesse sentido, 2011 foi um ano emblemático no Brasil devido à tragédia econômica, ambiental, social e financeira ocorrida após os eventos de movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro. Os fluxos de detritos ganharam destaque nos noticiários, principalmente pelas mortes de mais de 970 pessoas e mais de 20000 pessoas desabrigadas.

As localidades de Teresópolis, Bom Jardim, Sumidouro, São José do Vale do Rio Preto e Nova Friburgo, situadas na Região Serrana Fluminense, ao noroeste do estado do Rio de Janeiro e na área da Serra dos Órgãos, foram impactadas pela entrada de grandes massas de ar provenientes da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Esses fenômenos atmosféricos resultaram em episódios de forte tempestade, que acumularam um total de 297 mm de chuva durante a noite que transcorreu entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011. É importante ressaltar que os 297 mm de precipitação se sucederam a um volume ainda maior, registrado igual a 388 mm, ocorrido no mês anterior, dezembro de 2010, conforme relatado por Nunes e Sayão (2014).

De acordo com o DRM (2012), no início do mês de janeiro, houve um evento extremo de chuva que deflagrou múltiplos escorregamentos em diversas áreas dessa região decorrentes dos grandes volumes de água, os quais acarretaram o aumento da poropressão e, consequentemente, na perda de resistência do solo ao cisalhamento. Esse evento estendeu-se de 18 horas do dia 11 até 6 horas do dia 12 de janeiro.

Essa região é altamente suscetível a escorregamentos devido a fatores tais como hidrologia, ocupação do solo, geomorfologia e geologia. Ademais, os relevos são montanhosos, com rios hidraulicamente rápidos, marcados por

enchentes de curta duração, com grande capacidade erosiva e dinamicamente relacionados com a intensidade das chuvas.

A presente pesquisa selecionou o local para estudo situado em Teresópolis, uma das cidades mais afetadas pelo desastre, considerando as perdas humanas e econômicas. Apesar de bastante reconhecido, ainda faltam estudos sobre o *debris flow* do Córrego do Príncipe.

3.1. Fluxo de detritos do Campo Grande, no trecho do córrego do Príncipe

3.1.1. Localização da área de estudo

O contexto analisado encontra-se no Município de Teresópolis, mais especificamente no bairro do Campo Grande, abrangendo o trecho do córrego do Príncipe. Esta área compreende os bairros de Campo Grande, Posse e Cascata do Imbuí. O acesso ao vale é viável tanto a partir do centro de Teresópolis quanto de Petrópolis pela BR-495. Além disso, o córrego é um afluente do rio Paquequer, inserido na bacia do Piabanha, que por sua vez pertence à bacia do rio Paraíba do Sul (Cong et al., 2015).

A vista aérea do local foi obtida por meio da utilização do programa Google Earth (Figura 3-1). Algo importante a ser enfatizado é que o evento compreende cinco áreas importantes, as quais serão abordadas. A área de estudo foi definida no fuso 23 K entre as coordenadas UTM 702802 e 707999 Leste, e 7523280 e 7525452 Norte com Datum WGS84.



Figura 3-1 - Localização da área de estudo (Waldherr e Tupinambá, 2015).

3.1.3. Características geológicas-geomorfológicas da área

O vale do Príncipe está inserido no Domínio Montanhoso, o qual apresenta cotas superiores a 1000 metros, é caracterizado pela presença de declives rochosos em um vale estreito e assimétrico. As cotas mais altas da bacia superam os 1.700 m e as mais baixas estão em torno de 800 m (Waldherr e Tupinambá, 2014).

A cidade de Teresópolis apresenta dois tipos predominantes de formações rochosas. Elas são a Suíte Serra dos Órgãos e Unidade Santo Aleixo, compostas por granitóides tardio-colisionais transcorrentes, ambas do Neoproterozóico (Brasiliano II), conforme apresentado na Figura 3-2.



Figura 3-2 - Unidades geológicas da região do Rio Príncipe conforme Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro (adapt. CPRM/DRM-RJ, 2000, GEOPHI, 2021).

A bacia do Córrego do Príncipe situa-se em região de rochas da Suíte Serra dos Órgãos, Unidades Serra dos Órgãos composta por hornblenda-biotita granitóide de granulação grossa e composição de tonalítica a granítica, composição cálcio-alcalina (Nγ2s) com enclaves de paleodiques sanfibolíticos localizados. O pacote rochoso preserva texturas e estruturas magmáticas com foliação tangencial suprimpostas (CPRM, 2003).

Sobre a tectônica geral, o Rio de Janeiro está localizado na Provincia da Mantiqueira, a mais complexa província estrutural afetada pelo Ciclo Orogênico neoproterozóico/cambriano na América do Sul (CPRM, 2011).

Além disso, solos poucos espessos do tipo Cambissolo são propensos a gerarem escorregamentos translacionais, gerados no contato solo/rocha no topo superior das escarpas rochosas, uma vez que o aumento das poropressões reduz a coesão do material que cai pela encosta e gera uma energia cinética dissipada no tálus depositado na base da escarpa. Assim é promovido um movimento de massa secundário com volume muito superior ao movimento primário (Conq et al., 2015).

Geomorfologicamente a região é caracterizada por lineações de vales estruturais de cristas serranas, maciços graníticos, morros com desníveis altimétricos acentuados e alvéolos intermontanos. Essas feições refletem áreas de dobramentos remobilizados sob forma de blocos justapostos. A drenagem da Serra dos Órgãos se desenvolve sob o controle lito-estrutural, apresentando padrões paralelos e subparalelos (GEOPHI, 2021).

A cidade de Teresópolis está localizada no Arco Serra dos Órgãos do Domínio da Faixa Ribeira que se desenvolveu durante a Colagem Brasiliana quando ocorreu a amalgamação do Gondwana, e que se estende pela região litorânea do Sudeste do Brasil, ao longo dos Estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná.

3.1.4. Estratigrafia e parâmetros considerados

O relatório de sondagens mistas executadas no local indicou a presença de solo residual jovem e maduro pouco espesso, sobreposto a uma camada de rocha alterada, e rocha sã granito-gnáissica. Em alguns furos executados próximos às margens do Rio Iconha e Córrego do Príncipe também foi observada a presença de material aluvionar. Foram executadas oito sondagens mistas na região.

Foram adotados os parâmetros de análise sugeridos por Pelizoni (2014) no Caleme. Isso ocorreu devido à escassez de dados disponíveis, à proximidade da área onde ocorreu o fluxo de detritos e à semelhança com os materiais envolvidos no evento, que incluem solo transportado, solo residual jovem, rocha alterada e rocha sã.

A Figura 3-3 apresenta o perfil longitudinal da trajetória do fluxo de detritos Córrego do Príncipe.



Figura 3-3 – Perfil Longitudinal.

3.1.2. Histórico do evento

A área do Rio Príncipe impactada pelo evento extraordinário de janeiro de 2011 abrange todas as vertentes ao redor das nascentes e ao longo da trajetória do rio. Foram observados diversos tipos de movimentos, tais como deslizamentos translacionais nas interfaces entre solo e rocha, especialmente nas áreas mais elevadas das encostas.

Houve também deslizamentos rotacionais em terrenos naturais inclinados e em cortes situados em altitudes inferiores. Além disso, ocorreram rupturas planares e em forma de cunha nos maciços rochosos fraturados, bem como desprendimento e queda de fragmentos e blocos de rocha. Foram observados também fluxos de detritos (*debris flows*), que foram associados à erosão extremamente intensa das margens dos canais de drenagem naturais e do leito dos Rios Iconha e Príncipe.

Os fatores predominantes que desencadearam os deslocamentos de terra e os processos de drenagem foram a longa duração e a alta intensidade das chuvas extraordinárias caracteristicamente associadas à formação de *cumulonimbus,* resultando no fenômeno do desmonte hidráulico natural.

