

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Leonardo de Almeida Ferreira

**Forças de Impacto de Fluxos de
Detritos em Estruturas de Proteção**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Orientador: Alberto de Sampaio Ferraz J. Sayão
Coorientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro

Novembro de 2023



Leonardo de Almeida Ferreira

Forças de Impacto de Fluxos de Detritos em Estruturas de Proteção

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof.^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Coorientadora

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof.^a Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Rogério Luiz Feijó

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Willy Alvarenga Lacerda

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Tiago de Jesus Souza

Universidade Federal de São Carlos

Rio de Janeiro, 29 de novembro de 2023.

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

Leonardo de Almeida Ferreira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2004, exerce a profissão de Engenheiro Civil desde então, pós-graduado em Auditoria, Avaliações e Perícias de Engenharia pelo Instituto de Pós-Graduação IPOG (2016). Mestre em Engenharia Civil – Geotecnia pela PUC-Rio (2020). Atua na execução de obras civis e de infraestrutura, bem como na execução de projetos estruturais e de fundações. Trabalhou nas obras do Projeto de Transposição do Rio São Francisco e Canal Adutor do Sertão Alagoano. Desempenhou atividades na Secretaria Nacional de Programas Urbanos do Ministério das Cidades e na Secretaria de Infraestrutura Hídrica do Ministério da Integração Nacional. Atualmente é Analista de Infraestrutura do Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos com exercício no Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, aprovado em concurso público desde 2008, ocupa o cargo de Chefe de Representação na Região Sudeste do MIDR desde 2020. Ingressou em 2020 no curso de Doutorado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo tese de doutorado na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a Movimento de Massas.

Ficha Catalográfica

Ferreira, Leonardo de Almeida

Forças de Impacto de Fluxos de Detritos em Estruturas de Proteção / Leonardo de Almeida Ferreira; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; coorientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes. – 2023.

v., 197 f.; il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil e ambiental - Teses. 2. Forças de Impacto. 3. Fluxo de Detritos. 4. Barragens Sabo. 5. Região Sudeste, Brasil. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Aos que acreditam no poder da
Educação.

Agradecimentos

Agradeço àqueles que me presentearam com minha existência, meus pais Sônia e Carlos.

Agradeço a minha mãe por me proporcionar condições para que eu pudesse desenvolver minhas faculdades físicas, afetivas, intelectuais e espirituais.

Agradeço a minha irmã Isabel pelos momentos de apoio e incentivo em minha caminhada.

Agradeço ao amigo Márcio pelo companheirismo e contribuições.

Agradeço aos meus orientadores Sayão e Anna Laura, além de mentores acadêmicos, considero vocês grandes amigos. Gratidão pelo carinho, apoio e confiança.

Agradeço aos Professores Ana Cristina, Feijó, Willy e Tiago pela generosidade em participarem desta banca de doutorado. Além de estender meus agradecimentos à Luana, por sempre me socorrer administrativamente na PUC-Rio.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, por me franquear tanto conhecimento.

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

Por fim, dedico esta conquista a meus amores Anamaria, Antônio e Trovão, por me proporcionarem o amor, a paz e o equilíbrio necessários nesta caminhada.

Epa Babá!

Resumo

Ferreira, Leonardo de Almeida; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Orientador); Nunes, Anna Laura Lopes da Silva (Coorientadora). **Forças de Impacto de Fluxos de Detritos em Estruturas de Proteção**. Rio de Janeiro, 2023. 197p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese insere-se no contexto de diversos trabalhos realizados pelo grupo de estudo de Movimentos de Massas formado pelas Instituições PUC-Rio e COPPE-UFRJ, liderado pelos Professores Alberto Sayão e Anna Laura Nunes. O trabalho busca abordar formas de se obter as forças de impacto de fluxos de detritos brasileiros, principalmente advindas da parcela referente aos blocos de rocha (parcela não viscosa) do movimento. O tema ainda necessita de metodologias bem definidas e aplicáveis a casos que, recentemente, apresentam-se como objeto de estudo pelas comunidades técnicas e acadêmicas, no esforço de se mitigar e/ou conviver com movimentos de massa, cada vez mais presentes nas cidades brasileiras. Assim, propõe-se uma metodologia que utiliza ferramentas numéricas como o DAN-3D e o ROCFALL para se obter as forças de impacto dos blocos rochosos em estruturas de contenção estáticas e dinâmicas, levando em consideração parcelas viscosas e forças de atrito, bem como, compara-se a metodologia proposta com as métodos empíricos já existentes. Para obtenção dos resultados buscou-se a aplicação da metodologia em três casos recentes, de importantes fluxos de detritos ocorridos no Brasil, situados na Serra do Mar, mais precisamente nos municípios de Nova Friburgo e Teresópolis no Rio de Janeiro e em São Sebastião em São Paulo.

Palavras-chave

Forças de Impacto; Fluxos de Detritos; Barragens Sabo; DAN3D; Rocfall.

Abstract

Ferreira, Leonardo de Almeida; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor); Nunes, Anna Laura Lopes da Silva (Advisor). **Impact Loads of Debris Flows on Protection Structures**. Rio de Janeiro, 2023. 197p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis is part of the context of several works carried out by the study group of Mass Movements formed by the Institutions PUC-Rio and COPPE-UFRJ, led by Professors Alberto Sayão and Anna Laura Nunes. The work seeks to address ways of obtaining the impact forces of Brazilian debris flows, mainly arising from the portion referring to the rock blocks (non-viscous portion) of the movement. The subject still needs well-defined methodologies applicable to cases that, recently, have become an object of study by the technical and academic communities, in an effort to mitigate and/or coexist with mass movements, increasingly present in Brazilian cities. Thus, a methodology is proposed that uses numerical tools such as DAN-3D and ROCFALL to obtain the impact forces of rock blocks in static and dynamic containment structures, taking into account viscous portions and frictional forces, as well as the proposed methodology is compared with existing empirical methods. To obtain the results, we sought to apply the methodology in three recent cases of important debris flows that occurred in Brazil, located in the Serra do Mar, more precisely in the municipalities of Nova Friburgo and Teresópolis in Rio de Janeiro and in São Sebastião in São Paulo.

Keywords

Impact Forces; Debris Flows; Sabo Dams; DAN3D; Rocfall.

Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Considerações Iniciais	22
1.2.	Objetivos do Estudo	24
1.3.	Estrutura do Trabalho	26
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1.	Movimentos de Massa	27
2.2.	Fluxo de Detritos	32
2.2.1.	Características dos Fluxos de Detritos	33
2.2.2.	Deflagradores dos Fluxos de Detritos	37
2.2.3.	Classificação e Tipos de Fluxo de Detritos	39
2.2.4.	Fluxo de Detritos iniciados por deslizamentos	42
2.2.5.	Geomorfologia dos Depósitos dos Fluxos de Detritos	43
2.3.	Medidas de Contenção e/ou Convivência	46
2.3.1.	Medidas Ativas de Proteção	47
2.3.2.	Medidas Passivas de Mitigação	60
2.4.	Comentários Finais	62
3	Modelos de Forças de Impacto	63
3.1.	Classificação dos Modelos	64
3.1.1.	Modelos Hidráulicos	64
3.1.1.1.	Modelos Hidráulicos – Hidrostáticos	65
3.1.1.2.	Modelos Hidráulicos – Hidrodinâmicos	66
3.1.1.3.	Modelos Hidráulicos – Mistos	79
3.1.2.	Modelos Empíricos	81
3.1.3.	Modelos de Impacto de Corpos Sólidos	83
3.1.4.	Modelos de Ondas de Colisão	84
3.2.	Impacto de Blocos Rígidos	85
3.3.	Cenários Diversos	87

3.4. Considerações do Uso dos Modelos de Força de Impacto	90
3.5. Método da Energia	93
4 Métodos Numéricos de Fluxos de Detritos	96
4.1. Considerações Iniciais	96
4.2. Principais Programas Disponíveis	97
4.3. Características do DAN3D e DAN-W	99
4.4. Equações Governantes dos DAN-W e do DAN3D	101
4.4.1. Reologia dos Materiais	103
4.4.2. Dados de Entrada dos Programas	106
4.5. Características do Rocfall	106
4.5.1. Diferentes Tipos de Movimento	107
4.5.2. Dados de Entrada e Saída do Rocfall	108
5 Metodologia e Casos de Estudo	109
5.1. Considerações Iniciais	109
5.2. Metodologia	110
5.3. Fluxo de Detritos	113
5.3.1. Agente Deflagrador (Potencial Gatilho)	113
5.3.2. Localização	115
5.3.3. Geologia	125
5.3.4. Características dos Fluxos de Detritos	128
5.4. Resultados das Análises dos Fluxos de Detritos do Córrego D' Antas e Rio Príncipe	136
5.5. Resultados das Análises dos Fluxos de Detritos Instrumentados em Ensaios de Campo	138
5.5.1. Fluxos de Detritos em Pieve di Alpago – Itália	139
5.5.2. Fluxos de Detritos em Veltheim – Suíça	141
6 Simulações e Análises	144
6.1. Considerações Iniciais	144
6.2. Modelos Existentes na Literatura	145
6.2.1. Análises de Modelos de Força de Impacto de Fluxos de Detritos	145
6.2.2. Análises de Energia de Impacto de Fluxos de Detritos	155

6.2.3. Considerações Finais das Análises de Modelos da Literatura	156
6.3. Resultados das Simulações Numéricas de Testes de Campo	157
6.4. Simulação Numérica DAN3D Toque-Toque Grande e Resultados de Córrego D' Antas e Rio Príncipe	157
6.4.1. Dados de Entrada para a Simulação do Toque-Toque Grande	158
6.4.2. Resultados da Simulações	159
6.5. Simulação Numérica ROCFALL do Toque-Toque Grande/Rio Príncipe e Resultados de Córrego D' Antas	162
6.5.1. Dados de Entrada para a Simulação do Toque-Toque Grande e Rio Príncipe	163
6.5.2. Resultados das Simulações	165
6.6. Comparação e Análise dos Resultados	167
7 Conclusões e Sugestões	181
8 Referências Bibliográficas	187

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxo de Detritos Rio Príncipe, Teresópolis - RJ (CONQ et al., 2015).	24
Figura 2 – Tipos de movimentos de massa (Adapt. VARNES, 1978).	29
Figura 3 – Formação de fluxo de detritos (GIDES, 2018).	32
Figura 4 – Zonas Características dos fluxos de detritos (Adapt. de DNV, 2013).	34
Figura 5 – Zonas da trajetória com fluxo canalizado (VANDINE,1996).	35
Figura 6 – Perfil de fluxo de detritos com frente granular (PIERSON,1986).	37
Figura 7 – Movimentos iniciados nas margens do canal de fluxo em São Sebastião, SP.	43
Figura 8 – Deposição de fluxo de detrito por diminuição de inclinação e perda de canal (GIDES, 2018).	44
Figura 9 – Tipo de deposição de Fluxos de Detritos (Adapt. JABOYEDOFF et al., 2004).	46
Figura 10 – Fluxo de detritos e deslizamentos em Susukizuca, Japão, 1982 (JICA, 2015).	48
Figura 11 – Implantação de medidas ativas em 1983 após os eventos ocorridos em 1982 em Susukizuca, Japão (JICA, 2015).	48
Figura 12 – Drenagem superficial com canaleta chumbada na rocha no Morro Dois Irmãos, Rio de Janeiro (NUNES & SAYÃO, 2014).	50
Figura 13 – Drenos profundos em encosta com concreto projetado (MOTTA, 2014).	51
Figura 14 – Esquemático de Estabilização de Canais (Adapt. IKEDA, 2015).	52
Figura 15 – Estrutura de desvio em túneis falsos, Áustria (Acervo ALLS Nunes).	53
Figura 16 – Diagrama esquemático de estruturas de retenção em função da energia de impacto e custo (YOSHIDA, 1999).	54
Figura 17 – Sequência de muros rígidos para controle de <i>debris flow</i> , Rio de Janeiro, RJ (Acervo ALLS Nunes).	55

Figura 18 – Barragens Sabo de seções plena e vazada, Cubatão, SP (KANJI et al, 2009).	56
Figura 19 – Barragens Sabo de seção plena, Nagano, Japão (2015).	56
Figura 20 – Barragens Sabo de seção vazada, Nagasaki, Japão (2015).	57
Figura 21 – Barragens Sabo parcialmente vazada, Yamanashi, Japão (2015).	57
Figura 22 – Exemplo de intervenções com canais e Barragens Sabo (JICA, 2015).	58
Figura 23 – Barreira Dinâmica ou Flexível, BR 040, Rio de Janeiro (Nunes, 2013).	59
Figura 24 – Barreira Dinâmica em canal de fluxo, Petrópolis, RJ (Acervo Maccaferri, Brasil).	59
Figura 25 – Barreira dinâmica após interceptação de fluxo (Acervo Maccaferri, Brasil).	60
Figura 26 – Modelos de forças de impacto de fluxos de detritos.	64
Figura 27 – Modelo de impacto de <i>debris flows</i> em parede vertical (ARMANINI et al., 2011).	67
Figura 28 – Evolução da onda de impacto com o tempo e variação da força de impacto (CANELLI et al., 2012).	70
Figura 29 – Relação entre força de impacto de fluxos de detritos e Número de Froude, obtidos em campo e laboratório (HUBL et al., 2009).	72
Figura 30 – Padrões de carregamento para impactos de fluxos de detritos (HUBL et al., 2009).	74
Figura 31 – Impacto de fluxo de detritos medidos com sensores (CUI et al., 2015).	75
Figura 32 – Padrões simplificados de carregamento de impacto de fluxos de detritos em estruturas (CUI et al., 2015).	76
Figura 33 – Relação entre o coeficiente empírico α e o Número de Froude (CUI et al., 2015).	77
Figura 34 – Padrão de carregamento do fluxo de detritos viscoso (HE et al., 2016).	78
Figura 35 – Padrão de carregamento do fluxo de detritos diluído (HE et al., 2016).	78
Figura 36 – Esquema do modelo de VAGNON & SEGALINI (2016).	81
Figura 37 – Modelo de múltiplos impactos dos detritos (KWAN, 2012).	89

Figura 38 – Modelo de impacto de queda de bloco e galgamento da barreira (KWAN, 2012).	90
Figura 39 – Aplicação de fluxo equivalente (Adapt. HUNGR, 1995).	100
Figura 40 – Método numérico Lagrangeano baseado em SPH (HUNGR, 1995).	101
Figura 41 – Interpretação do SPH em profundidade média (Adapt. MCDOUGALL, 2006).	102
Figura 42 – Relação entre os parâmetros utilizados no modelo de atrito (MCDOUGALL, 2006).	104
Figura 43 – Fluxograma da metodologia de desenvolvimento da pesquisa.	112
Figura 44 – ZCAS, situação Climática no evento de 2011 (BAGGIO & HORN, 2011).	113
Figura 45 – Maiores volumes de chuva registrados no país (G1 - GLOBO, 2023).	114
Figura 46 – Fatores deflagradores das precipitações no Litoral Norte de SP (G1 - GLOBO, 2023).	115
Figura 47 – Imagem de satélite antes do evento no Morro Duas Pedras, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2023).	116
Figura 48 – Imagem de satélite após o evento no Morro Duas Pedras, delimitação parcial, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2023).	117
Figura 49 – Imagem de satélite antes do evento no Rio Príncipe, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2023).	118
Figura 50 – Imagem de satélite após o evento no Rio Príncipe, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2023).	118
Figura 51 – Mapa com delimitação da extensão e zonas da corrida de detritos com os diferentes processos geomorfológicos do Rio Príncipe (CONQ et al., 2015).	119
Figura 52 – Imagem de satélite do talvegue do Fluxo de Detritos do Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).	120
Figura 53 – Imagem de satélite da bacia de contribuição do Fluxo de Detritos do Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).	121
Figura 54 – Imagem de satélite antes do evento no Toque-toque Grande, capturada em 2022 (GOOGLE EARTH, 2023).	121

Figura 55 – Imagem de satélite depois do evento no Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).	122
Figura 56 – Cachoeira do Toque-toque Grande, local de iniciação do fluxo de detritos.	123
Figura 57 – Trecho do canal em concreto.	124
Figura 58 – Trecho do canal com pequenos muros de pedra argamassada.	124
Figura 59 – Fraturas subverticais do maciço (GEOMECANICA, 2011).	125
Figura 60 – Localização das principais áreas do desastre da Serra Fluminense em 2011, com destaque para a área do evento Rio Príncipe com contorno na cor laranja (LIMA et al., 2020).	126
Figura 61 – Mapa Geológico da Serra Fluminense do Estado do Rio de Janeiro (LIMA et al., 2020).	127
Figura 62 – Mapa Geológico da Região de São Sebastião, SP (Adapt. DIAS NETO, 2001).	128
Figura 63 – Trajetória do fluxo de detritos Córrego D’Antas originada na cota 1.300m (GEOMECANICA, 2011).	129
Figura 64 – Movimento de massa do Córrego D’Antas (PELIZONI, 2014).	130
Figura 65 – Rio Príncipe após passagem do fluxo de detritos (GEOPHI, 2021).	131
Figura 66 – Deslizamento adjacente ao talvegue do fluxo de detritos.	133
Figura 67 – Residência atingida pelo fluxo de detritos.	134
Figura 68 – Zona de iniciação do fluxo de detritos de Toque-toque Grande.	135
Figura 69 – Canal do fluxo de detritos de Toque-toque Grande.	135
Figura 70 – Seção transversal crítica do fluxo de detritos Córrego D’Antas (SACOTO, 2017).	138
Figura 71 – Campo de ensaios de fluxos de detritos de Pieve di Alpago, Itália (SEGALINI et al., 2016).	139
Figura 72 – Vista do canal antes do ensaio de fluxo de detritos induzido (SEGALINI et al., 2016).	140
Figura 73 – Vista do canal depois do ensaio de fluxo de detritos induzido (SEGALINI et al., 2016).	140
Figura 74 – Esquema da barreira flexível instrumentada com células de carga (SEGALINI et al., 2016).	141
Figura 75 – Campo Experimental de Veltheim (BUGNION et al., 2011).	142

Figura 76 – Localização da barreira e instrumentação do Campo de Veltheim (BUGNION et al., 2011).	143
Figura 77 – Perfil topográfico do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.	159
Figura 78 – Características dos blocos de rocha do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.	164
Figura 79 – Encosta com exposição do maciço rochoso 5 anos após fluxo de detritos de 2011, Rio Príncipe.	164
Figura 80 – Variação da velocidade simulada no Rocfall em função da distância percorrida para os fluxos de detritos estudados.	166
Figura 81 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.	169
Figura 82 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Córrego D' Antas.	170
Figura 83 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.	171
Figura 84 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.	171
Figura 85 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas.	172
Figura 86 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.	173
Figura 87 – Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Toque-Toque Grande.	174
Figura 88 – Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Córrego D'Antas.	175
Figura 89 – Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Rio Príncipe.	176
Figura 90 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Toque-Toque Grande.	176

Figura 91 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Córrego D' Antas. 177

Figura 92 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Rio Príncipe. 178

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação proposta por VARNES (Adapt. VARNES, 1978).	29
Tabela 2 – Classificação proposta com base na velocidade (Adapt. CRUDEN & VARNES, 1996).....	30
Tabela 3 – Classificação com base na velocidade (Adapt. CRUDEN & VARNES, 1996).....	33
Tabela 4 – Classificação de fluxos de detritos (POLANCO, 2010, adapt. JAKOB & HUNGR, 2005).....	41
Tabela 5 – Estimativas do fator empírico k para diferentes modelos (HUBL et al., 2009).....	73
Tabela 6 – Forças de impacto de fluxos de detritos na Rússia (WU et al., 1993).	82
Tabela 7 – Características dos modelos de esferas moles e leis de forças (Adapt. STEVENS & HRENYA, 2005).....	84
Tabela 8 – Modelos de força de impacto de blocos (SACOTO, 2017).....	85
Tabela 9 – Resumo dos diferentes modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos (SACOTO, 2017).....	92
Tabela 10 – Propostas de estimativa da pressão dinâmica de detritos (Adap. KWAN, 2012).....	93
Tabela 11 – Principais programas numéricos para análises de fluxos (Adapt. LUNA, 2011).....	98
Tabela 12 – Resultados das simulações do Fluxo de Detritos Córrego Dantas. .	136
Tabela 13 – Resultados das simulações do Fluxo de Detritos Rio Príncipe (MORAES, 2023).....	136
Tabela 14 – Forças registradas pelas células de carga da barreira flexível (SACOTO, 2017).	141
Tabela 15 – Velocidades e pressões registradas pelas células de carga da barreira flexível (SACOTO, 2017).	143
Tabela 16 – Valores dos fatores empíricos de impacto adotados para os modelos hidrostáticos (Grupo 1) e hidrodinâmicos (Grupo 2).	146

Tabela 17 – Velocidade e altura dos fluxos de detritos em função da trajetória percorrida.....	147
Tabela 18 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Córrego D’ Antas.	148
Tabela 19 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Córrego D’ Antas.	149
Tabela 20 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Córrego D’ Antas.	150
Tabela 21 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Rio Príncipe.....	150
Tabela 22 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Rio Príncipe.....	151
Tabela 23 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Rio Príncipe.....	152
Tabela 24 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Toque-Toque Grande.....	152
Tabela 25 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Toque-Toque Grande.....	153
Tabela 26 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Toque-Toque Grande.....	154
Tabela 27 – Massa de impacto dos fluxos de detritos obtidos com a abordagem modificada.	156
Tabela 28 – Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.	158
Tabela 29 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Córrego D’Antas.	160
Tabela 30 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Córrego D’Antas.	160
Tabela 31 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Rio Príncipe.....	161
Tabela 32 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Rio Príncipe.....	161
Tabela 33 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Toque-Toque Grande.....	162

Tabela 34 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Toque-Toque Grande.....	162
Tabela 35 – Características dos materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall - Toque-Toque Grande.....	165
Tabela 36 – Características dos materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall - Rio Príncipe.....	165
Tabela 37 – Valores de velocidade instantânea e energia cinética obtidas com Rocfall para os fluxos de detritos estudados.	167
Tabela 38 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.	168
Tabela 39 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D’Antas.....	169
Tabela 40 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.	170
Tabela 41 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande..	171
Tabela 42 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D’Antas.....	172
Tabela 43 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.	172
Tabela 44 – Forças de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Toque-Toque Grande.	173
Tabela 45 – Forças de Impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Córrego D’Antas.	174
Tabela 46 – Forças de Impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Rio Príncipe.....	175
Tabela 47 – Forças de Impacto em barreiras rígidas obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Toque-Toque Grande.	176
Tabela 48 – Forças de Impacto em barreiras rígidas obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Córrego D’ Antas.	176
Tabela 49 – Forças de Impacto obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Rio Príncipe.....	177

Lista de Símbolos

V	-	volume final
V_{SED}	-	volume de sedimentos
L	-	distância percorrida
AC	-	área de contribuição
H	-	diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final
g	-	aceleração da gravidade
r	-	raio de curvatura do canal
θ	-	gradiente de superelevação
α	-	inclinação do canal
Δh	-	altura de superelevação
γ	-	peso específico do material
K	-	fator de forma do canal
μ	-	viscosidade dinâmica do fluxo
h	-	espessura do fluxo
Sd	-	declividade de deposição
Er	-	taxa de erosão
Vf	-	volume final
Vi	-	volume inicial
S	-	distância percorrida
$P_{m\acute{a}x}$	-	pressão máxima de impacto do fluxo de detritos
k	-	fator empírico ou fator de impacto
ρ_{Mu}	-	densidade do fluxo de detritos
h_{Mu}	-	altura do fluxo de detritos
v	-	velocidade do fluxo de detritos
α	-	fator empírico ou fator de impacto
A	-	área da seção transversal do fluxo
$F-$	-	força de impacto adimensional
ψ	-	parâmetro de ajuste e usualmente
Fr	-	número de Froude
Pf	-	força de impacto da lama
ρ_f	-	densidade da lama no fluxo de detritos
v_f	-	velocidade da lama do fluxo de detritos
Pg	-	força de impacto dos pedregulhos
ρ_s	-	densidade dos pedregulhos no fluxo de detritos
E	-	módulo de elasticidade
Φ	-	volume de fração sólida do fluxo de detritos
Q	-	descarga de água/sedimento
$ V $	-	velocidade média
h	-	altura da estrutura
$Fstat$	-	força ativa do solo
$Fdyn$	-	força dinâmica
$Fdra$	-	força de arraste

D_{\max}	-	partícula de maior diâmetro do fluxo
U	-	velocidade do bloco
K	-	fator de rigidez da estrutura
M	-	massa do bloco
J	-	momento de inércia
L	-	comprimento da estrutura
E	-	energia de impacto
T	-	duração de impacto do fluxo de detritos
V_{DF}	-	volume do fluxo de detritos
a	-	aceleração
σ	-	tensão normal
τ	-	tensão cisalhante
φ	-	ângulo de atrito dinâmico
ξ	-	parâmetro de turbulência

1 Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O interesse no objeto deste projeto de pesquisa teve sua origem em 2015, motivado por meio de uma cooperação técnica entre os governos brasileiro e japonês visando a troca de experiências sobre a gestão de desastres naturais, alvo de diversas discussões entre os envolvidos na pesquisa (orientado e orientadores).

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

Para POLANCO (2010), a previsão de determinados tipos de movimentos de massa ou escorregamentos em encostas ainda é um grande desafio para engenheiros geotécnicos, devido às inúmeras variáveis envolvidas neste tipo de fenômeno. No caso específico de fluxo de detritos, estes condicionantes são ainda mais complexos, pois ocorrem em espaços de tempo muito curtos com poucos sinais prévios de instabilidade. São movimentos súbitos de difícil previsão, deflagrados por fortes precipitações, em curtos períodos de tempos ou por precipitações leves em períodos prolongados, ou ainda por sismos.

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

Bem descrito por SACOTO (2017), os casos mais relevantes de fluxos de detritos até 2010 no Brasil eram os da região Serrana de Cubatão em São Paulo e Serra das Araras no Rio de Janeiro. Em janeiro de 2011, devido às intensas precipitações, ocorreu a tragédia na Região Serrana do Rio de Janeiro, com vários movimentos de massas que resultaram em danos catastróficos.

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

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

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

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

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

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

Esta tese insere-se no contexto de mais de dez trabalhos realizados pelo grupo de estudo de Fluxos de Detritos, formado pelas Instituições PUC-Rio e COPPE-UFRJ e liderado pelos Professores Alberto Sayão e Anna Laura Nunes.

Assim, propõe-se uma metodologia que utiliza ferramentas numéricas como o DAN3D e o ROCFALL para se obter as forças de impacto dos blocos rochosos em estruturas de contenção estáticas e dinâmicas, levando em consideração parcelas viscosas e forças de atrito, bem como, compara-se a metodologia proposta com os métodos empíricos já existentes.

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

Com esta pesquisa de Doutorado, espera-se contribuir para a melhor compreensão e consolidação das forças de impacto dos *debris flows* brasileiros, tal como o evento ilustrado na Figura 1, além de fornecer arcabouço teórico e prático para a tomada de decisão à respeito de implantação de medidas mitigadoras de perdas materiais e, principalmente, de vidas humanas.



Figura 1 – Fluxo de Detritos Rio Príncipe, Teresópolis - RJ (CONQ et al., 2015).

1.2. Objetivos do Estudo

No intuito de contribuição técnico-acadêmica para o maior entendimento das forças de impacto produzidas por *debris flows* apresenta-se esta pesquisa dividida nas seguintes etapas: revisão bibliográfica, nacional e internacional; estudo de fluxos de detritos ocorridos no Brasil; simulação das forças de impacto por meio de métodos numéricos, utilizando *softwares* comerciais disponíveis tais como, DAN3D e ROCFALL; avaliação das forças de impacto dos fluxos de detrito brasileiros, com objetivo final de obter parâmetros para o dimensionamento de estruturas de contenção contra *debris flows* utilizadas na mitigação de danos materiais e proteção de vidas humanas.

Em síntese, esta tese guarda como objetivo principal o estudo dos esforços de impacto de fluxos de detritos, utilizando-se de métodos existentes na literatura e análises numéricas com os programas DAN3D e ROCFALL, aplicadas aos casos históricos dos fluxos de detritos da Região Serrana do Rio de Janeiro e Litoral Paulista, ocorridos em janeiro de 2011 e fevereiro de 2023.

Para atingir a finalidade principal desta pesquisa, tem-se:

- (a) Compilação e análises dos diferentes modelos de força de impacto;
- (b) Análise e comparação das simulações realizadas com DAN3D considerando diferentes reologias, especialmente a de atrito e de Voellmy;
- (c) Análise e comparação das simulações realizadas com o programa ROCFALL com a abordagem tradicional da energia;
- (d) Recomendações para o dimensionamento de estruturas de impacto para fluxos de detritos.

1.3. Estrutura do Trabalho

Para melhor entendimento dos objetivos propostos e resultados obtidos, esta tese foi dividida em sete capítulos, sendo este primeiro o capítulo de introdução ao tema, importância do estudo e apresentação dos objetivos e aspectos formais da pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de diversos conceitos de movimentos de massas, salientando os fluxos de detritos com as características principais e seus agentes deflagradores. Também são apresentados os principais parâmetros que caracterizam os fluxos de detritos tais como volume, velocidade, descarga pico, distância percorrida, área de deposição e taxa de erosão. Por fim são repassadas as principais medidas de mitigação e convivência com os *debris flows*.

O Capítulo 3 descreve os diferentes modelos de força de impacto existentes na literatura com suas classificações, ressaltando-se os modelos hidráulicos. São considerados os modelos de impacto de blocos e os diferentes cenários de impacto que podem acontecer durante um fluxo de detritos, além de considerações sobre o uso dos modelos de força de impacto. Aborda-se, ainda, o método da energia cinética tradicional ao final do capítulo.

No Capítulo 4 são apresentados os conceitos para a modelagem numérica de fluxos de detritos, incluindo breve descrição dos programas disponíveis no mercado. Ênfase é dada aos programas usados nesta pesquisa, com suas características, dados de entrada e saída.

Já no Capítulo 5 apresenta-se a metodologia e os casos de estudo de fluxos de detritos ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro e Litoral Paulista. Os fluxos de detritos estudados são o de Córrego D'Antas, Rio Príncipe e Toque-toque Grande, salientando as características de cada um deles e os resultados das análises anteriores realizadas por outros autores.

O Capítulo 6 destina-se à exposição dos resultados das análises. Por meio de diversas simulações numéricas utilizando-se diferentes reologias e programas. Os resultados das análises são comparados entre si e com modelos hidráulicos e hidrostáticos propostos na literatura.

No Capítulo 7 são relatadas as conclusões, bem como a síntese das contribuições desta pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica fundamental ao tema da tese. Sendo abordadas as classificações de movimentos de massa, a terminologia referente ao movimento do tipo Fluxo de Detritos, as etapas e os mecanismos que as desencadeiam e um resumo histórico mundial deste tipo de movimento.

2.1. Movimentos de Massa

De acordo com GIANI (1992), entende-se por movimento de massa, qualquer deslocamento de solo e/ou rocha resultante do aumento da tensão cisalhante atuante ou na diminuição da resistência ao cisalhamento da massa de solo, rocha ou mistura de ambos, sendo deflagrada ou não, por fatores naturais. Estes movimentos são alvos de diversos estudos. Importantes em escala macro, como, na evolução de aspectos geomorfológicos e hidrológicos de regiões, planejamento urbano e convivência com risco, quanto escala micro, para verificação de estabilidade de uma encosta/talude para implantação de um empreendimento, por exemplo.

Conforme bem colocado por MOTTA (2014), visto a extrema diversidade de enfoques, a complexidade dos processos envolvidos e a multiplicidade de ambientes de ocorrência, percebe-se uma grande dificuldade de análise e síntese dos movimentos de massa. A terminologia não é unificada, o que torna o conhecimento dos eventos, bem como sua catalogação, ainda mais complexos.

Com relação a nomenclatura, movimento de massa (*Landslide*) é comumente confundido com escorregamento (*slide*). Os escorregamentos representam grande parte dos movimentos de massa, porém não abrangem todos os tipos de movimento. Tais dificuldades de terminologia são evidenciadas na adoção de um sistema classificador, consequência da falta de definições básicas dos fenômenos envolvidos e da ausência de uma nomenclatura padronizada, conduzindo a uma grande quantidade de sistemas de classificação. GUIDICINI & NIEBLE (1984) destacam os seguintes autores que propuseram classificações de movimentos de

massa: Baltzer (1875), Heim (1882), Penck (1894), Molitor (1894), Braun (1908), Howe (1909), Almagià (1910), Stini (1910), Terzaghi (1925), Pollack (1925), Ladd (1935), Hennes (1936), Sharpe (1938), Terzaghi (1950), Varnes (1958), Penta (1960), Freire (1965), Ter-Stepanian (1966), Vargas (1966), Costa Nunes (1969), Skempton & Hutchinson (1969) e Záruba & Mencl (1969).

Destaca-se ainda a regionalidade da maioria das classificações, influenciadas pelas condições do ambiente em que o autor a elaborou.

Conforme GUIDICINI & NIEBLE (1984), Sharpe em 1938 avalia as classificações anteriores e correlaciona, de maneira simplificada, o tipo e a velocidade de movimentação com a natureza do material da massa em movimento, associando-o aos ambientes geomorfológico e climático, antecipando as características mais importantes na avaliação de um evento. Sua utilização no meio físico brasileiro é limitada, em função da ausência das características físicas e mecânicas do movimento, e por ser uma classificação desenvolvida para ambientes de clima temperado. Apesar das observações, a referida classificação já demonstra a preocupação de avaliar outros sistemas de classificação já desenvolvidos, associando a eles características relevantes dos movimentos.

A classificação mais utilizada internacionalmente foi proposta por VARNES (1958) e ampliada posteriormente (VARNES, 1978), baseando-se no tipo de movimento e no material escorregado. Como tipo de movimento, tal classificação subdivide-se em 5 grupos: queda (*fall*), tombamento (*topples*), escorregamento (*slide*), expansão lateral (*lateral spread*) e fluxo (*flow*). Um sexto grupo inclui a combinação de dois ou mais movimentos, denominado movimento de massa complexo. Em termos de materiais, subdivide-se em dois grupos: rochas e solos, estando os solos divididos em detritos e solo. Na Tabela 1 pode-se visualizar a classificação proposta por VARNES (1978), ilustrada na Figura 2.

Tabela 1 – Classificação proposta por VARNES (Adapt. VARNES, 1978).

Tipo de Movimento		Tipo de Material		
		Rocha	Solo	
			Grossoiro	Fino
Quedas		Blocos de rocha	Detritos	De Terra
Tombamentos		De blocos de rocha	Detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacionais	Poucas unidades	Desmoronamento de rocha	Desmoronamento de detritos
	Translacionais	Muitas unidades	Deslizamento de blocos de rocha	Deslizamento de detritos
Espalhamentos laterais		De blocos de rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos		De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
			(rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipo de movimentos				

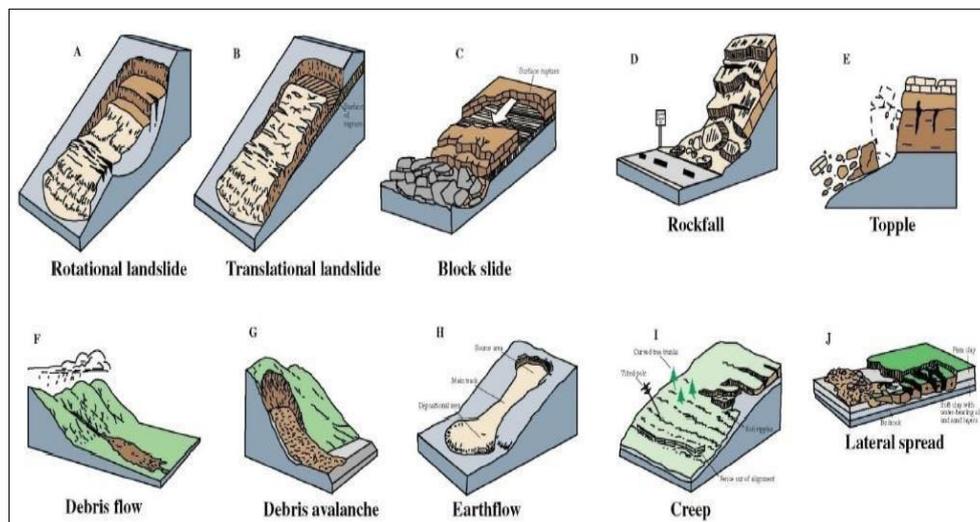


Figura 2 – Tipos de movimentos de massa (Adapt. VARNES, 1978).

A proposta de classificação de CRUDEN & VARNES (1996), apresentada na Tabela 2, tem como ponto favorável a utilização de velocidade como parâmetro classificatório. Fato que quanto mais rápido o movimento, mais destrutivo ele será. O risco específico de uma área é influenciado diretamente pela velocidade que o material atinge, tornando-se importante a estimativa deste parâmetro.

Tabela 2 – Classificação proposta com base na velocidade (Adapt. CRUDEN & VARNES, 1996).

Classe	Descrição	Velocidade típica	Danos esperados e reação da população
1	Extremamente rápido	>5 m/s	Desastres catastróficos; edificações destruídas por impacto de material deslocado, muitas perdas de vida. Sobrevivência improvável
2	Muito rápido	>3 m/min	Algumas perdas de vida; velocidades altas não permitem que as pessoas deixem o local
3	Rápido	>1,8 m/h	Possível evacuação, edificações destruídas
4	Moderado	>13 m/mês	Algumas edificações provisórias conseguem resistir ao movimento
5	Lento	>1,6 m/ano	Reparações em edificações podem ser feitas durante o movimento, estruturas insensíveis ao movimento podem ser mantidas após trabalho de manutenção se o movimento como um todo não for tão extenso durante uma determinada fase de aceleração
6	Muito lento	>15 mm/ano	A maioria das edificações não sofreram danos
7	Extremamente lento	<15 mm/ano	Imperceptível sem instrumentação para monitoramento; baixo risco de ruínas das construções

Para as Corridas de Detritos, as principais classificações adotadas na literatura são decorrentes da diferenciação dos materiais envolvidos e das velocidades, tal como definido por HUNGR (2005): corridas de detritos (*debris flow*), corridas de lama (*mud flows*), avalanches de detritos (*debris avalanches*) e fluxos de detritos (*debris floods*).

Os movimentos detríticos podem ser originados de materiais coluvionares, solos residuais, transportes glaciais, explosões vulcânicas ou por interferência das atividades humanas (HUNGR, 2005). Possuem um percentual de pedregulhos superior a 20% e menos de 20% de solo, sendo que o teor de solo influencia diretamente na velocidade dos movimentos. Os movimentos detríticos são considerados uma mistura de materiais de baixa plasticidade.

Os fluxos de detritos são movimentos de grandes massas de até centenas de metros cúbicos, deslocando-se com elevada velocidade, podendo variar de 1 a 20m/s (valores típicos registrados), causando estragos catastróficos, em muitos casos com fatalidades, danos em edificações e perdas econômicas irreparáveis.

Inicialmente a classificação de VARNES (1958) não incluía os movimentos do tipo corridas de detritos. Posteriormente, em 1978, foi modificada pelo autor descrevendo as corridas como um movimento rápido ou lento, de material granular, detritos e solo comportando-se como um fluido denso saturado ou não.

IVERSON (1997) e RICKENMANN (1999) coincidem na definição dos fluxos de detritos, descrevendo-os como um movimento de massa rápido, violento e contínuo constituído por blocos de rocha, material granular, sedimentos e água. Impulsionado pela gravidade, o movimento oferece grande potencial de danos às regiões atingidas.

Este tipo de movimento pode se desenvolver em canais confinados ou abertos, o que influencia nos principais parâmetros da massa que constituem o fluxo. A velocidade, vazão e espalhamento, distribuição das partículas e leque de deposição variam de acordo com a largura e forma do canal.

Diversos fatores condicionam este tipo de eventos, mas os principais deflagradores destes movimentos são as intensas precipitações em períodos curtos ou precipitações médias de longa duração (NUNES & RIOS FILHO, 2009). Situações extraordinárias que podem dar origem a estes fenômenos são as movimentações sísmicas, explosões, perda de resistência de uma massa de solo, erosão de canal de drenagem e ruptura de barragem.

NUNES & SAYÃO (2014) descrevem os fluxos de detritos como um movimento de massa muito complexo que envolve volumes, materiais, velocidades e energias muito diversas, dificultando a adoção de medidas de segurança de encostas com este potencial de ruptura.

Estes movimentos podem ser originados por simples deslizamento ou por queda de rocha. A mobilização da massa inicial, somadas às condicionantes da área onde se desenvolve o movimento, serão determinantes para que um movimento simples seja transformado em um movimento complexo.

Uma forma de instabilidade em tálus é o deslocamento de blocos isolados encosta abaixo. O choque de lascas e de blocos de rocha caindo do topo de uma encosta em massas de tálus/colúvio pode desencadear um fluxo de detritos, caso a massa coluvional esteja saturada após um período prolongado de chuvas ou período curto de chuvas torrenciais.

As consequências e potenciais danos originados pelos fluxos de detritos variam de acordo com o conjunto de fatores deflagradores, características do canal

do fluxo e condições geológicas e geomorfológicas da área de deposição, condições ilustradas na Figura 3.



Figura 3 – Formação de fluxo de detritos (GIDES, 2018).

2.2. Fluxo de Detritos

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

STINY (1910) foi um dos primeiros a definir este tipo de movimento como um fluido que se desenvolve em um canal natural, carregando sólidos e sedimentos em suspensão no corpo do fluxo e transportando material erodido no fundo do canal do fluxo. Devido ao aumento da massa em função dos sedimentos carregados, a partir de um determinado momento, o fluxo muda, transformando-se em uma massa viscosa, constituída por água, sólidos, solo, rocha e detritos misturados, semelhantes a uma lava num talvegue.

O fenômeno denominado fluxo de detritos não é mais que uma massa inicial acionada por fatores naturais ou externos que se desloca com grande velocidade,

variável em função dos diversos fatores envolvidos, carregando e associando detritos e sedimentos ao longo da sua trajetória, até atingir elevadas energias, com grande capacidade de destruição.

Alguns casos históricos têm sido registrados, mostrando que o potencial de destruição destas massas depende do conjunto de vários fatores deflagradores e que influenciam o movimento.

Algumas classificações mostram o potencial de dano de acordo com a magnitude do movimento, tal como a proposta por CRUDEN & VARNES (1996) e apresentada na Tabela 3, que enquadra os fluxos de detritos em classes de acordo com a velocidade e resposta ao movimento.

Tabela 3 – Classificação com base na velocidade (Adapt. CRUDEN & VARNES, 1996).

Descrição	Classificação	Limites de velocidade	Resposta
Extremadamente rápido	7	>5 m/s	Nula
Muito rápido	6		Nula
Rápido	5	3m/min	Evacuação
Moderado	4	1,8 m/h	Evacuação
Lento	3	13 m/mês	Manutenção
Muito lento	2	1,6 m/ano	Manutenção
Extremadamente lento	1	<16 mm/ano	Nula

TAKAHASHI (2006) descreve este tipo de movimento como uma mistura de água e sedimentos aleatórios comportando-se como um fluido contínuo conduzido por gravidade e que alcança grandes extensões.

2.2.1. Características dos Fluxos de Detritos

As características destes movimentos variam de acordo com o tipo de material envolvido, a geometria da superfície da trajetória do movimento e os fatores que deflagram o movimento. Os fluxos de detritos também podem ser caracterizados pela área de deposição disponível, em função da geologia e geomorfologia do local.

Alguns autores classificam as corridas de material basicamente em dois tipos; os denominados fluxos de detritos (*Debris Flows*) envolvendo materiais de

granulometria mais grosserias até blocos de rocha e os denominados fluxos de lama ou de material fino (*Mud Flows*).