Sendo assim, os destinos dos movimentos iniciados nas encostas, sendo os de maior impacto aqueles classificados como *debris flows*, foram os Rios Príncipe e Iconha. O evento ficou bastante reconhecido pela mobilização de grandes volumes de solo, desenvolvimento ao longo de ambos os rios, alta capacidade de erosão e destruição e transporte de detritos a grandes distâncias em períodos muito curtos, além disso, com alta concentração de blocos e matacões com dezenas de metros cúbicos.

A corrida de detritos estendeu-se por aproximadamente 4,8 km entre as cotas de 1250 m e 900 m, com largura variando entre 40 e 180 m. A corrida deuse a partir de contribuições de material e fluxo proveniente de deslizamentos nas vertentes da bacia, derivados de inúmeros deslizamentos no contato solo-rocha. Conforme houve ganho de densidade, o fluxo torrencial passou a exumar o material de antigos depósitos de corrida disponíveis no local. A maior parte desses escorregamentos laterais foi classificada como movimentos rasos planares no contato do solo residual com a rocha inalterada e se concentraram na porção Noroeste da bacia (Waldherr et al., 2011).

À medida que o fluxo ganhou velocidade e viscosidade com o aporte desse material, o fluxo ao longo do canal passou a exumar material de antigos depósitos laterais de corrida de detritos. Grande parte do material da corrida ainda ficou retida nas zonas de estrangulamento do canal do córrego principal no início da chuva, o que formou grandes lagos em alvéolos efêmeros. Estas zonas de estrangulamento tiveram influência no represamento de material, além de reterem a água. Análises preliminares evidenciaram a presença de antigo depósito de fluxo de detritos na vertente direita do vale principal que se deslocou para o leito do rio por deslizamento rotacional, causando um represamento efêmero com altura mínima de 10 metros (Waldherr et al., 2011).

A partir de trabalhos de campo, Waldherr e Tupinambá (2014) citam que os movimentos de massa, tanto oriundos do ocorrido em 2011 quanto pretéritos, apresentam uma distribuição na maior parte das vezes associada ao lineamento de fraturas no sentido de orientação do fluxo. Uma parte considerável das cicatrizes de escorregamento na vertente Norte tem a trajetória orientada direção NW-SE e N-S. A Figura 3-4 apresenta as principais características mapeadas em campo, onde o círculo preto indica a área de depósitos transversais à calha principal e o círculo azul mostra o exemplo de mudança brusca no trajeto do movimento de massa . Aparentemente, a fração sólida dos depósitos ficou retida ainda longe do local de passagem da corrida de detritos, nos patamares superiores ou anteparos.



Figura 3-4 - Distribuição dos depósitos de fluxos de detrito e cicatrizes dos deslizamentos na Bacia do Córrego do Príncipe (Waldherr e Tupinambá, 2014).

A Figura 3-5 apresenta imagens de satélite registradas antes (03/2010) e depois do evento catastrófico de 2011 (09/2011), onde se destacam as cicatrizes das instabilidades das encostas.



Figura 3-5 - Imagens de satélite da região do Rio Príncipe antes e depois dos eventos de janeiro de 2011 (GEOPHI, 2021).

A Figura 3-6 mostra que cinco trechos se destacaram no local: o Trecho 1 corresponde à Zona de Iniciação, o trecho 2, a Zona de Transporte; o 3, a Zona



Figura 3-6 – Vista geral das instabilidades de encostas ao longo do Rio Príncipe em registro aéreo de janeiro de 2011 (GEOPHI, 2021).

Por meio de imagens aéreas obtidas logo após o evento no local do Campo Grande, é possível destacar os seguintes aspectos (GEOPHI, 2021):

- Cotas das encostas sofreram deslizamentos translacionais e rupturas planares de lascas e blocos formados por juntas de alívio e outras juntas dando início aos movimentos de corridas de detritos;
- ii. Os deslocamentos dos *debris flows* nos talvegues produziram erosão das laterais e fundo dos canais, incorporando mais material

ao movimento, inclusive blocos e lascas de rochas de diversos volumes;

- iii. Alguns depósitos de blocos foram formados em afloramentos de menor declividade nas cotas médias das encostas;
- iv. Blocos rochosos de volumes diversos foram transportados até as cotas mais baixas, iniciando o processo de deposição ao longo da calha e margens destruídas do Rio Príncipe;
- V. Os sedimentos finos e blocos de menores dimensões foram transportados a longas distâncias, atingindo extensão de cerca de 4,8 km;
- vi. Os blocos rochosos em movimento foram os maiores responsáveis pela destruição das margens e calhas do Rio Príncipe e Rio Iconha e das estruturas construídas no entorno. As lamas e sedimentos finos provocaram o assoreamento do canal e inundações, porém produziram danos muito inferiores aos provocados pelos blocos rochosos.

As Figura 3-7 a Figura 3-16 registram como ficou o local após os movimentos de massa.



Figura 3-7 – Cicatrizes de *debris flows* nos talvegues a montante da cabeceira do Rio Príncipe e deslizamentos translacionais nas cristas - Trecho 1 (GEOPHI, 2021).



Figura 3-8 – Detalhe da superfície de rocha exposta na cicatriz de ruptura e os blocos produzidos que se depositaram na base da cicatriz – Trecho 1 (Adapt. GEOPHI, 2021).



Figura 3-9 – Cicatrizes de deslizamentos com exposição de superfície rochosa e canal de d*ebris flow* com blocos – Trecho 2 (Adapt. GEOPHI, 2021).



Figura 3-10 – Zonas de transporte e início de deposição do *debris flow* ao longo do Rio Príncipe – Trecho 3 (Adapt. GEOPHI, 2021).



Figura 3-11 – Vista de montante para jusante do *debris flow* – Trecho 3 (GEOPHI, 2021).



Figura 3-12 – Zonas de transporte e deposição dos blocos rochosos do debris flow com cicatrizes de deslizamentos rotacional e translacional das encostas na margem direita – Trecho 4 (GEOPHI, 2021).



Figura 3-13 – Zona de deposição dos blocos rochosos do *debris flow* – Trecho 5 (GEOPHI, 2021).



Figura 3-14 – Zona de transporte com cicatrizes de rupturas de juntas de alívio produzindo mais blocos e lascas para *debris flow* – Trecho 2 (GEOPHI, 2021).



Figura 3-15 – Zona de deposição dos blocos de rocha transportados pelo debris flow – Trecho 3 (GEOPHI, 2021).


Figura 3-16 - Zona de deposição dos blocos de rocha na cota mais baixa do Rio Iconha – Registro de março de 2013 (GEOPHI, 2021).

Algumas premissas adotadas neste estudo foram desenvolvidas pela GEOPHI (2021), que estou em detalhes o evento do Córrego Príncipe e são as seguintes:

- A movimentação do fluxo de detritos pelo canal com deposição canalizada, na qual o depósito tende a assumir a forma do canal e livre com depósito em forma de leque ou cunha dependendo da topografia;
- ii. O evento de 2011 com chuvas de tempo de recorrência muito elevado (até 566 anos) representa um desmonte hidráulico raro, que associou rupturas por deslizamentos translacional e rotacional, quedas de blocos e *debris flows* que contribuíram para a destruição da região do Rio Príncipe;
- iii. Os movimentos de massa críticos são do tipo queda de blocos e debris flows com predominância de blocos rochosos;
- iv. Debris flow do tipo granular com 3 zonas, diferenciadas pelos tamanhos das partículas. A parte frontal (cabeça) com maior porcentagem de blocos de maior diâmetro, seguida pela parte central do fluxo (corpo) com material fino e detritos e parte final (cauda) com maior porcentagem de água do que de sedimentos, similar a um fluxo de lama, porém turbulento;
- v. Blocos rochosos são pouco ou não alterados;

- vi. A movimentação do fluxo de detritos pelo canal com deposição canalizada, na qual o depósito tende a assumir a forma do canal e livre com depósito em forma de leque ou cunha dependendo da topografia;
- vii. As trajetórias preferenciais críticas dos debris flows com blocos rochosos correspondem aos talvegues/calhas do Rio Príncipe e Rio lconha com deposição progressiva dos blocos ao longo do eixo da calha. Após a movimentação nos talvegues de cotas altas, a cabeça do debris flow atinge as cotas baixas e inicia a deposição dos blocos volumosos, seguida pela deposição dos blocos de menores volumes e finalizada pela deposição da lama com sedimentos e fragmentos menores. Depósitos são formados em trechos de transição retilíneocurvo e de estrangulamento da calha original do rio.