Geralmente este tipo de movimento de massa apresenta a configuração mostrada na Figura 4, onde se identifica diferentes zonas da trajetória do movimento: zona de iniciação, onde é originado o movimento, zona de transporte e erosão, na qual se desenvolve o movimento e a zona de deposição do material, onde a massa mobilizada inicia seu processo de deposição.

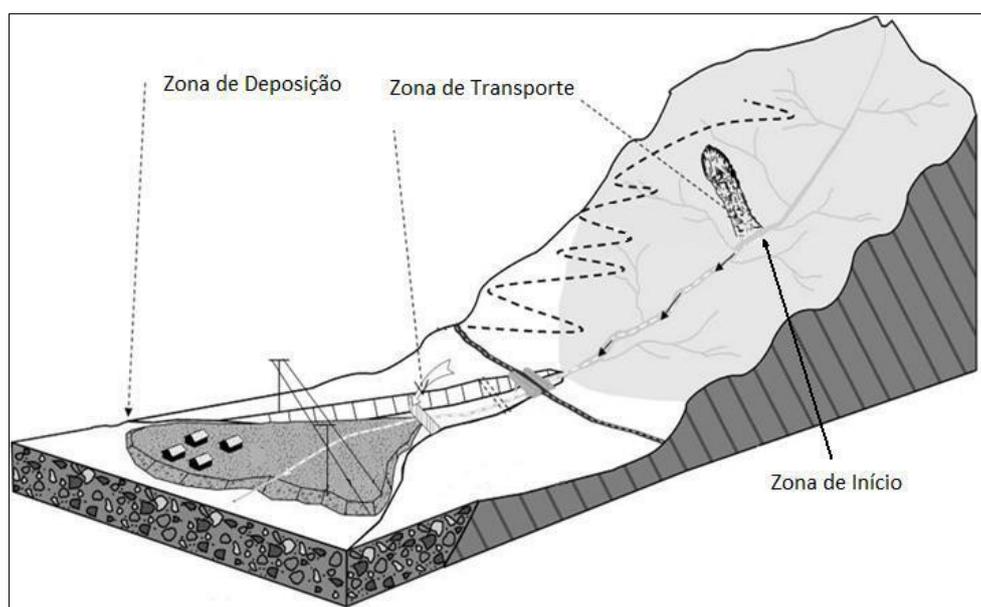


Figura 4 – Zonas Características dos fluxos de detritos (Adapt. de DNV, 2013).

Na Figura 5 é apresentada a configuração esquemática das zonas da trajetória do movimento, caracterizadas por: zona de iniciação com declividades superiores a 25° , zona de transporte e erosão com declividade superior a 15° e zona de deposição, geralmente com declividades menores a 10° (VANDINE (1996).

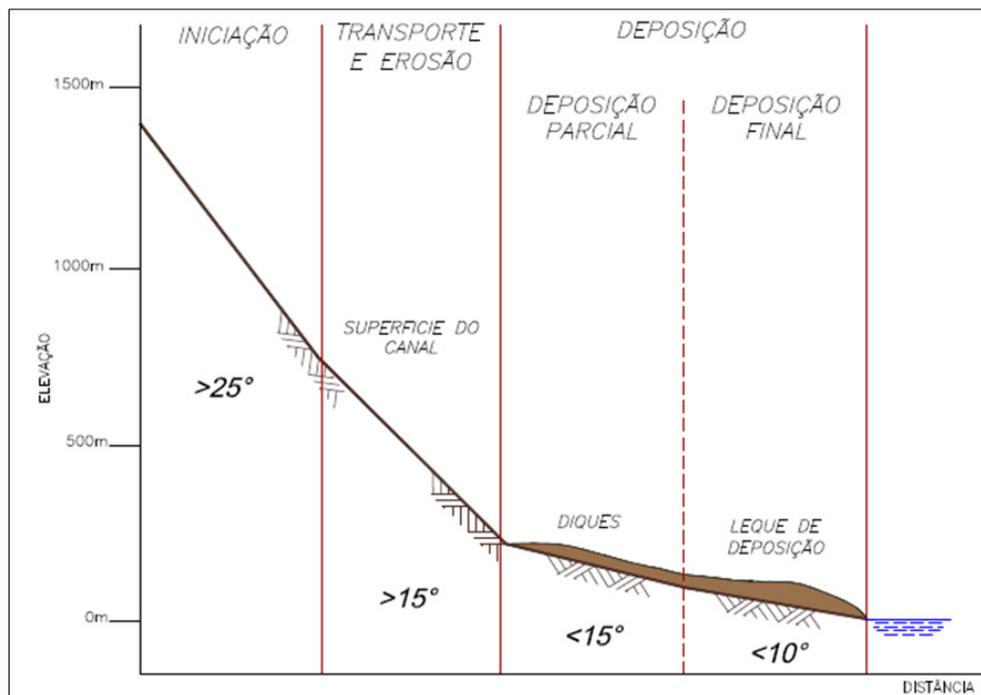


Figura 5 – Zonas da trajetória com fluxo canalizado (VANDINE,1996).

Zona de Iniciação

Normalmente, a zona de iniciação ou de ruptura se localiza na área de uma ruptura ocorrida na parte alta da encosta ou na lateral do talude ou ainda no canal principal (HUNGR, 2005; GOSTNER et al., 2008). A mobilização, representada pelo início da ruptura, corresponde ao processo pelo qual o movimento do tipo fluxo de detritos pode desenvolver-se a partir do estado estático, de uma massa aparentemente rígida de solo, sedimento, ou bloco de rocha (COSTA, 1984; TAKAHASHI, 1991; SHELBY, 1993; IVERSON 1997). A mobilização requer o deslocamento da massa, água suficiente para saturá-la (COSTA, 1984; TAKAHASHI, 1991; SHELBY, 1993), e a transformação de energia potencial gravitacional para energia cinemática capaz de mudar o tipo do movimento de deslocamento para fluxo (IVERSON, 1997).

Segundo TAKAHASHI (1991), os fluxos de detritos podem ser iniciados de três maneiras: (i) Deslizamento de terra que adquire maior mobilidade e se transforma em um fluxo de detritos; (ii) Colapso de uma estrutura ou barreira de solo e sedimento; e (iii) Instabilidade das margens do canal a partir da ocorrência ou aumento do escoamento superficial. O autor descreve que a área de iniciação deste tipo de movimento geralmente possui declividade elevada.

Zona de Transporte e erosão

A zona de transporte corresponde à área percorrida pelo fluxo de detritos em movimento (HUNGR, 2005). Usualmente esta zona de transporte e erosão encontra-se em locais com declividade maior que 15° (BATHURST et al., 1997; HUNGR, 2005). No percurso o movimento de massa pode incrementar seu volume, erodindo o material nesta zona ou carreando o material depositado em movimentos pretéritos. A taxa de erosão irá depender das características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo.

Zona de Deposição

De acordo com IVERSON (1997), a deposição ocorre quando toda a energia cinética é transformada em outra forma de energia. A deposição normalmente resulta da combinação da redução da declividade e da perda do confinamento (HUNGR, 2005; BENDA & CUNDY, 1990). Diversos autores apresentam os valores de declividade onde se inicia a deposição do fluxo. Segundo VANDINE (1996), a zona de deposição geralmente tem declividades inferiores a 10°. Outros autores apresentam valores de ângulo de deposição diferentes do proposto por VANDINE et al. (1997). Casos reais têm demonstrado que os ângulos de deposição são variáveis de acordo com as condições de desenvolvimento dos movimentos, podendo ser superiores a 10°. 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". Alguns casos de pequenos fluxos e avalanches de detritos registrados em Hong Kong mostram ângulos de deposição excedendo 30° a 40°. Na província de *British Columbia* (Canadá) são comuns ângulos de deposição de 10° a 22° para fluxos de detritos canalizados e de 19° a 24° para fluxos não confinados.

Em outros casos de estudo, declividades evidenciadas na zona de deposição são superiores a 15°. Isto indica que cada evento de fluxo de detritos deve ser avaliado de acordo com a geomorfologia da zona de trajetória e a área de deposição disponível.

PIERSON (1986) descreve que, para fluxos de detritos, o corpo é dividido em três zonas, diferenciadas pelos tamanhos das partículas (Figura 6). A parte frontal apresenta a maior porcentagem de partículas de maior diâmetro. Na parte central encontra-se a massa constituída de material fino e detritos. A parte final sofre fluxo turbulento com maior porcentagem de água do que de sedimentos, simulando um fluxo de lama.

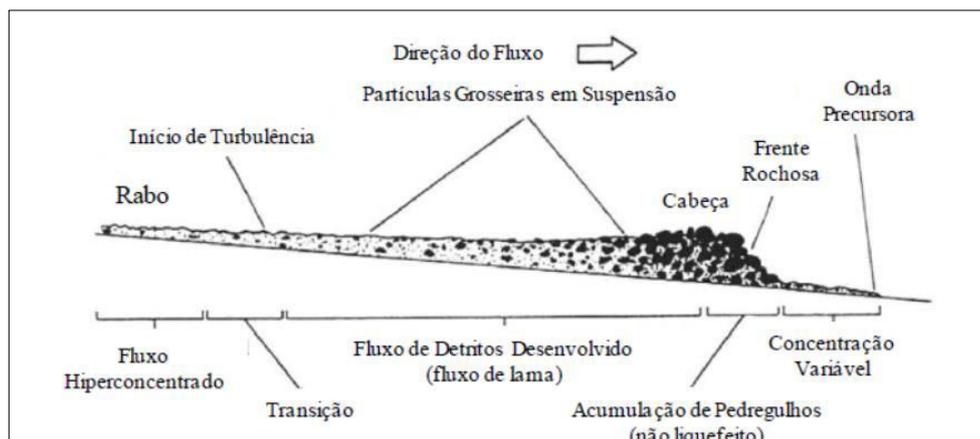


Figura 6 – Perfil de fluxo de detritos com frente granular (PIERSON,1986).

Segundo IVERSON (1997), o acúmulo de grandes rochas e detritos na cabeça da onda do fluxo de detritos pode ter duas origens: este material pode ser agregado durante o movimento e fica retido por outros detritos, ou pode migrar do corpo do fluxo por transporte preferencial. Desta forma, ao se propagar, o fluxo perde energia por atrito interno e externo, tendendo a parar. Sendo assim o fluxo passa da zona de transporte para a zona de deposição.

2.2.2. Deflagradores dos Fluxos de Detritos

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

BLACKWELDER (1928) numera algumas condições favoráveis para a formação de fluxos de detritos, a saber: abundância de água e materiais não consolidados, tornando-se instáveis quando saturados. Na maioria dos casos,

encostas escarpadas são suficientes para induzir mobilidade nos materiais. Outro fator deflagrador descrito pelo autor é a existência de pouca ou nenhuma proteção vegetal.

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

Os principais fatores deflagradores dos fluxos de detritos, portanto, são:

- i. Condições de geologia e geomorfologia da encosta: as diversas condições geomorfológicas e climáticas, iniciadas por uma variedade de mecanismos (MORGAN et al., 1997). Os condicionantes definidos pela topografia, geomorfologia e tipo de material definirão o comportamento: intensidade, magnitude, entre outros. GRAMANI (2001) também descreve que algumas das condições favoráveis para a ocorrência de corridas de detritos são as encostas íngremes (acima de 25°) e partículas e detritos de solos e/ou rochas inconsolidados. As superfícies das encostas e os canais de drenagem correspondem as duas feições geomorfológicas, nas quais são comuns as ocorrências de fluxos de detritos. Comumente o termo *ravine* é utilizado para descrever a trajetória em drenagens naturais e *slope* para encostas. Esses aspectos influenciam de maneira distinta o comportamento da massa, devido às diferenças de energia geradas;
- ii. Fatores naturais e externos: fenômenos como sismos, chuvas intensas, ações vulcânicas, enchentes, entre outros, são condicionantes nos movimentos do tipo fluxo de detritos;
- iii. Vegetação: o tipo de vegetação pode influenciar no grau de susceptibilidade de determinada área. No entanto BHUWANI (2004) descreve que a proteção vegetal escassa não corresponde a um fator de deflagração importante;
- iv. Ação antrópica: é relacionada às atividades humanas, principalmente aquelas que envolvem uso de explosivos (geração de sismos induzidos), remoção da cobertura vegetal e escavações, que podem iniciar o processo de mobilização de grandes quantidades de solo, criando condições para o desenvolvimento de fluxos de detritos quando as áreas coincidem com locais susceptíveis a esses processos (GRAMANI, 2001).

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

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

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

2.2.3.

Classificação e Tipos de Fluxo de Detritos

Fluxos de detritos se caracterizam por serem movimentos rápidos, com velocidades moderadas a elevadas, superiores a 5m/s, com exceções de alguns eventos registrados, como é o caso do evento de Huascarán no Peru, onde foram registradas velocidades médias de 280km/h (POLANCO, 2010).

A classificação deste tipo de movimento corresponde a um difícil aspecto, uma vez que o movimento depende de um conjunto de fatores e não somente de variáveis específicas. Classificações para este tipo de movimento de massa se dividem naquelas que relacionam os principais parâmetros que caracterizam o movimento e noutras que consideram a geologia do material.

VARNES (1978) classificou os fluxos de detritos em duas categorias: "fluxos rápidos" para velocidades superiores a 1,5 m/dia e "menos rápido", para velocidades inferiores a 1,5m/dia.

TAKAHASHI et al. (2001) classificam os fluxos de detrito em três diferentes categorias em função do comportamento da massa em movimento. Os números de Bagnold e Reynolds e a concentração de sedimentos são usados para classificar o fluxo em solo granular, viscoso ou de material fino (lama). O comportamento do fluxo de detritos depende da concentração de sedimentos, tipo e tamanho da partícula, profundidade do fluxo e geometria do perfil da trajetória.

O primeiro tipo (*stony type debris flow*), é caracterizado por carregar grandes blocos de rocha nas porções frontais, seguidos por massa com maior quantidade de água e partículas com menor diâmetro do que a porção frontal, diminuindo gradualmente a descarga e concentração de sólidos.

O segundo tipo (*muddy flow*) é definido pelos diâmetros das partículas dominantes, entre 1 e 3mm, com grandes blocos dispersos no fluxo e não concentrados na porção frontal. Este tipo de fluxo é considerado turbulento.

O terceiro tipo, denominado *viscous debris flow*, possui características distintas aos fluxos granulares e de material fino. Este tipo não apresenta blocos no corpo do fluxo e sua turbulência decresce gradualmente, transformando-se em fluxo laminar.

Por outro lado, HUNGR et al. (2001) classificam os fluxos em:

- i. Fluxo de detritos (*Debris Flow*), movimento rápido a extremamente rápido de detritos saturados, não plásticos, e em canal com $IP < 5\%$ na fração solo;
- ii. Fluxo de lama (*Mud Flow*), movimento rápido a extremamente rápido de lama e/ou detritos saturados, e em canal, com alto teor de água e alta plasticidade, $IP > 5\%$;
- iii. Enxurrada de detritos (*Debris flood*), movimento muito rápido com grande quantidade de detrito, afloramento de água;
- iv. Avalanche de detritos (*Debris avalanche*), movimento muito a extremamente rápido, de material superficial, parcial ou totalmente saturado, sem canal.

Na classificação proposta por HUNGR (2001), o termo *mud* é usado para solos argilosos, cuja matriz (areia e finos) é significativamente plástica. Este material argiloso ou solo seco é potencialmente instável ao se misturar rapidamente com águas superficiais, superando o limite líquido.

O termo *debris* (detritos) é definido por HUNGR et al. (2001) como um material solto de baixa plasticidade, resultante de movimentos de massa (colúvio), intemperismo (solo residual), transporte glacial (depósitos de gelo), explosões vulcânicas (depósitos piroclásticos) e de atividade humana (exploração de minas).

Em função da textura, os *debris* são uma mistura de diversas granulometrias, com massa constituída de areia, rocha, blocos de rocha geralmente com distintas proporções de silte e lama, podendo conter uma proporção significativa de material orgânico.

Como expresso anteriormente, não existe uma classificação universal para movimentos deste tipo. A maioria das classificações propostas é função da velocidade associada ao movimento e ao poder de destruição associado à massa. Os movimentos de massa com características muito variáveis e de difícil determinação tornam difícil uma classificação representativa do movimento.

JAKOB (2005) propõe uma classificação dos fluxos de detritos (*Debris Flows*) em função da magnitude do movimento, relacionando este volume aos principais parâmetros que caracterizam o movimento: vazão, área inundável e intensidade dos danos. A classificação apresentada na Tabela 4, proposta por JAKOB & HUNGR (2005) e adaptada por POLANCO (2010), considera apenas a área inundável e consequências de acordo com as classes do movimento. Esta classificação considera nove classes, crescentes com o potencial de danos.

A descrição de movimentos do tipo fluxos de detritos é muito complexa, principalmente pela dificuldade de registrar os principais parâmetros característicos da massa movimentada. Cada caso requer uma avaliação em função dos condicionantes e características da área e dos principais parâmetros. O potencial de dano dependerá principalmente da área de deposição disponível e do tipo de ocupação da área.

Tabela 4 – Classificação de fluxos de detritos (POLANCO, 2010, adapt. JAKOB & HUNGR, 2005).

Classificação	Volume (m ³)	Vazão (m ³ /s)	Área Inundável (m ²)
1	< 10 ²	< 5	< 4.10 ²
Danos localizados. Pode ocasionar a morte de pessoas que estiverem na área, danos em construções vulneráveis.			
2	10 ² - 10 ³	5 a 30	4.10 ² - 2.10 ³
Destruição de carros, construções de madeira, árvores e bueiros.			
3	10 ³ - 10 ⁴	30 a 200	9.10 ³ - 4.10 ³
Destruição de edifícios, danos em pilares de pontes, rodovias e gasodutos.			
4	10 ⁴ - 10 ⁵	200 a 1.500	9.10 ³ - 4.10 ⁴
Destruição de bairro, infraestrutura e obstrução de pequenos cursos d'água.			
5	10 ⁵ - 10 ⁶	1.500 a 12.000	4. 10 ⁴ - 2.10 ⁵
Destruição de bairros, áreas florestadas e obstrução de rios.			
6	10 ⁵ - 10 ⁶	Não Observado	> 2.10 ⁵
Destruição significativa de porção de cidades e áreas florestadas.			
7	10 ⁶ - 10 ⁷	Não Observado	Não Observado
Destruição significativa de porção de cidades e áreas florestadas.			
8	10 ⁷ - 10 ⁸	Não Observado	Não Observado
Destruição de cidades e áreas florestadas.			
9	> 10 ⁸	Não Observado	Não Observado
Destruição de cidades e áreas florestadas.			

2.2.4. Fluxo de Detritos iniciados por deslizamentos

Em inúmeros casos históricos evidencia-se que os fluxos de detritos são iniciados por deslizamentos, os quais devido à ação da gravidade e fatores e condições locais conseguem provocar um aumento de energia, originando um novo movimento com características de movimento do tipo fluxo de detritos.

IVERSON et al. (1997) descrevem que três processos são envolvidos neste fenômeno: (1) ruptura generalizada do material deslizado inicialmente; (2) liquefação completa ou parcial da massa de solo por elevada poropressão, e (3) transformação da energia de um deslizamento translacional em energia interna da massa deslizante.

Outro fator deflagrador de movimentos de massa que posteriormente pode se transformar em fluxos de detritos é representado pela quantidade de água da área, função da hidrologia local, que influencia diretamente no processo, diminuindo a sucção do material, incrementando a carga e reduzindo consideravelmente a coesão da massa envolvida no deslizamento.

Diversos casos originados a partir de deslizamentos são observados e registrados, tais como a ocorrência de 25 deslizamentos transformados em fluxos de detritos na Nova Zelândia. MCDUGALL (2006) também apresenta alguns casos de estudo iniciados por deslizamentos de solo em diversas regiões do mundo. A Figura 7 mostra deslizamentos de solo nas margens do canal principal de desenvolvimento de fluxo principal. Percebe-se na figura uma particularidade interessante representada pelo fato da área com intervenção antrópica (retaludamento da encosta natural) ter se mantido estável, ao contrário das rupturas distribuídas na encosta natural.



Figura 7 – Movimentos iniciados nas margens do canal de fluxo em São Sebastião, SP.

2.2.5. Geomorfologia dos Depósitos dos Fluxos de Detritos

A zona de deposição das corridas de detritos inicia-se geralmente em inclinações inferiores a 10° (18%) e tipicamente a região de deposição aumenta com a diminuição da inclinação da encosta.

Baseado na avaliação de depósitos de corridas de detritos na Inglaterra, VANDINE (1996), determinou que a inclinação mínima dos depósitos não supera 4° . JACKSON et al. (1987) encontraram valores próximos para áreas montanhosas do Canadá. Estudos desenvolvidos pelo governo japonês indicaram inclinações ainda menores, da ordem de 2° a 3° .

Segundo VANDINE (1996), a deposição das corridas de detritos é resultado de condições específicas:

- i. Diminuição da inclinação;
- ii. Perda do confinamento;
- iii. Impossibilidade de continuidade do movimento com a interrupção do fluxo.

Estas condições, normalmente, podem ocorrer de forma isolada ou conjunta, dependendo da magnitude do movimento, características geométricas da encosta e outros. A Figura 8 ilustra um fluxo de detritos com deposição causada por interrupção parcial do fluxo e mudança de inclinação da encosta.



Figura 8 – Deposição de fluxo de detrito por diminuição de inclinação e perda de canal (GIDES, 2018).

Para HUNGR et al. (1987) o confinamento é mais crítico para a continuidade do movimento do que a inclinação da encosta, quando a corrida de detritos se desenvolve em inclinações inferiores a 18° (32%).

MOTTA (2014) reporta que a interrupção do fluxo se dá pelo impedimento de forma abrupta do movimento, por meio de barreiras naturais ou artificiais. A

interrupção do fluxo por meio de barreiras artificiais pode ser entendida não só como meio de deposição, mas também como mecanismo de mitigação.

Já a forma de deposição das corridas de detritos depende diretamente do relevo e das barreiras que se apresentam no caminho de deposição. As corridas canalizadas assumem algumas formas de deposição conhecidas, tais como:

- i. Leques ou línguas de detritos;
- ii. Tampões de canais de drenagem, parcial ou total;
- iii. Diques de deposição ao longo dos canais.

Independente da forma de deposição, os depósitos de fluxos de detritos são tipicamente grosseiros e pouco estratificados, tendendo a possuir as partes frontais com maior presença de blocos, enquanto os materiais finos ficam retidos na porção posterior, conforme esquematizado na Figura 9.

Leques ou línguas de detritos são normalmente depósitos originados nas porções superiores do movimento, geralmente quando ultrapassa os limites do canal ou quando o canal está totalmente encoberto (VANDINE, 1996). Elas são frequentemente caracterizadas pela ocorrência de braços. HUNGR et al. (1987) estimaram que a espessura média dos depósitos com essa característica é da ordem de 1,0m a 1,5m, para eventos com volumes entre 10.000m³ e 50.000m³.

Já as corridas de detritos em canais totalmente ou parcialmente encobertos, chamados tampões, desenvolvem-se ao longo do próprio canal de drenagem, terminando em leques ou línguas de detritos canalizados. A obstrução dos canais de drenagem pelo próprio movimento resulta na mudança abrupta de direção dos fluxos.

Os diques ao longo dos canais contribuem para que o material seja depositado ao longo dos canais por vários metros. Tais características são típicas de leques de deposição na superfície. O fluxo pode se estender a lagos ou oceanos, onde parte do depósito ocorrerá em meio aquático e outra em ambiente terrestre.

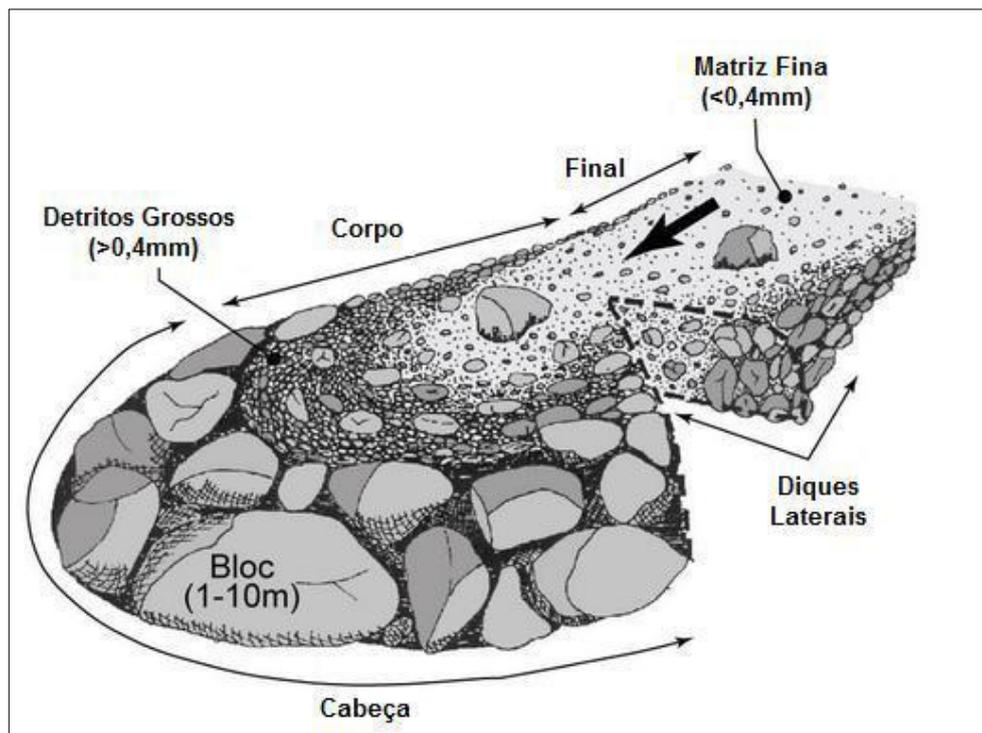


Figura 9 – Tipo de deposição de Fluxos de Detritos (Adapt. JABOYEDOFF et al., 2004).

2.3. Medidas de Contenção e/ou Convivência

Pode ser considerado como sistemas de contenção quaisquer medidas aplicadas em determinado local com o objetivo de retardar ou paralisar completamente um movimento de massa. No que tange os fluxos de detrito, devido a sua complexidade, tanto de materiais quanto de forma, o conceito de contenção apresenta-se mais amplo, necessitando da observação dos fatores envolvidos e do nível de risco aceitável para o local. Neste caso, o gerenciamento do risco é uma ferramenta útil, capaz de prevenir, intervir e mitigar eventual desastre natural. Não obstante, o gerenciamento voltado à prevenção de risco abrange não só o planejamento e gestão do uso do território, como também, a adoção de técnicas de engenharia em sentido mais amplo possível e de forma a garantir a segurança, além do custo-benefício.

HUEBL & FIEBIGER (2005) consideram de fundamental importância que o gerenciamento de risco tenha objetivos claros, tanto espacial como temporal, e que as medidas adotadas estejam em acordo com o nível de risco desejado. Ressalta-se que o aspecto essencial do gerenciamento de risco é a redução do risco existente a

níveis aceitáveis. Dois tipos de medidas podem ser adotados na prevenção e controle dos fluxos de detritos: um possui o foco no evento em si, sendo denominado de medida ativa, enquanto o outro visa o risco potencial do movimento, sendo denominado de medida passiva. O estado da arte indica a combinação de ambos os tipos, garantindo efetividade no melhor funcionamento das medidas.

FERREIRA et al. (2023) ressaltam que obras geotécnicas utilizam solos e rochas como principal material para a sua execução, os quais são materiais susceptíveis a uma grande variação de parâmetros físicos e químicos, que influencia sobremaneira na resistência mecânica e estabilidade dos empreendimentos executados com estes materiais. Destacam ainda influência da ação de fluidos (água e gases), que contribuem para aumentar o desafio de execução de obras de terra. Neste contexto, para maior auxílio na execução de obras geotécnicas faz-se uso de instrumentação que auxilia nas tomadas de decisão dos projetistas e dos gestores.

2.3.1. Medidas Ativas de Proteção

Medidas ativas de proteção atuam diretamente no ator deflagrador, no transporte e no processo de deposição, buscando intervir diretamente na magnitude e frequência do movimento, conforme indicado pelas estruturas de retenção e controle implantadas na área de eventos de instabilidade em Susukizuca, Japão (Figuras 10 e 11).

Estas medidas também podem ser responsáveis pela mudança na probabilidade de ocorrência do movimento (HUEBL & FIEBIGER, 2005). Medidas ativas de proteção podem também ser denominadas como Medidas de Controle (VANDINE, 1996) pelo caráter de alteração do movimento que possuem.

Os tipos de estruturas de controle a adotar depende das condições de contorno como: características topográficas, de depósito e estrutura local para a realização da obra.

Em geral se dividem dois grupos: estruturas abertas e fechadas. As estruturas abertas têm o objetivo de confinar o fluxo e canalizando-o, enquanto as estruturas fechadas possuem o objetivo de contê-lo. A seguir observa-se algumas medidas de controle ou ativas.



Figura 10 – Fluxo de detritos e deslizamentos em Susukizuca, Japão, 1982 (JICA, 2015).



Figura 11 – Implantação de medidas ativas em 1983 após os eventos ocorridos em 1982 em Susukizuca, Japão (JICA, 2015).

Atividades de manejo florestal

A modalidade de manejo florestal reduz descargas de pico pela adoção de revegetação de áreas degradadas com risco de deslizamento. Tal técnica utiliza espécie de árvores associadas à vegetação arbustiva, com características de plantio, de forma a oferecer uma barreira efetiva e gradual ao fluxo, com o cuidado de não se criar mais massa a participar do volume de detritos.

Bioengenharia e alteração do solo

Consiste na técnica de manejo de plantas para controle de erosão. A bioengenharia, além de minimizar a erosão também disciplina os escoamentos das águas, promovendo a redução das descargas de pico. Podem ser aplicadas em canais, rios, ravinas, na estabilização de encostas em terraço e em estabilização de rodovias. Para o sucesso desta prática sua aplicação deverá ocorrer em conjunto com outros sistemas de contenção.

Drenagem

Os sistemas de drenagem preveem a diminuição e o disciplinamento dos escoamentos superficial (Figura 12) e subsuperficial (Figura 13), além de prevenir a formação de superfícies potenciais de cisalhamento, pela implantação das soluções, individuais ou em conjunto com outras soluções técnicas de estabilização. Os sistemas de drenagem se dividem em:

- i. Superficial: A drenagem superficial é composta por todos os elementos instalados no entorno de um maciço, a fim de desviar a água oriunda das precipitações que porventura possa instabilizar a área. Os elementos de drenagem superficial devem ser preferencialmente moldados no local e dimensionados adequadamente, considerando-se as precipitações e demais fatores intervenientes locais. A disposição final de descarga do sistema de

drenagem da encosta deve ser verificada, evitando-se pontos de concentração não protegidos contra erosão, podendo ser adotadas bacias de amortecimento quando necessário;

- ii. Profunda: Utilizada para diminuir o escoamento subsuperficial e deve ser dimensionada a partir de estudos geológicos-geotécnicos e hidrogeológicos para permitir a passagem de água, sem carreamento de partículas sólidas. Geralmente consiste em tubos corrugados e perfurados, protegidos por material granular ou sintético, que atendam aos critérios granulométricos de filtro/dreno. Mesmo no caso de maciços rochosos é necessária a utilização de técnica semelhante para que seja mantida a drenagem aberta (BADGER & LOWELL, 1992).



Figura 12 – Drenagem superficial com canaleta chumbada na rocha no Morro Dois Irmãos, Rio de Janeiro (NUNES & SAYÃO, 2014).



Figura 13 – Drenos profundos em encosta com concreto projetado (MOTTA, 2014).

Estabilização dos canais

A estabilização dos canais consiste na construção de estruturas transversais ou longitudinais no canal de movimento do fluxo, que possibilitem uma melhor estabilidade global da encosta.

As estruturas longitudinais objetivam alargar os canais, podendo também servir como estruturas de estabilização. As estruturas transversais têm por objetivo acumular o sedimento e reduzir a inclinação na zona de transporte, criando-se barreiras (barragens) ao longo do canal, com altura e distância pré-determinadas entre estruturas sucessivas. Devem ser observados todos os aspectos que envolvem a construção deste tipo de sistema (pressões elevadas nas fundações, alto impacto dos detritos) para que não se tornem mais um elemento a ser associado ao fluxo de detritos. A Figura 14 ilustra intervenções nos canais.



Figura 14 – Esquemático de Estabilização de Canais (Adapt. IKEDA, 2015).

Desvios

A estrutura de desvio tem a função de direcionar o movimento para um canal específico, promovendo proteção contra danos físicos, materiais e humanos que seriam causados pelos fluxos de detritos. São estruturas do tipo túneis falsos que atuam somente como desvio, como por exemplo o desvio de avalanches ou quedas de blocos rochosos isolados em estradas, ferrovias (Figura 15). As dimensões dos desvios ou túneis de desvio são função da energia e trajetória do movimento e devem ter suas estruturas verificadas quanto à estabilidade global no momento de eventual passagem do fluxo de detritos. Em rodovias com vários níveis, pode não ser possível a execução de uma estrutura única, que atenda a todas as pistas de rolamento. Sugere-se, adicionalmente, a instalação de uma superfície com cascalho ou solo com cobertura vegetal, bem como escalonamento da superfície em banquetas, para auxiliar na dissipação de energia do movimento.



Figura 15 – Estrutura de desvio em túneis falsos, Áustria (Acervo ALLS Nunes).

Barreiras/Barragens ou Estruturas de Impacto

Como o próprio nome sugere, as estruturas de impacto têm como objetivo a desaceleração do movimento com a consequente redução da energia. Por definição, este tipo de estrutura sofre atuação direta das forças de impacto, isto é, devem ser dimensionadas com capacidade de dissipação de energia.

A Figura 16 mostra esquematicamente diferentes estruturas quanto à capacidade de impacto e custo de implantação. Salienta-se que, nos últimos anos e com a evolução tecnológica, novos sistemas vêm proporcionando um incremento significativo na capacidade de absorção/dissipação de energia, tais como os sistemas de barreiras flexíveis. Assim, o esquema proposto por Yoshida (1999) pode estar subdimensionado para as estruturas flexíveis.

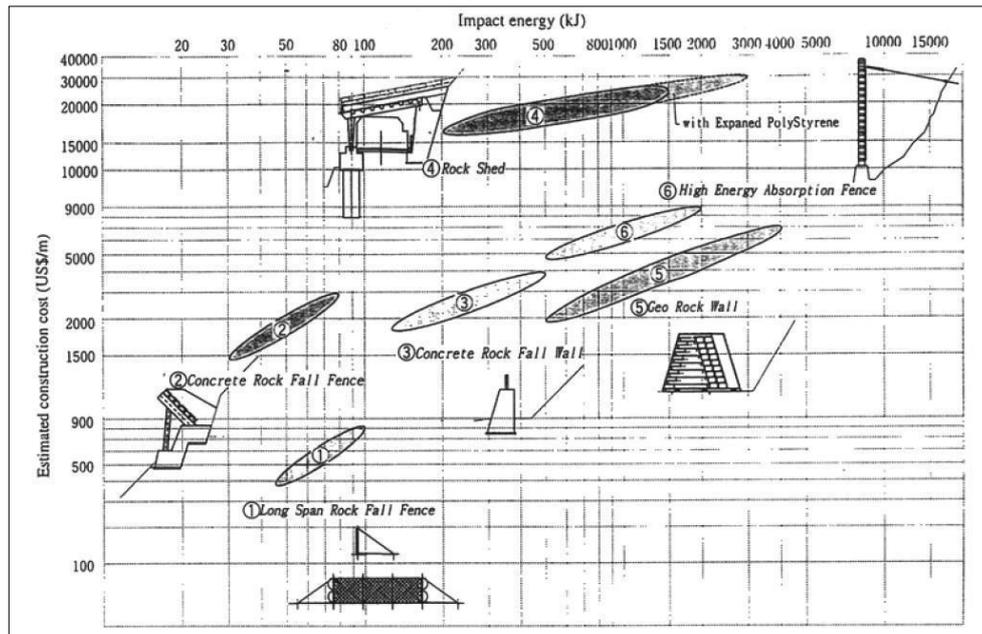


Figura 16 – Diagrama esquemático de estruturas de retenção em função da energia de impacto e custo (YOSHIDA, 1999).

As estruturas de impacto podem ser divididas em dois grupos, rígidas e flexíveis, como a seguir:

- i. Estruturas Rígidas/Semirrígidas de Impacto ou Estáticas (Barragens Sabo)

Consistem em estruturas associadas a uma área plana, na qual o movimento é contido na face interna (tardoz) do muro ou montante da barragem, destinado ao amortecimento do impacto e contenção total ou parcial dos materiais do fluxo de detritos.

As dimensões da área de amortecimento e do muro devem ser determinadas por métodos numéricos, ou empíricos, que simulem ou estimem a energia e a trajetória do movimento.

Podem ser executadas em solo, solo reforçado, gabião, concreto armado, concreto, mistas em concreto e perfis de aço, desde que mantenham sua integridade frente ao impacto esperado.

As Figuras 17 a 22 apresentam algumas estruturas rígidas, comumente chamadas de Barragens Sabo (com seção plena e vazada), Vale ressaltar a importância em se determinar as forças de impacto geradas pelo movimento ao se colidir com as estruturas rígidas, uma vez que, a ruptura de uma Barragem Sabo pode resultar

em considerável incremento de detritos ao fluxo. Interessante reportar que a massa viscosa de detritos pode induzir um efeito de amortecimento e dissipação de energia para impacto de bloco rochoso na barragem (LUO et al., 2022);



Figura 17 – Sequência de muros rígidos para controle de *debris flow*, Rio de Janeiro, RJ (Acervo ALLS Nunes).



Figura 18 – Barragens Sabo de seções plena e vazada, Cubatão, SP (KANJI et al, 2009).



Figura 19 – Barragens Sabo de seção plena, Nagano, Japão (2015).



Figura 20 – Barragens Sabo de seção vazada, Nagasaki, Japão (2015).



Figura 21 – Barragens Sabo parcialmente vazada, Yamanashi, Japão (2015).

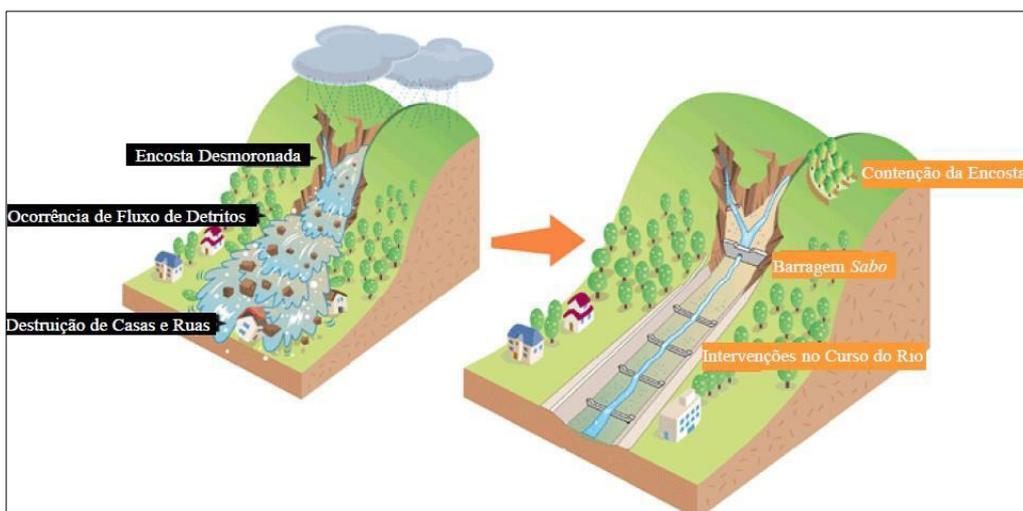


Figura 22 – Exemplo de intervenções com canais e Barragens Sabo (JICA, 2015).

ii. Barreiras Flexíveis ou Dinâmicas:

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

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

Por exemplo, em 1985 as barreiras eram capazes de suportar blocos cuja energia de impacto não ultrapassassem 250kJ, enquanto hoje as barreiras possuem energia de impacto que atingem 10.000kJ. Estes sistemas mantêm suas características básicas, ou seja, alta flexibilidade, alta capacidade de absorção de energias e melhor distribuição de cargas ao longo da superestrutura (ROTH et al., 2004), além de permitir a passagem de água, uma vez que somente ocorre retenção do material sólido. Necessitam de manutenção na remoção dos sedimentos e troca de elementos avariados pela utilização e intemperismo no decorrer de sua vida útil (Figuras 23, 24 e 25).



Figura 23 – Barreira Dinâmica ou Flexível, BR 040, Rio de Janeiro (Nunes, 2013).



Figura 24 – Barreira Dinâmica em canal de fluxo, Petrópolis, RJ (Acervo Maccaferri, Brasil).



Figura 25 – Barreira dinâmica após interceptação de fluxo (Acervo Maccaferri, Brasil).

2.3.2. Medidas Passivas de Mitigação

MOTTA (2014) destaca que as medidas de prevenção do tipo passiva são aquelas que não incluem a construção de nenhuma estrutura física, mas que são igualmente eficientes na redução do potencial de risco associado a uma região.

Medidas passivas focam na redução do potencial de dano e são essenciais para a redução dos riscos, apesar de não atuarem diretamente no movimento como as medidas ativas (NUNES & SAYÃO, 2014). A vulnerabilidade de um evento pode ser alterada de maneira preventiva pelo planejamento urbano ou pela resposta imediata após o desastre (AULITZKY, 1972).

Mapeamento de Áreas Risco

Consiste na compilação, em um mapa, da sobreposição de diversos fatores preponderantes em relação à suscetibilidade de um movimento de massa, como: intensidade, recorrência de processos, tipo de ocupação, geomorfologia, topografia, gestão das águas (servidas e pluviais) e aspectos geológico-geotécnicos. Representa uma ferramenta efetiva para nortear o planejamento e ocupação do solo em uma cidade.

O mapeamento de risco é chave para o planejamento e gestão do território, além de ter importante contribuição no que se refere à limitação das áreas potencialmente mais atingidas, gerenciamento e prevenção de grandes desastres, que podem causar mortes e grandes prejuízos materiais.

Vale salientar que existem diversas ações, nas três esferas de governo (municipal, estadual e federal) que visam estimular, fomentar e executar planos de redução de riscos, que utilizam do mapeamento como instrumento fundamental. A título de informação registra-se o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, liderado pela SEDEC/MIDR.

Sistema de Alerta e Planos de Contingência

O objetivo principal de um sistema de alerta é permitir às pessoas, que habitam áreas conhecidamente suscetíveis ao atingimento por desastres naturais, identificarem o risco e serem evacuadas do local antes da ocorrência de um evento que cause consequências danosas.

O sistema de alerta tenta identificar a possibilidade de ocorrência de um movimento de massa, por exemplo, por meio de instrumentação, meteorologia ou outros, para emitir alertas aos interessados, permitindo a evacuação e aplicação de medidas de prevenção, como a interrupção do tráfego em estradas ou encaminhamento de famílias a um abrigo em local seguro.

Para efetividade plena, são necessários sistemas de aquisição de dados, de transferência de dados, metodologia para avaliação dos dados, distribuição da informação, tomada de decisão, aplicação e organização da evacuação da área.

Neste momento faz toda a diferença a existência de um plano de contingência com matrizes de responsabilidades bem definidas, estabelecimento de rotas de fuga, abrigos protegidos e planejados para recebimento das pessoas, disponibilidade de víveres, agentes públicos e comunidade bem treinados e com boa percepção de seus papéis nos momentos pré e pós desastre.

Capacitação e Desenvolvimento de Sensação de Pertencimento

Ações de capacitação de agentes de defesa civil, agentes comunitários e da população a respeito de temas relacionados a desastres naturais, consiste em

importante medida passiva de mitigação. Primeiramente desenvolvem a percepção do risco, sensação de pertencimento como parte da solução e posteriormente trabalham na divulgação de informações sobre a cultura de prevenção e proteção contra eventuais desastres.