3.1.5. Variáveis estimadas do *debris flow* do Córrego do Príncipe

Volume Inicial Estimado

Para as simulações foi considerado que a zona de iniciação está situada entre as cotas 1400 a 1325 e próxima Rio Iconha conforme indicado na Figura 3-17.



Figura 3-17 – Locação em planta da Zona de Iniciação.

A cicatriz corresponde à área aproximada de 3500 m² conforme apresentado na Figura 3-18. O volume considerado para a simulação é representado pela área da cicatriz após o movimento de massa, multiplicada pela espessura variável de 0,5 m. O volume estimado do material escorregado foi considerado em função de observações e levantamento de campo.



Figura 3-18 – Estimativa do Volume Inicial.

Distância Percorrida e Área de Deposição

Conforme citado no Item 3.1.1, o material envolvido no evento de corrida de detritos do Córrego do Príncipe percorreu cerca de 4,8 km, abrangendo os bairros Campo Grande, Posse e Cascata do Imbuí.

4 Análises

Os principais parâmetros de fluxo de detritos foram avaliados neste capítulo. Para tal, foram utilizadas relações empíricas e análises numéricas com o programa DAN3D do evento de fluxo de detritos ocorrido em Teresópolis, Rio de Janeiro. Além disso, os dados encontrados foram comparados com os valores reais observados em campo. A Tabela 4-1 apresenta algumas características observadas no evento.

Tabela 4-1 - Parâmetros do fluxo de detritos do Córrego do Príncipe.

Cota Inicial (m)	Cota Final (m)	L observado	H (m)	α	H/L	Material
1400	825	4800	625	6,27	0,13	Granular

4.1. Parâmetros obtidos por meio de correlações empíricas

As correlações empíricas são interessantes para uma análise preliminar, uma vez que possibilitam estimar as magnitudes do evento. Elas podem ser utilizadas para avaliar zonas de potencial risco de ocorrência do movimento e as medidas de mitigação e convivência.

Alguns dos parâmetros avaliados por relações empíricas são: distância total percorrida, velocidade, volume, distância de deposição, descarga de pico e forças de impacto. Para o caso estudado, algumas relações empíricas não foram utilizadas por não serem as mais adequadas para obtenção dos parâmetros.

A Tabela 4-2 apresenta os resultados obtidos por meio das correlações empíricas consolidadas no Item 2.2.5. Somente se teve acesso aos valores reais da distância percorrida e área de deposição do material no dia do evento.

	Área de Deposição B (m²)	
Observado	284.000,00	
Calculado	Polanco (2010)	154.544,49
	Motta (2014)	963.517,70
	Volume V (m ³)	
Observado		nd
Calculado	Takahashi (1991)	33.922,69
	Rickenmann (1999)	107.637.012,41
	Polanco (2010)	3.817.251,20
	Motta (2014)	933.545,05
	Velocidade v (m/s)	
Observado		nd
Calculado	Sibnuy (1966)	6,46
	Kherkheulidze (1975)	5,42
	Zhang et al (1985)	166,56
	Rickenmann (1999)	90,39
	Vazão de Pico (m³/s)	
Observado		nd
Calculado	Takahashi(1991)	33.922,69
	Rickenmann (1999)	686.322,37
	Polanco (2010)	8.571,69
	Motta (2014)	321,49
	Distância Percorrida (m)	
Observado		4.800,00
Calculado	Hungr et al (2005)	5.681,82
	Rickenmann (1999)	7.663,87
	Polanco (2010)	4.712,33
	Motta (2014)	1.797,08
	Distância Percorrida de Deposição (m)	
Observado ⁽	1)	2.430,00
Calculado	Lorente et al (2003)	6.129,64
	Rickenmann (1999)	7.135,29
Obs.: nd: ná	ăo disponível; ⁽¹⁾ : Cong et al. (2015).	

Tabela 4-2 - Parâmetros Observados e Calculados por meio das relações empíricas.

Em relação à área de deposição, a relação proposta por Polanco (2010) apresentou um resultado que representa 55% do valor observado em campo. Enquanto a relação de Motta (2014) indicou um resultado de aproximadamente três vezes e meio (3,5) maior que o observado. Portanto, as relações empíricas para estimativa da área de deposição não conseguiram convergir para os valores reais do *debris flow*.

Foi possível observar uma grande variabilidade de resultados do volume final. Conforme citado por Pelizoni (2014), isto se deve a difícil previsão deste parâmetro, além dele ser dependente de diversas variáveis.

Para o caso do Córrego do Príncipe, não foram medidas as velocidades reais do fluxo de detritos, mas as equações de Sibnuy (1966) e Kherkheulidze (1975) apresentaram resultados compatíveis aos da literatura.

Assim como o volume total mobilizado, os resultados obtidos com as relações empíricas de descarga de pico apresentaram grande variabilidade.

Por outro lado, as relações de Polanco (2010) e Hungr *et al* (2005) forneceram valores iguais a respectivamente 98% e 118% da distância total real, observada no fluxo de detritos. Entretanto, os resultados obtidos por meio das relações de Motta (2014) e Rickenmann (1999) não foram compatíveis, resultando em valores de 40% e 159%, respectivamente, do valor observado em campo.

Os resultados obtidos por meio das relações propostas por Lorente et al. (2003) e Rickenmann (1999) para a distância percorrida de deposição foram de aproximadamente 224% e 261% do observado em campo, respectivamente.

Portanto, os resultados mais ajustados ao observados foram os obtidos por meio das relações empíricas de Polanco (2010) e Hungr *et al* (2005) para a distância percorrida pelo fluxo de detritos. Ademais, o volume como parâmetro de entrada em algumas relações empíricas gerou valores dispersivos dos reais observados.

4.2. Simulações numéricas com DAN3D

Para as análises numéricas com o programa DAN3D, foi necessário introduzir os mapas de topografia, erosão e de superfície de ruptura, além dos parâmetros de controle e as propriedades dos materiais.

Neste estudo foram desenvolvidas duas análises numéricas distintas. Os elementos de entrada para as simulações são: topografia, superfície de ruptura, mapa de erosão, parâmetros e reologia dos materiais. Os únicos elementos de entrada que foram variados para as análises foram os parâmetros e reologia dos materiais.

As duas análises numéricas distintas correspondem à:

i. Simulação 1 – Modelo Voellmy

Consistiu na adoção do modelo reológico de Atrito para a zona de iniciação, e de Voellmy para as zonas de transporte e deposição. A escolha das reologias se baseou no reportado por Ayotte et al. (1999), onde alguns autores sugerem que seja considerado o modelo de atrito para a ruptura inicial e, posteriormente, o modelo de Voellmy para simular o movimento de fluxo de detritos gerados por deslizamentos.

ii. Simulação 2 – Modelo Newton

Consistiu na adoção do modelo reológico de Atrito para a zona de iniciação, de Voellmy para a zona de transporte e de Newton para a zona de deposição. A escolha da reologia de Newton para a zona de deposição se baseou no observado em campo. De acordo com Conq et al. (2015), a inundação teve impacto em toda a região do vale do Príncipe, resultando em um período prolongado em que o rio manteve seu nível acima do normal, estendendo-se por várias semanas. Notavelmente, em algumas áreas situadas na zona de deposição, a camada de sedimentos mínima alcançou 0,9 metros e o nível de lama atingiu 3 metros a partir do nível da rua.