Tais ações são essenciais para o pleno sucesso de outras medidas passivas de mitigação, como os sistemas de alerta e planos de contingência.

2.4. Comentários Finais

Este capítulo abordou diversos aspectos de movimentos de massa, com ênfase nos fluxos de detritos, passando pelas questões relacionadas aos agentes deflagradores às estruturas de contenção e/ou convivência, que permitem maior proteção em relação aos movimentos de massa.

Devido ao fluxo de detritos ser rápido e altamente destrutivo, os autores referenciados neste capítulo convergem para o fato de que se trata de um movimento complexo e ainda pouco conhecido, com características específicas, variando a fase do movimento e dependente diretamente da topografia para sua evolução.

Fator deflagrador importante em regiões tropicais corresponde às precipitações, responsáveis pela perda de resistência inicial de taludes, principal ponto de partida para os fluxos, e também pelo desenvolvimento do movimento, sendo a água responsável por até 60% do volume da massa.

Uma vez iniciado, o fluxo de detritos precisa de um conjunto de fatores para que a energia seja dissipada e venha a se depositar, tais como a diminuição da inclinação, perda do confinamento, ou até medidas de contenção usadas também com o intuito de interrupção do movimento.

A velocidade, volume, comprimento e energia (forças de impacto) dos fluxos de detritos são parâmetros importantíssimos para a convivência com estes movimentos, bem como para dimensionamento de estruturas de contenção estáticas e dinâmicas. Ressalte-se que a força de impacto de *debris flows* é o principal alvo de busca de entendimento desta pesquisa.

3 Modelos de Forças de Impacto

Para se obter efetividade na contenção de movimento de massa, como fluxo de detritos, faz-se necessário estimativas de diversos parâmetros, bem como a demarcação da área suscetível e um projeto adequado. Existem alguns parâmetros que podem ser estimados com acurácia por meio de investigações geológicas e por análises de fluxos de detritos que ocorreram no passado, tais como volume total, magnitude do evento, composição dos sedimentos e chuvas deflagradoras. Entretanto, outros parâmetros são mais complexos de determinação e necessitam ser estimados com o auxílio de relações empíricas e complexas simulações numéricas. Dentre os parâmetros mais complexos encontram-se a vazão, a velocidade do fluxo e, especialmente, força de impacto.

O projeto e dimensionamento das estruturas de proteção contra os fluxos de detritos exige o conhecimento da força de impacto. ARMANINI (1997) reclama da ausência de informação na literatura tendo em vista o interesse e a importância do problema. Afirma que as estruturas de proteção como barreiras (Barragens Sabo), *debris racks* e *debris breakers* precisam ser projetadas considerando os impactos dinâmicos.

As forças de impacto geradas pelos fluxos de detritos são muito difíceis de se estimar principalmente porque dependem de muitos fatores que são igualmente difíceis de se obter. HUBL et al. (2009) enfatizam o uso de parâmetros como velocidade, densidade e altura do fluxo e sugerem que não é possível desenvolver modelos de força de impacto baseados em considerações teóricas.

Forças de impacto causadas por eventos reais de fluxos de detritos foram medidas por alguns pesquisadores (ZHANG, 1993; DE NATALE et al., 1999; WENDELER et al., 2007; HU et al., 2011; BUGNION et al., 2011; MACCAFERRI, 2013). Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas em laboratórios com modelos em escala reduzida, porém uma grande desvantagem é propriamente o efeito de escala.

Este capítulo tratará de forma objetiva de alguns modelos utilizados para obtenção de forças de impacto.

3.1. Classificação dos Modelos

Diversos pesquisadores consideram que os modelos de força de impacto podem ser classificados em hidráulicos, empíricos, ondas de choque e impacto de corpos sólidos, sendo os hidráulicos os mais usados e que podem ser divididos em hidrodinâmicos e hidrostáticos. A Figura 26 traz um resumo da classificação dos modelos de força de impacto disponíveis na literatura moderna.

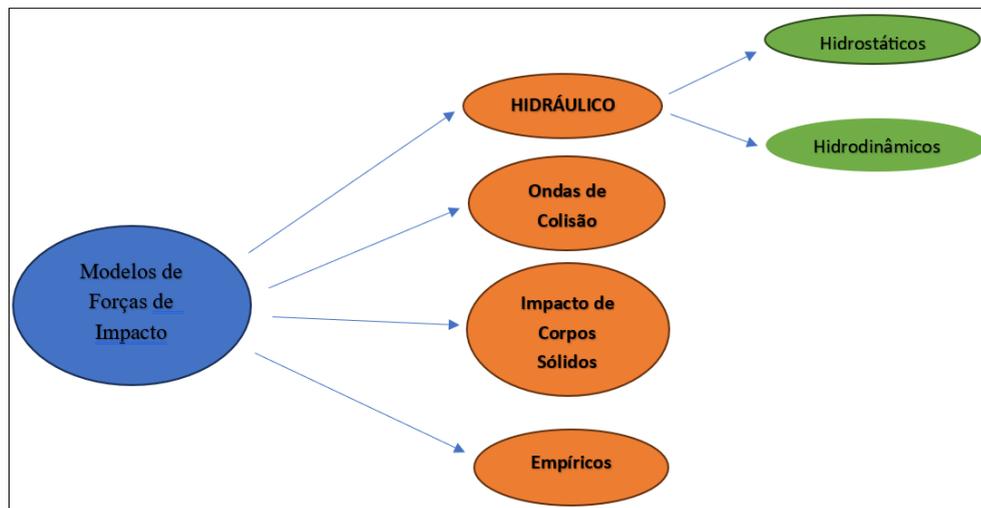


Figura 26 – Modelos de forças de impacto de fluxos de detritos.

3.1.1. Modelos Hidráulicos

Os modelos hidráulicos são os mais usados para analisar as forças de impacto, são divididos em modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos. O primeiro modelo hidráulico adotado para fluxo de detritos foi proposto por LICHTENHAHN (1973), o qual considera a força de impacto como uma força hidrostática. Posteriormente diversos autores foram contribuindo, complementando e evoluindo as teorias dos modelos hidráulicos.

MORIGUCHI et al. (2009) reportam que a força de impacto deve ser relacionada a outros fatores tais como a profundidade do fluxo e sua velocidade.

Ressalte-se que os modelos hidrostáticos não consideram esses parâmetros, tampouco o impacto dinâmico.

Por outro lado, MIZUYAMA (2008) considera que os modelos hidrodinâmicos são muito limitados, uma vez que o impacto dos fluxos de detritos é transiente e instável e, portanto, não pode ser definido por uma distribuição constante da velocidade.

3.1.1.1. Modelos Hidráulicos – Hidrostáticos

O primeiro modelo hidrostático foi desenvolvido por LICHTENHAHN (1973) e, apesar de sua antiguidade, ainda é empregado com frequência na atualidade. Isto se deve ao fato de a relação proposta pelo autor ser simples e prática, exigindo apenas a altura do fluxo de detritos. Normalmente as estruturas de proteção são dimensionadas especificamente com alturas dos fluxos de detritos (HUBL et al., 2009).

LICHTENHAHN (1973) propôs a seguinte relação para estimar as forças de impactos de fluxos de detritos:

$$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

k = Fator empírico, com valor entre 2,8 e 4,4;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

SCOTTON & DEGANUTTI (1997) propuseram fatores empíricos (k) diferentes de LICHTENHAHN (1973). Eles usaram uma calha de 9,5m de comprimento com resíduos de carvão e um diâmetro de partícula de 5,7mm, além de diferentes fluidos, para analisar o efeito da viscosidade na força de impacto do fluxo na barreira. A calha era inclinada de 10°, 15° e 20° nos modelos de ensaio. Os resultados foram analisados em termos da razão entre a força de impacto medida e

a força hidrostática na base da calha. Essa razão apresenta uma ampla variação, com valores compreendidos entre 2,5 e 7,5, com valores médios de 5,3 para fluxos mais viscosos e 3,5 para fluxos menos viscosos.

Já HUBL et al. (2009) consideram o fator empírico k como um fator de segurança, uma vez que, todos os modelos hidráulicos são baseados em fluidos newtonianos e a viscosidade é independente da velocidade. Porém, os fluxos de detritos são constituídos por uma mistura de sedimentos e água. Assim, existe uma relevante resistência ao cisalhamento viscoso que é dependente da velocidade.

3.1.1.2.

Modelos Hidráulicos – Hidrodinâmicos

ARMANINI (1997) estudou o impacto dinâmico de fluxos de detritos em ensaios de escala reduzida, reconhecendo os modelos que relacionam o impacto dinâmico com o quadrado da velocidade do fluxo, apesar da pouca confiabilidade, uma vez que o fluxo é turbulento.

ARMANINI & SCOTTON (1992) e ARMANINI (1997) observaram dois tipos de mecanismo de impacto do fluxo de detritos sobre uma parede vertical:

- i. Formação de uma onda completamente refletida;
- ii. Formação de uma protuberância vertical, esquematizados na Figura 27.

No primeiro caso, após o impacto a onda refletida é formada, propagando-se para montante com velocidade que pode ser considerada constante perto da parede. No segundo caso, o fluxo é desviado para cima paralelamente à parede vertical, formando-se um jato e, em seguida, um salto hidráulico com propagação para montante.

Como interpreta acertadamente SACOTO (2017), se as forças de atrito prevalecem em relação às forças de gravidade, o fluxo desacelera e forma uma onda refletida. Caso ocorra o contrário, com as forças de gravidade prevalecendo sobre as forças de atrito, o fluxo acelera e forma uma protuberância vertical.

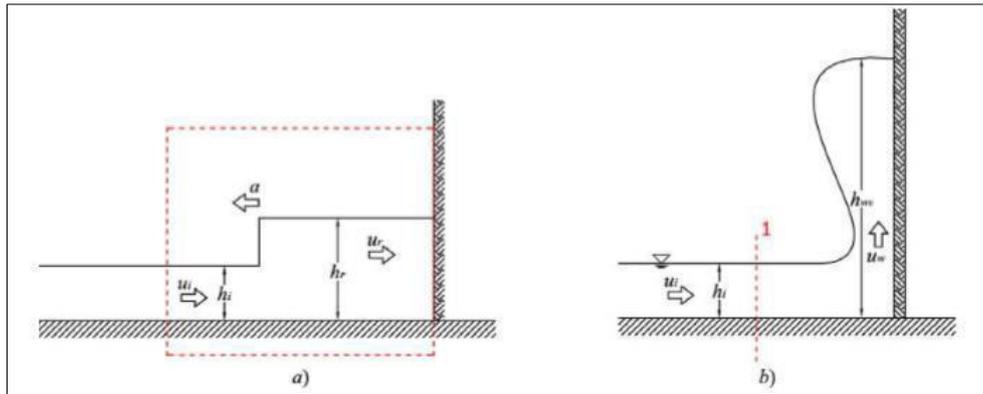


Figura 27 – Modelo de impacto de *debris flows* em parede vertical (ARMANINI et al., 2011).

Os resultados obtidos sugerem que o impacto dinâmico do fluxo de detritos em estruturas fixas não depende da altura da parede ou estrutura, mas sim da velocidade. Isto pode explicar a dispersão nas fórmulas práticas propostas pelos autores que tentaram correlacionar a pressão dinâmica à pressão hidrostática (ARMANINI, 1997). As pesquisas de ARMANINI (1997) e ARMANINI & SCOTTON (1992) permitem determinar a força dinâmica de impacto em termos da pressão hidrostática por meio da expressão:

$$P_{m\acute{a}x} = 9 \frac{1}{2} \rho_{Mu} h_0^2 \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

h_0 = Altura do fluxo de detritos não perturbada a montante em m.

O modelo de ARMANINI (1997) se baseia na hipótese de fluxo em uma única direção e considera o fluxo como uma mistura homogênea. Entretanto, sabe-se que as instabilidades e as curvaturas afetam a validade da teoria do fluxo em uma direção. Além disto, a presença de materiais grosseiros no fluxo de detritos, tais como os blocos de rocha, afetam a velocidade e a força de impacto. Conseqüentemente, a aceleração é mal reproduzida em modelos de escalas reduzidas como os utilizados por ARMANINI (1997).

Outros modelos hidrodinâmicos levam em conta a velocidade do fluxo de detritos e adotam um fator empírico. A maioria dos modelos hidráulicos hidrodinâmicos de determinação de pressão de impacto de fluxos de detritos podem ser representados pela seguinte expressão genérica:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

α = Fator empírico.

CUI et al. (2015) consideram que o fator empírico α representa as diferenças do regime do fluxo e as composições granulares de cada fluxo de detrito e, portanto, existe um intervalo de valores para este fator.

Diversos autores concordam com a expressão genérica representada pela Equação 3, diferenciando-se, unicamente, pelo valor do fator empírico e a consideração do ângulo da força de impacto (WATANABE & IKEYA, 1981; ZHANG, 1993; MIZUYAMA, 1979; WENDELER et al., 2007; DU et al., 1986; BUGNION et al., 2011).

Por exemplo, WATANABE & IKEYA (1981) consideram valores do fator empírico entre 2 e 4, enquanto WENDELER et al. (2007) consideram uma variação entre 0,7 e 2. BUGNION et al. (2011) propõem valores mais reduzidos, compreendidos entre 0,4 e 0,8, com um valor máximo igual a 2 para fluxos de detritos em encostas. Afirmam que esse fator depende principalmente das propriedades do fluxo. MIZUYAMA (1979) propõe valores do fator empírico entre 1 e 2, considerando medições *in situ* no Japão.

DU et al. (1986) consideram que a força de impacto depende do fator empírico e do ângulo da componente da força do fluxo que impacta na estrutura. Propõem um fator empírico igual a 3 e o uso do seno do ângulo da força de impacto na barreira.

ZHANG et al. (1990) mediram em ensaios de campo as forças de impactos de blocos e da pressão do fluxo dinâmico de formas diferentes, empregando células

de carga, medidores de deformação do tipo *strain gauges* e sensores piezoelétricos. As mais de 70 medições de forças de impacto forneceram um fator empírico variando entre 3 e 5. Mostraram também que a força de impacto é diretamente proporcional ao cosseno do seu ângulo. Essa variação do fator empírico se deve à densidade da lama que nunca é a mesma, além da dimensão dos blocos (ZHANG, 1993).

VANDINE (1996), HUNGR et al. (1984), ISHIKAWA et al. (2008) e CANELLI et al. (2012) acreditam que a força de impacto de fluxos de detritos deve ser uma função da área da seção transversal do fluxo. HUNGR et al. (1984) sugerem a seguinte equação de momento para calcular a força de impacto de fluxos de detritos sobre barreiras:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \cdot \sin \beta \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

A = Área da seção transversal do fluxo em m²;

α = Fator empírico;

β = Ângulo entre a face da barreira e a direção do fluxo.

HUNGR et al. (1984) recomendam um fator de segurança igual a 1,5, levando em consideração a acumulação inicial dos detritos a montante da barreira, os quais formam cunhas de empuxo estático contra a barreira, além da possibilidade do material galgar a barreira devido ao seu preenchimento pelos detritos.

ISHIKAWA et al. (2008) realizaram ensaios em modelo reduzido para a medição da força de impacto do fluxo de detritos. Eles testaram diversas misturas de materiais, água somente, sedimentos e água, e mistura de pedregulhos, sedimentos e água. Os resultados dos ensaios mostraram que a força calculada usando a Equação 4 é similar à força resultante obtida depois dos primeiros impactos. Além disto, a máxima força medida nos ensaios é 1,7 a 1,8 vezes maior do que a força calculada com a Equação 4. Consequentemente, o fator de segurança

de ISHIKAWA et al (2008) varia entre 1,0 e 1,8, enquanto o HUNGR et al (1984) é 1,5.

CANELLI et al. (2012) também fizeram ensaios em modelos reduzidos, cujos resultados indicaram um fator de segurança entre 1,5 e 5,0, o qual está relacionado com a possível formação de uma protuberância vertical depois do impacto. Embora pouco provável, a ocorrência de tal fenômeno levaria a uma subestimativa do valor de impacto de projeto, e, portanto, um incorreto dimensionamento da barreira. Por esta razão, durante a fase de projeto, o tipo de fluxo, canalizado ou de superfície livre, deve ser relacionado com o tipo de barreira instalada, rígida ou flexível. Em adição, o fluxo de detrito deve ser assumido como um fluxo homogêneo.

CANELLI et al. (2012) apresentam a evolução da onda de impacto com o tempo e a magnitude da força de impacto, conforme ilustrado no esquema da Figura 28. Observa-se que a força de impacto é maior uma vez formada a protuberância. Todavia, imediatamente depois do impacto (B), ocorre um decréscimo da força de impacto, para logo depois aumentar e atingir a força de pico.

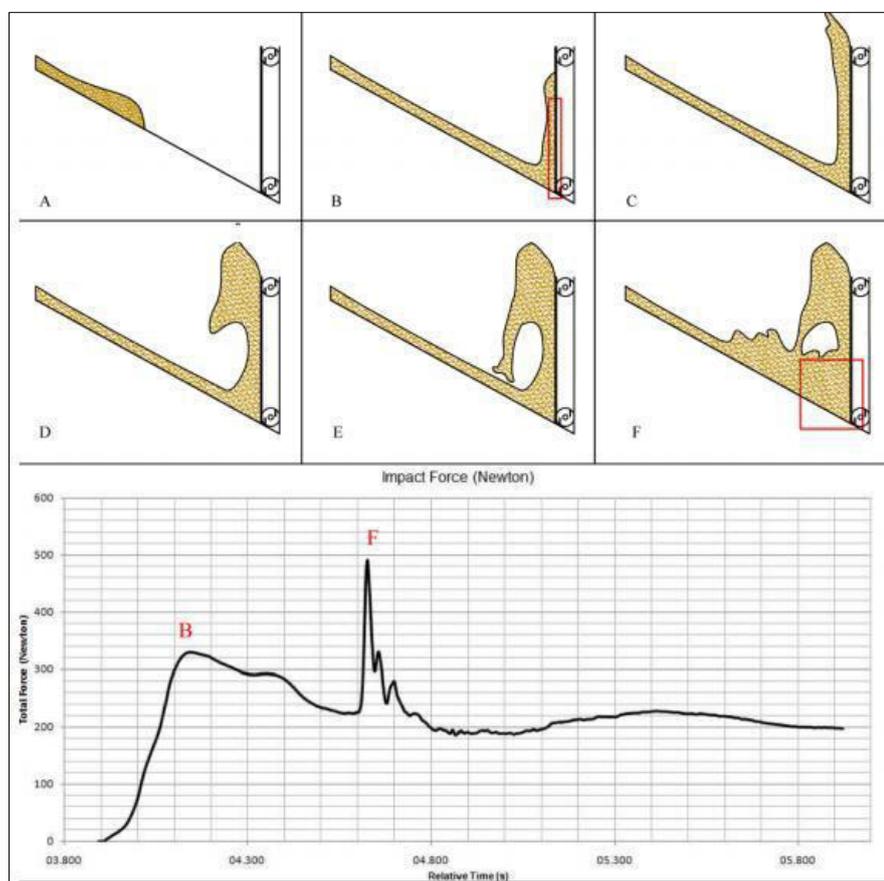


Figura 28 – Evolução da onda de impacto com o tempo e variação da força de impacto (CANELLI et al., 2012).

DAIDO (1993) propôs um modelo que considera que a força de impacto depende da densidade, altura e velocidade do fluxo de detrito, afetados pelo fator empírico que varia entre 5 e 12, expresso por:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot h \cdot v^2 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

h = Altura do fluxo de detritos em m;

α = Fator empírico.

HUBL & HOLZINGER (2003) realizaram ensaios em um modelo reduzido para medição da força de impacto, a qual foi normalizada por meio de formulação hidrodinâmica. Consideraram o Número de Froude que é um número adimensional, que representa a relação entre a velocidade da correnteza e a velocidade de onda gravitacional e define os regimes de escoamento do fluxo em crítico, fluvial e torrencial em função do valor do Número de Froude igual a 1, menor que 1 e maior que 1, respectivamente.

Os autores adotaram o Número de Froude, para obter relações livres de escala, o qual foi inserido na expressão para determinação da força de impacto, dada por:

$$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

A Figura 29 apresenta valores obtidos de medidas de campo e de laboratório em modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos e relações de forças de impacto, correlacionados com o Número de Froude, HUBL et al. (2009). Verifica-se na área retangular à esquerda do gráfico, que representa dados de eventos naturais de fluxos de detritos já ocorridos, que os valores de Número de Froude variam entre 0 e 2. Os valores do Número de Froude obtidos de ensaios em modelos reduzidos, concentrados na área retangular da parte inferior do gráfico variam entre 1,2 e 12. Portanto, os modelos desenvolvidos em laboratório não fornecem valores do Número de Froude compatíveis com os obtidos em eventos reais de fluxos de detritos.

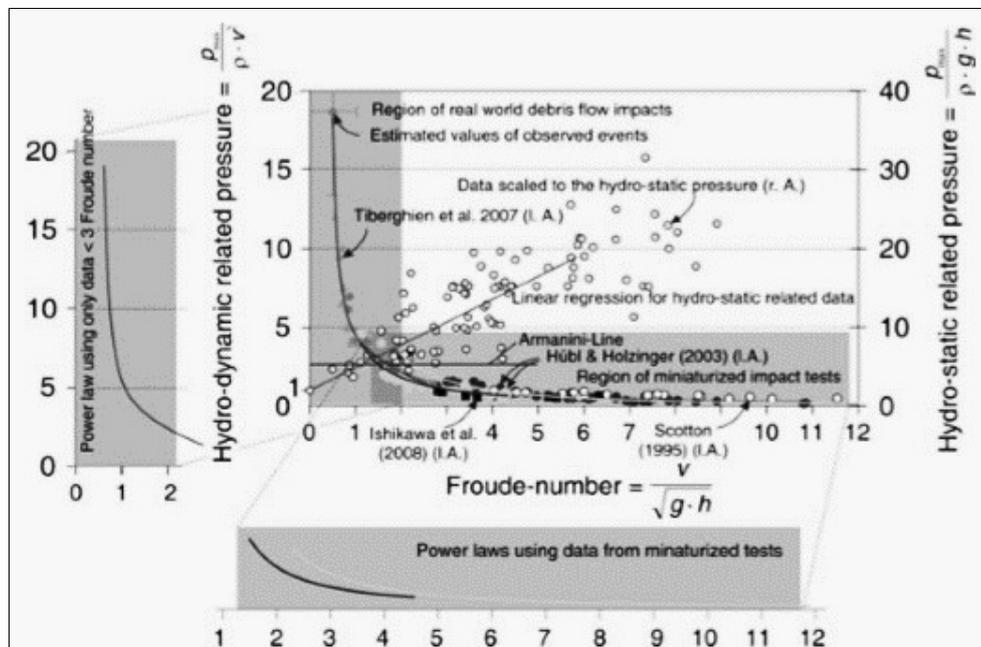


Figura 29 – Relação entre força de impacto de fluxos de detritos e Número de Froude, obtidos em campo e laboratório (HUBL et al., 2009).

Da Figura 29, pode-se observar que os modelos hidrodinâmicos não são bem representados quando os valores de Número de Froude são reduzidos. Porém, passam a ser bem representados com valores de Froude acima de 2. Em contrapartida, os modelos hidrostáticos são bem representados com valores baixos do Número de Froude, indicativos de regime de fluxo fluvial ou subcrítico.

Os modelos hidrodinâmicos podem ser comparados com os hidrostáticos por meio do Teorema de Bernoulli, permitindo a obtenção de valores empíricos de k com a expressão:

$$a \cdot \rho_{Mu} \cdot \frac{v^2}{2} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 7}$$

A Tabela 5, proposta por HUBL et al. (2009), apresenta os valores do fator empírico k para os diferentes modelos assumindo a Equação 7 e o Número de Froude igual a 1. Nota-se que os valores de k da tabela devem ser somente usados para a comparação entre os modelos hidrostáticos. Ao se comparar os valores do fator empírico da mesma tabela, conforme propostos pelos diferentes autores, observa-se que o fator empírico é duplicado nos modelos hidrodinâmicos.

Tabela 5 – Estimativas do fator empírico k para diferentes modelos (HUBL et al., 2009).

Autor	Fator Empírico k	Observações
Kherkheulitze	1	Valores médios, não valores máximos
Vandine	1,25 x A	Dificuldade ao intrudizer a área
Watanabe & Ikeya	4	
Lichtenhahn	2,8 - 4,4	Transferencia da densidade da agua para densidade do fluxo de detritos
Armanini	5	
Zhang	6 - 10	Medições em campo
Hubl & Holzinger	7,5	Dificuldade nos exponentes
Tiberghien	13,5	Ensaio modelos reduzidos
Aulitzky	25 - 50	Velocidade da onda de colisão é estimada

O padrão de carregamento de uma estrutura de proteção atingida por fluxo de detritos é essencial para a determinação da máxima força de impacto. A Figura 30 apresenta diferentes padrões de carregamentos para impactos de fluxos de detritos. O padrão de carregamento sugerido por HUBL et al. (2009) considera um possível fluxo de detritos em várias ondas sucessivas, preenchendo o espaço de depósito na frente da barreira de proteção.

CUI et al. (2015) desenvolveram um modelo reduzido no qual consideram que a força de impacto, além de depender do Número de Froude, também depende

do Número de Reynolds. Comparam os dados obtidos no modelo com os resultados observados em campo na Ravina Jiangjia, conforme apresentado na Figura 31. Os autores observam que o regime do fluxo e o processo de impacto podem ser divididos em três etapas:

- i. Impacto rápido e de grande magnitude da cabeça do fluxo de detritos em regime turbulento;
- ii. Impacto contínuo e estável do corpo do fluxo de detritos em regime laminar;
- iii. Pressão estática da parte final do fluxo de detritos.

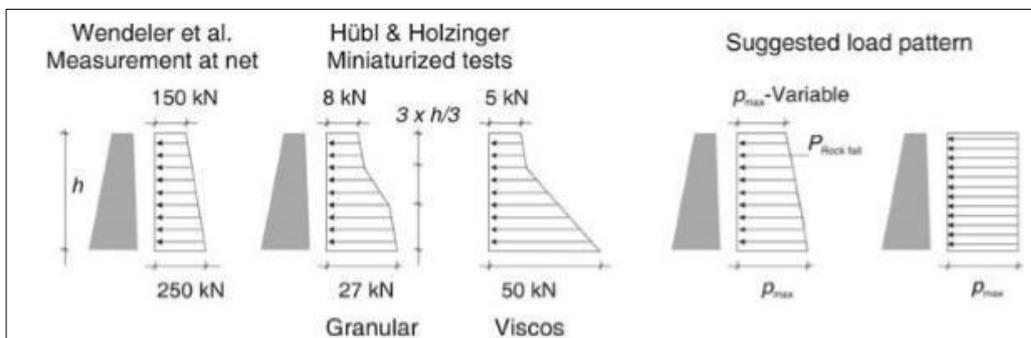


Figura 30 – Padrões de carregamento para impactos de fluxos de detritos (HUBL et al., 2009).

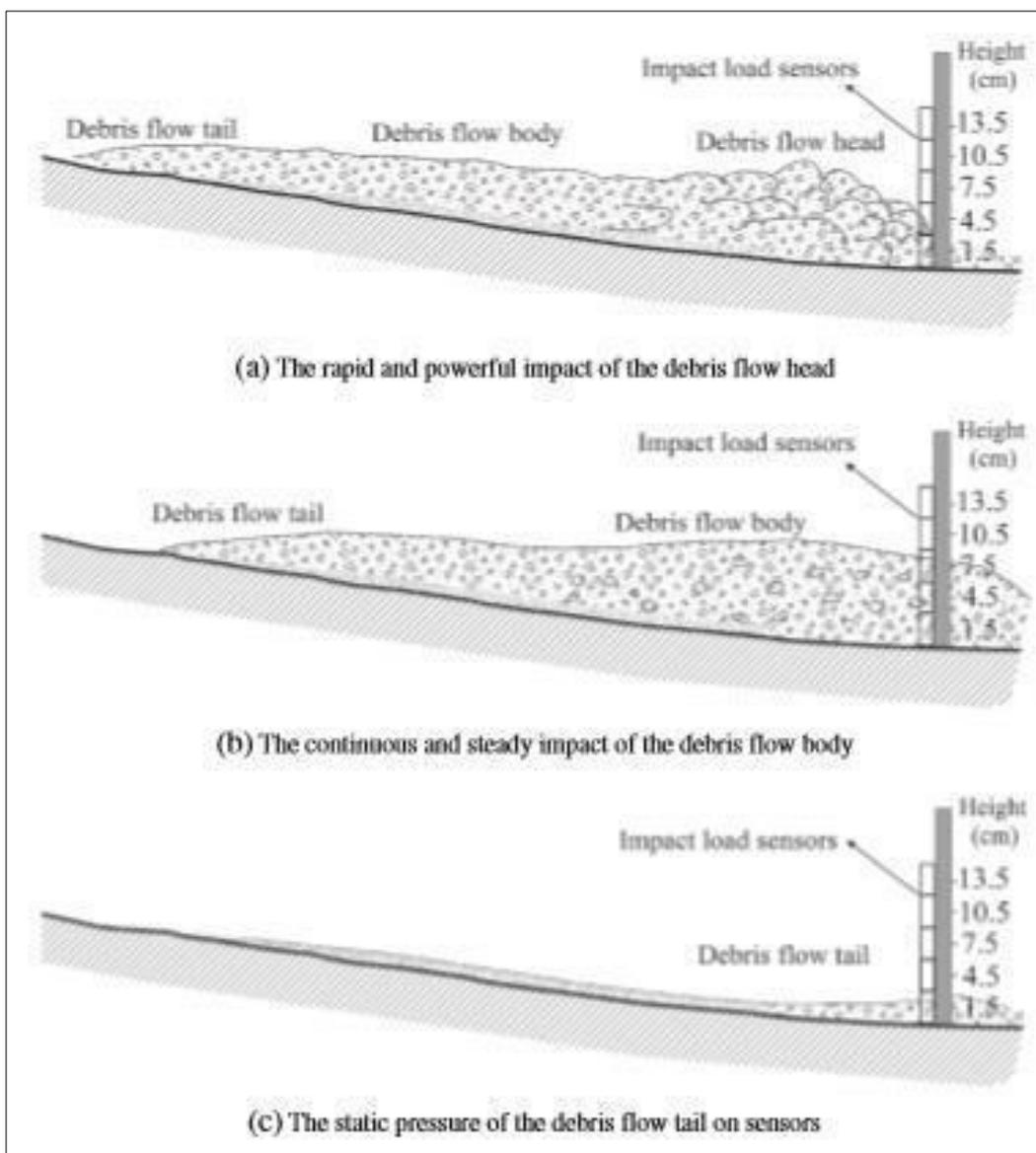


Figura 31 – Impacto de fluxo de detritos medidos com sensores (CUI et al., 2015).

Os padrões de carregamento apresentados por CUI et al. (2015) na Figura 32 são baseados na hipótese de um impacto contínuo do fluxo que varia com o tempo. O primeiro momento é quando o fluxo de detritos atinge a estrutura com regime turbulento e o ponto de contato está a $1/3$ da profundidade. Em seguida, existe uma pressão dinâmica contínua na estrutura que leva à deformação com a carga de distribuição trapezoidal e, por fim, ocorre uma diminuição da velocidade.

Nota-se que, caso seja considerado somente o impacto rápido do fluxo de detritos, e ignorado o processo do impacto contínuo, o carregamento das barreiras tende a ser subestimado, colocando em risco o desempenho da estrutura de proteção.

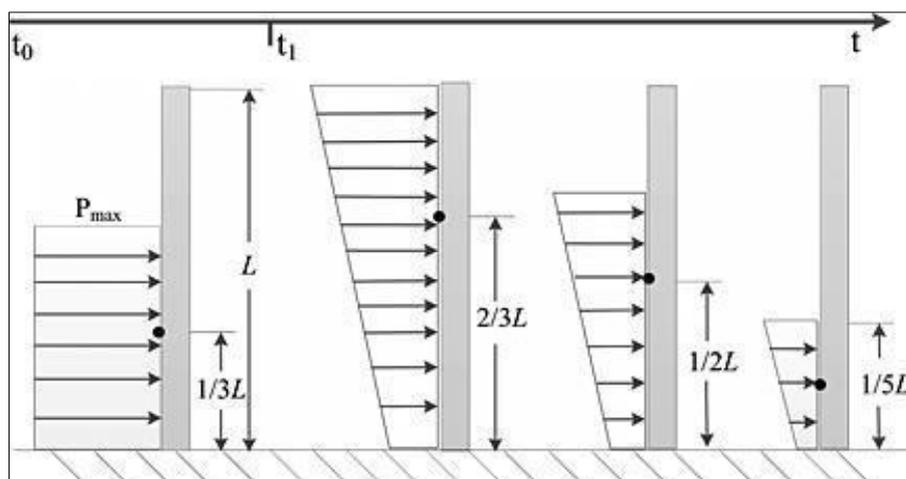


Figura 32 – Padrões simplificados de carregamento de impacto de fluxos de detritos em estruturas (CUI et al., 2015).

ZANUTTIGH & LAMBERTI (2006) e HUBL et al. (2009) consideraram o Número de Froude para calcular a força de impacto. ZANUTTIGH & LAMBERTI (2006) também inserem o fator C_c , que é um fator empírico que tem que ser calibrado considerando a aceleração vertical dos materiais. Desta forma, os autores propõem que a força de impacto seja determinada por:

$$P_{m\acute{a}x} = C_c \cdot \frac{(1+\sqrt{2} \cdot Fr)^2}{2} \cdot g \cdot \rho_{Mu} \cdot h^2 \quad \text{Eq. 8}$$

HUBL et al. (2009) substituem o fator empírico α e acrescentam mais dois fatores (a e b), resultando na expressão:

$$P_{Mu} = a F_r^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 9}$$

ARMANINI et al. (2011) continuaram com as pesquisas da força de impacto e mais recentemente, consideraram o Número de Froude com a hipótese de que, no momento do impacto, a distribuição de pressão na parede é hidrostática. Das análises realizadas, os autores observaram que são produzidos dois tipos de fluxos em um mesmo impacto: a formação de uma onda completamente refletida e a formação de uma protuberância vertical, e por isto é chamado de “esquema de duas fases”. Propõem a expressão para determinação da força de impacto:

$$F^- = \frac{0,5(g\rho_{Mu}h_{Mu}^2) + \psi\rho_{Mu}v^2h_{Mu}}{0,5(g\rho_{Mu}h_{Mu}^2)} = \left[1 + \frac{F_r^2}{2}\right] \left[1 + \frac{\psi F_r^2}{1+0,5F_r^2}\right] \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

F^- = Força de impacto adimensional;

ψ = Parâmetro de ajuste, usualmente igual a 1;

F_r = Número de Froude;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

CUI et al. (2015) desenvolveram um banco de dados com mais de 155 amostras (Figura 33) e considerando um modelo de regressão hidrodinâmica, conseguiram determinar os valores dos coeficientes da seguinte expressão de pressão de impacto:

$$P_{m\acute{a}x} = 5,3F_r^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 11}$$

Ressalte-se que as amostras utilizadas para obtenção da Equação 11 tem valores de Número de Froude entre 0,6 e 10,8.

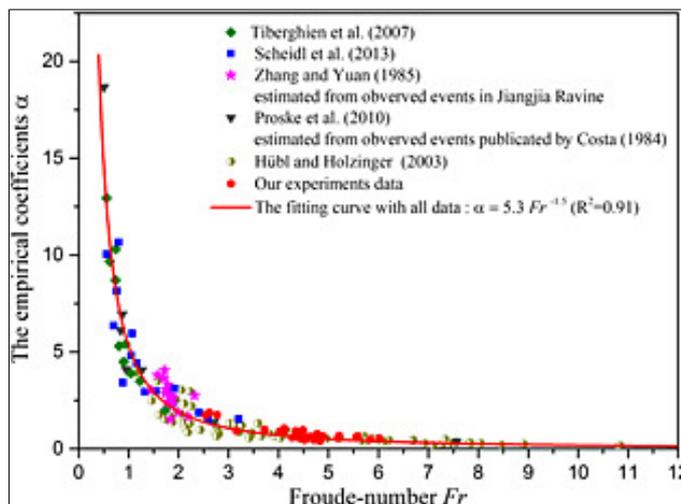


Figura 33 – Relação entre o coeficiente empírico α e o Número de Froude (CUI et al., 2015).

SCHEIDL et al. (2013) investigaram o Número de Froude e suas correlações com os coeficientes empíricos dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos, e determinaram que a expressão geral dos modelos de impacto dinâmico representa melhor o impacto dos fluxos de detritos, quando comparados aos modelos hidrostáticos.

HE et al. (2016) apresentaram um modelo de força de impacto que associa a influência da lama, pedregulhos e blocos de rocha no fluxo de detritos. A distribuição do padrão de carregamento depende do tipo do fluxo de detritos: viscoso e diluído, apresentados nas Figuras 34 e 35, respectivamente.

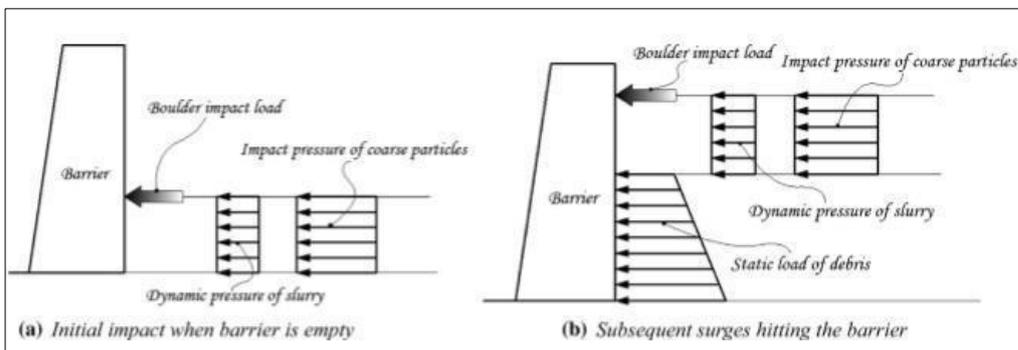


Figura 34 – Padrão de carregamento do fluxo de detritos viscoso (HE et al., 2016).

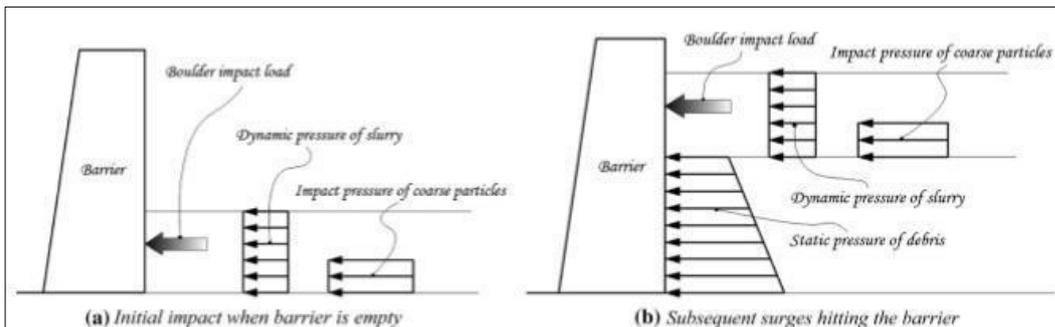


Figura 35 – Padrão de carregamento do fluxo de detritos diluído (HE et al., 2016).

As forças de impacto dos pedregulhos podem ser determinadas por:

$$P_g = 0,964E^{0,4} \rho_S^{0,6} v_S^{1,2} \phi \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

P_g = Força de impacto dos pedregulhos;

ρ_s = Densidade dos pedregulhos no fluxo de detritos kg/m³;

E = Módulo de elasticidade;

v_s = Velocidade em m/s;

Φ = volume de fração sólida do fluxo de detritos.

3.1.1.3. Modelos Hidráulicos – Mistos

Alguns modelos hidráulicos da literatura são reconhecidos como mistos, uma vez que aliam características dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos. Dentre esses modelos, encontram-se os propostos por ARATTANO & FRANZI (2003).

O modelo de ARATTANO & FRANZI (2003) se baseia em dados de campo obtidos por instrumentação do comportamento dinâmico de um fluxo de detrito nos alpes italianos. Os pesquisadores utilizaram diferentes alternativas computacionais, que resultou na proposta de um modelo matemático. Tal modelo assume uma massa homogênea de água/sedimento sobre uma base rígida. Não considera efeitos de deposição nem assoreamento ao longo do canal e o processo de propagação é assumido como monodimensional. Aplicando leis de conservação de momento e equações diferenciais parciais, a força de impacto do fluxo de detritos é definida pela seguinte equação baseada em ARMANINI & SCOTTON (1993):

$$|F| = |F1| + |F2| = \rho Q|V| + \frac{1}{2} g\rho h^2 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

Q = Descarga água-sedimento em m³/s;

$|V|$ = Velocidade média em m/s;

ρ = Massa específica em kg/m³;

g = Gravidade em m/s²;

h = Altura da estrutura em m.

A primeira parcela da equação depende de dois parâmetros reológicos da simulação: “c” que depende da concentração de sedimentos e “n” que depende do comportamento reológico do fluido. Esses parâmetros podem ser calibrados por modelagens numéricas ou calculados com auxílio de teorias propostas por

PIERSON & COSTA (1987), RICKENMANN (1999), TAKAHASHI (1991), TAKAHASHI & NAKAGAWA (1992). A segunda parcela da equação é associada ao modelo hidrostático de ARMANINI & SCOTTON (1992).

SEGALINI et al. (2016) propuseram um método considerando três componentes de forças aplicadas em barreiras flexíveis, as quais são geradas em sequência após o impacto do fluxo de detritos, a saber: força dinâmica, força estática e força de arraste. A força dinâmica é produzida pelo impacto do fluxo de detritos, posteriormente os detritos vão se acumulando na barreira produzindo uma força estática. Quando a altura dos detritos ultrapassa a barreira é produzida a força de arraste. As forças dinâmicas (P_1), estática (P_2) e de arraste (P_3) são expressas respectivamente por:

$$P_1 = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$P_2 = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 15}$$

$$P_3 = \tan\varphi \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_d \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

φ = Ângulo de atrito do fluxo;

h_d = Altura do fluxo de detritos que ultrapassa a barreira em m;

α = Fator empírico recomendado igual a 2;

k = Coeficiente de empuxo de terra igual a 1.

VAGNON & SEGALINI (2016) estudaram a força de impacto contra uma parede rígida. A Figura 36 apresenta o esquema do modelo pesquisado. Um dos principais problemas deste modelo é a quantidade de dados de entrada para cada tipo de força, conforme as expressões:

$$F_{m\acute{a}x} = F_{stat} + F_{dyn} \pm F_{drag} \quad \text{Eq. 17}$$

$$F_{stat} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \rho \cdot K_a \cdot (H_{max}^2 - h_f^2) \cdot B \cdot \cos\theta \quad \text{Eq. 18}$$

$$F_{dyn} = \alpha \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot \cos\beta \quad \text{Eq. 19}$$

$$F_{drag} = g \cdot \rho \cdot h_f \cdot \tan\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\theta \cdot B \cdot \frac{H_{max} - h_f}{\sin\theta} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde:

F_{stat} = Força ativa do solo em kN;

F_{dyn} = Força dinâmica em kN;

F_{drag} = Força de arraste em kN;

g = Gravidade em m/s^2 ;

ρ = Densidade do material em kg/m^3 ;

K_a = Condição ativa de Rankine;

H_{max} = Altura máxima do fluxo de detritos contra a barreira em m;

h_f = Profundidade do fluxo de detritos em m;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

θ = Ângulo da encosta;

β = Ângulo entre a barreira e a normal da superfície do canal;

φ = Ângulo de atrito do fluxo;

A = Área da seção transversal;

B = Comprimento horizontal da barreira em m.

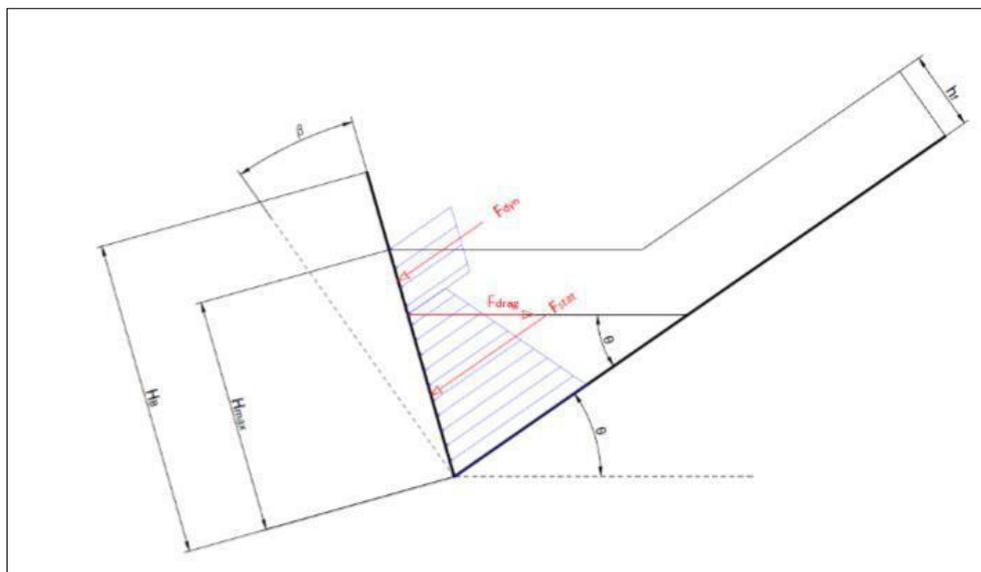


Figura 36 – Esquema do modelo de VAGNON & SEGALINI (2016).

3.1.2. Modelos Empíricos

Os modelos empíricos para estimar a força de impacto em barreiras geralmente assumem uma pressão hidrostática distribuída associada a um fator empírico de impacto (LO, 2000).

THURBER CONSULTANTS LTD (1984) projetaram barreiras na Suíça e na Áustria como a seguinte equação:

$$P = \frac{\alpha \cdot \rho_w \cdot g \cdot d^2}{2} \quad \text{Eq. 21}$$

Onde:

P = Força de impacto (kPa);

α = Fator empírico de impacto;

ρ_w = Densidade da água (kg/m³);

g = Gravidade (m/s²);

d = Altura do fluxo contra a barreira (m).

O fator empírico varia entre 3 a 5 nas barreiras na Áustria e na Suíça possui um valor fixo de 3. A base dessa abordagem empírica não é bem documentada, mas pode ser comparada com resultados de medições reportadas na literatura.

WU et al. (1993) propõem a Tabela 6 para estimar a força de impacto no dimensionamento de barreiras na Rússia. A força de impacto depende da magnitude do fluxo de detritos, da profundidade do fluxo e do diâmetro do maior bloco do fluxo de detritos.

Tabela 6 – Forças de impacto de fluxos de detritos na Rússia (WU et al., 1993).

Magnitude do Fluxo de Detritos	Máxima Profundidade do Fluxo (m)	Diâmetro maior de Bloco (m)	Força de Impacto (kPa)
Pequeno	< 2	< 0,50	50 a 60
Médio	2 a 3	< 0,70	70 a 80
Médio a Grande	3 a 5	< 1,50	90 a 100
Grande	5 a 10	2,50 a 3,00	110 a 150
Gigante	> 10	> 3,00	150 a 300

YU (1992) propõe um modelo empírico considerando a mudança dinâmica do fluxo para estimar a máxima força de impacto do fluxo de detritos, sendo proposta a equação:

$$P = \sqrt{D_{max}} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{Eq. 22}$$

Onde:

P = Força de impacto (kPa);

ρ = Densidade do fluxo (kg/m³);

v = Velocidade do fluxo (m/s);

D_{\max} = Maior diâmetro do fluxo (m);

g = Gravidade (m/s^2).

Em comparações feitas com o modelo proposto por YU (1992) resulta-se em forças de impacto subestimadas sobremaneira (HUBL et al., 2009).

3.1.3. Modelos de Impacto de Corpos Sólidos

Esses modelos são baseados nos modelos de Hertz assumindo o comportamento elástico do material. Contudo, existem modelos alternativos considerando o comportamento viscoelástico e elasto plástico, tais como apresentados por KUWABARA & KONO (1987) e WALTON & BRAUN (1986). Também existem pesquisas que empregam modelos de Kelvin-Voigt, baseados no sistema de molas.

O pioneiro dos modelos de impacto de corpos sólidos foi proposto por CUNDALL & STRACK (1979), que fizeram modelagens de elementos discretos de fluxos aplicados para geofísica, astrofísica e sistemas industriais.

A iteração entre grãos é muito complicada para construir modelos no qual todas as propriedades de um sistema granular possam ser descritas com acurácia. Consideram ainda que é muito mais vantajoso identificar os componentes básicos do sistema e, a partir daí, construir um modelo que considera a repulsão entre duas partículas em contato e a dissipação da energia durante a colisão. Em alguns casos, a rotação de partículas pode ser importante.

Segundo STEVENS & HRENYA (2005), esses modelos podem ser divididos em duas categorias: modelos de esferas duras e modelos de esferas moles. No primeiro, a colisão entre as partículas é assumida como instantânea e de natureza binária. Já o modelo de esferas moles considera o contato pleno de partículas,

acompanhando a dinâmica do contato entre partículas e, devido a sua complexidade, as forças são simplificadas para descrever a fase de contato.

Os modelos de força de impacto de corpos sólidos para fluxo de detritos são definidos como modelos de esferas moles, porque têm a vantagem de serem aplicados para vários sistemas, incluindo fluxos rápidos e fluxos lentos. No entanto, a principal desvantagem é seu alto custo computacional e a determinação dos parâmetros de entrada.

Na Tabela 7 encontram-se resumidos os modelos de esferas moles mais conhecidos com suas características de tipo de regime, dados de entrada e leis de forças. Os subíndices 1 e 2 correspondem às propriedades das partículas 1 e 2, respectivamente. A variável “m” é a massa e “F_n” é a força normal experimentada pela partícula durante o contato. O parâmetro ξ corresponde ao fator de sobreposição e é definido pela seguinte equação:

$$\xi = \max(0, R_1 + R_2 - |r_2 - r_1|) \quad \text{Eq. 23}$$

Tabela 7 – Características dos modelos de esferas moles e leis de forças (Adapt. STEVENS & HRENYA, 2005).

Nome	Abreviatura	Regime	Input	Lei de forças
Kuwabara & Kono	KK	Visco elástico	\tilde{k}_n, γ_{n2}	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2} + \gamma_{n2} \xi^{1/2} d\xi/dt$
Lee & Hermann	LH	-	\tilde{k}_n, γ_{n3}	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2} + \gamma_{n3} m_{\text{eff}} V_n$
Walton & Braun e constante	WBCE	Elasto plástico	k_L, k_U	$F_{n,\text{loading}} = k_L \xi; F_{n,\text{unloading}} = -k_U(\xi - \xi_0)$
Walton & Braun e variável	WBVE	Elasto plástico	k_L, S	$F_{n,\text{loading}} = k_L \xi; F_{n,\text{unloading}} = (k_L + SF_{\text{max}})(\xi - \xi_0)$
Thornton	T	Elasto plástico	\tilde{k}_n, p_y	$F_{n,\text{elastic loading}} = \tilde{k}_n \xi^{3/2}; F_{n,\text{plastic loading}} = F_y + \pi p_y R_{\text{eff}}(\xi - \xi_y); F_{n,\text{elastic unloading}} = \tilde{k}_n(\xi - \xi_p)^{3/2}$
Hertz		Elástico	$\tilde{k}_n = \frac{4}{3} \sqrt{R_{\text{eff}}} E_{\text{eff}}$	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2}$
Mola linear	LSD	-	k_n, β_n	$F_n = k_n \xi + \beta_n \gamma_{n,\text{crit}} d\xi/dt$

3.1.4. Modelos de Ondas de Colisão

A literatura contempla poucos modelos de ondas de colisão, reportando-se apenas aos modelos propostos por AULITZKY (1989). Levando em consideração a velocidade

das ondas de choque nos fluxos de detritos. Para SACOTO (2107), na prática, a obtenção da velocidade das ondas de choque em eventos reais de fluxo de detritos é extremamente difícil, ou até mesmo impossível.

3.2. Impacto de Blocos Rígidos

Para vários pesquisadores o impacto dos blocos rígidos, devido aos esforços gerados, pode ser maior que os produzidos pelo impacto do fluxo de detrito viscoso (MIZUYAMA, 1979; YAMAGUCHI, 1985; HUANG et al., 2007; HUNGR et al., 1984; ZHANG, 1993; LIEN, 2002).

HE et al. (2016) consideram que, quando bloco flutua sobre a lama do fluxo de detrito, a velocidade do bloco é igual a velocidade do fluxo. No entanto, quando o bloco se desloca independentemente do fluxo de detritos, seu atrito aumenta e, por consequência, sua velocidade é menor.

YAMAGUCHI (1985), MIZUYAMA (1979), LIEN (2002) e HUANG et al. (2007) consideram que a força de impacto do bloco é derivada da teoria da colisão elástica, porém pode ser melhor estimada quando são realizadas investigações de campo e testes em modelos reduzidos. A Tabela 8 apresenta as forças de impacto estimada pelos autores, onde “F” é a força de impacto (kN), “U” é a velocidade do bloco (m/s) e “R” é o diâmetro do bloco (m).

Tabela 8 – Modelos de força de impacto de blocos (SACOTO, 2017).

Autor	Modelo	Observação
Mizuyama (1979)	$F = 241 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
	$F = 48,2 U^{1,2} R^2$	Modificada por dados de campo
Yamaguchi (1985)	$F = 426 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
	$F = 50 U^{1,2} R^2$	Modificada por dados de campo
Lien (2002)	$F = 80,8 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
Huang et al (2007)	$F = 30,8 U^{1,2} R^2$	Modificada por modelos reduzidos

Conforme abordado por HUNGR et al. (1984), o impacto dos blocos pode ser importante no dimensionamento de alguns elementos estruturais e depende principalmente do momento produzido pela maior partícula. Sugerem que seja assumida uma esfera com diâmetro igual ao da profundidade do fluxo. As forças de

impacto podem ser estimadas usando a Equação de Hertz, mas os resultados são muito conservadores. Portanto, preferem-se utilizar a energia cinética do bloco e a deflexão da estrutura para a determinação da força de impacto, dada por:

$$F = \sqrt{MKU^2} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde:

F = Força de impacto em kN;

U = Velocidade em m/s;

K = Fator de rigidez da estrutura;

M = Massa do bloco em kg.

ZHANG (1993) propõe modelos de força de impacto de blocos em função do tipo de estrutura de contenção e da mecânica dos materiais, divididos em estruturas em balanço (pilares, pontes e píer) e estruturas simplesmente apoiadas (barragens e barreiras).

O modelo para estrutura em balanço é expresso por:

$$F = \sqrt{\frac{3EJGV^2 \cos^2 \beta}{gL^3}} \quad \text{Eq. 25}$$

O modelo para estrutura simplesmente apoiada é expresso por:

$$F = \sqrt{\frac{48EJGV^2 \cos^2 \beta}{gL^3}} \quad \text{Eq. 26}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade da estrutura (Kg/m²);

J = Momento de inércia (m⁴);

G = Peso do bloco submergido no fluxo de detritos (kg);

V = Velocidade do bloco (m/s);

G = aceleração da gravidade (m/s²);

L = Comprimento da estrutura (m);

β = Ângulo entre a face da estrutura e a direção do fluxo.

HE (2016) propõe um modelo baseado na teoria de contato de Hertz, considerando as deformações elásticas e plásticas da barreira. O modelo conta com os coeficientes “c” e “n” que descrevem a característica do material da estrutura de proteção e a força de impacto é dada por:

$$F = C \left[\frac{Mv^2(n+1)}{2c} \right]^{n/(n+1)} \quad \text{Eq. 27}$$

Os impactos de blocos nas estruturas acarretam elevadas forças. Para a modelagem dos impactos é necessário ter mais informações sobre a rigidez e resistência das estruturas. Por conseguinte, a modelagem por forças não seria mais possível e o modelo aumentaria sua complexidade. Esses modelos não seriam aplicáveis em condições práticas, além disso, exigiriam extensos dados de entrada (HUBL et al., 2009).

CANELLI et al. (2012) acreditam que as barreiras flexíveis permitem uma redução dos efeitos dos blocos devido à grande área de contato entre a barreira e o bloco.

3.3. Cenários Diversos

Frequentemente, os fluxos de detritos, além dos detritos e da água, apresentam blocos de rocha entre seus materiais. Em geral, os blocos de rocha são os primeiros a produzir o impacto, seguido dos outros materiais que formam os fluxos de detritos. VANDINE (1996) reporta que as cargas de impacto de cada material que se choca em uma estrutura vão diminuindo progressivamente devido ao depósito de detritos que atingem a barreira nos primeiros momentos, o que aumenta a importância de conhecimento das forças de impacto dos blocos rígidos.

LO (2000) mostra que o primeiro impacto de bloco de rocha assim como todos os impactos seguintes devem ser considerados para dimensionamento das barreiras. Portanto, o impacto dos blocos de rocha e de outros detritos devem ser considerados separadamente baseados nas abordagens pseudo estáticas.

O NILIM (*National Institute for Land and Infrastructure Management*), no Japão, recomenda que a carga de dimensionamento deve considerar uma

superposição das forças de impacto dos blocos e os detritos. Já o SWCB (*Soil and Water Conservation Bureau*), na China, considera que as estabilidades das barreiras devem ser analisadas contemplando o impacto dos blocos e dos detritos separadamente. Primeiro considera-se o impacto do fluxo de detritos sem os blocos, e depois considera-se o impacto de um bloco no topo da barreira.

Por outro lado, SUN et al. (2003) consideram que o volume do fluxo de detritos deve ser dobrado para o dimensionamento de barreiras rígidas, que admitem um deslocamento de 1,5m. Esse volume dobrado do fluxo de detrito é considerado um fator de segurança relacionado ao grau de incerteza da estimativa do volume.

KWAN (2012) reúne diversas abordagens de vários autores e entidades governamentais que têm pesquisado os diferentes cenários de impacto dos fluxos de detritos e faz as seguintes recomendações para o dimensionamento de estruturas de proteção em diferentes cenários:

- i. Já que o fluxo de detritos pode atingir a barreira em forma de pulsos, múltiplos ciclos de carga devem ser considerados para dimensionar a estrutura (Figura 37). Portanto, o primeiro ciclo de carga (primeiro pulso) deve ser adotado para os seguintes com o objetivo de reforçar a barreira;
- ii. No caso da presença de blocos de rocha no fluxo de detritos, eles devem ser considerados em todos os ciclos de carregamento, especialmente no primeiro ciclo (pulso). O impacto do bloco deve ser dividido pela largura da barreira, adotando-se aquele com maior diâmetro;
- iii. O dimensionamento deve contemplar a possibilidade do fenômeno de galgamento (ultrapassagem) da barreira e, conseqüentemente, a força de arraste (Figura 38);
- iv. O dimensionamento deve considerar as pressões estáticas de solo e água ao longo da barreira (Figuras 37 e 38). O coeficiente de pressão lateral de solo é considerado igual a $\frac{1}{2}$ e os detritos são semelhantes a uma lama espessa;
- v. Na possibilidade de uma queda de bloco, a barreira deve ser revisada para resistir ao impacto do bloco, além do impacto de blocos na massa do fluxo de detritos.

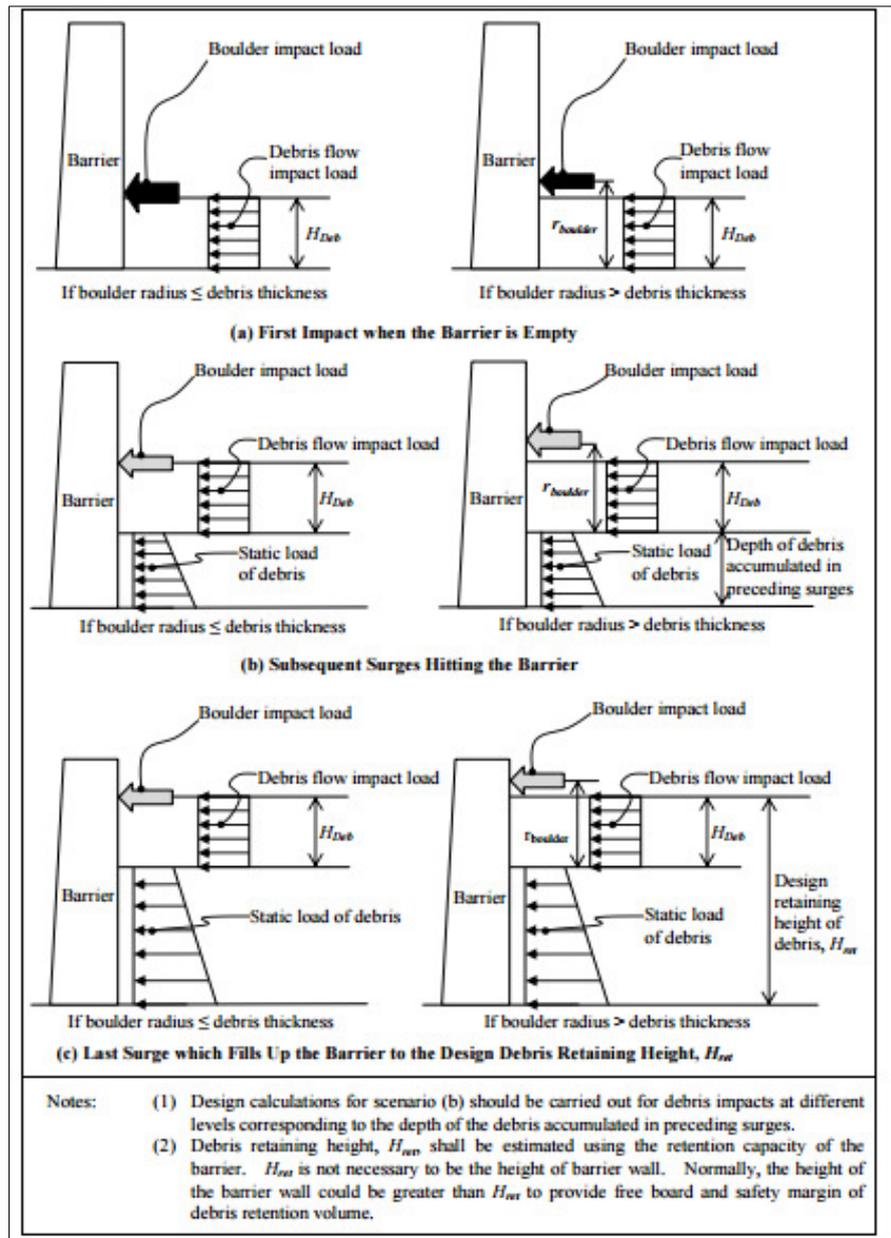


Figura 37 – Modelo de múltiplos impactos dos detritos (KWAN, 2012).

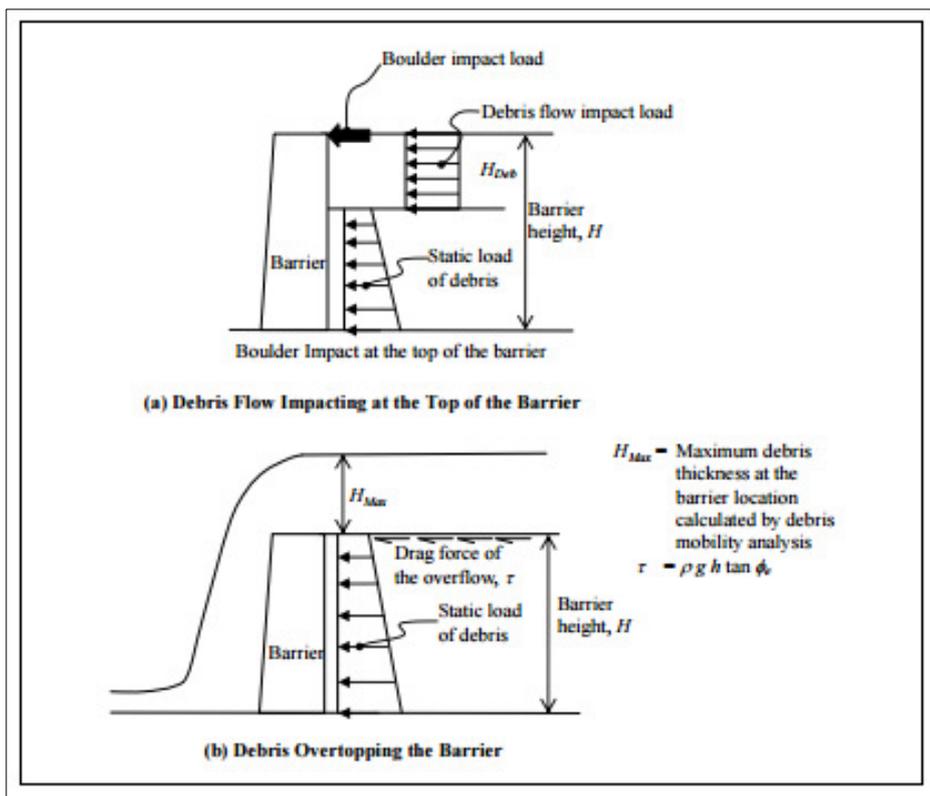


Figura 38 – Modelo de impacto de queda de bloco e galgamento da barreira (KWAN, 2012).

3.4.

Considerações do Uso dos Modelos de Força de Impacto

SUWA & OKUDA (1983) dissertam que os impactos dos blocos de rocha são duas ou três vezes maiores que a pressão dinâmica da lama do fluxo de detritos e acreditam que é este é principal impacto a ser considerado e aquele que pode danificar uma estrutura.

Autores como HE et al. (2016) afirmam que a força de impacto deve ser dividida em três partes: a pressão dinâmica da lama do fluxo de detritos, a força de impacto dos agregados grosseiros e a força de impacto dos blocos de rocha. Porém, ARMANINI (1997) acredita que devido à velocidade mais reduzida dos blocos de grandes dimensões, o efeito também tem menor importância quando comparado às pressões hidrodinâmicas.

Devido à dificuldade da seleção dos diferentes modelos de carregamento existentes na literatura para projeto da estrutura de proteção, HUBL et al. (2009) fazem importantes sugestões:

- i. Modelos devem ser convergentes. Ao incrementar a qualidade dos dados de entrada, a qualidade do modelo deve aumentar;
- ii. Pequenas alterações nos dados de entrada também produzem pequenas mudanças nos resultados;
- iii. Modelos não devem ter erros sistemáticos;
- iv. Dados de entrada devem ser medidos ou calculados;
- v. Modelo deve ser prático e de uso fácil;
- vi. Modelo deve ter alguma base teórica;
- vii. Modelo deve ser escolhido de acordo com os eventos históricos do lugar;
- viii. Entre modelos com mesma a acurácia, deve-se escolher aquele com menor número de dados de entrada.

A Tabela 9 apresenta um resumo dos modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos analisados na presente pesquisa.

Finalmente, o autor desta dissertação acredita que os modelos hidráulicos definem melhor a força de impacto dos fluxos de detritos.

Os modelos de forças de impacto cujos parâmetros de entrada são muito difíceis de obter, visto que são medidos durante a ocorrência de fluxos de detritos, têm aplicação muito restrita e resultados geralmente menos representativos dos eventos reais.

Além disso, acredita-se também que quanto maior é a quantidade de parâmetros de entrada dos diferentes modelos de força de impacto, maior é a susceptibilidade ao erro. Um exemplo desse modelo é o de HE et al. (2016), que divide a força de impacto em forças de impacto de pedregulho, lama e blocos.

Entidades de pesquisas de diferentes países têm estabelecido abordagens para estimar as forças de impacto dos fluxos de detritos e a influência dos blocos. Por exemplo, o guia suíço de estruturas de proteção de fluxos de detritos recomenda o uso da velocidade para a análise das forças de impacto e adota um fator empírico de 2. A Tabela 10 apresenta as diferentes abordagens.

Tabela 9 – Resumo dos diferentes modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos (SACOTO, 2017).

Autor	Modelos Hidráulicos	Formula	Factor Empírico	Observações
Lichtenbahn (1973)	Hidrostáticos	$P_{máv} = k \cdot \rho_{M_u} \cdot g \cdot h_{M_u}$	2,8 - 4,4	Primeiro modelo proposto assumindo que o material é água
Scotton & Degannutti (1997)	Hidrostáticos	$P_{máv} = k \cdot \rho_{M_u} \cdot g \cdot h_{M_u}$	2,5 - 7,5	Modelo reduzido onde valores promediados de k varia de 5,3 para fluxos mais viscosos e 3,5 para menos viscosos
Armanini & Scotton (1992)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = 9 \frac{1}{2} \rho_{M_u} h_0^2$	-	Modelo reduzido onde se observam dois tipos de impacto
Mizuyama (1979)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	1,0 - 2,0	Medições in situ no Japão
Watanabe & Ikaya (1981)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	2,0 - 4,0	Medições in situ no Japão de fluxo de lama
Wendeler (2007)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	0,7 - 2,0	Modelo reduzido
Bugnion (2011)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	0,4 - 2,0	Medições in situ
Du (1986)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	3	
Zhang (1990)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	3,0 - 5,0	Medições in situ
Vandine (1996)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	1	Depende del área da seção transversal
Hungr (1984)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	1,5	Depende del área da seção transversal. Retoanalise de fluxos em British Columbia
Ishikawa (2008)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	1,0 - 1,8	Depende del área da seção transversal. Modelo reduzido
Canelli (2012)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	1,5 - 5,0	Depende del área da seção transversal. Modelo reduzido
Daido (1993)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = \alpha \cdot \rho_{M_u} \cdot h \cdot v^2$	5,0 - 12,0	
Hubl & Holzinger (2003)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = 5 \cdot \rho_{M_u} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{M_u})^{0,6}$	-	Modelo reduzido
Cui (2015)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = 5,3 F_r^{-1,5} \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	-	Modelo reduzido e banco de dados de 155 registros de eventos desenvolveu uma regressão hidrodinâmica
Hubl (2009)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = a F_r^b \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	a (4,9 - 5,2) b (-1,3 - -1,66)	Modelo reduzido e regressões não lineares com numero de Froude menor que 3
Zannitigh & Lamberti (2004)	Hidrodinâmicos	$P_{máv} = C_c \frac{(1 + \sqrt{2} F_r)^2}{2} g \rho_{M_u} \cdot h^2$	-	Modelo reduzido considerando o numero de Froude e Cc como um fator empírico considerando a aceleração vertical
Armanini (2011)	Hidrodinâmicos	$F^- = \left\{ 1 + \frac{F_r^2}{2} \right\} \left\{ 1 + \frac{\psi F_r^2}{1 + 0,5 F_r^2} \right\}$		Considera a força como adimensional e em função do numero de Froude.
He (2016)	Hidrodinâmicos	$P_f = \rho_f v_f^2$ $P_g = 0,9164 E^{0,4} \rho_p^{0,6} v_p^{1,2} \varphi$		Considera que a força de impacto é a somatoria entre o impacto dos matacões, lama e pedregulhos. (P_f =força da lama, P_g =força do pedregulho)

Tabela 10 – Propostas de estimativa da pressão dinâmica de detritos (Adap. KWAN, 2012).

Grupo de Pesquisa	Pressão Dinâmica de Detritos (P)	Abordagem de cenários de dimensionamento e impacto de blocos rochosos
GEO Report nº 104	$P = \gamma \rho v^2 ; \gamma = 3$	A carga de dimensionamento considera a superposição da pressão dinâmica dos detritos e o impacto do bloco rochoso, calculado com a equação Hertz modificada por um fator de redução de 0,1.
Áustria	$P = 4,5 \rho v^{0,8} g h^{0,6}$	A carga de dimensionamento considera a superposição da pressão dinâmica dos detritos e o impacto do bloco rochoso, calculado com a equação Hertz.
British Columbia, Canadá	$P = \gamma \rho v^2 ; \gamma = 1$	Cenários de dimensionamentos não mencionados. O impacto do bloco rochoso é calculado usando equação Hertz e modificada por Hungr.
China	$P = \gamma \rho v^2 \quad \gamma = 1 \text{ a } 1,47$	Cenários de dimensionamentos não mencionados. O impacto do bloco rochoso é calculado usando equações Flexão-rigidez.
Japão	$P = \gamma \rho v^2 ; \gamma = 1$	Cenários de dimensionamentos não mencionados. O impacto do bloco rochoso é calculado usando equações modificadas da Hertz com fator redução de 0,1.
Taiwan	$P = \gamma \rho v^2 ; \gamma = 1$	O impacto do bloco rochoso e a pressão dinâmica de detritos são considerados separadamente nos cenários de dimensionamento. O impacto do bloco rochoso é calculado usando equações modificadas da Hertz com fator redução de 0,2 até 0,5.

3.5. Método da Energia

É sabido que a energia cinética do impacto de blocos e dos fluxos de detritos são dissipadas por meio da absorção da energia pelo sistema da estrutura de contenção.

SACOTO (2017) afirma que as barreiras dinâmicas podem ser dimensionadas considerando o estado limite último ou também chamado de estado MEL (*Maximum Energy Level*) e o estado de energia de serviço ou estado SEL (*Service Energy Level*). O estado MEL utiliza a capacidade máxima da barreira, o que significa maiores custos, porém uma manutenção reduzida. Em contrapartida o estado SEL não considera a capacidade máxima da barreira, mas exige manutenção frequente.

Tradicionalmente o método da energia é relacionado à energia cinética do movimento, assim:

$$E = \frac{1}{2} M v^2 \quad \text{Eq. 28}$$

M é a massa efetiva do fluxo de detritos e v é a velocidade do fluxo.

WENDERLER et al. (2008) implantam o conceito de massa efetiva e estabelecem que a massa varia entre 10.000 e 20.000kg, pois depende da vazão do fluxo e é expressa por:

$$M = \rho Q T \quad \text{Eq. 29}$$

Onde:

ρ = Densidade do fluxo (kg/m³);

Q = Vazão pico (m³/s);

T = Duração de impacto do fluxo.

A duração de impacto do fluxo varia de 1 até 4 segundos para o caso de fluxo de detritos e de 0,2 até 0,5 segundos no caso de queda de blocos, embora outros autores reportem valores de até 12 segundos. Por outro lado, a vazão de pico dos fluxos de detritos depende do volume do material que potencialmente pode ser retido na barreira e é determinada por (MIZUYAMA et al., 1992):

$$Q = 0,135V_{DF}^{0,78} \quad \text{Eq. 30}$$

Onde V_{DF} é o volume do fluxo de detritos, que pode variar entre 100m³ e 1.000m³. A vazão de pico pode variar de 5m³/s até 30m³/s.

LUIZ-FONSECA et al. (2011) apresentam uma relação baseada na premissa de que a energia deve ser transformada em força de impacto e, portanto, por meio da segunda lei de Newton, recomendam que a força de impacto seja determinada por:

$$F_{imp} = M \cdot a \quad \text{Eq. 31}$$

A aceleração é dada por:

$$a = \frac{v^2}{D} \quad \text{Eq. 32}$$

Onde D é a máxima deflexão da barreira, cujo valor pode variar entre 2 até 7m, em função do tipo de barreira e fabricante.

Com as Equações 31 e 32, a força de impacto em termos da energia cinética é dada por:

$$F_{imp} = 2 \frac{E}{D} \quad \text{Eq. 33}$$

SACOTO (2017) frisa que em observações in situ de fluxos de detritos na Suíça, percebeu-se que a abordagem da energia apresenta limitações na modelagem do movimento. Como, por exemplo, a não consideração dos efeitos da força de arraste quando o fluxo galga a barreira.

4 Métodos Numéricos de Fluxos de Detritos

Neste capítulo são abordadas as questões voltadas às principais ferramentas numéricas existentes para modelagem dos fluxos de detritos, destacando-se os *softwares* utilizados para o desenvolvimento de análises desta pesquisa.

4.1. Considerações Iniciais

Cada vez mais os métodos numéricos oferecem melhor representação de eventos reais, desde que, bem alimentados com dados consistentes e analisados de maneira criteriosa, não sendo diferente para modelagem e representação dos fluxos de detritos, principalmente se comparados aos resultados das relações empíricas e dos métodos analíticos. Ressaltando-se que os métodos analíticos e numéricos são baseados em mecanismos que envolvem análises probabilísticas do material, enquanto os métodos empíricos são baseados em correlações de dados obtidos de eventos ocorridos.

Pode-se afirmar que os fluxos de detritos são movimentos de massa bastante complexos. Desta forma, a análise com relações empíricas requer uma quantidade considerável de informações de campo que, muitas vezes, são difíceis de obter ou mesmo indisponíveis por diversos motivos, além da dispersão típica dos resultados. Segundo MCDUGALL (2006), os métodos empíricos estimam valores de pico e não fornecem informações sobre a distribuição espacial dos parâmetros estudados. No entanto, são métodos simples cujo nível de confiança varia com a qualidade e acurácia com as quais os dados são coletados nas diferentes topografias e geologias.

Os métodos analíticos utilizam a analogia de um bloco deslizando por equilíbrio limite e modelam o movimento de massa fazendo uso das leis da física, da dinâmica dos sólidos e dos fluidos (MORLES, 2009).

Os métodos numéricos de fluxo de detritos são capazes de modelarem numericamente acontecimentos reais e investigar o comportamento do evento, e, ainda, oferecerem resultados, por vezes, próximos à realidade. Tais métodos são

baseados nas leis constitutivas e na força gravitacional que, associadas aos modelos reológicos, representam o comportamento e propriedades do fluxo.

MCDUGALL (2006) afirma que a modelagem dinâmica dos meios contínuos é mais precisa porque a geometria e o mecanismo são levados em conta explicitamente. Associa-se a isto o fato da modelagem considerar equações de conservação de massa, momento e energia da mecânica dos fluidos. Esses modelos podem ser classificados em:

- i. Modelos de topografia 2D versus 3D;
- ii. Modelos com enfoque Euleriano versus Lagrangiano; e
- iii. Modelos com parâmetros medidos.

SACOTO (2017) disserta que na abordagem Euleriana o marco de referência se encontra fixado no espaço e as soluções das equações são mais complexas. Na abordagem Lagrangeana, o marco de referência se movimenta com a velocidade local, o que produz uma simplificação das equações governantes. Porém, estas são susceptíveis a distorções devido a grandes deformações.

Não existem ensaios padronizados para avaliar as propriedades, ou seja, a abordagem dos parâmetros medidos pode ser considerada idealista. Além disso, o processo de calibração dos parâmetros pode consumir muito tempo e requerer bases de dados e informação de eventos anteriores (MCDUGALL, 2006).

4.2. Principais Programas Disponíveis

Pelas últimas quatro décadas, na busca de representação mais próxima da realidade da dinâmica dos fluxos de detritos, vem sendo desenvolvidos e/ou aprimorados programas numéricos. Estas ferramentas computacionais objetivam o melhor entendimento e a adequada reprodução de fenômenos tão complexos como corridas ou avalanches, além contribuir com os métodos de prevenção, convivência e mitigação de eventos catastróficos.

Tais programas são baseados na dinâmica dos meios contínuos. LANG et al. (1979) apresentaram a primeira proposta com a modificação de um modelo Euleriano em 2D para incluir a resistência de atrito.

A Tabela 11 resume os principais programas numéricos existentes com sua reologia e metodologia de cálculo.

HUNGR (1995) desenvolveu o programa DAN-W, bidimensional, que utiliza uma solução unidimensional Lagrangeana para as equações de movimento e considera as características das tensões internas, do arrastre e as diversas reologias.

O programa DAN3D desenvolvido por MCDOUGALL (2006) é uma atualização do programa DAN-W e adota uma formulação Lagrangeana em 3D, incorporando o método numérico de SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*).

VALVERDE (2016) realizou análises de fluxos de detritos com os programas DAN3D e DAN-W, considerando a reologia de Voellmy.

Na presente pesquisa os fluxos de detritos foram analisados adotando-se os programas DAN3D (MCDOUGALL, 2006) e ROCFALL (Rocscience inc.) e a reologia de atrito.

Tabela 11 – Principais programas numéricos para análises de fluxos (Adapt. LUNA, 2011).

Programa	Reologia	Método	Varição da Reologia
MADFLOW	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (com malha)	Não
KANAKO	Atrito	Lagrange	Não
DAN-W	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (sem malha)	Sim
DAN3D	Atrito, Voellmy, Bingham, Newtoniano e Plástico	Lagrange (sem malha)	Sim
RAMMS	Voellmy	Euler	Sim
FLATMODEL	Atrito e Voellmy	Euler	Não
SCIDDICA s3-hex	Baseado em Energia	Euler	Não
3dDMM	Atrito e Voellmy	Euler	Sim
PASTOR Model	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (sem malha)	Sim
MassMov2D	Voellmy e Bingham	Euler	Sim
RASH3D	Atrito, Voellmy e Quadrático	Euler	Não
FLO-2D	Quadrático	Euler	Não
TITAN2D	Atrito	Lagrange (sem malha)	Não
VolcFlow	Atrito e Voellmy	Euler	Não

SACOTO (2017) reporta que os programas DAN-W e DAN3D não fornecem energia de impacto, parâmetro importante para o dimensionamento de estruturas de contenção. Além disto, eles consideram o movimento como um fluxo equivalente, que corresponde a uma severa restrição para obtenção da energia de impacto de fluxo de detritos.

Exatamente pela existência desta limitação, buscou-se, como forma de aprimoramento metodológico, a decisão de se realizar análises suplementares com o programa Rocfall, desenvolvido pela Rocscience, devido a existência de blocos rígido na massa do fluxo. Assim tenta-se contemplar, de forma mais fidedigna às situações reais, as componentes reológicas do fluido viscoso, bem como as componentes de atrito.

4.3. Características do DAN3D e DAN-W

O DAN-W foi concebido para modelagem de movimentos de massa reais por meio de um modelo Langrageano bidimensional para a solução das equações de fluxo ao longo de um modelo de elevação digital. Já o programa DAN3D representa uma evolução do programa bidimensional DAN-W e foi desenvolvido por MCDOUGALL (2006).

O programa DAN-W é baseado 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. Além disso, o DAN-W, estabelece a compatibilidade entre as tensões internas e as tensões no fundo do canal do fluxo, que representa uma condição bastante interessante do ponto de vista de representação do movimento real. Consegue simular eventos ocorridos por meio de retro análises e estimar o comportamento de futuros movimentos de massas.

O DAN3D e o DAN-W consideram características importantes como complexidade da reologia, heterogeneidade, rigidez interna e capacidade de incluir o material arrastado pelo fluxo de detritos ao longo do trajeto. Os programas possuem uma abordagem semiempírica, baseada no conceito do fluxo equivalente, onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas (HUNGR, 1995).

A abordagem é chamada de semiempírica, pois faz-se necessária uma calibração de eventos anteriores e utiliza diferentes soluções analíticas para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. A Figura 39 apresenta um exemplo de fluxo equivalente aplicado a uma avalanche de rochas.

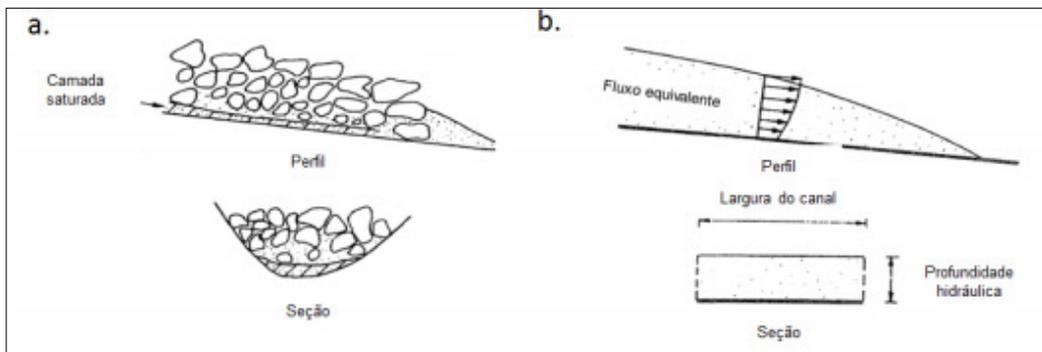


Figura 39 – Aplicação de fluxo equivalente (Adapt. HUNGR, 1995).

Pela diferença de granulometria em relação à profundidade do fluxo, o material em movimento e o material da base podem ser governados por reologias diferentes. Desta forma, HUNGR & MCDUGALL (2009) consideram que a reologia interna é de atrito e é controlada pelo ângulo de atrito. Entretanto, é interessante lembrar que a reologia basal é uma combinação das reologias de atrito, turbulenta e viscosa.

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

Algumas características importantes do programa DAN3D são elencadas por PELIZONI (2014), conforme a seguir:

- i. Simula fluxos complexos em superfícies em 3D;
- ii. Permite a distribuição dos esforços não hidrostáticos e anisotrópicos;
- iii. Simula a erosão do material;
- iv. Permite a escolha de diferentes modelos reológicos (Atrito, Voellmy, Bingham, Inelástico e Newtoniano);
- v. Processa a modelagem sem malha de elementos, eliminando os problemas relativos à distorção durante grandes deslocamentos.

4.4. Equações Governantes dos DAN-W e do DAN3D

O DAN-W considera a continuidade do modelo por meio de um sistema de blocos deformáveis de volume fixo, interpolado a partir de funções de suavização (*smoothing functions*).

Por outro lado, o método numérico do programa DAN3D é o SPH (*smooth particle hydrodynamics*), que corresponde a um método sem malha, baseado em formulações Lagrangeanas e que divide o volume total em partículas distribuídas em colunas de referência, podendo incrementar seu volume devido ao arraste provocado pelo fluxo de detritos.

O volume total da massa movimentada é particionado em elementos conhecidos como partículas regularizadas, onde cada partícula tem um volume finito e que só pode ser aumentado conforme o arraste da massa deslizada (HUNGR & MCDUGALL, 2009), esquematizado na Figura 40.

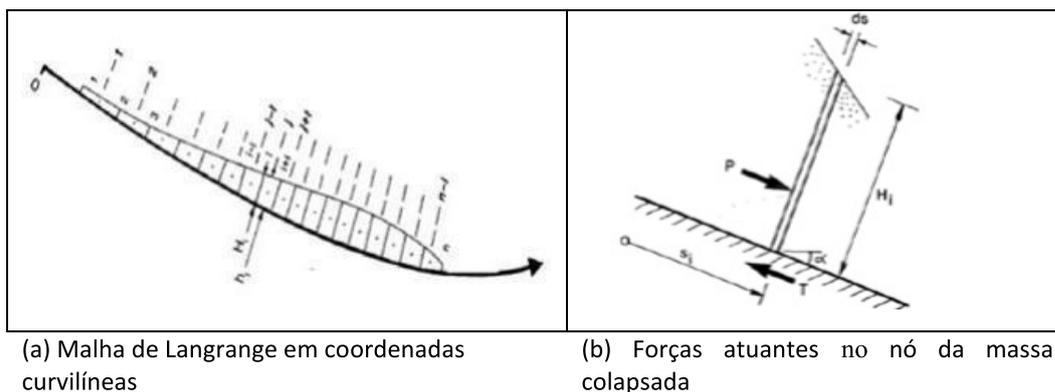


Figura 40 – Método numérico Lagrangeano baseado em SPH (HUNGR, 1995).