4.2.1 Elementos de entrada (*inputs*)

Topografia (Path Topography)

O levantamento topográfico da região após o ocorrido foi fornecido pela projetista de obras de proteção nos Rios Iconha e Príncipe, em arquivo formato DWG compatível com o programa AUTOCAD (GEOPHI, 2021). Para ser utilizado no DAN3D como modelo digital de elevação (MDE), este arquivo foi convertido para o formato GRD por meio do programa *SURFER*. A Figura 3.16 foi gerada por meio do programa, e representa as cotas de elevação do terreno, onde é possível observar que elas variam de 850 a 1450 metros.



Figura 3.16 – Topografia do caso do Córrego do Príncipe.

O *Surfer* é um programa de análise, modelagem e mapeamento bidimensional e tridimensional desenvolvido pela empresa *Golden Software*. Além disso, praticamente todos os aspectos do mapa são personalizáveis, como perfis, legendas, títulos e rótulos, falhas e linhas de corte ou mapas externos.

Para o caso analisado, foi utilizada uma topografia levantada na escala 1:5, apresentando curvas de nível a cada 5 metros, as quais contemplaram os bairros do Campo Grande, Cascata do Imbuí e Posse.

Superfície de ruptura (Source Depth)

Apesar da dificuldade em se determinar as coordenadas da zona de iniciação com precisão, a superfície de ruptura que deu origem ao fluxo de detritos do caso analisado foi estimada com o auxílio do programa *Google Earth* sendo complementada por meio do levantamento de campo da área, onde foi constatada a cicatriz de escorregamento inicial e estimado o volume em função da geometrização da cicatriz do deslizamento inicial. De forma similar ao levantamento topográfico, a superfície de ruptura foi igualmente convertida, com auxílio do *software Surfer*, em um modelo digital de elevação (MDE) para ser usada no DAN3D.

Mapa de Erosão (*Erosion Map*)

O mapa de erosão do Córrego do Príncipe foi definido em função dos materiais observados nas áreas de trajetória e impacto do movimento de massa. Os materiais foram definidos em função da avaliação de geologia e geomorfologia da área, das sondagens encontradas e do levantamento de campo.

De forma similar ao levantamento topográfico e da superfície de ruptura, o mapa de erosão foi igualmente convertido, com o auxílio do programa *Surfer*, em um modelo digital de elevação (MDE) para ser usada no DAN3D.

Materiais

A definição dos materiais foi realizada com base no levantamento de campo, das sondagens e da avaliação geológica-geomorfológica. Esta definição incluiu as propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais. No caso do Córrego do Príncipe, os parâmetros característicos adotados foram obtidos com base em eventos anteriores, levantamento de campo, sondagens e observação visual do material de depósito e material remanescente na área.

A divisão dos materiais foi a mesma para as duas Simulações 1 (Modelo Voellmy) e 2 (Modelo Newton). Eles foram definidos em função da zona da trajetória do movimento, sendo representados por:

- Material 1: Mistura de material que provocou a deflagração do movimento, concentrada na zona de iniciação;
- ii. Material 2: Material na zona de transporte do movimento;
- iii. Material 3: Material na zona de deposição do movimento;
- iv. Material 4: Material não envolvido no movimento.

No caso de estudo foram considerados os seguintes materiais:

- Material 1 (Zona de iniciação): Este material apresenta predominância de blocos rochosos, além de solo residual jovem saturado. A matriz rochosa é gnáissica;
- Material 2 (Zona de transporte): Constituído de blocos rochosos, solo residual maduro e jovem saturados, material aluvionar, incorporados ao movimento devido à erosão das margens do Corrégo do Príncipe e Rio Iconha;
- iii. Material 3 (Zona de deposição): Constituído de água, sedimentos finos e blocos de menores dimensões;
- iv. Material 4: Na área que não foi afetada pelo movimento, adotou-se solo residual. Este material não participou do movimento de massa, mas foi inserido como input no programa DAN3D.

Parâmetros e reologia

A Simulação 1 – Modelo Voellmy consistiu na adoção do modelo reológico de Atrito para a zona de iniciação, de Voellmy para a zona de transporte e deposição.

Na Simulação 2 – Modelo Newton se manteve o modelo reológico de Atrito para a zona de iniciação, de Voellmy para a de transporte, entretanto, o modelo de Voellmy foi substituído pelo modelo de Newton para a zona de deposição. Os parâmetros foram estimados com base nas sondagens, inspeção de campo e eventos e trabalhos pretéritos próximos da região (Pelizoni, 2014; Valverde Sancho, 2016). É importante destacar que a investigação geotécnica por meio de ensaios de amostras em laboratório não foi realizada à época dos estudos da projetista de obras de proteção, dificultando uma melhor avaliação das propriedades e comportamento dos materiais.

Os principais materiais foram definidos em função da zona da trajetória do movimento, sendo representados por:

- Peso específico (kN/m³): Foram adotados para rocha; mistura solo e água e solo residual, os valores de 22, 14 e 18 kN/m3, respectivamente;
- ii. Ângulo de atrito Ø (°): Foram adotados para rocha e solo residual, os valores de 22 e 18º, respectivamente;
- iii. Coeficiente de poropressão ru (adimensional): Nos materiais com reologia de atrito foram adotados valores variando de 0 a 1. Este coeficiente considera a poropressão atuante na base da superfície de ruptura;
- iv. Coeficiente de atrito f (adimensional): No material com reologia Voellmy foi adotado o valor de 0,15, seguindo as recomendações propostas para casos históricos com características similares;
- v. Coeficiente de turbulência ξ (m/s²): Define o fator de turbulência ou aceleração na equação de resistência basal do fluxo. Este coeficiente é considerado nas análises de materiais com reologia Voellmy e os valores foram adotados em função de registros históricos de casos simulados;
- vi. Ângulo de atrito interno Øint (°): Corresponde ao ângulo interno das partículas dos materiais considerados na simulação, sendo adotado 35°;
- vii. Profundidade máxima de erosão: Profundidade definida em função do material distribuído no mapa de erosão da área. Para os casos estudados, foi considerado um valor máximo de 1 m para a zona de iniciação e de 2,5 m para a zona de transporte e deposição em função das sondagens e levantamento de campo das áreas. Foi observada a ocorrência de depósito (tálus-colúvio) na base, o qual foi mobilizado ao ser impactado pela massa inicial, originada na crista;
- viii. Taxa de erosão: a taxa de erosão é calculada por meio de uma aproximação da profundidade normal erodida por metro unitário.

Neste estudo de caso, assim como nos casos estudados por Pelizoni (2014) e Valverde Sancho (2016), foram realizadas análises de sensibilidade, onde foram consideradas as seguintes faixas de variação de valores para os parâmetros:

- Ângulo de atrito (φ) para o modelo reológico de atrito (Frictional) variando entre de 32 e 35°;
- ii. Coeficiente de atrito (f) com variação entre 0,07 e 0,20;
- iii. Coeficiente de poropressão (ru) variando de 0,10 a 0,50;
- iv. Fator de turbulência (ξ) para o modelo Voellmy entre 150 e 500m/s²;
- v. Pesos específicos dos materiais variando entre 16 kN/m³ (material coluvional) a 30 kN/m³ (rocha sã granítica).

Tempo de Simulação

O tempo máximo de simulação foi definido em 1500 segundos para as Simulações 1 e 2.

4.2.2. Elementos de saída (outputs)

Os elementos de saída obtidos são a espessura da camada erodida, espessura do material depositado, velocidade do movimento, a distância total percorrida e o volume final para o tempo máximo de simulação de 1500 segundos (t = 1500 s). Ademais, também são obtidos os máximos resultados obtidos para cada um dos elementos de saída.