O método utilizado pelo programa permite a simulação do movimento em uma topografia real em 3D, evitando problemas de distorção das malhas de elementos e restrições associadas às grandes deformações (XAVIER SILVA, 2015). Os cálculos são realizados no centro das partículas e a distribuição é dada pela função de Gauss, conforme esquematizado na Figura 41.

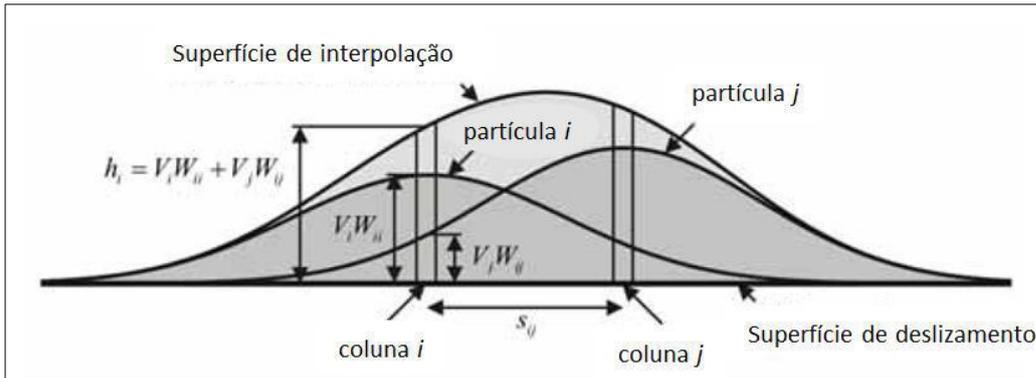


Figura 41 – Interpretação do SPH em profundidade média (Adapt. MCDOUGALL, 2006).

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

$$\rho_h \frac{DV_x}{Dt} = \rho h g_x - k_x \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_{zx} - \rho V_x E \quad \text{Eq. 34}$$

$$\rho_h \frac{DV_y}{Dt} = \rho h g_y - k_y \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{Eq. 35}$$

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 termo, relacionados com as pressões; e (iii) quarto termo, somente aparece na direção x (direção do fluxo) e corresponde à resistência ao cisalhamento na base e o arraste gerado pelo movimento.

O programa DAN3D considera as colunas de referência como distribuídas ao longo da massa em movimento. O material erodido é considerado por meio da taxa de erosão estabelecida como dado de entrada. Por sua vez, o programa DAN-W estabelece que as colunas de referência representam blocos com um volume fixo.

4.4.1. Reologia dos Materiais

O programa DAN3D adota quatro modelos constitutivos para representação do comportamento do material, quais sejam: plástico, atrito, Voellmy e Bingham.

De outra forma, o programa DAN-W considera oito modelos constitutivos: plástico, newtoniano, turbulento, atrito, atrito Coulomb, lei da força, Voellmy e Bingham.

Modelo Plástico

Neste modelo o fluxo é controlado pela resistência ao cisalhamento constante, da mesma forma que o estado estacionário de resistência não drenada, c , em materiais liquefeitos, expressa por:

$$T = c \cdot A_i \quad \text{Eq. 36}$$

Onde A_i é a área do elemento infinitesimal do método SPH.

Modelo de Atrito

O esforço de cisalhamento é proporcional à tensão efetiva normal ao esforço na base da camada σ'_z , e expresso por:

$$\tau_{zx} = -\sigma' \cdot \tan\varphi \quad \text{Eq. 37}$$

Onde φ é o ângulo de atrito dinâmico da base.

As poropressões em estabilidades de taludes podem ser relacionadas com a tensão total pela razão $r_u = \frac{u}{\sigma_z}$, a qual poder ser substituída na Equação 37:

$$\tau_{zx} = -\sigma \cdot (1 - r_u) \cdot \tan\varphi \quad \text{Eq. 38}$$

Pode-se simplificar para incluir somente variáveis dependentes, introduzindo o termo de ângulo de atrito basal (φ_b):

$$\tau_{xz} = -\sigma_z \cdot \tan \varphi_b \quad \text{Eq. 39}$$

Adotando o coeficiente de poropressão ou ângulo de atrito residual, admite-se que os carregamentos se situam entres os carregamentos drenado e não drenado (MCDOUGALL, 2006), conforme apresentado na Figura 42.

O modelo de atrito usa os seguintes parâmetros de entrada: peso específico (kN/m^3), ângulo de atrito (graus), coeficiente de poropressão (ru), ângulo de atrito interno (graus) e profundidade máxima de erosão (m). Os modelos governados por atrito possuem velocidades maiores e uma frente de depósitos menor quando comparados aos outros modelos.

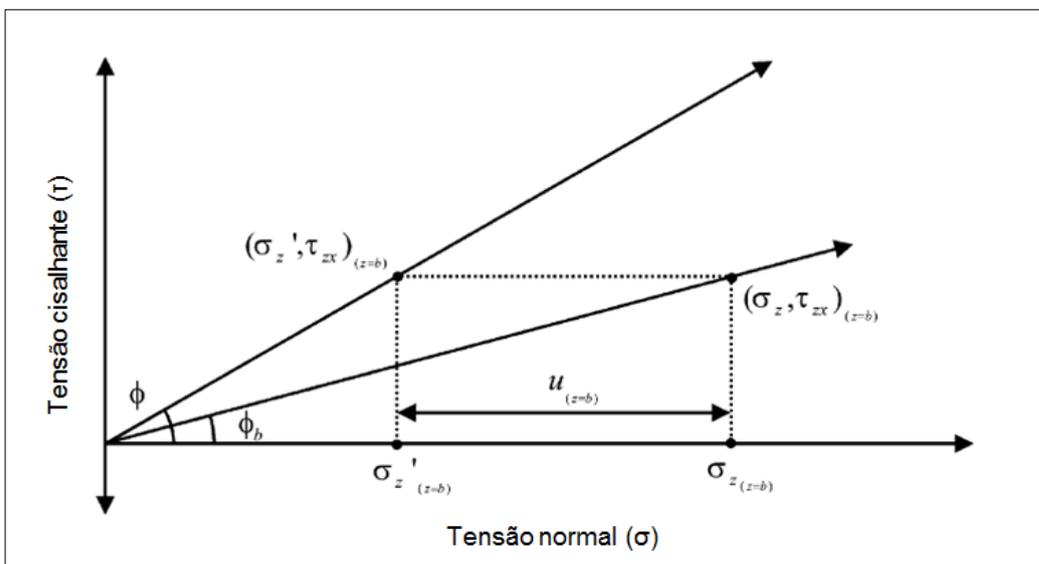


Figura 42 – Relação entre os parâmetros utilizados no modelo de atrito (MCDOUGALL, 2006).

Modelo de Voellmy

Também é referenciado como modelo turbulento, uma vez que há combinação dos comportamentos turbulento e de atrito, sendo a resistência calculada por:

$$\tau_{zx} = -(\sigma_z \cdot f + \frac{\rho \cdot g \cdot v^2}{\xi}) \quad \text{Eq. 40}$$

Onde f é o coeficiente de atrito e ξ é o parâmetro de turbulência.

O primeiro termo da equação considera as componentes de atrito da resistência e tem a mesma forma da expressão utilizada no modelo de atrito, sendo o parâmetro f análogo ao parâmetro $\tan\phi_b$. O segundo termo, introduzido por VOELLMY (1955), é utilizado para considerar qualquer possível dependência da resistência com a velocidade.

Esta reologia tem sido muito estudada e adotada por diversos pesquisadores para modelar vários movimentos de massa como avalanches de neve, avalanches de rochas, fluxos de detritos e avalanches de detritos (KÖRNER, 1976; PERLA et al., 1980; RICKENMANN & KOCH, 1997; HUNGR et al., 2002; REVELLINO et al., 2004).

Modelo de Bingham

O modelo de Bingham é conhecido por modelo viscoso, pois combina os comportamentos plástico e viscoso. Um fluido com as características deste modelo se comporta como um material rígido abaixo do limite de elasticidade (ou escoamento) e acima do limite viscoso. A resistência ao cisalhamento é função da profundidade do fluxo, velocidade, tensão de escoamento e da viscosidade, sendo expressa por:

$$\tau_{zx}^3 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{yield}}{2} + \frac{\mu_{Bingham} \cdot v_x}{h} \right) \cdot \tau_z^2 - \frac{\tau_{yield}^3}{2} = 0 \quad \text{Eq. 41}$$

Onde τ_{yield} é a tensão de escoamento Bingham e $\mu_{Bingham}$ é a viscosidade de Bingham.

4.4.2. Dados de Entrada dos Programas

Os dados de entrada (*input*) do programa DAN-W são divididos em parâmetros de controle, topografia e materiais. O número de materiais, número de elementos e fator de forma de acordo com a seção transversal do canal são considerados nos parâmetros de controle. A topografia abrange o perfil de elevação-distância e a largura do canal. Os parâmetros de materiais consideram a reologia e suas propriedades.

Já os dados de saída (*output*) no programa DAN - W são disponibilizados em um documento que especifica o número de elementos, intervalo de tempo utilizado, tempo transcorrido desde o início da corrida, tipo de configuração, fator de forma inserido, volume final, área de deposição e distância percorrida. Esta ferramenta ainda fornece a opção de colocar pontos de controle ao longo da trajetória simulada do evento para analisar as velocidades da frente e traseira do fluxo, velocidade máxima, assim como a altura do fluxo ao longo do movimento.

O DAN3D, tem *inputs* divididos em parâmetros de controle, parâmetros relacionados com a reologia adotada e com a geomorfologia da área estudada. Os *outputs* correspondem à velocidade do movimento, volume final da massa envolvida, espessura da camada erodida, ângulo de viagem e distância total percorrida. Além de serem gerados conjuntos de “curvas” contendo o resultado das principais variáveis em cada um dos intervalos de tempo e seus respectivos valores máximos.

4.5. Características do Rocfall

Rocfall é uma ferramenta computacional desenvolvida pela Rocscience, que realiza análise estatístico-probabilística de queda de blocos rochosos em encostas. Entrega envoltórias de energia e de velocidade para toda a trajetória da queda de blocos, bem como a localização de parada do corpo que tenha se movimentado. É possível a inserção de barreiras rígidas e flexíveis e analisa seu desempenho em relação à energia cinética de impacto, para posteriormente determinar o tamanho, capacidade e localização da barreira.

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

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

4.5.1. Diferentes Tipos de Movimento

É sabida a existência de diversos tipos de movimentos de um bloco durante a trajetória de queda, classificados em:

- i. Deslizamento, quando a trajetória do bloco é paralela à superfície e o bloco não sofre rotação. O coeficiente de atrito da superfície de deslizamento mobiliza um esforço contra o movimento do bloco;
- ii. Rolamento, movimento acelerado, com trajetória paralela à superfície, porém não existe deslizamento entre o bloco e a superfície;
- iii. Tombamento, ocorre com diferença brusca na inclinação da superfície, podendo ser utilizadas as equações da conservação de energia para o movimento circular;
- iv. Queda Livre, movimento acelerado verticalmente, somente pela gravidade, com velocidade inicial nula;
- v. Parabólico, movimento sujeito ação da aceleração da gravidade, porém com velocidade inicial não nula.

Destaca-se que os movimentos de blocos estão amplamente interligados com os choques na superfície, baseando-se nos coeficientes de restituição normal e tangencial para a determinação da quantidade de energia dissipada durante os impactos na superfície.

4.5.2. Dados de Entrada e Saída do Rocfall

Como dados de entrada da ferramenta Rocfall (*input*) pode-se citar as condições iniciais dos blocos, as características dos materiais e as condições topográficas. As condições iniciais são apresentadas pela velocidade inicial, massa e quantidade de blocos.

As características dos materiais constituem o grupo mais complexo dos dados de entrada e correspondem à rugosidade da encosta, ângulo de atrito e coeficientes de restituição normal e tangencial, com seus respectivos desvios normais. Para STEVENS (1998), os coeficientes de restituição são os mais importantes e difíceis de serem obtidos, pois eles representam a energia dissipada durante os choques dos blocos com a superfície da encosta e podem variar de 0 (choque pleno inelástico) a 1 (choque pleno elástico).

Já as condições topográficas ou geométricas da seção de cálculo exigem-se mais próximas possível da realidade, baseada em levantamentos topográficos, visto que as trajetórias dos blocos de rocha são sensíveis a pequenas mudanças na geometria (STEVENS, 1998).

Por outro lado, os parâmetros de saída (*output*) da ferramenta correspondem à velocidade, alturas e energias cinéticas da queda de bloco e do impacto na barreira caso existente. Os parâmetros de saída são fornecidos por meio de envoltórias, além de poderem ser exportados para executores de planilhas como o Excel.

5 Metodologia e Casos de Estudo

5.1. Considerações Iniciais

O capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia a ser empregada para o desenvolvimento da presente pesquisa, vislumbrando a reprodução do método e posterior formação de banco de dados consistente para o histórico de fluxos de detritos ocorridos no Brasil, principalmente os da Serra do Mar, os quais se mostram como os mais catastróficos.

Importante frisar que as corridas de massa escolhidas por esta pesquisa foram deflagradas por intensa pluviosidade, que serviu de gatilho para deslizamentos iniciais que se transformaram em fluxos de detritos, que causaram grandes perdas de vidas humanas e danos materiais e socioambientais.

Os fluxos de detritos são os movimentos de massas mais catastróficos, com grande potencial de danos materiais, econômicos e, por consequência, perdas de vidas humanas. As corridas de detritos se destacam devido a sua grande competência para exercer o trabalho geomorfológico, representado pelo seu alto potencial de erosão e transporte de materiais diversos por longas distâncias, velocidade e raio de alcance (GUIDICINI & NIEBLE, 1984; SHELBY, 1993; TAKAHASHI, 2007).

O Brasil tem vasto histórico de eventos de fluxos de detritos, os quais têm atingido cada vez mais as cidades e seus habitantes, porém possibilitando observações e registros dos movimentos. Afirma-se que, na imensa maioria dos acontecimentos, o principal gatilho é o de chuvas intensas. Os primeiros registros de fluxo de detritos no País datam de 1967 na Serra das Araras no Estado do Rio de Janeiro e em Caraguatatuba no Estado de São Paulo.

Ambas as Regiões, Serrana do estado do Rio de Janeiro e Litorânea do Estado de São Paulo, situadas à Serra do Mar, guardam semelhanças em suas características geológicas, geomorfológicas, uso ocupacional do solo e pluviometria, favorecendo

sobremaneira para a alta susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massas, inclusive fluxos de detritos.

Os Fluxos de Detritos objetos desta pesquisa estão localizados em três municípios brasileiros, dois no Estado do Rio de Janeiro e representados pelos *debris flows* Córrego D'Antas em Nova Friburgo e Rio Príncipe em Teresópolis, ambos na Região Serrana do Rio de Janeiro e um no Estado de São Paulo, sendo o *debris flow* Toque-toque Grande em São Sebastião no Litoral Paulista.

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

5.2. Metodologia

Como disposto no Capítulo 2, os fluxos de detritos são movimentos de massa dos mais catastróficos, com potencial para causar grande número de vítimas e prejuízos. Além de ser um movimento rápido, com grande capacidade de transporte de massa de diferentes tipos, produz um depósito volumoso e complexo.

Para se conviver com movimentos tão destrutivos necessita-se de medidas que disponham de grande poder de contraposição aos esforços gerados pelos *debris flows*. Tais medidas estruturais resumem-se em dois grandes tipos: estruturas flexíveis e estruturas rígidas. Para dimensionamento de ambos os tipos de estruturas é importante a obtenção das forças de impactos das corridas de massa.

CALLIGARIS & ZINI (2012) ressaltam a importância do conhecimento das possíveis áreas atingidas, contemplando parâmetros como área de deposição e a velocidade máxima do evento, as quais são informações úteis não só para definir, mas principalmente para delimitar, as áreas vulneráveis, a fim de identificar as medidas de mitigação a serem adotadas. Não menos importantes são os parâmetros de volume, altura e distância percorrida dos fluxos de detritos.

Este conjunto de parâmetros auxilia no delineamento dos eventos, potenciais locais de instalação de estruturas de proteção e quantificação do desempenho das estruturas.

Neste sentido, com ênfase na obtenção das forças de impacto de fluxos de detritos, parâmetro fundamental para o dimensionamento de estruturas de proteção flexíveis ou rígidas, estabeleceu-se a seguinte metodologia, esquematizada na Figura 43:

1. Verificação dos principais Modelos de Forças de Impacto existentes na literatura;
2. Verificação dos principais *softwares* existentes para obtenção de parâmetros de fluxos de detritos;
3. Seleção dos *softwares* para simulação numérica e obtenção de parâmetros (DAN3D e ROCFALL);
4. Definição de três casos de estudo com fluxos de detritos semelhantes em locais diferentes, com alguns parâmetros observados após os eventos reais ocorridos;
5. Aplicação dos principais modelos de força de impacto existentes na literatura aos casos de estudo;
6. Obtenção de parâmetros dos fluxos de detritos de estudo com o DAN3D e ROCFALL, com diferentes reologias;
7. Comparação dos parâmetros obtidos com o DAN3D e ROCFALL com os dados obtidos da observação dos eventos reais de estudo;
8. Comparação das energias de impacto obtidas com as simulações do DAN3D e ROCFALL;
9. Comparação das forças de impacto obtidas com as simulações DAN3D, ROCFALL e MIZUYAMA (1979), tanto para estruturas flexíveis (Barreiras Dinâmicas) como para estruturas rígidas (Barragens Sabo).

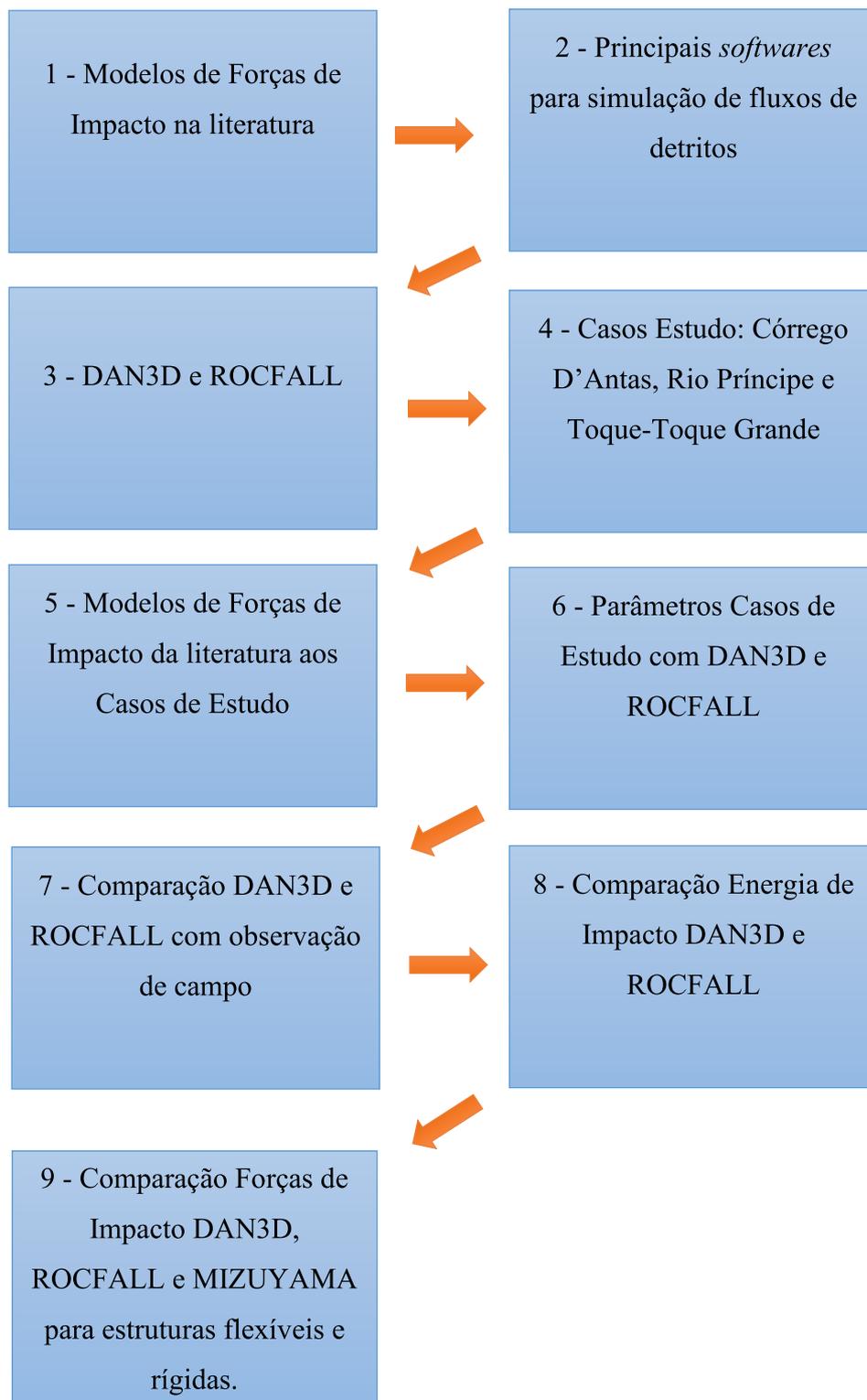


Figura 43 – Fluxograma da metodologia de desenvolvimento da pesquisa.

5.3. Fluxo de Detritos

5.3.1. Agente Deflagrador (Potencial Gatilho)

Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ

Em janeiro de 2011, registrou-se o grande desastre da Região Serrana Rio de Janeiro, na Serra dos Órgãos (Serra do Mar). Intensas e persistentes chuvas formaram condições de gatilho para deflagração de incontáveis movimentos de massa, resultando em uma tragédia de grandes proporções. Segundo MOTTA (2014), o evento foi provocado pela entrada de massas de ar da Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS, com precipitações de 297mm acumulados de chuvas na noite do dia 11 para o dia 12 de janeiro de 2011, precedidas por um alto índice pluviométrico, de 388mm, no mês de dezembro de 2010, conforme apresentado na Figura 44.

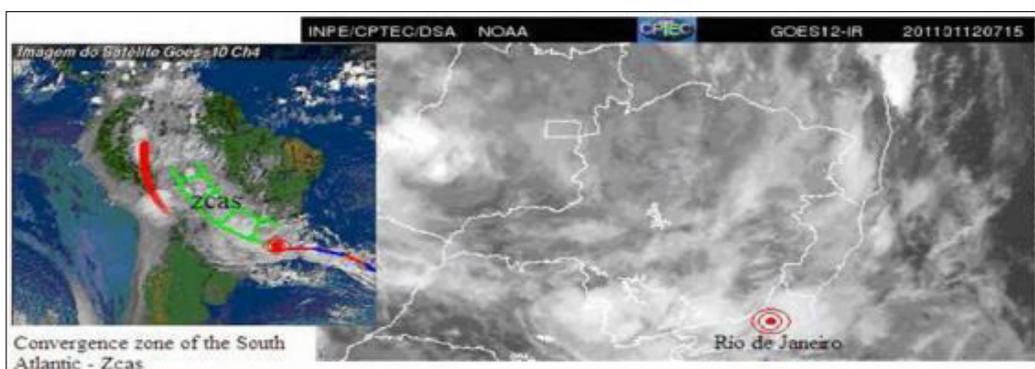


Figura 44 – ZCAS, situação Climática no evento de 2011 (BAGGIO & HORN, 2011).

Rio Príncipe – Teresópolis/RJ

O grande desastre da Região Serrana Rio de Janeiro, na Serra dos Órgãos (Serra do Mar), em janeiro de 2011, atingiu diversos municípios como: Cantagalo, Nova Friburgo, Petrópolis, Sumidouro e Teresópolis. Assim, atribui-se como fator deflagrador dos eventos a elevada precipitação pluviométrica, provocada pela entrada de massas de ar da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS.

Toque-toque Grande – São Sebastião/SP

Em fevereiro de 2023 registrou-se o desastre do Litoral Norte de São Paulo, na região da Serra do Mar. Intensas e persistentes chuvas formaram condições de gatilho para deflagração de incontáveis movimentos de massa, resultando em uma tragédia que deixou de grandes prejuízos materiais e a morte de 65 pessoas, principalmente no município de São Sebastião/SP. Para DOLIF (2023), o evento foi provocado principalmente pela associação de cinco fatores concomitantes e causaram o grande volume de precipitação, a saber: baixa pressão atmosférica na região; frente fria vinda do mar; ventos quentes vindos do Nordeste; nuvens com muita presença de água; cadeia de montanhas da Serra do Mar. Esses cinco fatores juntos convergiram em cima do Litoral Norte Paulista, como se cercassem as nuvens e as fizessem ficar concentradas em uma só área durante um longo período. Parecido com uma grande esponja de água sendo espremida por todos os lados.

Tais fatores provocaram precipitações de 683mm acumulados de chuvas entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 (Figuras 45 e 46).

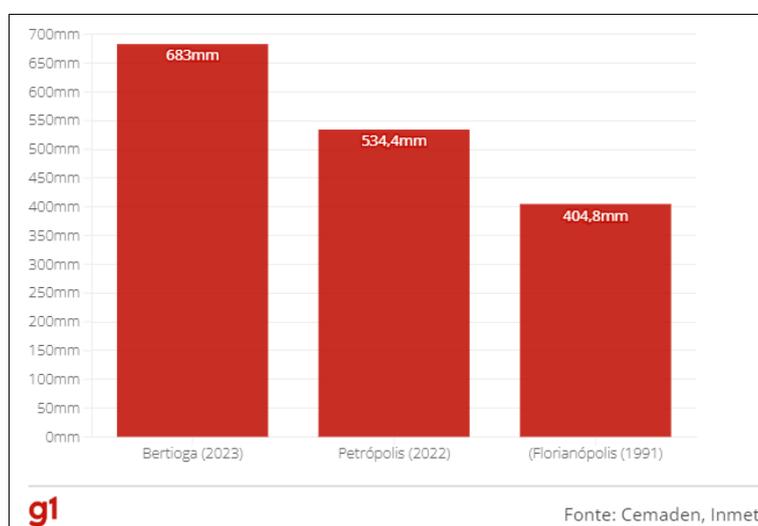


Figura 45 – Maiores volumes de chuva registrados no país (G1 - GLOBO, 2023).



Figura 46 – Fatores deflagradores das precipitações no Litoral Norte de SP (G1 - GLOBO, 2023).

5.3.2. Localização

Córrego D’Antas – Nova Friburgo/RJ

O Morro Duas Pedras foi o cenário de ocorrência de dois fluxos de detritos de grandes proporções: Fluxos de Detritos Hospital São Lucas e Córrego D’Antas, sendo o segundo, objeto desta pesquisa.

O fluxo de detritos do Córrego D’Antas teve seu nome atribuído em função do nome do bairro para o qual ele se dirigiu. A área de estudo corresponde à parte alta da encosta do Morro Duas Pedras, identificado pelas Coordenadas Geográficas: 22°15'39.86" S e 42°32'42.30" O.

A zona de iniciação dos movimentos localiza-se praticamente no topo do Morro Das Pedras, nas proximidades da cota 1.290m.

A massa deslocada se movimentou do ponto de iniciação, no topo da encosta até encaixar-se no talvegue, para dar início à zona de transporte e erosão. A partir deste ponto, parte da massa mobilizada se dirigiu no sentido da localidade de Córrego D'Antas e a outra parte se movimentou no sentido do Hospital São Lucas, situado na vertente oposta (SACOTO, 2017), conforme visualizado na Figuras 47 e 48.

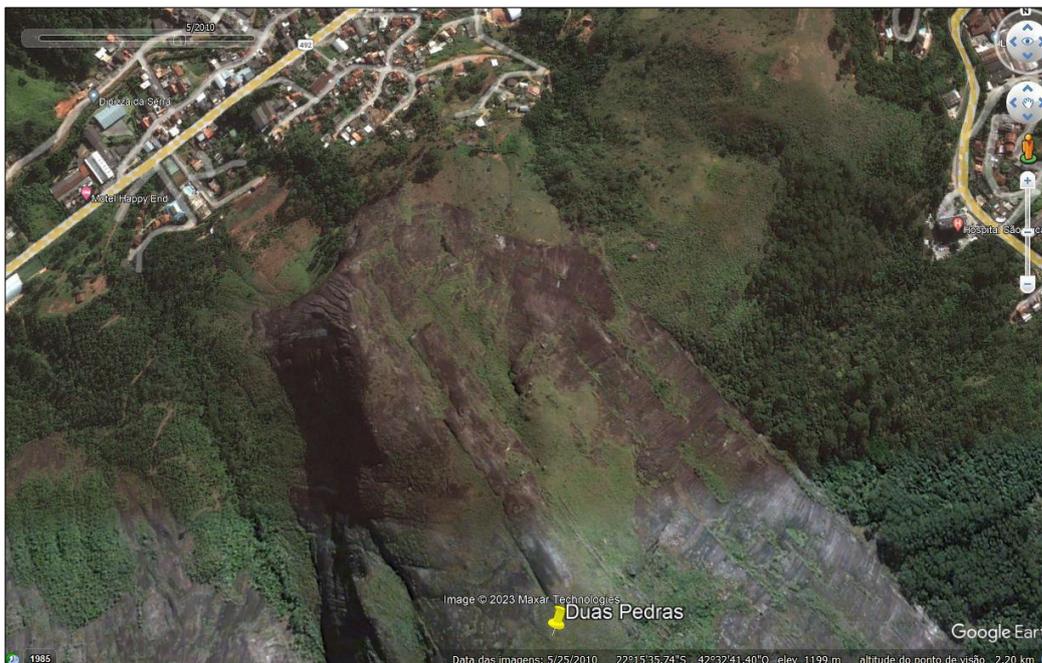


Figura 47 – Imagem de satélite antes do evento no Morro Das Pedras, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2023).

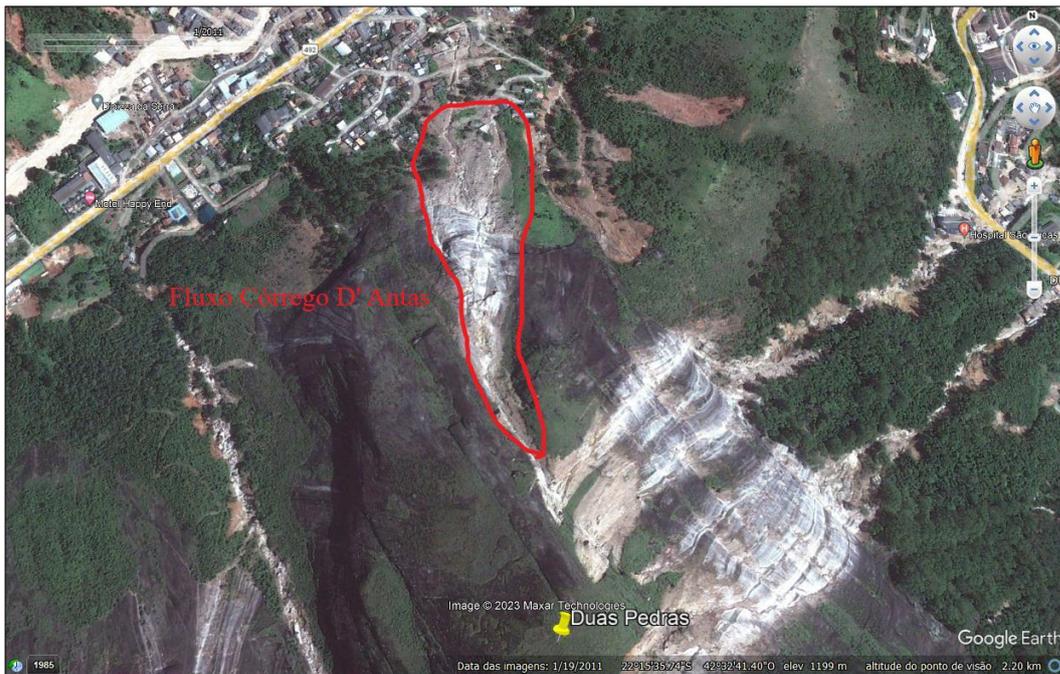


Figura 48 – Imagem de satélite após o evento no Morro Duas Pedras, delimitação parcial, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2023).

Rio Príncipe – Teresópolis/RJ

O vale do Rio Príncipe, em Teresópolis, RJ, foi o cenário de ocorrência de um fluxo de detrito de grandes proporções, tanto em destruição quanto extensão do movimento que percorreu cerca de cinco quilômetros, atingindo três bairros, Campo Grande, Posse e Cascata do Imbuí, como mostrado na Figura 51.

O fluxo de detritos do Rio Príncipe teve seu nome atribuído em função do nome do curso d'água pelo qual se desenvolveu e deixou destruição. A área de estudo corresponde a cerca dos 5km, identificado em sua zona de iniciação aproximada, pelas Coordenadas Geográficas: 22°22'9.48" S e 43° 1'21.07" O.

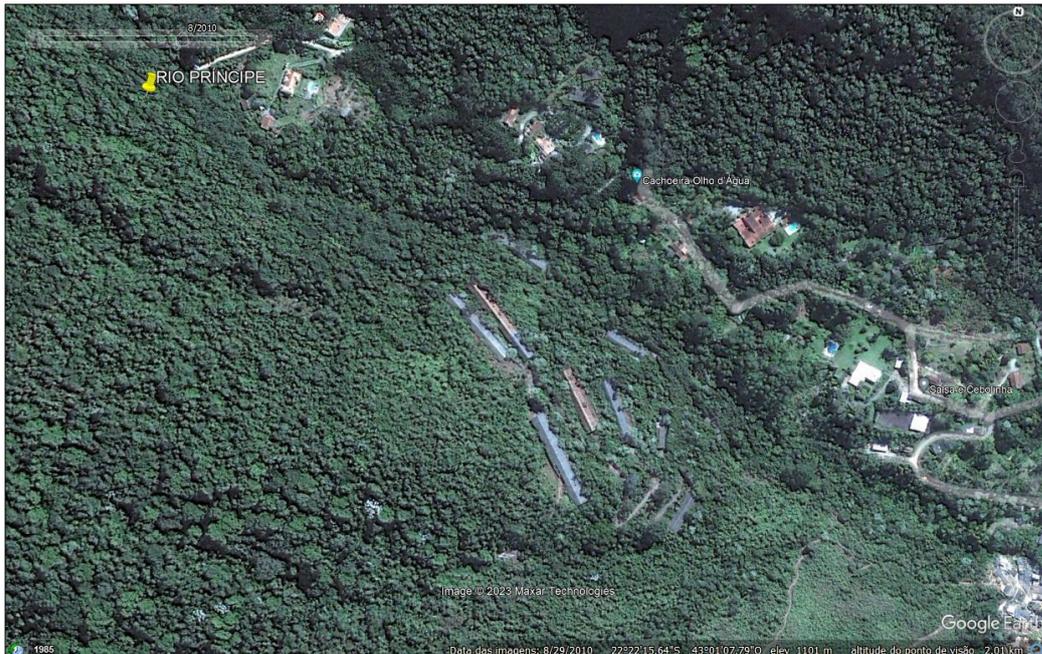


Figura 49 – Imagem de satélite antes do evento no Rio Príncipe, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2023).



Figura 50 – Imagem de satélite após o evento no Rio Príncipe, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2023).

O fluxo de detritos do Rio do Príncipe se estendeu por 4,8km e teve uma largura variando entre 40 e 180m (LIMA, 2017). O fluxo se desenvolveu a partir de contribuições de material proveniente dos taludes laterais do canal principal, derivados de inúmeros deslizamentos no contato solo-rocha, como se constata pelas Figuras 49 e 50. Ao ganhar densidade, o fluxo torrencial ao longo do canal passou

a exumar e/ou mobilizar o material de antigos depósitos de corrida de detritos disponível no canal.

Embora o fluxo tenha ficado confinado ao vale do Príncipe, destruiu 85% das moradias na zona de transporte/erosão, particularmente aquelas localizadas em cotas mais baixas e mais próximas ao canal principal, e 50% das moradias nas zonas de deposição, em especial a montante das gargantas, ora pelos escombros transportados, ora submersas pela água (WALDHERR et al., 2014).

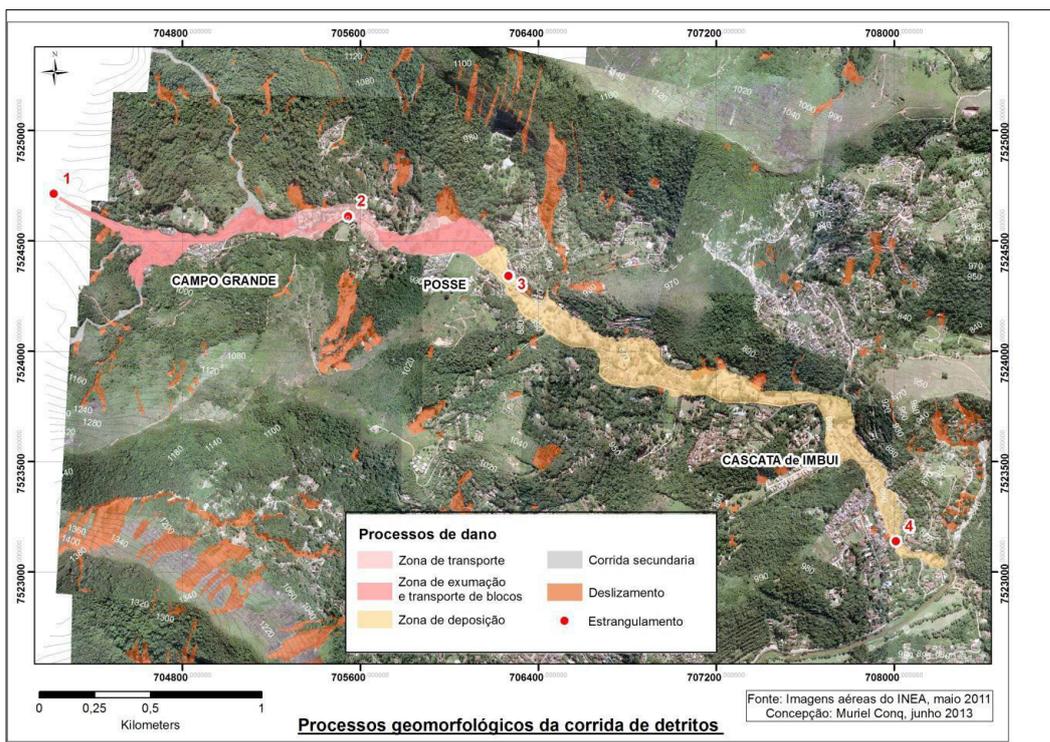


Figura 51 – Mapa com delimitação da extensão e zonas da corrida de detritos com os diferentes processos geomorfológicos do Rio Príncipe (CONQ et al., 2015).

Toque-toque Grande – São Sebastião/SP

A Cachoeira do Toque-toque Grande, em São Sebastião, SP, às margens da Estrada Rio-Santos, foi o cenário de ocorrência de um fluxo de detritos de grandes proporções, mobilizando elevado volume de blocos rochosos e sedimentos mais finos, invadindo o bairro de mesmo nome, causando danos e interdição importante da rodovia.

O fluxo de detritos do Toque-toque Grande teve seu nome atribuído em função do nome do bairro para o qual ele se dirigiu. A área de estudo corresponde

à parte alta da encosta e ao canal percorrido pelo movimento, identificado em sua zona de iniciação aproximada pelas Coordenadas Geográficas: 23°49'40.05" S e 45°30'25.00" O. As Figuras 52 a 56 ilustram o local do *debris flow*.

Vale destacar que Toque-toque Grande é um bairro com residências de alto padrão construtivo, cujas casas guardam considerável distância do talvegue do curso d'água, e que a calha do rio já havia recebido algumas poucas intervenções de engenharia em seu leito natural, conforme Figuras 57 e 58.

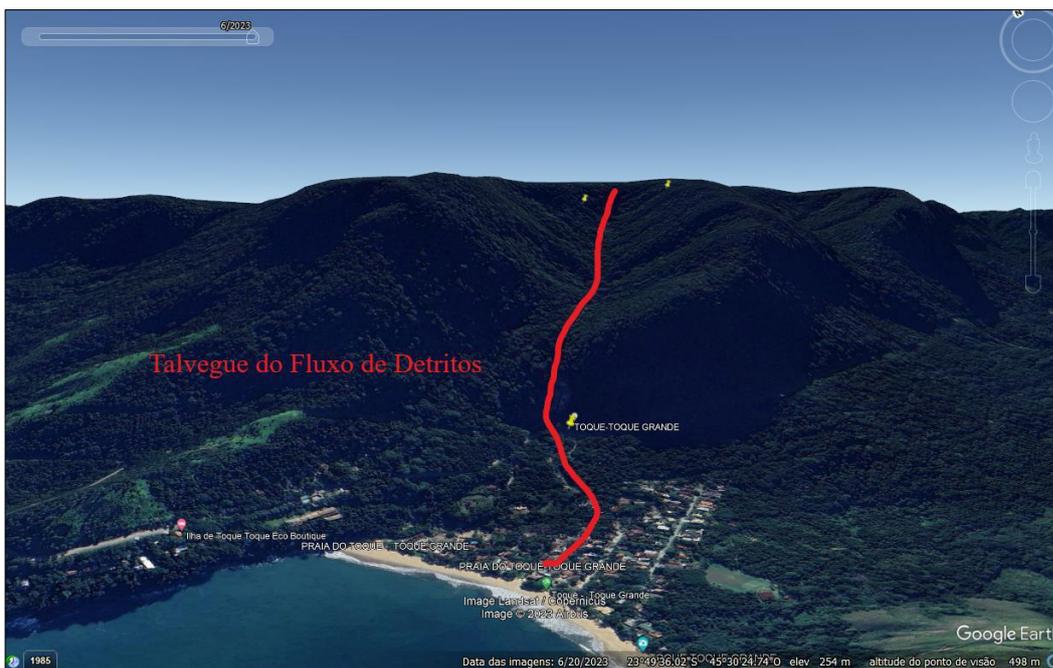


Figura 52 – Imagem de satélite do talvegue do Fluxo de Detritos do Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).

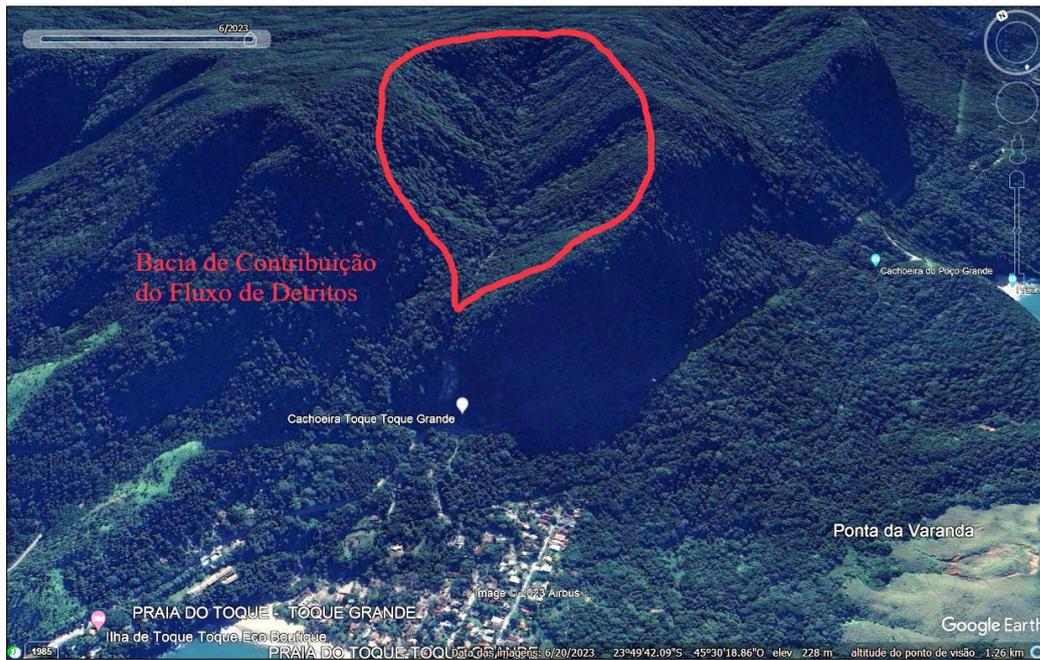


Figura 53 – Imagem de satélite da bacia de contribuição do Fluxo de Detritos do Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).

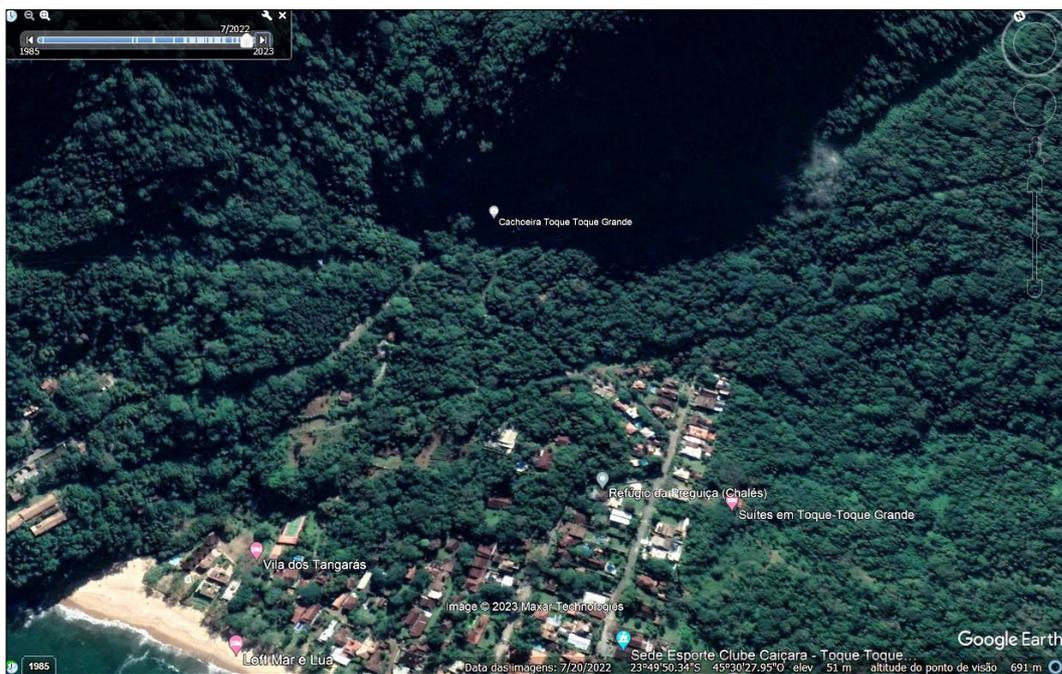


Figura 54 – Imagem de satélite antes do evento no Toque-toque Grande, capturada em 2022 (GOOGLE EARTH, 2023).

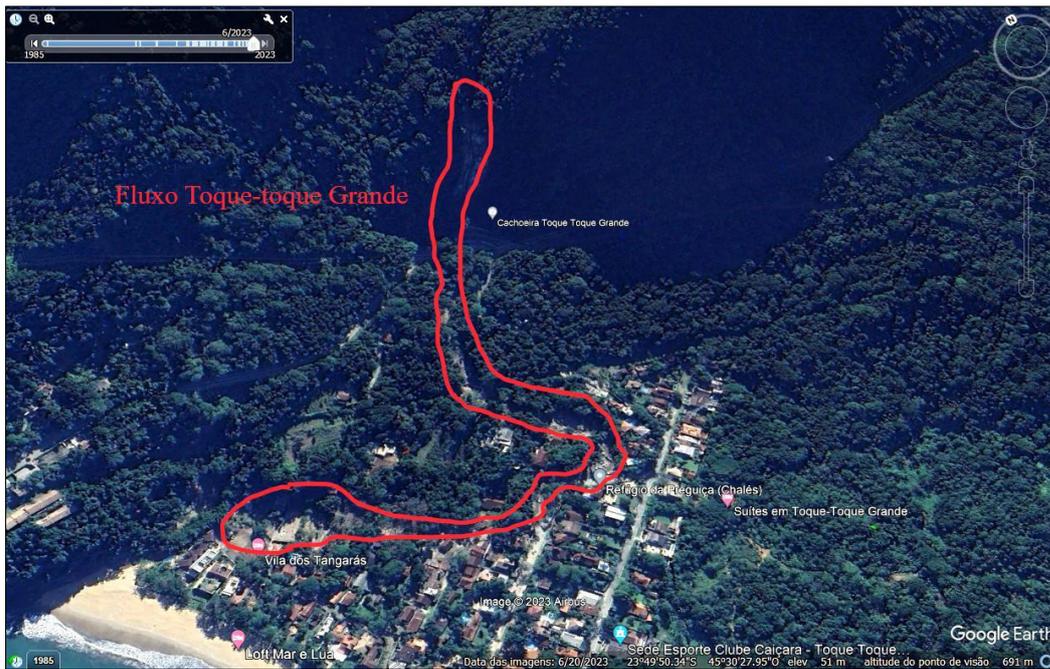


Figura 55 – Imagem de satélite depois do evento no Toque-toque Grande, capturada em 2023 (GOOGLE EARTH, 2023).



Figura 56 – Cachoeira do Toque-toque Grande, local de iniciação do fluxo de detritos.



Figura 57 – Trecho do canal em concreto.



Figura 58 – Trecho do canal com pequenos muros de pedra argamassada.

5.3.3. Geologia

Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ

O Morro Duas Pedras é formado por rochas graníticas do Proterozóico pertencentes a Suíte Serra dos Órgãos. A face norte da escarpa rochosa possui em média 45° de inclinação com a cota máxima atingindo aproximadamente 1360m de altitude com cerca de 480m de altura (PORTELLA et al., 2013).

Na Figura 59 observam-se duas famílias de fraturas subverticais, mergulhando para o sudoeste segundo a direção $238^\circ/75^\circ$ e para o nordeste segundo a direção $320^\circ/80^\circ$, persistentes em todo o maciço.

Foram observadas surgência de água por entre as juntas e fraturas, e essas podem ter facilitado o deslocamento de grandes volumes de rocha, que deram início ao movimento (GEOMECANICA, 2011).

SACOTO (2017) define que o morro Duas Pedras possui um depósito de tálus que se estende desde a base da escarpa até a rodovia RJ-130 com mais de 10,0m de espessura. Há inúmeras ocorrências de blocos, de dimensões variadas, misturados na matriz do solo e blocos soltos sobre o terreno.

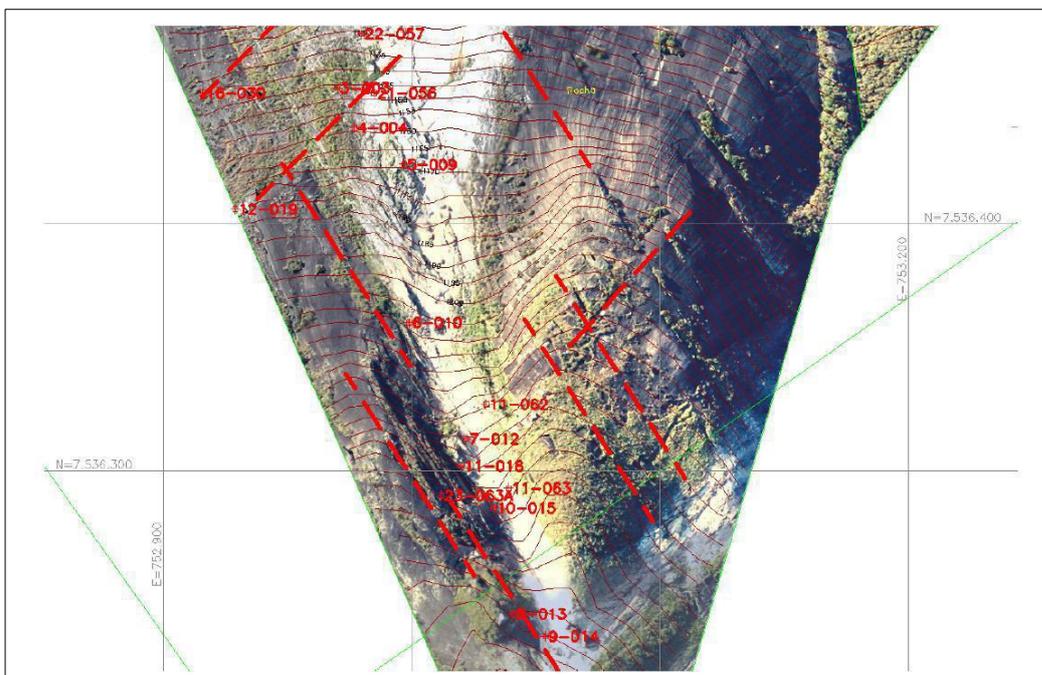


Figura 59 – Fraturas subverticais do maciço (GEOMECANICA, 2011).

Rio Príncipe – Teresópolis/RJ

Com descreve LIMA et al. (2020), a serra fluminense é uma das muitas serras que compõem a Serra do Mar, localizada no sudeste do Brasil. A Região Serrana fluminense está localizada no Terreno Oriental da Faixa Ribeira, representado pelo domínio tectônico Costeiro.

Esta área é constituída por terrenos de Paragneisses Meso a Neoproterozoicos (Suíte São Fidélis) intrudidos por complexos plutônicos Gnaissificados Neoproterozoicos (Complexo Rio Negro, Suítes Cordeiro e Serra dos Órgãos) e por granitos da Suíte Nova Friburgo. As Figuras 60 e 61 mostram mapa das áreas mais atingidas pelo desastre de janeiro de 2011, bem como o mapa geológico de Estado do Rio de Janeiro.

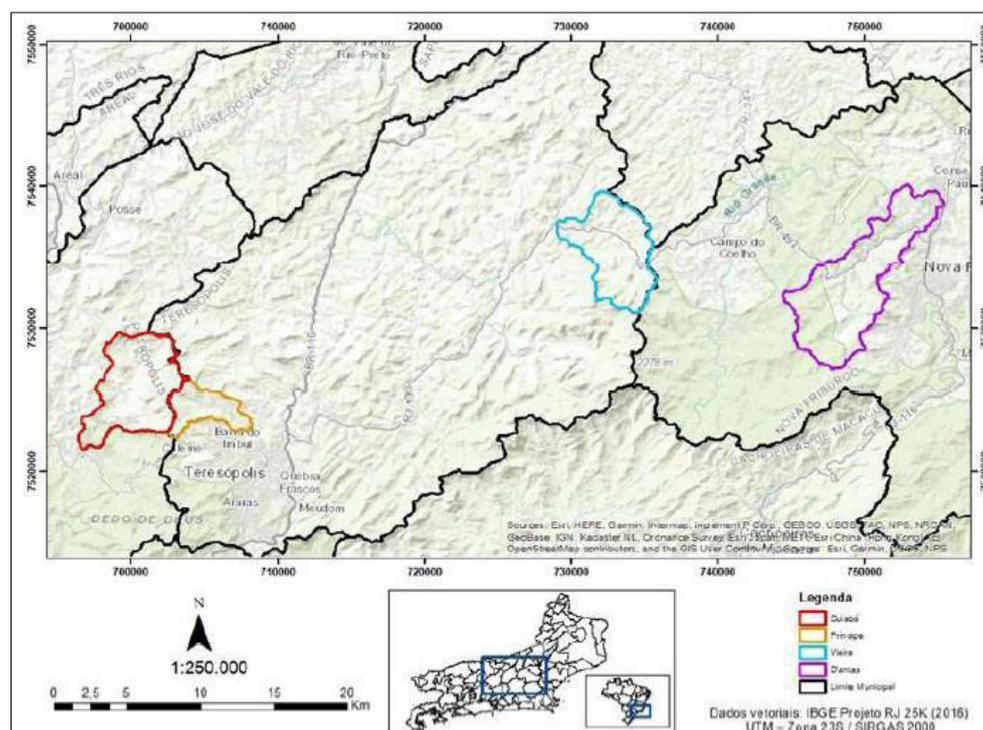


Figura 60 – Localização das principais áreas do desastre da Serra Fluminense em 2011, com destaque para a área do evento Rio Príncipe com contorno na cor laranja (LIMA et al., 2020).

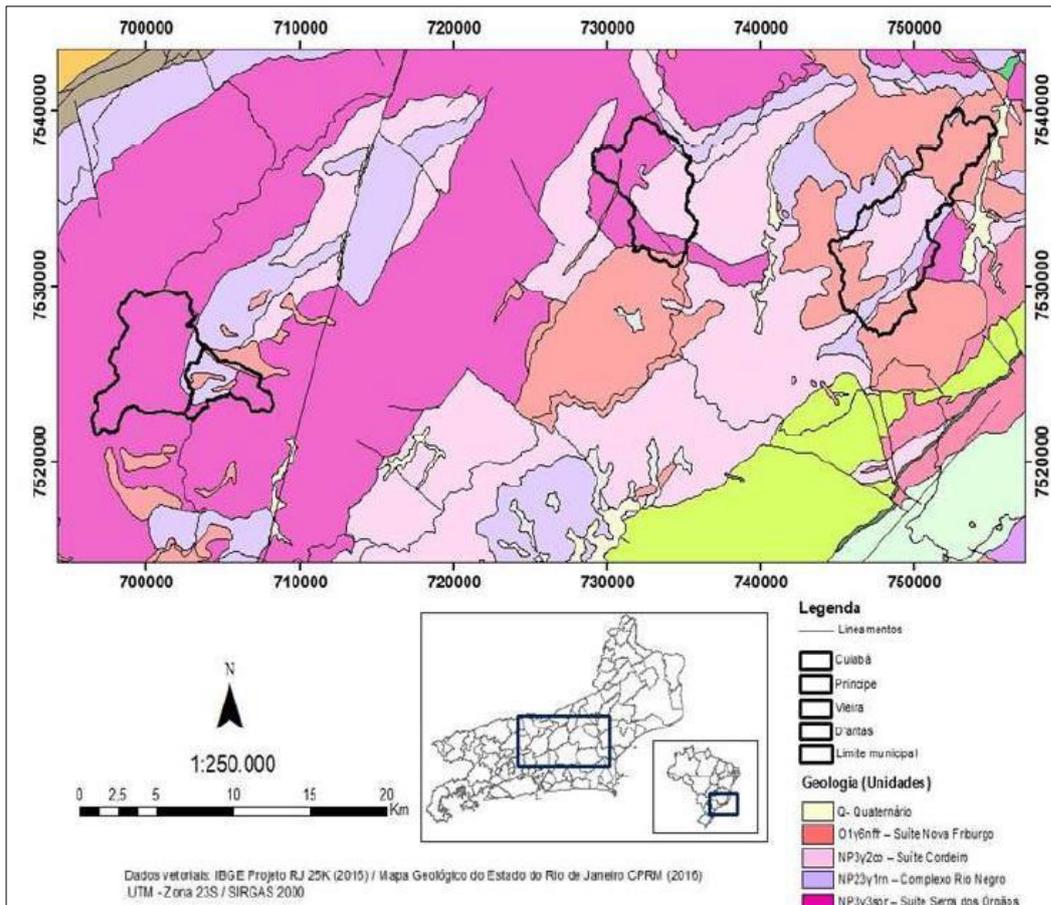


Figura 61 – Mapa Geológico da Serra Fluminense do Estado do Rio de Janeiro (LIMA et al., 2020).

Toque-toque Grande – São Sebastião/SP

A região do litoral norte paulista está inserida na Faixa Ribeira, um dos Orógenos que compõem a Província Mantiqueira que, por sua vez, se estende ao longo da costa brasileira por mais de 3.000km com direção NE-SW, entre Montevidéu e o sul da Bahia (ALMEIDA et al., 1977; HEILBRON et al., 2004).

A unidade geológica que ocorre na região de São Sebastião é denominada Domínio Costeiro ou Terreno Serra do Mar, limitado a noroeste pela Zona de Cisalhamento Cubatão e estendendo-se até a zona costeira, incluindo as ilhas (HEILBRON & MACHADO, 2003).

As rochas presentes são Ortognaisses, Gnaisses Metapelíticos parcialmente migmatizados, incluindo anfíbolitos interpretados como paleodiques, além de inúmeros corpos de composição granítica (TUPINAMBÁ et al., 2012).

MAFFRA (2000) define as seguintes unidades de mapeamento: Granito Pico do Papagaio, Augen Gnaiss Juquehy, Complexo gnáissico migmatítico e Granito Guaecá. Na região de Toque-toque Grande prevalecem Gnaisses Kinzigito e Gnaisses Graníticos, Proterozóicos-Eopaleozoicos (REVERTE & GARCIA, 2016), conforme indicado na Figura 62.

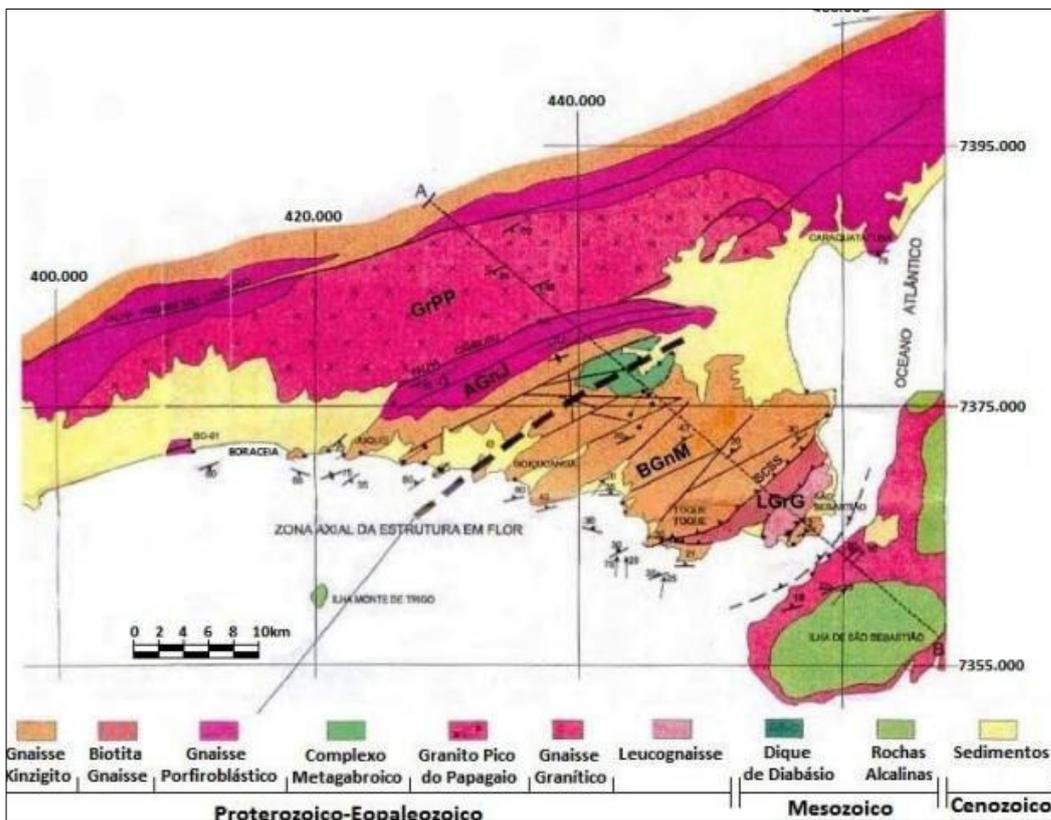


Figura 62 – Mapa Geológico da Região de São Sebastião, SP (Adapt. DIAS NETO, 2001).

5.3.4. Características dos Fluxos de Detritos

Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ

O fluxo de detritos do Córrego D'Antas iniciou na vertente norte, no topo do maciço, no contato solo/rocha, conforme se verifica na Figura 63, e prosseguiu orientado por uma linha de fraturas, erodindo a camada de solo residual e expondo o topo rochoso alterado (PORTELLA et al., 2013).



Figura 63 – Trajetória do fluxo de detritos Córrego D'Antas originada na cota 1.300m (GEOMECANICA, 2011).

O fluxo de detritos teve três canais principais e um quarto canal de fluxo na lateral direita a jusante da encosta, chamados nesta pesquisa de Canal 1, Canal 2, Canal 3 e Canal 4. Conforme apresenta a Figura 64, o material desse movimento de massa se juntou ao depositado pelo movimento principal, aumentando a distância atingida. A maior parte do fluxo de detritos se movimentou pelos canais 2 e 3, concentrando o maior volume e destruindo casas do setor. Por outro lado, o Canal 1 possui trechos íngremes com volume de material menos significativo.

Na zona de transporte, a escarpa rochosa tem uma declividade variável de 40 a 60°, enquanto na zona de deposição, a topografia se suaviza com uma inclinação aproximada de 26°. A trajetória de deposição do material atingiu uma distância de aproximadamente 500m. Alguns blocos de grande volume tiveram pequenos deslocamentos e foram depositados no talvegue da zona de transporte. Em contrapartida, outros blocos foram arrastados até a zona de deposição do movimento (SACOTO, 2017).

A área plana de deposição foi estimada por PELIZONI (2014) e MOTTA (2014) e corresponde a 35.000m² e 31.000m², respectivamente. Segundo os relatos dos sobreviventes da tragédia, a velocidade do fluxo foi muito elevada, porém ninguém conseguiu medi-la.



Figura 64 – Movimento de massa do Córrego D´Antas (PELIZONI, 2014).

Rio Príncipe – Teresópolis/RJ

Na região norte, mais precisamente os bairros de Campo Grande, Posse e Cascata do Imbuí, município de Teresópolis, a bacia do Córrego do Príncipe foi afetada por fluxos de detritos (blocos, solo, lama e água) ao longo dos cursos d'água na madrugada de 12 de janeiro de 2011 (LIMA et al., 2020).

O fluxo de detritos do Córrego do Príncipe se estendeu por 4,8km e teve uma largura variando entre 40 e 180m (WALDHERR et al., 2011; WALDHERR & TUPINAMBÁ, 2014; CONQ et al., 2015).

O fluxo de detritos se desenvolveu por meio das contribuições de materiais provenientes do desmonte das encostas laterais do canal principal do Rio Príncipe, advindos predominantemente dos diversos movimentos no contato solo-rocha.

No início do movimento, grande parte do material do fluxo foi retida em quatro pontos de estrangulamento do canal principal, formando grandes lagos (alvéolos) de acumulação provisória de detritos e de grande volume d'água. No pico da chuva, contudo, estas gargantas foram rompidas dando origem a fluxos que mobilizaram parte dos depósitos pretéritos de antigas corridas de massa (LIMA, 2017).

Embora tenha ficado confinada ao vale do Príncipe, WALDHERR et al. (2014) afirmam que o fluxo destruiu 85% das moradias na zona de transporte/erosão, particularmente aquelas localizadas em cotas mais baixas e mais próximas ao canal principal, e 50% das moradias nas zonas de deposição, em especial a montante das gargantas, ora pelos escombros transportados, ora submergidas pelos lagos. A Figura 65 mostra o rastro de destruição no canal do Rio Príncipe ao passar pelo bairro do Campo Grande.



Figura 65 – Rio Príncipe após passagem do fluxo de detritos (GEOPHI, 2021).

Toque-toque Grande – São Sebastião/SP

O fluxo de detritos de Toque-toque Grande se estendeu por cerca de 1km e teve uma largura variando entre 20 e 50m aproximadamente.

Por meio de relatos dos moradores locais, comprovados por meio de vídeo filmado no momento do evento, percebe-se que o volume de chuvas continuava contante, bem como o fluxo no curso do rio, até que repentinamente surge uma onda de grandes dimensões, como se estivesse estourado uma barragem à montante do ponto observado, momento que se presume a vazão pico da corrida de detritos.

Após sobrevoos ao longo da região da bacia de contribuição e do talvegue do fluxo de detritos, verificou-se a existência de movimentos de massa adjacentes ao canal principal. Os quais podem ter realizado um barramento/represamento precário e momentâneo do curso das águas, que ao estourar lançou no canal grande vazão que potencializou o fluxo de detritos. A partir daí a vazão torrencial ao longo do canal passou a exumar e/ou mobilizar o material de antigos depósitos de corrida de detritos disponíveis no local. Os deslizamentos adjacentes podem ser vistos na Figura 66.



Figura 66 – Deslizamento adjacente ao talvegue do fluxo de detritos.

Embora o fluxo tenha ficado confinado ao vale do Toque-toque Grande e as casas guardarem certa distância das margens, algumas construções foram afetadas, conforme se constata na Figura 67.



Figura 67 – Residência atingida pelo fluxo de detritos.

As Figuras 68 e 69 mostram a zona de iniciação do fluxo de detritos, o topo da Cachoeira do Toque-toque Grande, por meio de fotografia obtida em sobrevoo, e o rastro do movimento com ênfase na quantidade de blocos rochosos remanescentes no canal.



Figura 68 – Zona de iniciação do fluxo de detritos de Toque-toque Grande.



Figura 69 – Canal do fluxo de detritos de Toque-toque Grande.

5.4.

Resultados das Análises dos Fluxos de Detritos do Córrego D' Antas e Rio Príncipe

Após o grande desastre da Serra Fluminense, ocorrido em janeiro de 2011, intensificou-se as pesquisas que envolvem movimentos de massa, principalmente com ênfase nas corridas de detritos, destacando-se o grupo de pesquisa *Debris Flow*, capitaneado pelos Professores Alberto Sayão (PUC-Rio) e Anna Laura Nunes (COPPE-UFRJ), e resultando em inúmeras dissertações de mestrados e teses de doutorado.

Pesquisadores como MOTTA (2014), PELIZONI (2014), XAVIER SILVA (2015), VALVERDE (2016), SACOTO (2017), MORAES (2023) têm estudado os fluxos de detritos da Região Serrana. Atualmente o grupo conta com um banco de dados de eventos ocorridos e eventos simulados numericamente com programas computacionais (DAN-W, DAN3D, ROCFALL), dados de levantamentos in situ e análises usando equações empíricas.

As Tabelas 12 e 13 resume alguns dos resultados de campo e de simulações numéricas executadas pelos diversos pesquisadores.

Tabela 12 – Resultados das simulações do Fluxo de Detritos Córrego Dantas.

Parâmetro	Observado	Pelizone	Valverde	Silva	Sacoto
Área de Deposição (m ²)	35600	20000	34650	19378	13579
Volume Final (m ³)	17000	11000 - 15000	18000	13210	7568
Distância Percorrida (m)	770 - 780	600 - 1000	770 - 790	621	720
Velocidade (m/s)	-	12 - 15	2 - 10,5	17	4,5 - 20,6
Erosão (m)	0,5 - 1	0,5 - 1	0,2 - 0,7	1	0,5 - 1

Tabela 13 – Resultados das simulações do Fluxo de Detritos Rio Príncipe (MORAES, 2023).

Parâmetro	Observado	Moraes
Área de Deposição (m ²)	300000	200000
Volume Final (m ³)	-	800000
Distância Percorrida (m)	4900	4600
Velocidade (m/s)	-	2,5 - 6
Erosão (m)		3 - 6

PELIZONI (2014) foi a pesquisadora pioneira a investigar o fluxo de detritos do Córrego D'Antas usando o *software* DAN3D, disponibilizado pelo próprio Hungr em 2013. XAVIER SILVA (2015) fez a análise paramétrica dos valores de entrada que mais influenciam os resultados de saída do programa. PELIZONI (2014) e XAVIER SILVA (2015) usaram duas reologias, sendo elas de Atrito e de Voellmy.

Porém, VALVERDE (2016) usou uma única reologia e ainda calibrou os dados de entrada por meio de um programa PEST, especialmente desenvolvido por MCDOUGALL (2006) para melhor definição de parâmetros de *debris flows*. SACOTO (2017) também utilizou os *softwares* DAN3D e DAN-W para a simulação do fluxo de detritos Córrego D'Antas e MORAES (2023) utilizou o *software* DAN3D para simular o fluxo de detritos do Rio Príncipe.

A compilação de resultados do fluxo de detritos Córrego D'Antas e Rio Príncipe são de suma importância para o desenvolvimento das análises da presente pesquisa, bem como para a avaliação/verificação dos modelos, relações empíricas e simulações numéricas de esforços de impacto, pois agem como referencial balizador.

Observa-se das Tabelas 12 e 13 que os valores obtidos por meio das simulações de VALVERDE (2016) são os mais similares aos valores reais do fluxo. Portanto, esses valores serão considerados para avaliar os diferentes modelos de força de impacto desta pesquisa. Com os mesmos dados de entrada de VALVERDE (2016) foram analisados diferentes parâmetros de saídas em diferentes pontos de controle e comparados àqueles obtidos pela autora.

Os valores de altura de fluxo fornecidos por VALVERDE (2016) são menores tendo em consideração que blocos de aproximadamente 5m³ formaram parte do fluxo de detritos. Os modelos hidrostáticos e os mistos têm em consideração a altura do fluxo para calcular a pressão de impacto, por conseguinte, foi necessário realizar novas simulações considerando outra reologia que possivelmente influenciasse o resultado.

KWAN (2012) considera que as reologias de Atrito e Voellmy são as mais adequadas para simular fluxos de detritos e as que fornecem resultados mais próximos da realidade. As pesquisas anteriores do Grupo *Debris Flow* da PUC-Rio – COPPE/UFRJ consideraram somente a reologia de Voellmy. No entanto,

SACOTO (2017) ampliou as análises numéricas considerando a reologia de Atrito no programa DAN-W.

Necessário ressaltar que os programas DAN-W e DAN3D não conseguem quantificar a energia de impacto diretamente, o que justifica a utilização do programa ROCFALL para avaliar a energia gerada pelo impacto da queda de um bloco com grande dimensão, que simule o impacto do fluxo de detritos. A Figura 70 apresenta a seção transversal crítica do fluxo de detritos do Córrego D'Antas.

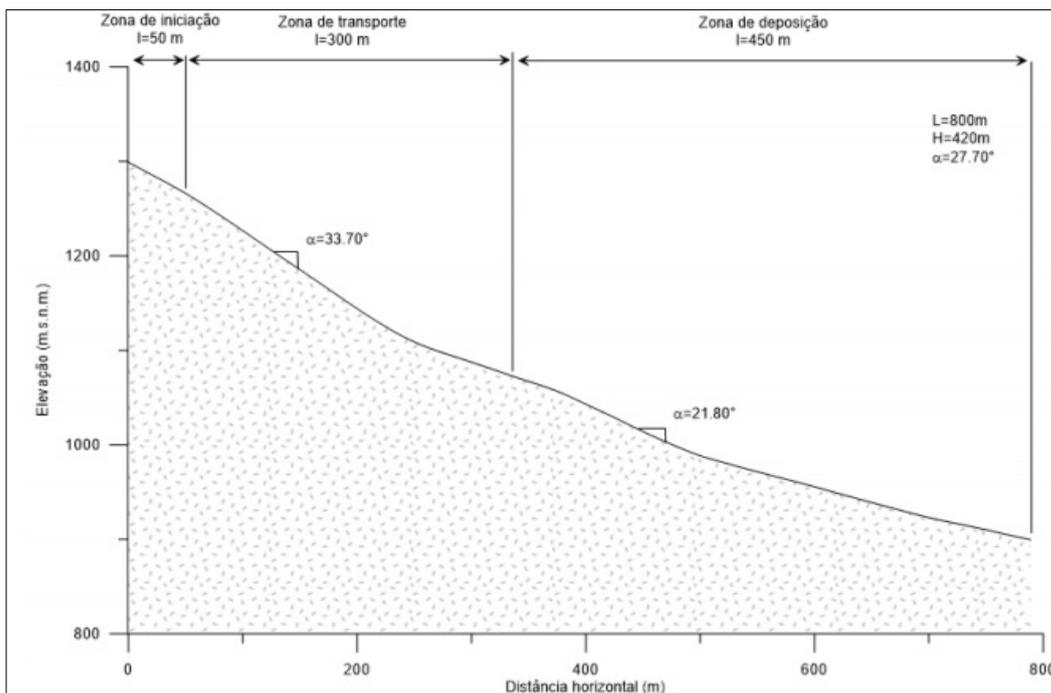


Figura 70 – Seção transversal crítica do fluxo de detritos Córrego D'Antas (SACOTO, 2017).

5.5.

Resultados das Análises dos Fluxos de Detritos Instrumentados em Ensaio de Campo

Como já demonstrado os fluxos de detritos apresentam grande complexidade, contudo, vários pesquisadores buscam reproduzir tais movimentos em laboratório e campo. Resultados mais fidedignos e confiáveis podem ser observados se as reproduções forem em escala semelhante a real, em encostas naturais, com a possibilidade de instrumentação.

Dois grupos de pesquisa merecem destaque em função dos investimentos realizados em ensaios de campo para observarem melhor as forças de impacto dos fluxos de detritos.

Sendo um liderado pela *Officine Maccaferri* com a participação de Segalini na Itália e o outro é liderado por Wendeler na Suíça.

5.5.1. Fluxos de Detritos em Pieve di Alpago – Itália

O Grupo de pesquisa liderado pela Officine Maccaferri com participação de Andrea Segalini da Universidade di Parma estruturou um campo experimental para a pesquisa de fluxos de detritos e impactos em barreiras flexíveis. O local escolhido situa-se na pedreira de Pieve di Alpago, próxima a Belluno, Itália.

O campo de teste, concebido em uma encosta com canal natural de forma trapezoidal de 40° de inclinação, 40m de comprimento e 2m de largura. Instalou-se uma barreira flexível de 3000kJ com 6m de altura e 20m de comprimento, localizada no desemboque do canal, na região aproximada de deposição do fluxo. A Figura 71 mostra o mapa digital de elevação da área de teste e vista geral da área de testes.

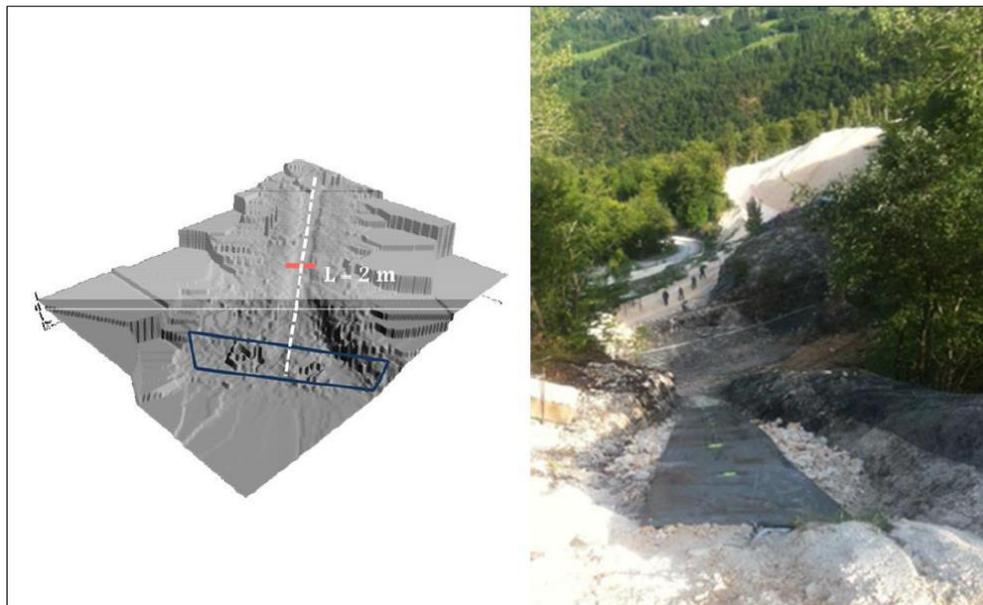


Figura 71 – Campo de ensaios de fluxos de detritos de Pieve di Alpago, Itália (SEGALINI et al., 2016).

Vale lembrar que o canal de teste não apresenta material passível de erosão, uma vez que se encontrava em superfície rochosa sem finos e/ou fragmentos, possuindo ângulo de atrito de cerca de 30°.

Os ensaios de fluxo de detritos foram realizados considerando uma mistura de sólidos e água com massa específica próxima a 1800kg/m³. O volume total de mistura de material lançado no emboque do canal foi de 500 m³ aproximadamente, distribuídos por dez lançamentos subsequentes. A Figura 72 e 73 apresentam a situação antes e depois dos lançamentos, isto é, indução do fluxo de detritos.



Figura 72 – Vista do canal antes do ensaio de fluxo de detritos induzido (SEGALINI et al., 2016).

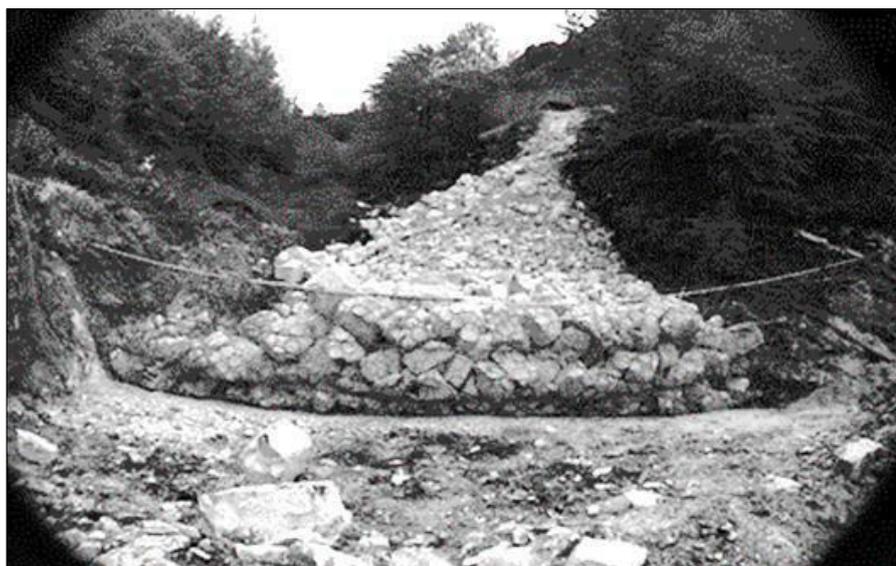


Figura 73 – Vista do canal depois do ensaio de fluxo de detritos induzido (SEGALINI et al., 2016).

A barreira flexível foi instrumentada com células de carga e sensores de deslocamento e a área de teste foi monitorada por câmeras especiais para a medição de parâmetros tais como altura do fluxo, velocidade e força de impacto. A Figura 74 apresenta a disposição das principais células de carga e a Tabela 14 resume os valores médios registrados pelas células de carga na campanha de ensaios. A célula de carga número 21 registrou valores muito baixos devido possivelmente ao efeito de restrição com o topo do canal. As células 15 e 20 apresentam valores maiores, pois o impacto do fluxo de detritos ocorreu nessa região.

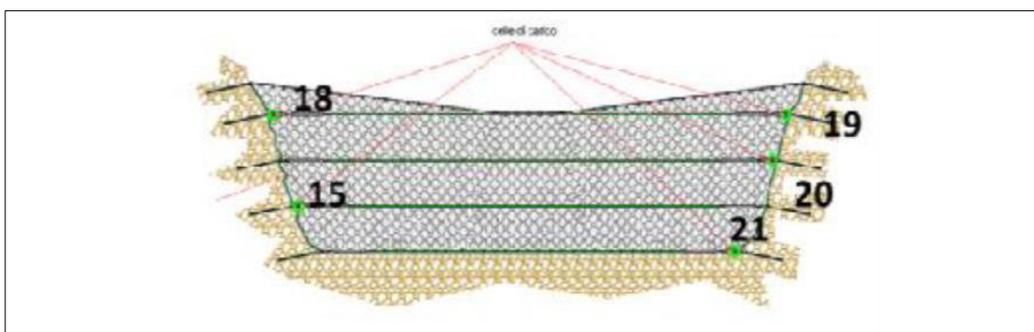


Figura 74 – Esquema da barreira flexível instrumentada com células de carga (SEGALINI et al., 2016).

Tabela 14 – Forças registradas pelas células de carga da barreira flexível (SACOTO, 2017).

Célula de Carga	Forças (kN)	
	F máxima	F média
15	254,7	180
18	114,4	53,1
19	105,7	41
20	366,1	183,7
21	40,8	31,2

5.5.2. Fluxos de Detritos em Veltheim – Suíça

Analogamente aos italianos um Grupo de pesquisadores encabeçado por Wendeler e Bugnion decidiu criar teste de campo de fluxo de detritos na região de

Veltheim na Suíça. Eles instrumentaram a barreira flexível com células de carga e o canal com câmeras e lasers para medir a velocidade e altura do fluxo de detrito em diversos pontos do canal parcialmente natural. A Figura 75 mostra o campo de testes de Veltheim.



Figura 75 – Campo Experimental de Veltheim (BUGNION et al., 2011).

O canal de teste foi conformado por meio de uma escavação em encosta natural com dimensões aproximadas de 40m de comprimento e 8m de largura e inclinação de 30°, muito semelhante a Pieve di Alpago, Itália.

Foram realizados 12 lançamentos com diferentes misturas e configurações em volumes de 60 m³ por vez, realizando-se registros ao longo do canal com sensores de deslocamento e lasers para medir velocidades e altura de fluxos em 3 pontos de controle, como mostra a Figura 76.

A barreira flexível, instalada na base do canal também foi instrumentada com células de carga para medirem o impacto do fluxo de detritos. Os resultados das pesquisas do fluxo de detritos de Veltheim apresentaram grandes dispersões de resultados, não indicados utilização, apesar de apresentados na Tabela 15.

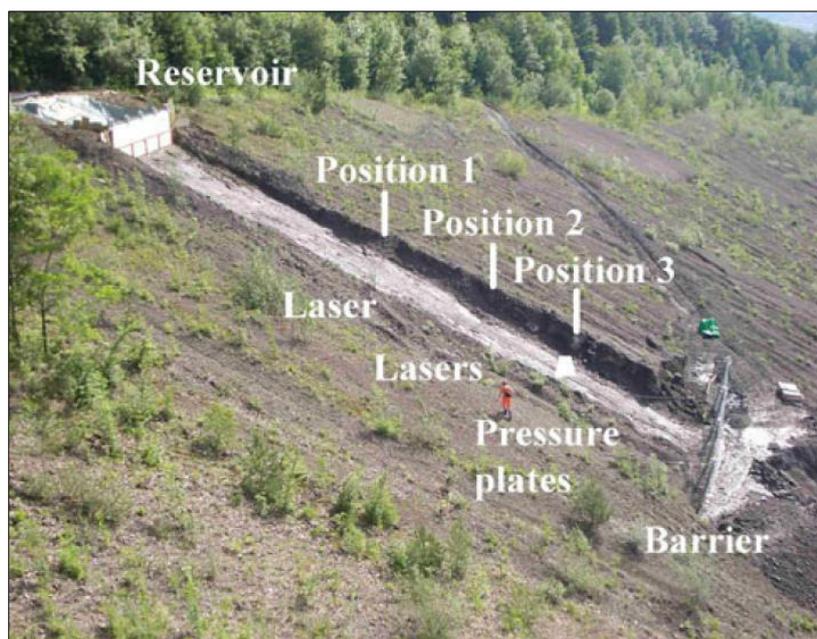


Figura 76 – Localização da barreira e instrumentação do Campo de Velheim (BUGNION et al., 2011).

Tabela 15 – Velocidades e pressões registradas pelas células de carga da barreira flexível (SACOTO, 2017).