O software DAN3D fornece como resultado da modelagem dois relatórios principais que destacam as características centrais da simulação: *output.text* e *finaloutput.text*. Além disso, é viável obter um conjunto de isocurvas que apresentam os resultados das variáveis principais para cada intervalo de tempo pré-definido durante a simulação, bem como os valores máximos alcançados ao longo da simulação. Os dados de saída são armazenados em arquivos com formato GRD.

4.3. Resultados

4.3.1. Simulação 1 – Modelo Voellmy

Conforme citado no Item 4.2.2, foram realizadas análises considerando o modelo reológico de Voellmy na zona de transporte e erosão, as quais forneceram a distância percorrida pelo material de aproximadamente 3,2 km e cota final de deposição na El.900 m.

A Figura 4-1 apresenta a espessura do material depositado ao longo da zona de deposição. A espessura máxima do material no trecho de deposição é de 3,5 metros. Ainda foi observada a espessura de aproximadamente 2,0 metros em alguns trechos da zona de transporte.

A Figura 4-2 apresenta as velocidades atingidas pelo material no tempo de 1500 segundos. Foi possível observar que ela varia em função da topografia das três zonas da corrida de detritos, desde valores muito reduzidos e iguais a 0,4 m/s a valores mais elevados de até 2,2 m/s, incluindo velocidade de 1,0 m/s na zona de deposição.

A Figura 4 3 apresenta as descargas de pico fornecidas pelo programa. É possível identificar que elas também variam de valores muito reduzidos e iguais a 0,8 m³/s a valores de 3 m³/s em alguns trechos na zona de deposição.

A Figura 4-3 apresenta as descargas de pico fornecidas pelo programa. É possível identificar que elas também variam de valores muito reduzidos e iguais a 0,8 m³/s a valores de 3 m³/s em alguns trechos na zona de deposição.



Figura 4-1 – Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 1 – Modelo Voellmy.



Figura 4-2 –Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 1 – Modelo Voellmy.



Figura 4-3 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 1 – Modelo Voellmy.

4.3.2. Simulação 2 – Modelo Newton

Para o tempo de simulação de 1500 segundos foi obtida uma distância percorrida pelo material de aproximadamente 4,6 km. A cota de deposição final foi igual a 850 m. Conforme citado no Item 2.5.4, o programa forneceu o resultado dos principais parâmetros na paralisação em 1500 s e os valores máximos obtidos durante a simulação.

A Figura 4-4 apresenta a espessura do material depositado ao longo da zona de deposição que atingiu 5,4 m e cerca de 1 m na zona de transporte e erosão, respectivamente no tempo de paralisação da simulação (1500 segundos).

A Figura 4-5 mostra que a descarga de pico é mais elevada do meio para o final da zona de transporte e início da zona de deposição. Na zona de deposição, no t = 1500 s atingiu em média 7 m³/s, chegando a 8,5 m³/s no tempo de paralisação da simulação (1500 segundos).

A Figura 4-6 apresenta a espessura de erosão do material durante a simulação, que chega a 5,0 m em alguns trechos ao longo do início da zona de deposição. A erosão nas margens do Rio Iconha e Córrego do Príncipe atingiu aproximadamente 0,6 metros no tempo de paralisação da simulação (1500 segundos).

A Figura 4-7 mostra que a velocidade do fluxo é muito reduzida na paralisação da simulação, chegando em alguns trechos praticamente a zero. Entretanto, o fluxo de detritos atingiu velocidades de aproximadamente 5,5 m/s na zona de deposição no tempo de paralisação de 1500 segundos.

A Figura 4-8 a Figura 4-20 apresentam os máximos valores obtidos para os parâmetros de saída ao longo do caso analisado no tempo de simulação de 1500 segundos.

A Figura 4-8 mostra que a máxima descarga de pico obtida foi obtida logo a jusante da zona de iniciação do movimento, próximo das cotas de El. 1350,0 a 1400,0 m, chegando a 18 m³/s.

A Figura 4-9 indica que a máxima deposição chegou a 6,5 metros e ocorreu no trecho próximo do início da zona de deposição.

A Figura 4-10 mostra que a máxima velocidade atingida pelo fluxo de detritos é de 18 m/s, e ocorreu próxima do fim da zona de transporte e início da zona de deposição.



Figura 4-4 – Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-5 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-6 – Espessura de erosão do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-7 – Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-8 – Máxima Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-9 – Máxima Deposição do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-10 – Máxima Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 1500 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.

O programa forneceu que as maiores velocidades foram obtidas próximas do trecho final da zona de transporte e início da zona de deposição no tempo de aproximadamente 600 segundos de simulação.

Dessa forma, a Figura 4-11 a Figura 4-14 apresentam respectivamente a espessura, descarga de pico, espessura de erosão e velocidade, no tempo de simulação de 600 segundos.

Por sua vez, a Figura 4-15 a Figura 4-17 apresentam respectivamente os resultados dos valores máximos de descarga de pico, erosão e velocidade, obtidos no tempo de simulação de 600 segundos até próximo da zona final de transporte.



Figura 4-11 – Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-12 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-13 – Espessura de Erosão do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-14 – Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-15 – Máxima Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-16 – Máxima Espessura do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-17 – Máxima Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe (t = 600 s) – Simulação 2 – Modelo Newton.

4.4. Comparação dos resultados de campo, relações empíricas e simulações numéricas

Neste item são apresentados e comparados os resultados dos principais parâmetros de fluxo de detritos obtidos por meio das simulações com DAN3D e das relações empíricas, e dos valores reais observados para os eventos de fluxo de detritos do Córrego do Príncipe. A Tabela 4-3 apresenta a consolidação dos resultados obtidos por meio do DAN3D para o caso analisado no t = 1500 s.

Simulação	Tempo (s)	Descarga máxima (m³/s)	Velocidade máxima (m/s)	Deposição máxima (m)
1 - Voellmy	1500	3,2	3,2	3,5
2 - Newton	1500	18,0	19,0	6,5

Tabela 4-3 - Parâmetros do fluxo de detritos do Córrego do Príncipe.

Conforme citado no Capítulo 4, alguns autores sugerem que seja considerado o modelo de atrito para a ruptura inicial e, posteriormente, o modelo de Voellmy para simular o movimento de fluxo de detritos gerados por deslizamentos.

Entretanto, na Simulação 1 (Voellmy) a adoção deste procedimento não apresentou bons resultados e, desta forma, foi julgada como não satisfatória, uma vez que a corrida de detritos não atingiu a distância percorrida de 4,8 km conforme observada no evento (Lima et al, 2020, Waldherr et al., 2011; Waldherr e Tupinambá, 2014; Conq et al., 2015).

A distância percorrida pelo material e a velocidade do fluxo foram mais ajustadas ao observado em campo na Simulação 2 (Newton). Esta observação pode estar associada à influência dos Rios Iconha e Príncipe na grande distância percorrida pelo material no evento. Logo, a consideração de um material com reologia Newtoniana na zona de deposição apresentou os melhores resultados, sendo a mais representativa do evento de *debris flow* no Córrego Príncipe.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados obtidos por meio da utilização do DAN3D para a Simulação 2 (Newton) no t = 1500 s e compara com os resultados obtidos empiricamente e os observados em campo no evento.