Lançamento	Velocidade célula de carga maior (m/s)	Velocidade célula de carga menor (m/s)	Pressão célula de carga maior (kPa)	Pressão célula de carga menor (kPa)
4	2,2	2,3	17,2	18,4
5	6,8	8,6	61,5	92,9
6	-	10,8	-	106,1
7,1	-	8,6	-	112,5
7,2	-	6,1	-	75,2
8,1	7,2	9,3	41,7	72,9
8,28	6,5	8,1	28,1	86,2
9,1	8,3	9,3	65,9	135,6
9,2	5,2	5,5	48,7	96,3
9,3	5,7	8,3	44,6	146,3
10	9	8,9	96	201,1
11,1	7,9	-	94,6	-
11,2	8,9	-	83	-
13,1	9,5	8,9	98,5	138,8
13,2	10,5	-	123,7	-
14,1	9,4	-	138	-
14,2	9,3	-	132,5	-
14,3	8,1	-	99,7	-
14,4	11,9	-	108,2	-
15,1	10,1	-	109,4	-
15,2	9	-	99,7	-
16,1	6,9	-	69,2	-
16,2	13,6	-	177	-

6

Simulações e Análises

6.1.

Considerações Iniciais

Neste capítulo são avaliados e comparados os modelos de força de impacto de fluxo de detritos e queda de bloco, com o objetivo de verificar a representatividade e consistência em relação aos casos de fluxos de detritos estudados. É sabido que também existe a abordagem tradicional pelo método da energia, além da abordagem modificada por WENDELER et al (2008).

São apresentadas as análises numéricas dos ensaios em escala real de fluxos de detritos realizados no Pieve di Alpago e Veltheim, desenvolvidas nesta pesquisa com o auxílio do programa DAN-W e os resultados são comparados aos valores obtidos em campo e analisados por SACOTO (2017).

Neste capítulo também são apresentadas as análises numéricas com os programas DAN3D e ROCFALL dos fluxos de detritos Córrego D'Antas, Rio Príncipe e Toque-toque Grande, realizadas com objetivo de se avaliar os principais parâmetros dos fluxos de detritos assim obtidos e usá-los para determinação de forças e energias de impacto. Este estudo também possibilita a realização de retroanálises dos casos estudados e a obtenção de parâmetros básicos em função da reologia de atrito.

O objetivo primordial das análises consiste na determinação dos esforços de impacto de fluxos de detritos, por meio de modelos analíticos, empíricos e numéricos. Análises complementares foram implementadas visando a estimativa de esforços e/ou verificação da representatividade dos modelos adotados.

6.2. Modelos Existentes na Literatura

Em capítulos anteriores foram apresentados diferentes modelos e relações empíricas de força e energia de impacto. Em função da complexidade de modelagem dos fluxos de detritos, atualmente não existe um modelo ou uma relação que possam ser apontados como os mais representativos para a determinação dos esforços de impacto do movimento. Esta motivação justifica a finalidade desta pesquisa em se aprimorar o conhecimento sobre o assunto, para contribuir no maior entendimento do tema e auxiliar a escolha de um método de força de impacto para o dimensionamento de estruturas de convivência e proteção contra os fluxos de detritos.

6.2.1. Análises de Modelos de Força de Impacto de Fluxos de Detritos

No Capítulo 4 descreveu-se sobre os diversos modelos de força de impacto existentes na literatura, ressaltando que a grande maioria dos autores consideram que os modelos de força de impacto do tipo hidráulicos são os que fornecem resultados mais próximos da realidade.

Contudo, os modelos hidráulicos apresentam uma divergência comum, a qual se torna um óbice, representada pelo fator empírico que varia de acordo com o autor. Vale lembrar que tanto os modelos hidrostáticos como os hidrodinâmicos possuem um fator empírico, cujo valor depende da interpretação de cada autor.

Nos fluxos de detritos ocorridos no Brasil, a velocidade da corrida de massa foi elevada ocasionando grandes perdas. Acredita-se que, pelos comentários dos sobreviventes, além de vídeo do momento do evento (Toque-toque Grande), os fluxos de detritos estudados nesta tese, ocorreram com uma alta velocidade e com um único impacto.

Assim, faz-se necessária a elaboração de um modelo geomecânico dos fluxos de detritos que represente o evento real e com condições compatíveis com os modelos avaliados. Os modelos foram selecionados em função de suas características e de análises de resultados prévias, indicativas de boa representatividade dos casos reais.

Portanto, para a análise dos modelos de força de impacto foram consideradas as seguintes premissas:

- i. O ângulo de impacto do fluxo de detritos é assumido igual a 90°, isto é, a força de impacto é perpendicular à estrutura de proteção;
- ii. A estrutura de proteção foi assumida genérica, sem restrição relativa à área de impacto, isto é, os esforços foram determinados em função da pressão com resultados expressos em unidade de pressão (KPa).

Os modelos selecionados para a realização das análises são divididos em 3 grupos, conforme segue:

- i. **Grupo 1 - Hidrostáticos:** composto pelos modelos hidrostáticos de LICHTENHAHN (1973) e SCOTTON & DEGANUTTI (1997);
- ii. **Grupo 2 - Hidrodinâmicos:** composto pelos modelos hidrodinâmicos de MIZUYAMA (1979), VANDINE (1996), WATANABE & IKEYA (1981), HUNGR (1984), DU (1986), ZHANG (1990), WENDELER (2007), BUGNION (2011), ISHIKAWA (2008) e CANELLI (2012);
- iii. **Grupos 3 – Hidrodinâmicos/Froude:** composto pelos modelos hidrodinâmicos com Número de Froude, representados por HUBL & HOLZINGER (2003) e CUI (2015).

As análises dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos com fatores empíricos foram realizadas considerando o cálculo das pressões de impacto para fatores mínimo, médio e máximo. A Tabela 16 resume os valores dos fatores empíricos adotados para os Grupos 1 e 2. Importante ressaltar que o Grupo 3 leva em consideração o Número de Froude.

Tabela 16 – Valores dos fatores empíricos de impacto adotados para os modelos hidrostáticos (Grupo 1) e hidrodinâmicos (Grupo 2).

	Grupo 1	Grupo 2
Mínimo	2,5	1
Médio	4,3	2,2
Máximo	7,5	5

As análises foram realizadas com valores de velocidade e altura do fluxo de detritos apresentados na Tabela 17, determinados com o programa DAN3D por VALVERDE (2016), MORAES (2023) e por esta pesquisa. Importante ressaltar que os valores mais importantes a serem analisados correspondem aos valores na zona de deposição, visto que qualquer estrutura de proteção construída na zona de transporte pode facilmente se transformar em acréscimo de detritos ao se colapsar, devido à alta energia e ao severo processo erosivo típicos desta zona.

Tabela 17 – Velocidade e altura dos fluxos de detritos em função da trajetória percorrida.

Córrego D' Antas		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	0,4	10,4
200	0,4	4,8
300	0,4	6,1
400	0,4	4,5
500	0,5	2,5
600	0,5	2,6
700	0,5	2,0
Rio Príncipe		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	1	12,7
200	1	11,1
300	1	14,9
400	1	19,0
500	1	13,3
600	1	8,8
700	1	3,2
Toque-Toque Grande		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	0,2	11,6
200	0,3	12,3
300	0,7	14,7
400	0,7	13,5
500	0,4	10,3
600	0,3	6,3
700	0,2	5,9

As Tabelas 18 a 26 apresentam a síntese dos resultados obtidos das análises dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos adotados para a determinação da pressão de impacto do fluxo de detritos.

Tabela 18 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Córrego D' Antas.

DADOS	Modelos Hidrostáticos, Grupo 1, Córrego D'Antas				
	LICHTENHAHN		SCOTTON & DEGANUTTI		
$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{M\acute{u}} \cdot g \cdot h_{M\acute{u}}$					
k	2,8	4,4	2,5	7,5	
$\rho_{M\acute{u}}$	2000	2000	2000	2000	
g	9,81	9,81	9,81	9,81	$h_{M\acute{u}}$
Pmax (kPa) em 100m	19,2	30,2	17,2	51,5	0,4
Pmax (kPa) em 200m	22,0	34,5	19,6	58,9	0,4
Pmax (kPa) em 300m	22,0	34,5	19,6	58,9	0,4
Pmax (kPa) em 400m	22,0	34,5	19,6	58,9	0,4
Pmax (kPa) em 500m	27,5	43,2	24,5	73,6	0,5
Pmax (kPa) em 600m	27,5	43,2	24,5	73,6	0,5
Pmax (kPa) em 700m	27,5	43,2	24,5	73,6	0,5

Tabela 19 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Córrego D' Antas.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 2 , Córrego D' Antas													
	Watanabe & Ikeya	Zhang	Wendeler	Bugnton	Du	Mizuyama	Hungr	Ishikawa	Canelli	Vandine				
$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot P_{Mu} \cdot v^2$	2	3	0,7	2	3	1	2	1,5	1,8	5	1	1	1	1
Cx	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
P_{Mu}	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Pmax (kPa) em 100m	432,6	865,3	151,4	432,6	649,0	216,3	432,6	324,5	389,4	1081,6	216,3	324,5	1081,6	216,3
Pmax (kPa) em 200m	92,2	184,3	32,3	92,2	138,2	46,1	92,2	69,1	82,9	230,4	46,1	82,9	230,4	46,1
Pmax (kPa) em 300m	148,8	297,7	52,1	148,8	223,3	74,4	148,8	111,6	134,0	372,1	74,4	111,6	372,1	74,4
Pmax (kPa) em 400m	81,0	162,0	28,4	81,0	121,5	40,5	81,0	60,8	72,9	202,5	40,5	60,8	202,5	40,5
Pmax (kPa) em 500m	25,0	50,0	8,8	25,0	37,5	12,5	25,0	18,8	22,5	62,5	12,5	18,8	62,5	12,5
Pmax (kPa) em 600m	27,0	54,1	9,5	27,0	40,6	13,5	27,0	20,3	24,3	67,6	13,5	20,3	67,6	13,5
Pmax (kPa) em 700m	16,0	32,0	5,6	16,0	24,0	8,0	16,0	12,0	14,4	40,0	8,0	12,0	40,0	8,0

Tabela 20 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Córrego D' Antas.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 3, Córrego D' Antas			
$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6}$ $P_{m\acute{a}x} = 5,3F_r^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	Hubl & Holzinger	Cui		
ρ_{Mu}	2000	2000	v	h_{Mu}
Pmax (kPa) em 100m	136,5	120,1	10,4	0,4
Pmax (kPa) em 200m	79,7	25,6	4,8	0,4
Pmax (kPa) em 300m	96,5	41,3	6,1	0,4
Pmax (kPa) em 400m	75,6	22,5	4,5	0,4
Pmax (kPa) em 500m	54,0	6,9	2,5	0,5
Pmax (kPa) em 600m	55,8	7,5	2,6	0,5
Pmax (kPa) em 700m	45,2	4,4	2,0	0,5

Tabela 21 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Rio Príncipe.

DADOS	Modelos Hidrostáticos, Grupo 1, Rio Príncipe				
$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu}$	LICHTENHAHN		SCOTTON & DEGANUTTI		
k	2,8	4,4	2,5	7,5	
ρ_{Mu}	2000	2000	2000	2000	
g	9,81	9,81	9,81	9,81	h_{Mu}
Pmax (kPa) em 100m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 200m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 300m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 400m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 500m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 600m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0
Pmax (kPa) em 700m	54,9	86,3	49,1	147,2	1,0

Tabela 22 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Rio Príncipe.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 2, Rio Príncipe																	
	Watanabe & Ikeya	Zhang	Wendeler	Bugnon	Du	Mizuyama	Hungr	Ishikawa	Canelli	Vandine								
$P_{\text{mlc}} = \alpha \cdot P_{\text{Mu}} \cdot v^2$	2	4	3	5	0,7	2	0,4	2	3	1	2	1,5	1	1,8	1,5	5	1	
P_{Mu}	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Pmax (kPa) em 100m	645,2	1290,3	967,7	1612,9	225,8	645,2	129,0	645,2	967,7	322,6	645,2	483,9	322,6	580,6	483,9	1612,9	322,6	12,7
Pmax (kPa) em 200m	492,8	985,7	739,3	1232,1	172,5	492,8	98,6	492,8	739,3	246,4	492,8	369,6	246,4	443,6	369,6	1232,1	246,4	11,1
Pmax (kPa) em 300m	888,0	1776,1	1332,1	2220,1	310,8	888,0	177,6	888,0	1332,1	444,0	888,0	666,0	444,0	799,2	666,0	2220,1	444,0	14,9
Pmax (kPa) em 400m	1444,0	2888,0	2166,0	3610,0	505,4	1444,0	288,8	1444,0	2166,0	722,0	1444,0	1083,0	722,0	1299,6	1083,0	3610,0	722,0	19,0
Pmax (kPa) em 500m	707,6	1415,1	1061,3	1768,9	247,6	707,6	141,5	707,6	1061,3	353,8	707,6	530,7	353,8	636,8	530,7	1768,9	353,8	13,3
Pmax (kPa) em 600m	309,8	619,5	464,6	774,4	108,4	309,8	62,0	309,8	464,6	154,9	309,8	232,3	154,9	278,8	232,3	774,4	154,9	8,8
Pmax (kPa) em 700m	41,0	81,9	61,4	102,4	14,3	41,0	8,2	41,0	61,4	20,5	41,0	30,7	20,5	36,9	30,7	102,4	20,5	3,2

Tabela 23 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Rio Príncipe.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 3, Rio Príncipe			
$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{M_u} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{M_u})^{0,5}$ $P_{m\acute{a}x} = 5,3F_r^{-1,5} \cdot \rho_{M_u} \cdot v^2$	Hubl & Holzinger	Cui		
ρ_{M_u}	2000	2000	v	h_{M_u}
Pmax (kPa) em 100m	300,6	179,1	12,7	1,0
Pmax (kPa) em 200m	269,9	136,8	11,1	1,0
Pmax (kPa) em 300m	341,6	246,5	14,9	1,0
Pmax (kPa) em 400m	415,0	400,9	19,0	1,0
Pmax (kPa) em 500m	311,9	196,4	13,3	1,0
Pmax (kPa) em 600m	224,2	86,0	8,8	1,0
Pmax (kPa) em 700m	99,8	11,4	3,2	1,0

Tabela 24 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 1 – Toque-Toque Grande.

DADOS	Modelos Hidrostáticos, Grupo 1, Toque-Toque Grande			
$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{M_u} \cdot g \cdot h_{M_u}$	LICHTENHAHN	SCOTTON & DEGANUTTI		
k	2,8	4,4	2,5	7,5
ρ_{M_u}	2000	2000	2000	2000
g	9,81	9,81	9,81	9,81
				h_{M_u}
Pmax (kPa) em 100m	10,4	16,4	9,3	28,0
Pmax (kPa) em 200m	18,1	28,5	16,2	48,6
Pmax (kPa) em 300m	35,7	56,1	31,9	95,6
Pmax (kPa) em 400m	36,8	57,8	32,9	98,6
Pmax (kPa) em 500m	23,6	37,1	21,1	63,3
Pmax (kPa) em 600m	15,9	25,0	14,2	42,7
Pmax (kPa) em 700m	11,5	18,1	10,3	30,9

Tabela 25 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 2 – Toque-Toque Grande.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 2, Toque-Toque Grande																		
	Watanabe & Ikeya		Zhang		Wendeler		Bugnon		Du		Mizayama		Hungr		Ishikawa		Canelli		Vandine
$P_{\text{mlc}} = \alpha \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot v^2$	2	4	3	5	0,7	2	0,4	2	3	1	2	1,5	1	1,8	5	1	1	1	1
P_{Mu}	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
P _{mlc} (kPa) em 100m	535,5	1070,9	803,2	1338,6	187,4	535,5	107,1	535,5	803,2	267,7	535,5	401,6	267,7	481,9	401,6	1338,6	267,7	11,6	v
P _{mlc} (kPa) em 200m	600,3	1200,5	900,4	1500,6	210,1	600,3	120,1	600,3	900,4	300,1	600,3	450,2	300,1	540,2	450,2	1500,6	300,1	12,3	
P _{mlc} (kPa) em 300m	867,9	1735,8	1301,8	2169,7	303,8	867,9	173,6	867,9	1301,8	433,9	867,9	650,9	433,9	781,1	650,9	2169,7	433,9	14,7	
P _{mlc} (kPa) em 400m	730,1	1460,2	1095,1	1825,2	255,5	730,1	146,0	730,1	1095,1	365,0	730,1	547,6	365,0	657,1	547,6	1825,2	365,0	13,5	
P _{mlc} (kPa) em 500m	422,7	845,4	634,1	1056,8	147,9	422,7	84,5	422,7	634,1	211,4	422,7	317,0	211,4	380,4	317,0	1056,8	211,4	10,3	
P _{mlc} (kPa) em 600m	156,3	312,5	234,4	390,6	54,7	156,3	31,3	156,3	234,4	78,1	156,3	117,2	78,1	140,6	117,2	390,6	78,1	6,3	
P _{mlc} (kPa) em 700m	138,8	277,5	208,2	346,9	48,6	138,8	27,8	138,8	208,2	69,4	138,8	104,1	69,4	124,9	104,1	346,9	69,4	5,9	

Tabela 26 – Valores de pressão de impacto obtidos com modelos dos Grupos 3 – Toque-Toque Grande.

DADOS	Modelos Hidrodinâmicos, Grupo 3, Toque-Toque Grande			
	Hubl & Holzinger	Cui		
$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6}$ $P_{m\acute{a}x} = 5,3F_r^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$				
ρ_{Mu}	2000	2000	v	h_{Mu}
Pmax (kPa) em 100m	103,0	148,6	11,6	0,2
Pmax (kPa) em 200m	150,2	166,6	12,3	0,3
Pmax (kPa) em 300m	261,4	240,9	14,7	0,7
Pmax (kPa) em 400m	248,4	202,7	13,5	0,7
Pmax (kPa) em 500m	153,0	117,3	10,3	0,4
Pmax (kPa) em 600m	81,1	43,4	6,3	0,3
Pmax (kPa) em 700m	63,7	38,5	5,9	0,2

Os resultados obtidos com a avaliação dos modelos permitem várias observações e conclusões, sendo destacadas aquelas mais interessantes e importantes.

As alturas de fluxo obtidas das simulações com o programa DAN3D não são representativas e consistentes com os eventos reais, pois consideram o volume do fluxo de detritos como um fluxo equivalente.

PORTELLA et al. (2013) e o próprio autor identificaram detritos formados por grandes blocos com volume maior que 5m³, o que não está de acordo com a altura do fluxo obtida com os programas.

O modelo hidrostático de ARMANINI & SCOTTON (1992) fornece resultados extremamente inferiores aos dos outros modelos, tendo sido considerado não representativo e eliminado das análises.

O fator empírico de impacto dos modelos hidrostáticos adotado igual a 4,5, valor que equivale à média dos valores propostos na literatura, é considerado um valor aceitável. Porém, faz-se necessário revisar as velocidades do fluxo, posto que os modelos hidrostáticos somente são adequados e representativos para velocidades baixas.

A comparação entre modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos é mais recomendada para fluxos de detritos com velocidades muito baixas e alturas elevadas. Isto se deve ao princípio básico de cada tipo de modelo. Por exemplo, BUGNION et al. (2011) mostram que a pressão de impacto hidrostática pode ser até 50 vezes menor que a dinâmica.

Considerando os valores máximos do fator empírico de impacto, a comparação entre os modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos de pressão de impacto dos Grupos 1 e 2 fornece os seguintes resultados:

- i. Na zona de deposição do Córrego D'Antas, a pressão de impacto do Grupo 2 é geralmente inferior à do Grupo 1, uma vez que a velocidade do fluxo é diminuída. Todavia, em locais onde a velocidade do movimento é maior, observa-se valores de pressão de impacto do Grupo 2 até 20 vezes maior que os do Grupo 1;
- ii. Para o Rio Príncipe, existe semelhança com relação ao apresentado no item anterior. Todavia, em locais onde a velocidade do movimento é maior, observa-se valores de pressão de impacto do Grupo 2 até 10 vezes maior que os do Grupo 1;
- iii. Na zona de deposição do Toque-Toque Grande, a pressão de impacto do Grupo 2 é geralmente inferior à do Grupo 1, uma vez que a velocidade do fluxo diminui. Todavia, em locais onde a velocidade do movimento é maior, observa-se valores de pressão de impacto do Grupo 2 até 18 vezes maior que os do Grupo 1.

Em relação aos resultados de pressão de impacto calculada com os modelos hidrodinâmicos do Grupo 3 e os hidrostáticos do Grupo 1, pode-se concluir que o Grupo 3 fornece valores maiores em toda a extensão analisada nos 3 casos de fluxos de detritos.

6.2.2. Análises de Energia de Impacto de Fluxos de Detritos

No Capítulo 3 faz-se referência a duas abordagens da energia de impacto dos fluxos de detritos: tradicional baseada na energia cinética dos corpos e as modificadas que inserem conceitos de massa efetiva.

Em geral os valores de energia de impacto obtidos com abordagem tradicional são superiores aos calculados com as outras abordagens modificadas. Por exemplo, a modificada proposta por DE NATALE et al. (1996) considera que somente uma parte do fluxo atua dinamicamente contra a barreira e depende da máxima deflexão desta, logo a energia de impacto se torna menor.

A Tabela 27 apresenta os valores de massa do fluxo de detritos determinados a partir das energias de impacto calculadas com a abordagem modificada.

SEGALINI et al. (2016) concluem que a abordagem da energia cinética dos corpos fornece resultados de massa e energias de impacto muito maiores que os valores medidos em campo.

Tabela 27 – Massa de impacto dos fluxos de detritos obtidos com a abordagem modificada.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Massa de Impacto (kg)		
	Córrego D' Antas	Rio Príncipe	Toque-Toque Grande
100	32797	36088	29409
200	32797	36088	29409
300	38235	63819	40349
400	38235	63819	40349
500	38235	63819	40349
600	71973	72862	69285
700	71973	72862	69285

6.2.3.

Considerações Finais das Análises de Modelos da Literatura

As análises desenvolvidas anteriormente permitem algumas observações relevantes. Nos fluxos de detritos analisados existiram muitos blocos de grandes dimensões e os programas computacionais não conseguiram modelar corretamente a altura do fluxo, pois consideram o fluxo de detritos como um fluxo equivalente.

Os modelos hidráulicos dinâmicos, nomeados como Grupo 2, são considerados os mais adequados para determinar a força e pressão de impacto. Os modelos dos Grupos 1 e 3 exigem a determinação da altura do fluxo, de modo que seus resultados são muito influenciados pela qualidade e acurácia desta medida. Os modelos hidráulicos estáticos podem oferecer resultados consistentes quando se tem movimentos de massa com velocidades muito baixas e a altura do fluxo seja estimada corretamente.

O estabelecimento de uma relação entre a energia de impacto e a força de impacto não é recomendável, pois ela é influenciada por vários fatores que não podem ser calculados como a dissipação da energia ao longo do movimento.

6.3.

Resultados das Simulações Numéricas de Testes de Campo

No Capítulo 5 são mencionados dois testes de campo instrumentados para medir parâmetros como velocidade, altura do fluxo e esforços de impacto, a saber Ensaio de campo Pieve di Alpago e Veltheim.

SACOTO (2017) selecionou estes ensaios para o desenvolvimento de simulações numéricas com o programa DANW, cujos resultados são avaliados em relação às medições de campo. O conhecimento da capacidade deste programa em representar um evento real de fluxo de detritos é importante, tendo em vista que os parâmetros necessários para as análises numéricas são mais simples e em menor quantidade do que os exigidos pelo programa tridimensional DAN3D.

Além disto, vislumbrou-se a possibilidade de se obter diretamente parâmetros relacionados aos esforços de impacto em barreiras. Importante lembrar que os dois ensaios de campo foram instrumentados com células de carga, permitindo a determinação dos esforços de impacto dos fluxos de detritos nas barreiras.

SACOTO (2017) comparou os resultados entre as medições in situ com os resultados da simulação com o programa DANW, observando que a altura do fluxo no ponto de controle obtida numericamente é igual a altura média do fluxo de detritos registrada in situ. A velocidade no ponto de controle da simulação encontra-se dentro dos valores correspondentes às medições feitas pelas câmeras e instrumentação dos campos de teste italiano e suíço.

Conclui-se, portanto, que os resultados obtidos nas simulações com o programa DAN-W, realizadas por SACOTO (2017), conseguem representar satisfatoriamente, os fluxos de detritos dos ensaios de campo de Pieve di Alpago (Itália) e Veltheim (Suíça) e, desta forma, podem ser adotados para comparação de resultados obtidos na presente pesquisa.

6.4.

Simulação Numérica DAN3D Toque-Toque Grande e Resultados de Córrego D' Antas e Rio Príncipe

As análises numéricas com o programa DAN3D foram desenvolvidas com a finalidade de comparar os resultados em função de reologias distintas e permitir a obtenção da velocidade do fluxo a ser usada para estimativas de esforços de impacto nas barreiras.

Foi realizada a simulação do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande e aproveitadas as contribuições de VALVERDE (2016) e MORAES (2023), com relação ao Córrego D'Antas e Rio Príncipe, respectivamente. Adotou-se a indicação de KWAN (2012) que considera os materiais da zona de deposição com ângulo de atrito entre 20° e 25°.

6.4.1.

Dados de Entrada para a Simulação do Toque-Toque Grande

Para a análise do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande foram considerados três materiais diferentes, todos com a mesma reologia de atrito: um material para a zona de iniciação, um material para a zona de transporte e outro para a zona de deposição. A Tabela 28 apresenta os dados de entrada dos materiais usados na simulação.

O material da zona de iniciação é considerado como rocha sã. Para a zona de transporte foi considerado uma mistura entre fragmentos de rocha e solo com detritos, já na zona de deposição se tem um solo residual.

Tabela 28 – Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.

Dados de Entrada	Mat. Zona de Iniciação	Mat. Zona de Transporte	Mat. Zona de Deposição
Peso Específico (KN/m ³)	25	20	16
Ângulo de Atrito Basal (°)	35	26	23
Profundidade de Erosão (m)	0,1	0,5	0
Ângulo de Atrito Interno (°)	35	26	23

O volume inicial adotado para o fluxo de detritos do Toque-Toque Grande foi de aproximadamente 3.000m³ e a Figura 77 apresenta o perfil topográfico da geometria usada para a análise.

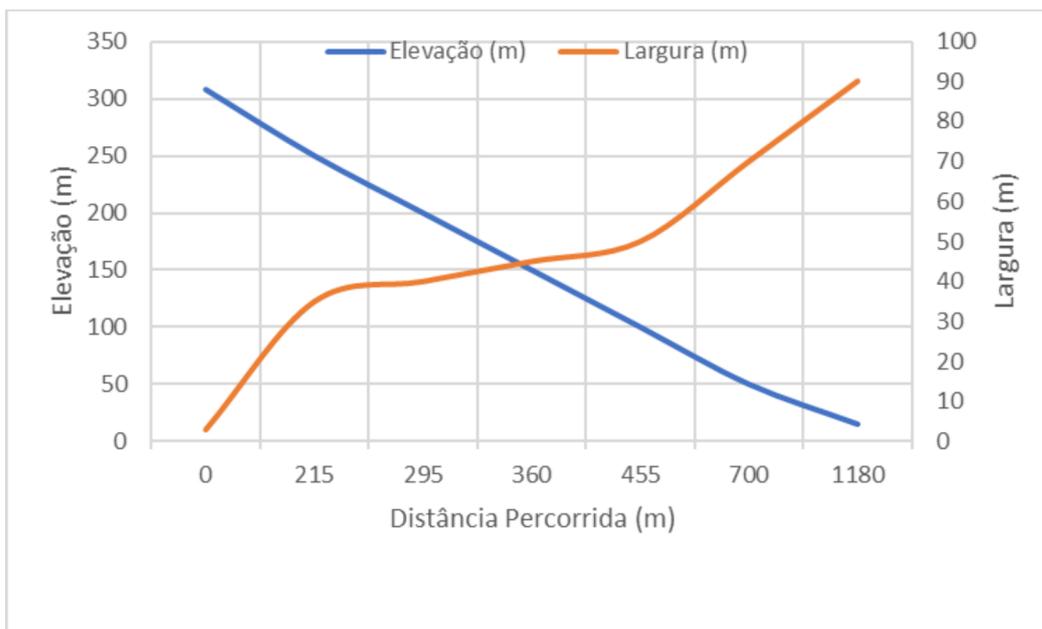


Figura 77 – Perfil topográfico do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.

6.4.2. Resultados da Simulações

Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ

A Tabela 29 mostra e compara os valores observados em campo e obtidos numericamente referentes à distância percorrida, volume final e a área de deposição do fluxo de detritos do Córrego D'Antas. As diferenças percentuais entre os parâmetros calculados e medidos varia entre 6% e 9%, indicando uma representação consistente do fluxo de detritos real pela modelagem com o DAN3D.

Já a Tabela 30 apresenta os valores obtidos numericamente de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. Estes valores não podem ser comparados ao do evento, visto que eles não foram registrados. Segundo SACOTO (2017), testemunhos dos poucos sobreviventes informam que o fluxo foi muito rápido e cobriu completamente muitas casas na área. Por conseguinte, a altura máxima do fluxo deve ter valores superiores aos indicados pela simulação numérica.

Tabela 29 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Córrego D'Antas.

Parâmetro	Valores	
	Observados	Calculados
Distância Percorrida (m)	770	720
Volume Final (m³)	7000	7568
Área de Deposição (m²)	15000	13579

Tabela 30 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Córrego D'Antas.

Córrego D' Antas		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	0,4	10,4
200	0,4	4,8
300	0,4	6,1
400	0,4	4,5
500	0,5	2,5
600	0,5	2,6
700	0,5	2,0

Rio Príncipe – Teresópolis/RJ

A Tabela 31 mostra e compara os valores observados em campo e obtidos numericamente referentes à distância percorrida, volume final e a área de deposição do fluxo de detritos do Rio Príncipe. As diferenças percentuais entre os parâmetros calculados e medidos varia entre 9% e 30%, indicando uma representação relativamente consistente do fluxo de detritos real pela modelagem com o DAN3D, sendo que a maior diferença é atribuída a prováveis erros de medição na área de deposição.

Já a Tabela 32 apresenta os valores obtidos numericamente de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. Estes valores não podem ser comparados ao do evento, visto que eles não foram registrados. Também, conforme LIMA (2017) e testemunhos dos poucos sobreviventes, o fluxo foi muito rápido e cobriu completamente muitas casas na

área. Por conseguinte, a altura máxima do fluxo deve ter valores superiores aos indicados pela simulação numérica.

Tabela 31 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Rio Príncipe.

Parâmetro	Valores	
	Observados	Calculados
Distância Percorrida (m)	4800	4600
Volume Final (m³)	-	800000
Área de Deposição (m²)	300000	200000

Tabela 32 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Rio Príncipe.

Rio Príncipe		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	1	12,7
200	1	11,1
300	1	14,9
400	1	19,0
500	1	13,3
600	1	8,8
700	1	3,2

Toque-Toque Grande – São Sebastião/SP

A Tabela 33 mostra e compara os valores observados em campo e obtidos numericamente referentes à distância percorrida, volume final e a área de deposição do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande. As diferenças percentuais entre os parâmetros calculados e medidos varia entre 6% e 11%, indicando uma representação consistente do fluxo de detritos real pela modelagem com o DAN3D.

Já a Tabela 34 apresenta os valores obtidos numericamente de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. A altura máxima de 0,67m ocorre no ponto de controle correspondente a 400m, na zona de transporte e velocidade máxima de 14,73m/s em 300m. Estes valores não podem ser comparados ao do evento, visto que eles não foram registrados. Restam os

testemunhos dos sobreviventes e vídeo do momento do movimento que indicam que o fluxo foi muito rápido, mas não informam sobre a altura atingida.

Tabela 33 – Comparação de valores DAN3D e observados - Fluxo de detritos Toque-Toque Grande.

Parâmetro	Valores	
	Observados	Calculados
Distância Percorrida (m)	1050	930
Volume Final (m³)	12000	13153
Área de Deposição (m²)	23000	21619

Tabela 34 – Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN3D - Fluxo de detritos Toque-Toque Grande.

Toque-Toque Grande		
Distância a Zona de Iniciação (m)	Altura do fluxo (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)
100	0,2	11,6
200	0,3	12,3
300	0,7	14,7
400	0,7	13,5
500	0,4	10,3
600	0,3	6,3
700	0,2	5,9

6.5.

Simulação Numérica ROCFALL do Toque-Toque Grande/Rio Príncipe e Resultados de Córrego D' Antas

A utilização de análises numéricas com o programa Rocfall para queda de blocos foram desenvolvidas para os fluxos de detritos, na busca de quantificar a energia envolvida neste movimento de massa, além de tentar comparar com os resultados das outras simulações. Importante ressaltar que consiste em diferença expressiva, o fato da simulação com o programa Rocfall considerar o fluxo de detritos como uma massa sem forma e sem volume, concentrada em um ponto (Método de massa concentrada).

Foram realizadas as simulações dos fluxos de detritos do Toque-Toque Grande e Rio Príncipe, além de considerada a contribuição de SACOTO (2017), com relação ao Córrego D' Antas.

6.5.1.

Dados de Entrada para a Simulação do Toque-Toque Grande e Rio Príncipe

Para as simulações no programa Rocfall, foram consideradas as mesmas condições topográficas do programa DAN3D, adotando-se uma análise estatística de 10.000 lançamentos de blocos. Os fluxos de detrito foram considerados como blocos de massa igual a 15.000kg, ou seja, equivalente a um bloco de 6m³, com um valor de massa específica de 2.600 kg/m³.

Tais características do bloco equivalente foram adotadas em função da presença, na massa do fluxo, de blocos de rocha com dimensões similares, verificadas em campo após o movimento em Toque-toque Grande, conforme Figura 78.

A Figura 79 mostra a encosta exposta após fluxo de detritos, em Teresópolis, RJ, aproximadamente cinco anos depois do desastre de 2011. Nesta figura é possível observar juntas de alívio no maciço rochoso, as quais podem se decompor em blocos de rocha de dimensões consideráveis no momento de um fluxo.



Figura 78 – Características dos blocos de rocha do fluxo de detritos do Toque-Toque Grande.



Figura 79 – Encosta com exposição do maciço rochoso 5 anos após fluxo de detritos de 2011, Rio Príncipe.

As Tabelas 35 e 36 apresentam as características dos materiais ao longo da superfície da encosta. Os coeficientes de restituição normal e tangencial dos materiais foram selecionados em função das suas propriedades. Os ângulos de atrito escolhidos foram similares aos da simulação do DAN3D. Os valores indicados na tabela apresentam os respectivos desvios *standard* considerados nas análises com o Rocfall. Para melhor identificação os materiais utilizados são: afloramentos rochosos (Zona de Iniciação), solo com vegetação (Zona de Transposição) e talus com vegetação (Zona de Deposição).

Tabela 35 – Características dos materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall - Toque-Toque Grande.

Dados de Entrada	Mat. Zona Iniciação	Mat. Zona Transposição	Mat. Zona Deposição
Rn / Des. Stand.	0,35 / 0	0,30 / 0	0,32 / 0,04
Rt / Des. Stand.	0,85 / 0	0,70 / 0	0,80 / 0,04
Âng. Atrito / Des. Stand.	35 / 0	27 / 0	21 / 2

Tabela 36 – Características dos materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall - Rio Príncipe.

Dados de Entrada	Mat. Zona Iniciação	Mat. Zona Transposição	Mat. Zona Deposição
Rn / Des. Stand.	0,35 / 0	0,30 / 0	0,32 / 0,04
Rt / Des. Stand.	0,85 / 0	0,70 / 0	0,80 / 0,04
Âng. Atrito / Des. Stand.	35 / 0	27 / 0	21 / 2

6.5.2. Resultados das Simulações

Os resultados mais relevantes simulados pelo programa Rocfall são a velocidade e a energia cinética. Nota-se que o referido *software* não representa adequadamente a distância percorrida, principalmente no Rio Príncipe, uma vez que, por simples observação do fenômeno em campo observa-se distâncias percorridas muito superiores as obtidas nas simulações.

Tal conclusão explica-se, pois, as simulações do Rocfall levam em consideração somente os deslocamentos sujeitos ao atrito entre superfícies blocos/encostas, desprezando a componente comum aos fluxos de detritos, água/ar. Observação já esperada, uma vez que o Rocfall foi criado para quedas de blocos.

A Figura 80 traz a variação da velocidade em função da trajetória para os 3 fluxos de detritos. Percebe-se picos nos gráficos para os 3 fluxos de detritos, devido a elevada sensibilidade do programa em relação à variação da topografia do canal. Isto é, pequenas mudanças na inclinação da trajetória geram picos de valores, tanto na velocidade como na energia.

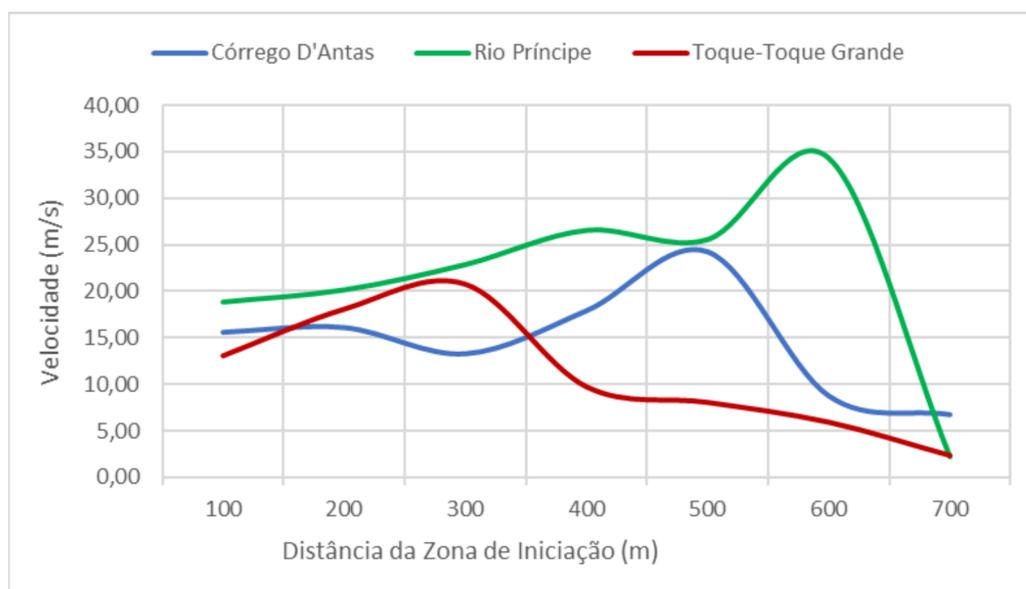


Figura 80 – Variação da velocidade simulada no Rocfall em função da distância percorrida para os fluxos de detritos estudados.

A Tabela 37 apresenta os valores de velocidade instantânea e energia cinética, obtidos por meio de simulações com o Rocfall, os quais são considerados consistentes com os valores esperados para os casos dos fluxos de detritos do estudados nesta pesquisa. Observa-se queda brusca da energia cinética para os movimentos de Córrego D'Antas e Toque-Toque Grande, atingindo valores inferiores a 1.000kJ na Zona de Deposição, 600m da Zona de Iniciação, indicando ponto favorável ao posicionamento de estruturas de proteção que podem resistir ao impacto dos fluxos de detritos.

Já para o fluxo do Rio Príncipe verifica-se diminuição abrupta da energia cinética na Zona de Transporte, 700m da Zona de Iniciação. Ressalte-se que este movimento atingiu elevadas distâncias, sendo identificados blocos rochosos de grandes dimensões a mais de 3.000 metros da Zona de Iniciação.

Tabela 37 – Valores de velocidade instantânea e energia cinética obtidas com Rocfall para os fluxos de detritos estudados.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Velocidade Instantânea (m/s)			Energia Cinética (kJ)		
	Córrego D'Antas	Rio Príncipe	Toque-Toque Grande	Córrego D'Antas	Rio Príncipe	Toque-Toque Grande
100	15,6	18,9	13,1	2066	2709	1742
200	16,1	20,2	18,1	2279	3696	2919
300	13,3	22,9	20,8	1448	4577	3704
400	17,9	26,6	9,8	2647	6919	1119
500	24,2	25,6	8,1	4875	5546	893
600	8,8	34,3	6,0	940	9476	668
700	6,8	2,3	2,4	563	149	442

6.6. Comparação e Análise dos Resultados

Importante frisar a existência de mais de dez pesquisas realizadas pelo Grupo *Debris Flow* da PUC-Rio e COPPE/UFRJ, desde 2008, as quais contribuem com as análises da presente pesquisa.

Desta forma, a partir dos resultados de VALVERDE (2016), SACOTO (2017) e MORAES (2023), associados aos resultados das novas simulações numéricas desta pesquisa, obtém-se análises e um banco de dados contendo diferentes modelos reológicos e *softwares*, os quais são avaliados em função da velocidade, energia e forças de impacto dos fluxos de detritos do Córrego D' Antas em Nova Friburgo, RJ, Rio Príncipe em Teresópolis, RJ e Toque-Toque Grande em São Sebastião, SP.

Destaca-se que os movimentos do Córrego D' Antas e de Toque-Toque Grande tem distâncias percorridas muito semelhantes, ambas próximas a mil metros. Diferente do Rio Príncipe que percorreu distância cerca de cinco vezes maior. Neste sentido, para efeito comparativo de escala, utilizou-se para as análises dos 3 movimentos, os trechos compreendidos até 700 metros da Zona de Iniciação.

Nesta pesquisa foram realizadas simulações com os programas DAN3D com reologia de Voellmy e Rocfall utilizando reologia de Atrito.

VALVERDE (2016) realizou simulações com os programas DAN-W e DAN3D com a reologia de Voellmy.

SACOTO (2017) simulou com o DAN-W e Rocfall ambos com reologia de Atrito e MORAES et al. (2023) utilizou o DAN3D com a reologia de Voellmy e Newtoniana.

Velocidade do Fluxo

As Tabelas 38, 39 e 40 e as Figuras 81, 82 e 83 mostram os resultados obtidos para as velocidades dos 3 fluxos de detritos estudados tanto com o DAN3D com reologia de Voellmy ou reologia Newtoniana (somente para o Rio Príncipe), quanto com o Rocfall com reologia de Atrito.

Tabela 38 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Velocidade (m/s)	
	DAN3D	ROCFALL
100	11,6	13,1
200	12,3	18,1
300	14,7	20,8
400	13,5	9,8
500	10,3	8,1
600	6,3	6,0
700	5,9	2,4

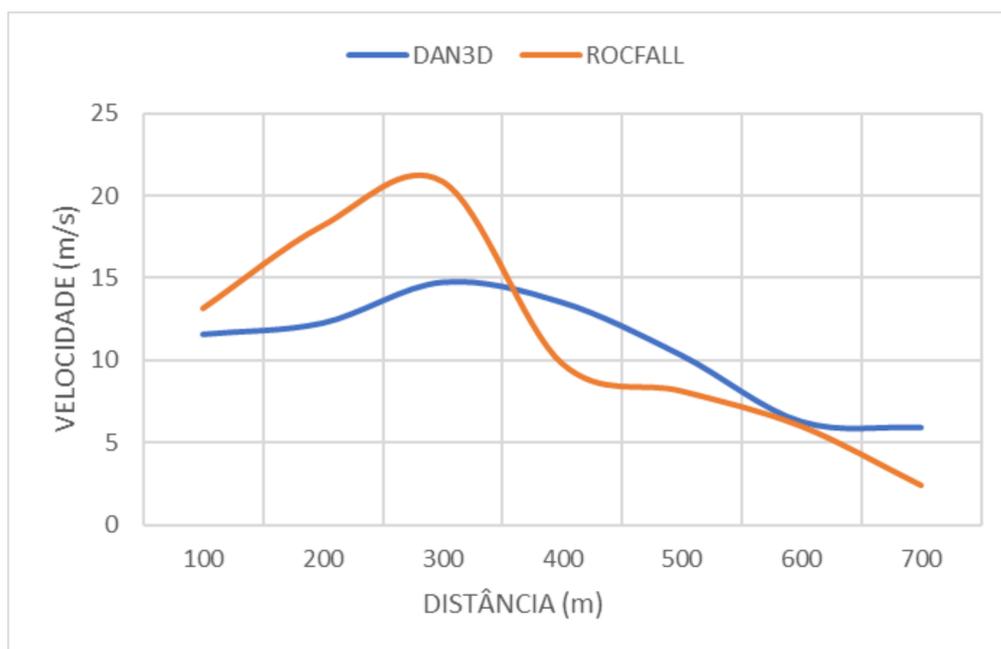


Figura 81 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.