Ntea de Deposição B (III) Observado ⁽¹⁾ 284.000,0 Calculado Polanco (2010) 154.544,5 Motta (2014) 963.517,7 DAN3D 200.000,0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) 0 Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 – 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 – 8,0 Distância Percorrida (m) 0		Ároa do Donaciaão P (m ²)	
Coservace 284.000,0 Calculado Polanco (2010) 154.544,5 Motta (2014) 963.517,7 DAN3D -200.000,0 Volume V (m³) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Obse			004.000.0
Calculado Polanco (2010) 154.544,5 Motta (2014) 963.517,7 DAN3D ~200.000,0 Observado Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 DAN3D 811.825,8 Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 – 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0d Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 – 8,0 Distância Percorrida (m) 2,5 – 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005)	Observado		284.000,0
Motta (2014) 963.517,7 -200.000,0 DAN3D -200.000,0 Volume V (m³) nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) 0 Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 90,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9	Calculado	Polanco (2010)	154.544,5
DAN3D 200.00,0 Volume V (m³) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 90,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 <td< td=""><td></td><td>Motta (2014)</td><td>963.517,7</td></td<>		Motta (2014)	963.517,7
Volume V (m³) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrid	DAN3D		~200.000,0
Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Obse		Volume V (m ³)	
Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Uzão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8	Observado		nd
Rickenmann (1999) 107.637.012,4 Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) 0 Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	Calculado	Takahashi (1991)	33.922,7
Polanco (2010) 3.817.251,2 Motta (2014) 933.545,1 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) 0 Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 DAN3D 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Rickenmann (1999)	107.637.012,4
Motta (2014) 933.545,1 811.825,8 DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) nd Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Polanco (2010)	3.817.251,2
DAN3D 811.825,8 Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Observado 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Motta (2014)	933.545,1
Velocidade v (m/s) Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	DAN3D		811.825,8
Observado nd Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Velocidade v (m/s)	
Calculado Sibnuy (1966) 6,5 Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) 0 Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	Observado		nd
Kherkheulidze (1975) 5,4 Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	Calculado	Sibnuy (1966)	6,5
Zhang et al (1985) 166,6 Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 DAN3D 2,5 - 8,0 Stância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Kherkheulidze (1975)	5,4
Rickenmann (1999) 90,4 DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Zhang et al (1985)	166,6
DAN3D 2,5 - 6,0 Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0		Rickenmann (1999)	90,4
Vazão de Pico (m³/s) Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m) 4.600,0	DAN3D		2,5-6,0
Observado nd Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m) 1.600,0		Vazão de Pico (m³/s)	
Calculado Takahashi (1991) 33.922,7 Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	Observado		nd
Rickenmann (1999) 686.322,4 Polanco (2010) 8.571,7 Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m) 1.797,1	Calculado	Takahashi (1991)	33.922,7
Polanco (2010) Motta (2014) 8.571,7 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 2,5 - 8,0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Rickenmann (1999)	686.322,4
Motta (2014) 321,5 DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Polanco (2010)	8.571,7
DAN3D 2,5 - 8,0 Distância Percorrida (m) 0 Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Motta (2014)	321,5
Distância Percorrida (m) Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0	DAN3D		2,5-8,0
Observado 4.800,0 Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m) 5.681,8		Distância Percorrida (m)	
Calculado Hungr et al (2005) 5.681,8 Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)	Observado		4.800,0
Rickenmann (1999) 7.663,9 Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)	Calculado	Hungr et al (2005)	5.681,8
Polanco (2010) 4.712,3 Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Rickenmann (1999)	7.663,9
Motta (2014) 1.797,1 DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Polanco (2010)	4.712,3
DAN3D 4.600,0 Distância Percorrida de Deposição (m)		Motta (2014)	1.797,1
Distância Percorrida de Deposição (m)	DAN3D		4.600,0
		Distância Percorrida de Deposição (m)	
Observado ⁽¹⁾ 2.730.0	Observado	(1)	2,730.0
Calculado Lorente et al (2003) 6 129 6	Calculado	Lorente et al (2003)	6 129 6
Rickenmann (1999) 7 135 3		Rickenmann (1999)	7 135 3
DAN3D nd	DAN3D		nd
Erosão (m)		Erosão (m)	na
Observado (1) 1.0.3.0	Observado	(1)	10-30
$\mathbf{D} \Delta \mathbf{N} \mathbf{S} \mathbf{D} \qquad \mathbf{S} \mathbf{O} = \mathbf{S} \mathbf{O}$		• •	1,0 - 3,0 3 0 _ 6 0
Obs : nd: não disponível: ⁽¹⁾ : Cong <i>et al</i> (2015)	Ohs · nd· né	ão disponível: ⁽¹⁾ : Cong <i>et al</i> (2015)	5,0 - 0,0

Tabela 4-4 – Parâmetros observados e calculados por meio das relações
empíricas e DAN3D.

Devido à dificuldade de monitoramento dos movimentos de massa rápidos e repentinos, como os fluxos de detritos, não há registro de alguns parâmetros característicos do fluxo. Entretanto, para os parâmetros reais do evento do Córrego do Príncipe, os resultados obtidos da modelagem mostram-se satisfatórios em relação aos valores calculados e àqueles estimados em função do observado nas áreas.

Em relação a área de deposição, o resultado obtido por meio da simulação com o DAN3D representou cerca de 70% do valor observado em campo. Por outro lado, o resultado obtido pelas relações empíricas de Polanco (2010) e Motta (2014) forneceram valores de 55 % e 339% do valor observado em campo, respectivamente. Logo, os resultados obtidos por meio das simulações são mais compatíveis ao observado em campo do que os obtidos por meio das relações empíricas para a área de deposição.

O resultado obtido para o volume final por meio da modelagem representou cerca de 87% do calculado por meio da relação proposta por Motta (2014). Devido à falta de informações e dificuldade de estimar o volume final observado em campo, não foi possível compará-lo com o calculado.

Para o caso do Córrego do Príncipe, apesar de não se ter tido acesso as velocidades reais do evento, os resultados das velocidades obtidas por meio das relações empíricas e pela simulação apresentaram resultados satisfatórios. Os resultados também indicaram que as velocidades decresceram à medida que o material foi depositado.

Os resultados obtidos por meio das relações empíricas para as descargas de pico foram muito elevados. Já para a simulação numérica, os resultados obtidos são satisfatórios quando comparados aos valores registrados na literatura. Assim como o volume final e a velocidade, não foi possível comparar a descarga de pico com os resultados observados em campo.

O parâmetro de distância percorrida pelo *debris flow* apresentou os melhores resultados. As relações de Polanco (2010) e Hungr *et al* (2005) ganharam destaque, uma vez que forneceram valores de respectivamente 98% e 118% da distância total real observada no fluxo de detritos. Além disso, o programa DAN3D forneceu resultados que representam cerca de 96% do valor real observado.

Os valores de erosão máxima calculados por meio do DA3D mostraram-se compatíveis com a erosão máxima estimada no evento.

As Figura 4-18 a Figura 4-23 apresentam uma comparação entre os valores obtidos com o DAN3D por meio da Simulação 2 e valores obtidos por meio das

relações empíricas propostas na literatura e os observados campo. É imperativo ressaltar que o programa DAN3D forneceu resultados compatíveis ao observado em campo. As relações empíricas que se mostraram mais adequadas para a estimativa dos parâmetros foram as propostas por Polanco (2010) e Motta (2014).



Figura 4-18 – Área de deposição do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-19 – Volume do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-20 – Velocidade do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-21 – Descarga de Pico do fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.


Figura 4-22 – Distância percorrida pelo fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.



Figura 4-23 Distância percorrida de deposição pelo fluxo de detritos Córrego do Príncipe – Simulação 2 – Modelo Newton.

4.5. Considerações Finais

De maneira geral, os resultados obtidos por meio das relações empíricas são coerentes com os valores observados no evento de fluxo de detritos do Córrego do Príncipe. Adicionalmente, o parâmetro volume final foi o principal responsável pela incompatibilidade dos resultados de algumas relações empíricas. Para melhores resultados, deve ser feita uma análise detalhada deste parâmetro.

No que tange as simulações numéricas, os resultados obtidos com o DAN3D são consistentes, apresentando o mesmo comportamento qualitativo nos eventos. Todos os dados de saída fornecidos pelo programa indicaram boa compatibilidade com os valores reais do evento.

5 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo expandir o atual entendimento sobre os fenômenos de movimentos em massa, especificamente os fluxos de detritos. As simulações desenvolvidas apresentaram resultados importantes para a prevenção, sobretudo para os casos que envolvam grandes distâncias percorridas pelo material envolvido no fluxo.

Para tal, foi avaliado o caso de corridas de detritos ocorrido no Córrego do Príncipe, localizado em Teresópolis na Região Serrana Fluminense. O evento foi investigado e analisado por meio de relações empíricas e simulação numérica com a utilização do programa DAN3D. Ao final, os resultados obtidos foram comparados aos dados reais do evento.

As principais atividades desenvolvidas na pesquisa foram:

- i. Caracterização geral do evento de fluxo de detritos do Córrego do Príncipe;
- ii. Consolidação das principais relações empíricas para estimativa de parâmetros dos fluxos de detritos;
- iii. Determinação dos principais parâmetros do evento, utilizando as relações empíricas e simulação numérica com o programa DAN3D;
- iv. Realização de análises e comparação dos resultados das abordagens empíricas e numéricas com os valores observados e verificados no caso analisado.

De maneira geral, pode-se concluir que:

- Os métodos empíricos e numéricos são uma ferramenta poderosa para estimar parâmetros necessários para a concepção e implantação de medidas de mitigação;
- ii. As relações empíricas que apresentaram os melhores resultados são as formuladas para fluxo granular com presença de água;
- iii. A principal causa do início dos escorregamentos está associada com a diminuição da resistência ao cisalhamento pelo aumento da poropressão, produto da saturação do material da encosta.

Em relação aos métodos de análise, pode-se concluir que:

- Os principais indicadores de boa adesão das análises foram a compatibilidade dos resultados da distância percorrida e área de deposição obtidas por meio da utilização programa DAN3D;
- ii. As relações empíricas propostas por Polanco (2010) e Hungr *et al* (2005),
 e a Simulação 2 Caso Newton desenvolvida por meio do programa
 DAN3D forneceram resultados muitos próximos da distância percorrida
 real do evento;
- iii. O modelo reológico de Voellmy é adequado para ser utilizado somente na zona de transporte do fluxo;
- iv. Por meio das Simulações 1 (Modelo Voellmy) e 2 (Modelo Newton) foi observado que na zona de deposição, a adoção do modelo reológico de Newton (Simulação 2) apresentou resultados mais ajustados ao observado em campo, uma vez que a distância percorrida pelo fluxo de detritos foi maior, sugerindo que os Rios Iconha e Príncipe foram os principais agentes responsáveis pelas grandes distâncias percorridas pelo fluxo;
- As simulações realizadas indicaram que a combinação de duas ou mais reologias apresentam resultados mais ajustados;
- vi. As velocidades e descargas de pico reduziram com o aumento da trajetória do movimento e do volume de material que se deposita.

5.1.

Sugestões para pesquisas futuras

Indicam-se como sugestões para futuros trabalhos:

- Ampliação da base de dados de parâmetros reológicos por meio da calibração de outros casos de estudo de *debris flow*;
- Elaboração de técnicas para relacionar os resultados obtidos nos programas com as forças de impacto, visando o dimensionamento de estruturas de mitigação e convivência;
- iii. Registro e acompanhamento de eventos naturais para uma simulação mais precisa dos casos de corridas de detritos brasileiros, permitindo a calibração dos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augusto Filho, O. (1992) Caracterização Geológico-Geotécnica voltada a Estabilização de Encostas: Uma Proposta Metodológica, Conf. Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1^a COBRAE, Rio de Janeiro, ABMS/ABGE, V. 2, p. 721-733.
- Bacchini, M.; Zannoni, A. (2003). Relations between rainfall triggering of debris flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). Natural Hazard Earth Sys, v. 3, p. 71-79.
- Beguería, S. (2009). Comparison of three landslide runout models on the Turnoff Creek rock avalanche, British Columbia. p. 243–247.
- Blackwelder, E. (1928). Mudflow as a geological agent in semi-arid mountains, Geological Society of America, Bulletin, 39, 465-484.
- Bovis, M. J.; Jakob, M. (1999). The role of debris supply consitions in predicting debris flows activity. Earth Surface Processes and Landforms, n. 24, p. 1039-1054.
- Budetta, P.; Riso, R. (2004). The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy). Bulletin of Engineering Geology Environmental, v. 63, p. 293-302.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow lansdlides and debris flows. Geografiska Annaler, n. 62, p. 23-27.
- Campbell, R. H. (1974). Debris flows originating from soil slips during rainstorms in southern California. Journal of Engineering Geology, v. 7, p. 339-349.
- Capra, L.; Macías, L; Scott, K.M; Ambrams, M; Garduño-Monroy, V.H. (2002). Debris avalanches and debris flows transformed from collapsed in the Trans-Mexican Volcanic belt, Mexico-Behaviour, and implications for hazard assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 113, p. 81-110.
- Chen, H.; Lee, C. F. (2000). Numerical simulation of debris flows. Canadian Geotechnical Journal, v. 37, p. 146-160.
- Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill.
- Conq, M.; Silveira, C. S.; Dourado, F. (2015). 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, v. 37 n. 1, p. 11.

- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, v. 33, p. 260-271.
- Costa, J. E. (1984) "Physical Geomorphology of debris flows", 25p.
- Coussot, P.; Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Reviews, v. 40, p. 209-227.
- CPRM (2011). Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:1.000.000. Serviço Geológico do Brasil.
- Crosta, G. B.; Dal Negro, P. (2003). Observation and modeling of soil slip-debris flow iniciation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event. Natural Hazard and Earth System Sciences, v. 3, p. 53-69.
- Crosta, G. B.; Calvetti, F; Imposimato, S.; Roddeman, D.; Frattini, Paolo; Agliardi,F. (2001). Granular flows and numerical modeling of landslides. Debrisfall assessment in mountain catchments for local end-users, p. 71.
- Crozier, M. J. (1997). The climate-landslide couple: A southern hemisphere perspective. In: MATTHEWS, J. A., et al. Rapid Mass Movement as a Source of Climatic Evidence for the Holocene: Palaeoclimate Research. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, v. 19, p. 333-354.
- Cruden, D. M. (2003). The first classification of landslides. Enviromental & Engineering Geoscience, v. IX, n. 3, p. 197-200.
- Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). Landslides Types and Processes, Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, Washington, USA, p. 36-75.
- Dana, J. D. (1876). Manual of Geology. New York: Ivison, Blakeman, Taylor.
- DRM (2012). Análise do risco a escorregamento na Rua Canário, alto do Caleme, em Teresópolis, Laudo de Vistoria Técnica do Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – DRM-RJ, 3p.
- Fairchild, L. H.; Wigmosta, M. (1983). Dynamic and volumetric characteristics of the 18 May 1980 lahars on the Toutle River, Washington. Proceedings of the Symposium on Erosion Control in Volcanic Areas. Washington: Technical Memorandum of Public Works Research Institute. p. 131-153.
- Garcia-Ruíz, J. M.; Beguería, S.; Lorente, A.; Martí, C. (1999). Comparing debris flow relationships in the alps and the Pyrenees. DAMOCLES - Debrisfall assessment in mountain catchments for local end-users., p. 10.
- GEOPHI (2021) Projeto Executivo de Barreiras Flexíveis de Proteção Rio
 Príncipe Teresópolis, Memória de Cálculo GPHI-PJ143-MC-415-03-001 R0, GEOPHI Engenharia, Rio de Janeiro, 85p.

- Govi, M.; Sorzana, P. F. (1980). Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount in Piedmont basins (North-Western Italy). Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, n. 14, p. 43-61.
- Gramani, M. F. (2001). "Caracterização geologico-geotécnica das corridas de detritos ("DebrisFlows") no Brasil e comparação com alguns casos internacionais", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 372 p.
- Griswold, J. P.; Iverson, R. M. (2007). Mobility statistics and automated hazards mapping for debris flows and rock avalanches. Scientific Investigation Report 2007 - 5276. USGS, p. 68.
- Heim, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben (Landslides and Human Lives). Translated by N. Skermer. Bitech Press, Vancouver, 1989.
- Hungr, O.; Mcdougall, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers & Geosciences, n. 35, p. 978-992.
- Hungr, O.; Morgan, G. C.; Kellerhals, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remediation measures. Canadian Geotechnical Journal, n. 21, p. 663-677.
- Hungr, O.; Evans, S. G; Bovis, M.J; Hutchinson, J.N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience, v. VII, n. 3, p. 221-238.
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, V. 11, N.2, p. 167-194.
- Hungr, O. (2005). Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris flow Hazards and Related Phenomena. : Praxis-Springer, p. 47-61.
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: BONNARD, C. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides.
 A.A. Balkema, Rotterdam: v. 1, p. 3-36.
- IPT (1988). Programa Serra do Mar: Carta Geotécnica da Serra do Mar na Folhas de Santos e Riacho Grande, SCT, Relatório nº 26.504/88.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. Review of Geophysics, v. 35, n. 3, p. 245-296.
- Jakob, M.; Hungr, O. (2005). Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Heidelberg: Praxis-Springer.
- Jakob, M.; Weatherly, H. (2003). A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. Geomorphology, v. 54, p. 137-156.

- Jakob, M. (2005). Debris-flow hazard analysis", Debris-flow Hazards and Related Phenomena, Praxis, Cap. 17
- Kanji, M. A., Cruz, P. T. da, Massad, F., & Araujo Filho, H. A. de. (1997). Basic and Common Characteristics of Debris Flows. 2nd Panamerican Symposium on Landslides. 2nd COBRAE. Rio de Janeiro.
- Lang, T. E.; Martinelli JR, M. (1979). Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow, Part 2: Avalanche modeling and parameter error evaluation. Journal of Glaciology, v. 22, n. 86, p. 117-126.
- Marchi, L.; D'Angostino, M. (2004). Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. Earth Surface Processes and Landforms, v. 29, p. 207-220.
- Marchi, L.; Arattano, M.; Deganutti, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). Geomorphology, v. 46, p. 1-17.
- Massad, F.; Cruz, P. T.; Kanji, M. A.; Araujo Filho, H.A. (1997). Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments., II COBRAE, vol. 1, p. 213-222.
- Massad, F.; Kanji, M.A.; Cruz, P. T.; Uehara, K.; Ishitani, H.; Araujo Filho, H. A. (1998). DebrisFlows em Cubatão, S. Paulo: Obras de Controle e Impactos Ambientais. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, v. 2, p. 1265-1272.
- Mcclung, D. M. (2001). Superelevation of flowing avalanches around curved chanel bends. Journal of Geophysical Research, v. 106, p. 16489-16498.
- Mcdougall, S.; Hungr, O. (2004). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. Canadian Geotechnical Jornal, n. 41, p. 1084- 1097.
- Mcdougall, S. (2006). A New Continuum Dynamic Model for the Analysis of Extremely Rapid Landslide Motion Across Complex 3D Terrain. PhD thesis, The University of British Columbia, Canadá.
- Mckinnon, M.; Hungr, O.; Mcdougall, S. (2008). Dynamic analyses of canadian landslides. Proceeding of the 4th Canadian Conference on Geohazards. Québec.
- Mizuyama e Kobashi (1992) Mizuyama, T.; Kobashi, S. (1992). Prediction on debris flow peak discharge. INTERPRAEVENT, v. 4, p. 99-108.
- Morles, M. S. (2009). "Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH. Aplicación a casos reales". Teses doctora, universidad Politécnica de Madrid.

- Motta, H. P. (2014). Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros. Tese de Doutorado. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- Nakatani, K.; Satofuka, Y.; Mizuyama, T. (2007). Development of KANAKO, a wide use debris flow simulator equipped with GUI. Proceedings of 32nd Congress of IAHR. Venice, Italy, p. 10.
- Nunes, A. L. L. S. (2023). Comunicação pessoal
- Nunes, A. L. L. S.; Rios Filho, M. G. (2009). Barreiras flexíveis para mitigação de fluxo de detritos. V Conferência Brasileira de Encosta COBRAE, 10p.
- Nunes, A. L.L.S.; Sayão, A. (2014). Debris flows e técnicas de mitigação e convivência. 14 Congresso Nacional de Geotecnia. Covilhã, Portugal. p. 83-123.
- O'brien, J. S.; Julien, P. Y. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 119, n. 2, p. 244-259.
- Ortigão, J.A.R.; Sayão, A.S.F.J. (2004). Handbook of Slope Stabilisation, Springer-Verlag, 540p.
- Pelizoni, 2014 Pelizoni, A. (2014). Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense. Dissertação de mestrado. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- Pierson, T. (1986). Flow behaviour of channelized debris flows, Mt. St. Helens. In: ABRAHAMS, A. D. Hillslope processes. Boston: Allen and Unwin, p. 1173-1176.
- Pitman, E. B., C. C. Nichita, A. K. Patra, A. C. Bauer, M. Bursik, And A. Webb (2003), A model of granular flows over an erodible surface", Discrete Contin. Dyn. Syst., 3, 589–599.
- Polanco, L. S. E. (2010). Correlações empíricas para fluxos de detritos, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 110p.
- Rickenmann, D.; Zimmermann, M. (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology, v.8, p. 175-189.

Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. n. 9, p. 47–77.

- Valverde Sancho, A. M. (2016) Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais. Dissertação de Mestrado, Depto de Engenharia Civil, PUC-RIO, 146p.
- Scheidl, C.; Rickenmann, D. (2010). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. Earth Surface Processes and Landforms, v. 35, p. 157-173.

- Shelby, M. (1993). Hillslope materials and proceses. 2nd. ed. Oxford: Oxford University Press.
- Silva, J. (2015). Análise numérica do fluxo de detritos do Córrego D'Antas. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- Starkel, L. (1979). The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. Geographia Polanica, v. 41, p. 13-20.
- Stiny, J. (1910). Die Muren. Verlag der Wagner´schen Universitäts-buchhandlung, Innsbruck. Debris flow (English translations by M. Jakob and N. Skermer, 1997), EBA Engineering Consultants, Vacouver, Canada.
- Takahashi, T.; Nakagawa, H. (1991). Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, v. 44, n. 3, p. 12-19.
- Takahashi, T. (2007). Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. London: Taylor & Francis Group.
- VanDine, D. F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering", Ministry of Forests Research Program, Victoria, British Columbia, Canadá, 68 p
- VanDine, D. F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering, Ministry of Forests Research Program, Victoria, British Columbia, Canadá, 68 p.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Process, Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, USA, p. 11-33.
- Waldherr, F. R.; Tupinambá, M (2014). A dinâmica dos depósitos pretéritos na deflagração de corridas de detritos em eventos catastrófi cos: a bacia de drenagem do córrego do Príncipe, Teresópolis – RJ. In: VIII Simposio Latinoamericano de Geografi a Física & IV Simposio Iberoamericano de Geografi a Fisica, P 1185-1192.
- Waldherr, F. R.; Tupinambá, M.; Motta, M.; Amaral, C.; Fraifeld, F.; Paixão, R. (2011). Megadesastre Da Serra Fluminense: Zonas De Estrangulamento Durante Corrida De Detritos No Córrego Do Príncipe, Em Teresópolis. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 12, 2011, Nova Friburgo: SBG.
- Waythomas, C. F.; Miller, T. P.; Beget, J. E. (2000). Record of Late Holocene debris avalanches and lahars at Iliamna volcano, Alaska. Jounal of Volcanology and Geothermal Research, n. 104, p. 97-130.

- Wieczorek, G. F.; Sarmiento, J. (1983). Significance of storm intensity-duration for triggering debris flow near La Honda, California. Geological Society of America. Boulder, CO, p. 5-289.
- Yu F. C; Chen C. Y; Chen T. C; Hung F. Y; Lin S. C (2006). A GIS process for debris flow potentially endangered areas delineating. Natural Hazards, n. 37, p. 169-189.