Tabela 39 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Velocidade (m/s)	
	DAN3D	ROCFALL
100	10,4	15,6
200	4,8	16,1
300	6,1	13,3
400	4,5	17,9
500	2,5	24,2
600	2,6	8,8
700	2,0	6,8

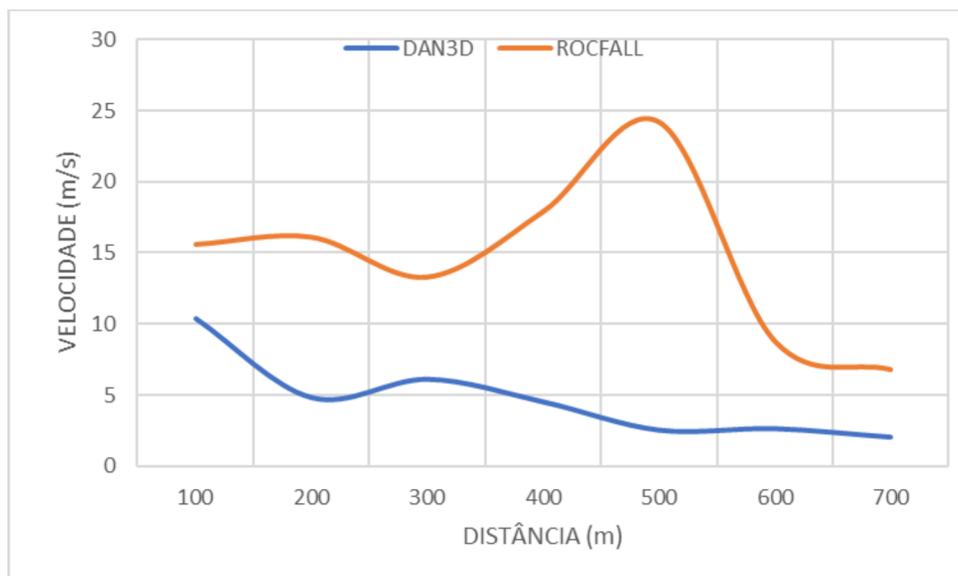


Figura 82 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Córrego D' Antas.

Tabela 40 – Velocidades instantâneas obtidas com DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Velocidade Instantânea (m/s)	
	DAN3D	ROCFALL
100	12,7	18,9
200	11,1	20,2
300	14,9	22,9
400	19,0	26,6
500	13,3	25,6
600	8,8	34,3
700	3,2	2,3

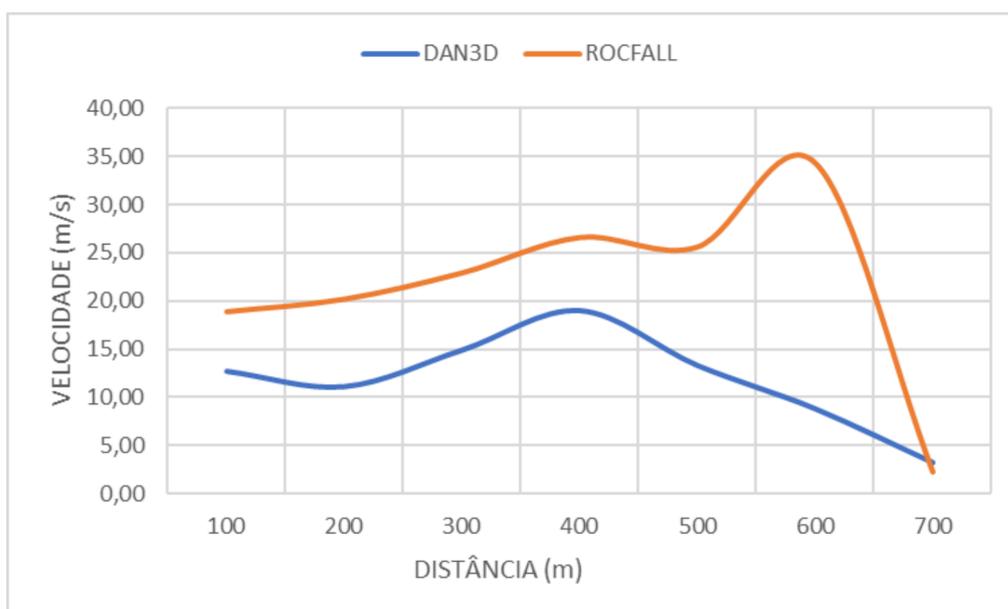


Figura 83 – Variação da velocidade em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.

Energia

As Tabelas 41, 42 e 43 e as Figuras 84, 85 e 86 mostram os resultados obtidos para as energias dos 3 fluxos de detritos estudados tanto com o DAN3D com reologia de Voellmy ou reologia Newtoniana (somente para o Rio Príncipe), quanto com o Rocfall com reologia de Atrito.

Tabela 41 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Energia (kJ)	
	DAN3D	ROCFALL
100	1968	1742
200	2207	2919
300	4377	3704
400	3682	1119
500	2132	893
600	1353	668
700	1202	442

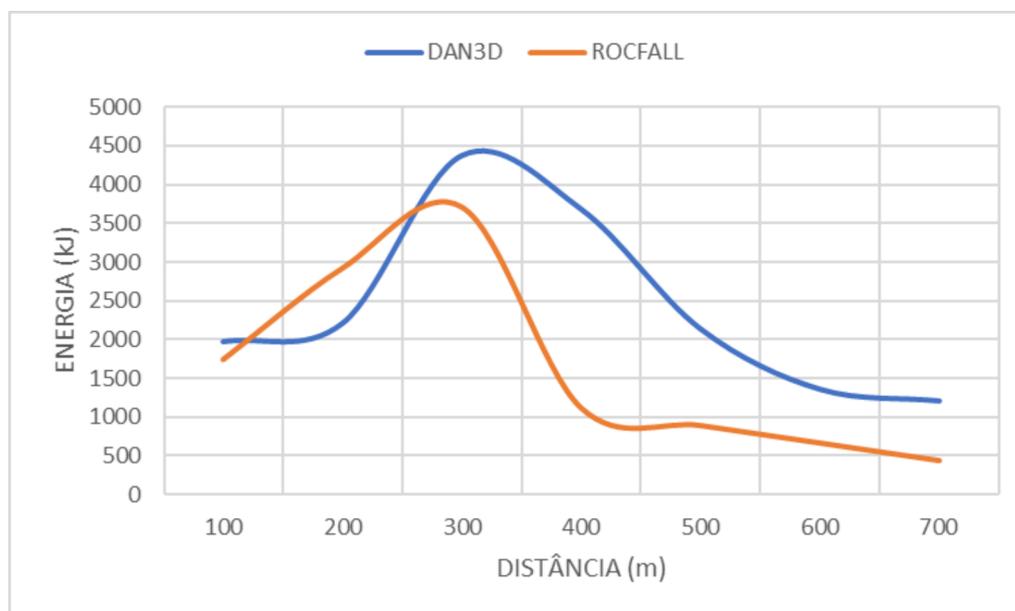


Figura 84 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Toque-Toque Grande.

Tabela 42 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Energia (kJ)	
	DAN3D	ROCFALL
100	1774	2066
200	378	2279
300	711	1448
400	387	2647
500	119	4875
600	243	940
700	144	563

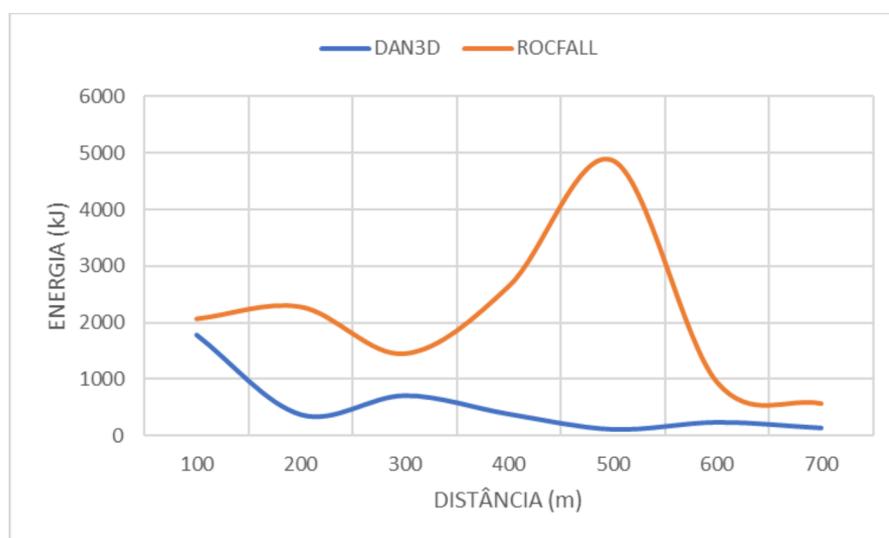


Figura 85 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas.

Tabela 43 – Energias obtidas com DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Energia (kJ)	
	DAN3D	ROCFALL
100	2910	2709
200	2223	3696
300	7084	4577
400	11519	6919
500	5644	5546
600	2821	9476
700	373	149

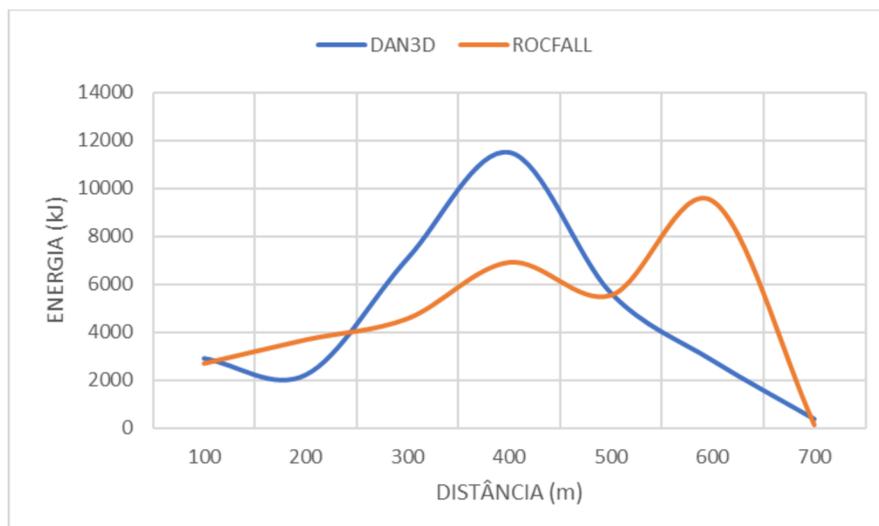


Figura 86 – Variação da energia cinética em função da distância percorrida até 700m simulada no DAN3D e Rocfall - Rio Príncipe.

Forças de Impacto

As forças de impacto foram analisadas em função da disposição de barreiras flexíveis e rígidas a cada 100m de distância da zona de iniciação dos fluxos de detritos. As Tabelas 44, 45 e 46 (Barreiras Flexíveis) e 47, 48 e 49 (Barragens Rígidas), além das Figuras 87, 88 e 89 (Barreiras Flexíveis) e 90, 91 e 92 (Barreiras Rígidas) mostram os resultados obtidos para as Forças de Impactos dos 3 fluxos de detritos estudados tanto com o DAN3D com reologia de Voellmy ou reologia Newtoniana (somente para o Rio Príncipe), quanto com o Rocfall com reologia de Atrito.

Tabela 44 – Forças de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Toque-Toque Grande.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	1312	1161	5411
200	1471	1946	7978
300	2918	2469	9414
400	2455	746	3808
500	1421	595	3040
600	902	445	2110
700	801	295	708

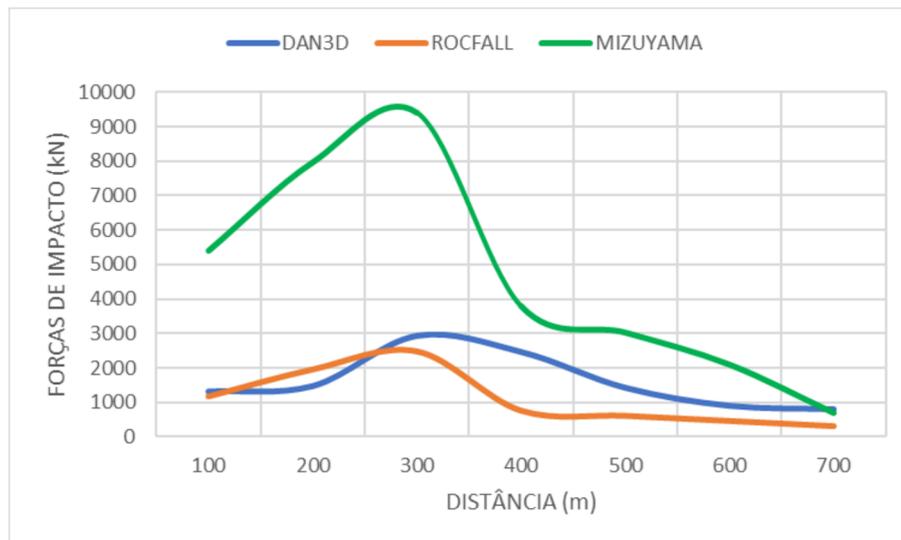


Figura 87 – Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Toque-Toque Grande.

Tabela 45 – Forças de Impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Córrego D'Antas.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	1182	1377	6653
200	252	1519	6910
300	474	965	5494
400	258	1765	7847
500	80	3250	11268
600	162	627	3347
700	96	375	2456

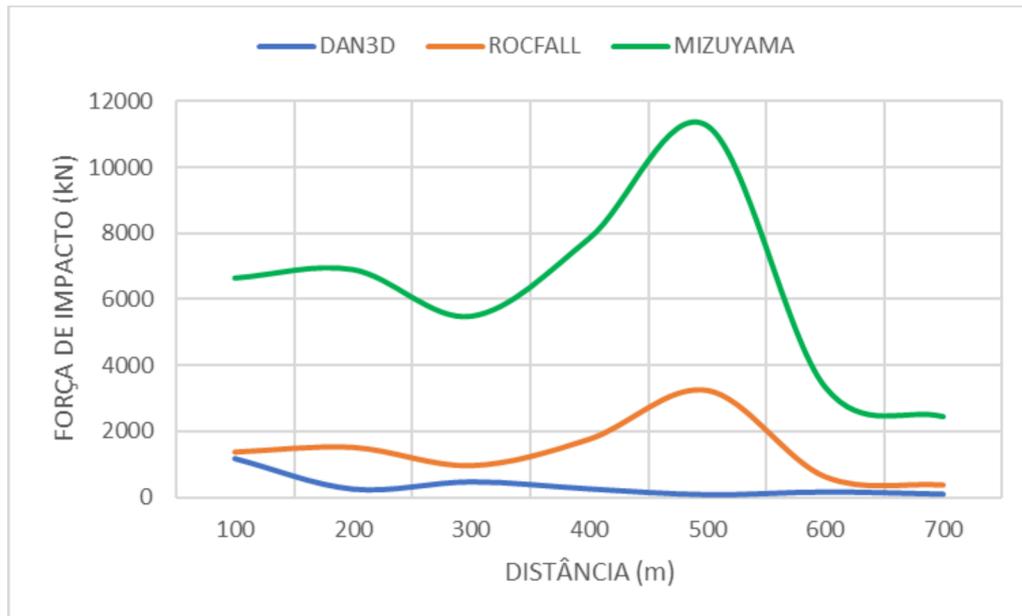


Figura 88 –Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Córrego D’Antas.

Tabela 46 – Forças de Impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Rio Príncipe.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	1940	1806	8370
200	1482	2464	9068
300	4723	3051	10557
400	7680	4613	12619
500	3763	3697	12059
600	1881	6317	17152
700	249	99	652

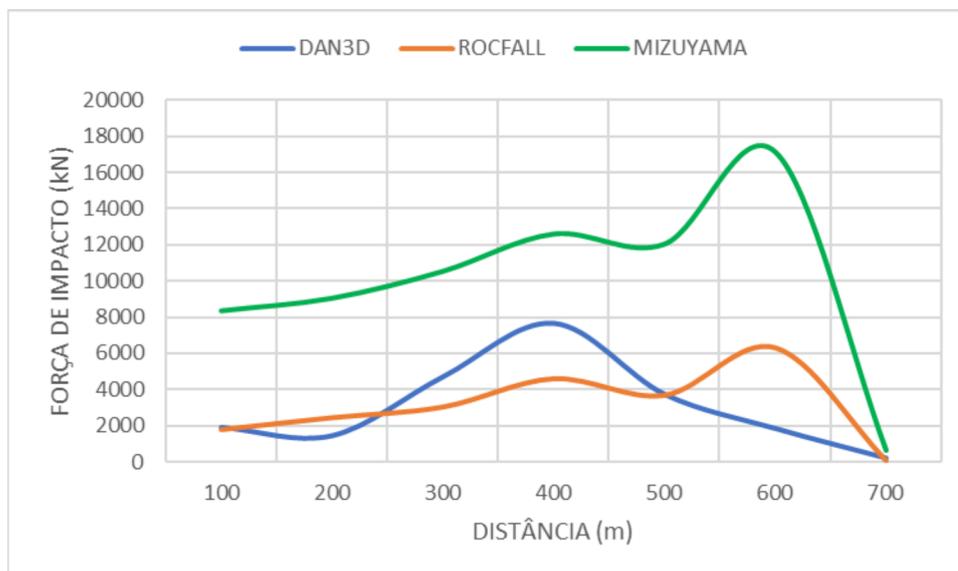


Figura 89 – Variação da força de impacto em barreiras flexíveis obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Rio Príncipe.

Tabela 47 – Forças de Impacto em barreiras rígidas obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Toque-Toque Grande.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	39369	34840	5411
200	44132	58380	7978
300	87547	74080	9414
400	73646	22380	3808
500	42641	17860	3040
600	27064	13360	2110
700	24036	8840	708

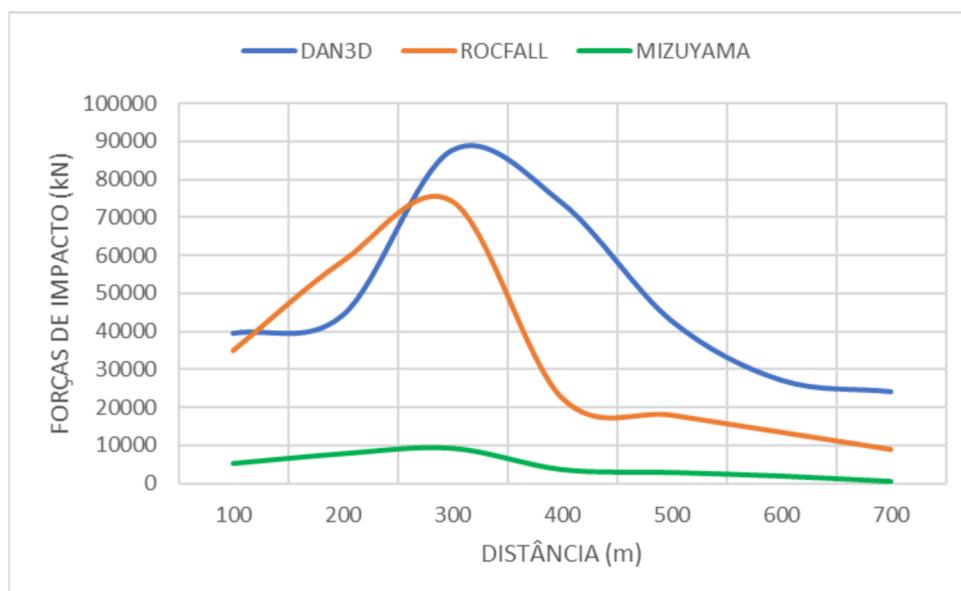


Figura 90 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Toque-Toque Grande.

Tabela 48 – Forças de Impacto em barreiras rígidas obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Córrego D' Antas.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	35473	41320	6653
200	7556	45580	6910
300	14227	28960	5494
400	7743	52940	7847
500	2390	97500	11268
600	4865	18800	3347
700	2879	11260	2456

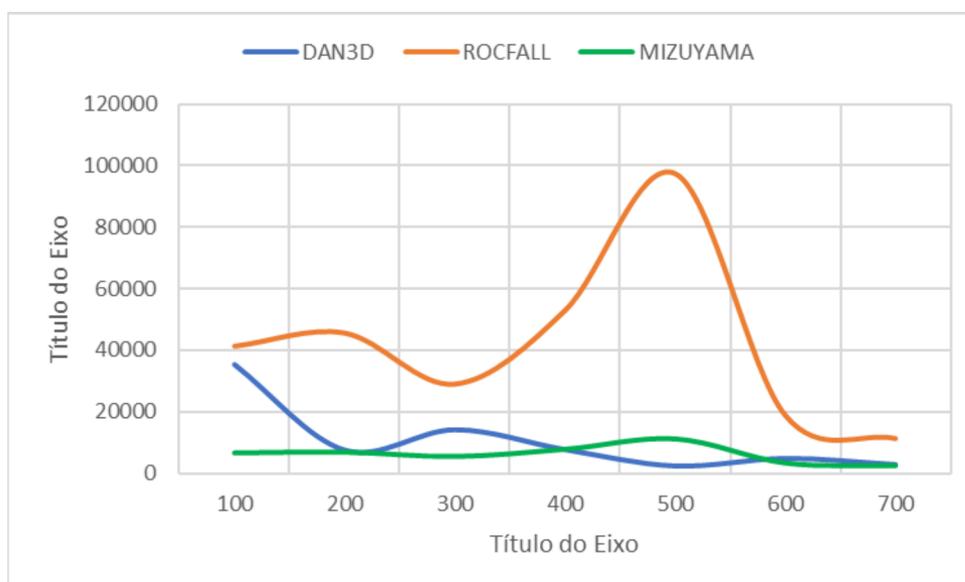


Figura 91 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Córrego D' Antas.

Tabela 49 – Forças de Impacto obtidas com DAN3D, Rocfall e Mizuyama - Rio Príncipe.

Distância da Zona de Iniciação (m)	Forças de Impacto (kN)		
	DAN3D	ROCFALL	MIZUYAMA
100	58206	54180	6653
200	44464	73920	6910
300	141684	91540	5494
400	230386	138380	7847
500	112889	110920	11268
600	56424	189520	3347
700	7461	2980	2456

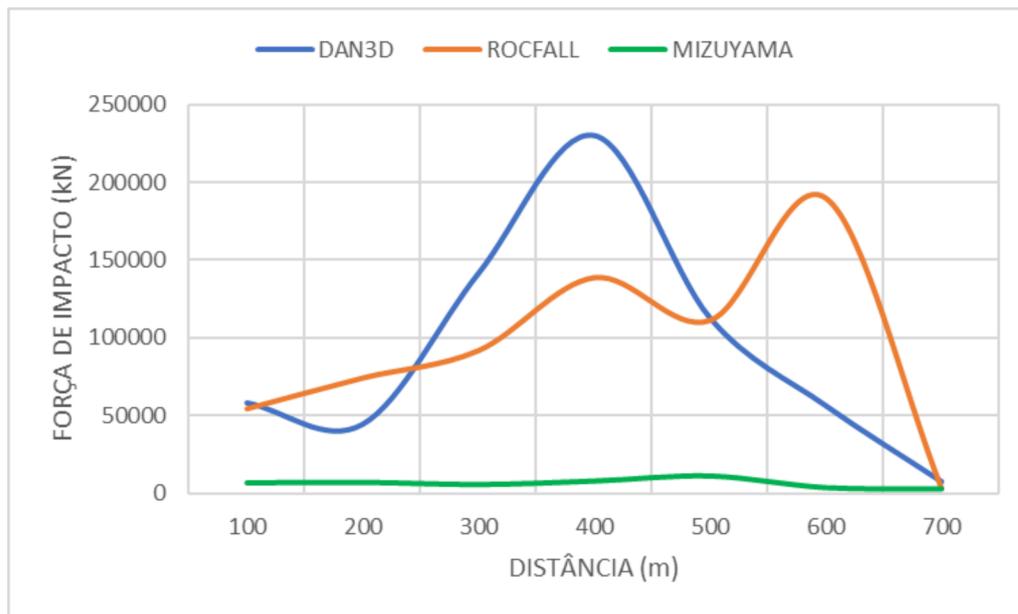


Figura 92 – Variação da força de impacto em barreiras rígidas obtida com DAN3D, Rocfall e Mizuyama em função da distância percorrida até 700m - Rio Príncipe.

Em relação à velocidade instantânea dos fluxos de detritos pesquisados, verificou-se certa convergência do parâmetro com a utilização dos *softwares* DAN3D e Rocfall e as reologias de Voellmy, Atrito e Newtoniana.

Contudo, observa-se alguns picos de velocidade nas simulações do Rocfall com reologia de Atrito, provocados, principalmente, por leves mudanças topográficas de declividade ao longo do canal de fluxo, as quais, devido à sensibilidade do programa podem explicar estes picos nos valores do parâmetro e nos gráficos.

Registra-se que os maiores valores de velocidade se encontram nas Zonas de Iniciação e Transporte das corridas, com valores máximos compreendidos entre 15 e 20m/s, muito coerente com os observados em campo na Região da Serra do Mar.

Vale destacar que a velocidade do fluxo, vinculada à distância de ocorrência, é parâmetro dos mais importantes para se dimensionar estruturas de contenção, amortecimento e/ou desvio do movimento.

Uma vez verificado que em determinado ponto do canal de fluxo a velocidade é elevada, este não é um local adequado para a instalação de obras, sob a pena de serem destruídas e tornarem-se em mais detritos incorporados ao movimento.

A energia é outro parâmetro fundamental para dimensionamento de estruturas de contenção, tanto flexíveis, quanto rígidas. As barreiras dinâmicas (estruturas

flexíveis) são especificadas pelos seus fabricantes pela energia que são capazes de absorver ao capturar um fluxo e deformar-se.

Nota-se que as energias calculadas com os programas DAN3D e Rocfall com as reologias de Voellmy, Atrito e Newtoniana e auxílios do Método da Energia com as contribuições de MIZUYAMA et al (1979), foram relativamente convergentes para os fluxos do Toque-Toque Grande e do Rio Príncipe. O mesmo não se verifica para o movimento do Córrego D'Antas, cujos resultados foram mais divergentes entre o DAN3D e o Rocfall.

Os valores máximos de energia obtidos nas distâncias analisadas variam aproximadamente entre 4.500 e 11.000kJ entre as Zonas de Iniciação e Transporte, mais uma vez ratificando que para os movimentos estudados, tais áreas não são adequadas para instalação de estruturas.

Destaca-se que a partir de 700m do início do movimento, próximo à Zona de Deposição de dois dos fluxos de detritos as energias estão próximas de 1.000kJ. No movimento do Rio Príncipe, com aproximadamente 5.000m de trajetória, energias de cerca de 1.000kJ foram identificadas ainda na Zona de Transporte.

Importante frisar que a energia está intimamente ligada ao parâmetro de velocidade do fluxo, isto é, grandes velocidades irão impor grandes energias aos obstáculos interpostos ao canal onde se desenvolve a corrida. Porém, a energia também é dependente do volume, massa, vazão e tempo de impacto do movimento.

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

Estruturas flexíveis, tais como as barreiras dinâmicas, usualmente deformam-se entre 2 a 7m ao interceptarem o movimento de massa, dissipando parte da energia com a deformação de seus diversos elementos, como amortecedores e painéis de anéis.

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

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

Foram comparados os valores das forças de impacto com as energias encontradas com base nos *softwares* DAN3D e Rocfall, além do modelo proposto por MIZUYAMA (1979).

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

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

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

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

7 Conclusões e Sugestões

Neste capítulo apresenta-se as conclusões da pesquisa e algumas recomendações para futuros estudos relacionados com fluxos de detritos e forças de impacto.

Destaca-se a importância do grupo de pesquisa *Debris Flow* PUC-Rio e COPPE/UFRJ, o qual vem pavimentando um caminho bastante contributivo graças a formação de confiável banco de dados de pesquisas a respeito desta temática no Brasil e Américas do Sul e Central.

Estima-se que o grupo reuniu um banco de dados com informações de fluxos de detritos nacionais e internacionais, com mais de 250 eventos. Além da maior compreensão dos mecanismos dos eventos de fluxos brasileiros, o grupo também apresenta relações empíricas para determinação de parâmetros e diretrizes para a realização de simulações numéricas bi e tridimensionais para a modelagem de corridas de massa.

Esta pesquisa foi elaborada em consonância com as diretrizes do grupo *Debris Flow* na busca de aumentar o conhecimento sobre o movimento e as técnicas de caracterização e determinação de importantes parâmetros.

Especificamente, este trabalho procurou avaliar métodos e modelos capazes de fornecerem forças de impacto de fluxo de detritos. A determinação de forças e energias de impacto é essencial para o adequado dimensionamento de estruturas de proteção ou de convivência com *debris flows*. Buscou-se cumprir a investigação da literatura técnica nacional e internacional para a seleção de métodos e modelos de esforços de impacto, os quais foram analisados e comparados.

Os eventos de fluxos de detritos do Córrego D' Antas, Nova Friburgo, RJ (2011), Rio Príncipe, Teresópolis, RJ (2011) e Toque-Toque Grande, São Sebastião, SP (2023) foram eleitos como casos de referência para este estudo. Também se registra nesta pesquisa a apresentação, pertinente com o tema, das informações sobre os fluxos de detritos induzidos e instrumentados em campos experimentais na Itália e Suíça.

Por meio do desenvolvimento desta pesquisa foi possível ampliar a compreensão e evidenciar conclusões relevantes sobre os fluxos de detritos brasileiros que acontecem na Região da Serra do Mar, as quais são resumidas a seguir:

1. A literatura indica várias propostas para a determinação da pressão de impacto de fluxos de detritos, dentre as quais os modelos hidráulicos são os usados para dimensionamento de estruturas de proteção;
2. Dentre os modelos hidráulicos, os mais consistentes são os hidrodinâmicos, em comparação com os hidrostáticos, os quais revelam-se mais adequados para fluxos de detritos com velocidades baixas em relação aos estudados;
3. O software DAN3D revelou-se consistente ferramenta para obtenção de parâmetros dos fluxos de detritos estudados, principalmente com as reologias de Voellmy e Newtoniana;
4. Os parâmetros mais consistentes do *software* DAN3D foram velocidade, volume, distância percorrida e área de deposição;
5. A altura do fluxo não foi um parâmetro confiável obtido pelas simulações com o DAN3D, provavelmente pela impossibilidade de se adicionar grandes blocos para modelagem do fluxo equivalente;
6. A utilização do *software* RocFall, desenvolvido para quedas de blocos, forneceu valores consistentes de energia para os fluxos de detritos da pesquisa;
7. O RocFall revelou-se importante aliado para a obtenção das energias de impacto dos fluxos de detritos com blocos de rochas de grandes dimensões;
8. Os esforços de impacto de fluxos de detritos podem ser obtidos com auxílio de parâmetros obtidos por simulações numéricas dos *softwares* DAN3D e Rocfall, de maneira confiável e relativamente simples, desde que o pesquisador tenha amplo conhecimento das condições de contorno envolvidas na modelagem, tais como geomorfologia, geologia, movimentos

- pretéritos semelhantes, topografia do canal de fluxo e possíveis pontos de iniciação dos movimentos;
9. As análises de fluxos de detritos por meio de ferramentas numéricas exigem o conhecimento da dinâmica de movimentos semelhantes em casos pretéritos para que a modelagem reproduza de forma mais fiel possível as condições de campo, aumentando a confiabilidade dos resultados;
 10. A formação de banco de dados de fluxos de detritos com o maior número de dados topográficos, geológico-geotécnicos, pluviométricos, distância percorrida, volume de detritos, profundidade do canal de fluxo e área de deposição, consiste em poderosa ferramenta para trabalhos científicos e práticos de mitigação de danos.

Enorme é o desafio da previsibilidade de ocorrência de corridas de massa com a precisão requerida para adotar as medidas de evacuação de populações por meio da emissão de alertas (medidas não estruturais).

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

Um exemplo de movimento de massa de difícil previsão de iniciação (em alusão ao fluxo de detritos) ocorre na Noruega, país com cerca de 11% de seu território em solo metaestável *quick clay*, como descreve BJERRUM et al. (1969).

As autoridades governamentais norueguesas exigem, para novos empreendimentos, que sejam apresentados mapas de suscetibilidade de ocorrência de *flow slide* na área de construção, impedindo a ocupação e/ou exigindo obras de proteção da infraestrutura e edificações.

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

que permitem às pessoas ocuparem áreas inadequadas para moradia, expondo populações de maneira dolosa aos riscos geológicos-geotécnicos dos movimentos de massas.

Outra questão sensível na gestão sócio-territorial brasileira consiste no imenso passivo de ocupações em áreas inadequadas, com elevada suscetibilidade de desastres com movimentos de massa.

Por fim, pode-se afirmar que a obtenção de parâmetros de fluxos de detritos traz um grande desafio para dimensionamento de estruturas para mitigação e convivência com os potenciais danos do movimento, em especial a obtenção dos esforços de impacto.

Destarte, a elaboração desta pesquisa ampliou os horizontes da utilização de ferramentas numéricas como auxiliares na obtenção de energias e forças de impacto de fluxos de detritos, permitindo a elaboração de diretrizes e sugestões práticas para a modelagem dos movimentos, com a intenção de auxiliar o dimensionamento de estruturas de proteção flexíveis ou rígidas, sendo:

1. Conhecimento da topografia do canal de fluxo, potenciais pontos de iniciação do movimento, profundidade e tipo do material a ser exumado do leito do canal, densidade e tipo de troncos que podem se tornar detritos, existência de juntas de alívio e fraturas nas rochas das adjacências possibilitando a formação de blocos rochosos que se incorporarão ao fluxo, dimensão aproximada dos blocos de rocha incorporados ao fluxo, largura do canal de fluxo, declividade ao longo do comprimento do canal;
2. Lançamento das características do movimento no *software* DAN3D privilegiando a reologia de Voellmy para comprimentos de canais de fluxo até 1.500m, uma vez que esta reologia se mostrou consistente para os fluxos de detritos do Córrego D'Antas e de Toque-Toque Grande. Para fluxos mais extensos, como o do Rio Príncipe (aproximadamente 5.000m), verificar a simulação com a reologia Newtoniana, pois revelou-se mais aderente à realidade deste último;
3. Para a aquisição de energias de impacto, lançar mão do *software* Rocfall que simula a energia cinética em função da

- distância do fluxo ao ponto de iniciação e comparar com as energias calculadas com as velocidades obtidas com o DAN3D e com a abordagem tradicional da energia cinética;
4. Para a obtenção das forças de impacto deve-se utilizar as energias obtidas conforme exposto no item anterior e analisar a mais consistente para o dimensionamento, distinguindo se a estrutura a ser dimensionada é do tipo flexível ou rígida.

O desenvolvimento desta pesquisa demonstrou que a obtenção de parâmetros de fluxos de detritos é uma questão desafiadora e um grande caminho a ser trilhado, principalmente no que diz respeito as energias e forças de impacto, importantes para o dimensionamento de estruturas de proteção flexíveis ou rígidas.

A confirmação de parâmetros medidos *in loco*, em eventos reais, ainda não é realidade, pois as campanhas de instrumentação têm elevado custo e o local escolhido para campo de ensaios/instrumentação pode não ter o fluxo de detritos deflagrado naturalmente.

Contudo, existem campos de teste com movimentos induzidos fornecendo bons resultados, a exemplo da Itália e Suíça, mas com escala diferente da real.

Assim, destacam-se as ferramentas numéricas na obtenção dos esforços de impacto de fluxos de detritos de forma mais efetiva, rápida e com menores custos.

Como sugestão para continuidade e enriquecimento desta pesquisa propõe-se:

1. Formação sistemática de banco de dados unificado a nível de país contendo dados dos fluxos de detritos ocorridos, como: declividade do canal, distância percorrida, volume de detritos, dimensão dos blocos, precipitação pluviométrica, entre outros;
2. Aplicação dos *softwares* DAN3D e Rocfall com diversas reologias para obtenção de parâmetros no maior número de fluxos de detritos possível, comparando os resultados obtidos com os observados em um evento real;
3. Análise de sensibilidade de resultados obtidos com simulações do DAN3D, Rocfall e outros *softwares* com dados observados no maior número possível de eventos reais;

4. Aplicação da abordagem de estimativa de energia de impacto por meio do programa Rocfall a novos casos de fluxos de detritos para avaliação da sua representatividade de eventos reais;
5. Verificar a influência do nível do lençol freático na taxa de arrasamento de material tanto na zona de iniciação quanto no canal de fluxo, como sugerido por CASCINI et al. (2012).

Com o intuito de se qualificar a formação de um banco de dados consistente, fundamental para se registrar e entender os fluxos de detritos brasileiros, sugere-se ainda, ações de capacitação da comunidade técnica municipal, estadual e federal, envolvidas nas ações de prevenção, recuperação e reconstrução, para melhor entendimento e percepção dos mecanismos deflagradores, bem como as áreas mais suscetíveis a este tipo de movimento de massa.

8 Referências Bibliográficas

Acervo técnico gentilmente cedido por ALLS NUNES.

Acervo técnico gentilmente cedido por MACCAFERRI, Brasil.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. In: 8º Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, pp.12-13.

ARATTANO, M.; FRANZI, L. (2003). On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3: pp.539-544.

ARMANINI, A. (1997). On the dynamic impact of debris flows. In: Armanini A., Masanori M., Recent developments on debris flows, lecture notes in earth sciences, Springer, Berlin, pp. 208–226.

ARMANINI, A.; LARCHER, M.; ODORIZZI, M. (2011). Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall, *Ital. J. of Eng. Geol. and Env.*, pp.1041-1049.

ARMANINI, A.; SCOTTON, P. (1992). Experimental analysis on the dynamic impact of a debris flow on structures. In: International symposium interpraevent 1992, vol 6, Bern, pp.107–116.

AULITZKY, H. (1972). Gefahrenzonenplaene im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung. Bundesministerium fuer Land- und For-stwirtschaft. Vienna, pp. 95-113.

AULITZKY, H. (1989). The debris flow of Austria, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 40, Issue 1, pp.5-13.

BADGER, T. C.; LOWELL, S. M. (1992). Rockfall Control in Washington State, *Transportation Research Record* n° 1343 – Rockfall Prediction and Control and Landslides Case Histories, Transportation Research Board, Washington, p. 14-19.

BAGGIO, H.; HORN, A. H. (2011). Avaliação geoquímica ambiental da água superficial do Rio do Formoso, Buritizeiro - MG. *Revista Geografias*, pp.56–67.

BATHURST, J. C.; BURTON, A.; WARD, T. J. (1997). Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 5, n. 123, pp. 410-419.

- BENDA, L.E.; CUNDY, T.W. (1990). Predicting deposition of debris flows in mountain channels, *Can. Geotech*, V.27, N.4, pp.409-417.
- BHUWANI, P. P. (2004). *Landslide Gravitative Debris Flow in Natural terrain*, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, 188p.
- BJERRUM, L.; LOKEN, T.; HEIBERG, S.; FOSTER, R. (1969). A field study of factors responsible for quick clay slides, *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11p.
- BLACKWELDER, E. (1928). Mudflow as a geological agent in semi-arid mountains, *Geological Society of America, Bulletin*, 39, pp. 465-484.
- BUGNION, L; MCADELL, B; BARTELT, P; WENDELER, C. (2011). Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, pp.1-9.
- CALLIGARIS, C.; ZINI, L. (2012). Debris flow phenomena: a short overview?, *Earth Sciences, Capítulo 4*, p. 71-90.
- CANELLI, L.; FERRERO, A.M.; MIGLIAZZA, M.; SEGALIN, A. (2012). Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers experimental tests and impact analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:pp.1693-1699.
- CASCINI, L.; CUOMO, S.; PASTOR, M.; SORBINO, G.; PICIULLO, L. (2012). Modeling of propagation and entrainment phenomena for landslides of the flow type: the May 1998 case study, 11th International Symposium on Landslides (ISL) and 2nd North American Symposium on Landslides - Banff, Canada, 7p.
- 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, 11p.
- COSTA, J. E. (1984). Physical geomorphology of debris flows. In: COSTA, J. E.; FLEISHER, P. J. *Developments and Applications in Geomorphology*. New York: Springer Verlag, pp. 268-317.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996). Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. *Landslides investigation and mitigation*. Washington, DC: Transportation research board, 1996. Cap. 3, pp. 36-75.
- CUI, P.; ZENG, C.; LEI, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, pp.1644-1655.
- CUNDALL, P.; STRACK O. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29, pp.47-65.

DAIDO, A. (1993). Impact Force of Mud Debris Flows on Structures, Proceedings of XXV IAHR Congress, Tokyo (Tech. Sess. B, III), pp.211–218.

DE NATALE, J. S. et al. (1996). Response of the Geobrugg cable net system to debris flow loading. Report. California Polytechnic State University.

DE NATALE, J. S.; IVERSON, R. M.; MAJOR, J.J.; LAHUSEN, R. G.; FIEGEL, G. L.; DUFFY, J.D. (1999). Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows. USGS Open-File Report pp.99-205.

DIAS NETO, C. M. (2001) Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos Ribeira). São Paulo, Tese de Doutorado em Geociências – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 160p.

DNV (2013). Understanding Debris Flow, North Vancouver District, informação disponível em: [http://www.dnv.org/upload//debrisflowimage\(8\).gif](http://www.dnv.org/upload//debrisflowimage(8).gif)

DOLIF, G. (2023). Cinco fatores ajudam a explicar a chuva em São Sebastião – SP, Informação disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/20/chuva-que-caiu-em-24-horas-no-litoral-norte-foi-o-maior-registro-da-historia-diz-governo-de-sao-paulo.ghtml>

DU, R.; KANG, Z.; ZHANG, S. (1986). On the classification of debris flow in China, Collected Papers of the Third International Symposium on River Sedimentation, The University of Mississippi, U.S.A., pp.1286-1291.

FERREIRA, L.A.; SAYÃO, A.S.F.J.; NUNES, A.L.L.S. (2023). Obras geotécnicas da Transposição do Rio São Francisco: Barragem Milagres e Túnel Milagres, 18º Congresso Nacional de Geotecnia – Évora, Portugal, pp. 903-912.

G1, GLOBO (2023). Chuva que caiu em 24 horas no Litoral Norte foi o maior registro da história do Brasil, Informação disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/20/chuva-que-caiu-em-24-horas-no-litoral-norte-foi-o-maior-registro-da-historia-diz-governo-de-sao-paulo.ghtml>

GEOMECÂNICA (2011). Estudo de Detalhes – Descrição dos Pontos do Bairro Córrego D’Antas, Relatório Técnico, 82p.

GEOPHI (2021). Projeto Executivo de Barreiras Flexíveis de Proteção Rio Príncipe – Teresópolis, Memória de Cálculo, 88p.

GIANI, G. P. (1992). Rock slope stability analysis, Balkeman, Rotterdam.

GIDES (2018). Manual Técnico para Concepção de Intervenções para Fluxo de Detritos, Volume 4, Governo Federal, Brasil, 162p.

GOSTNER, W. et al. (2008). Water related natural disasters: Strategies to deal with debris flows: The case of Tschengls, Italy. In: WIEGANDT, E. Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge. Netherlands: Springer, v. 31, pp.221-241.

GRAMANI, M. F. (2001). Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. Dissertação de mestrado. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 112p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 194p.

HE, S.; LIU, W.; LI, X. (2016). Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. *Environmental Earth Science* 75:298, pp.8.

HEILBRON, M.; MACHADO, N. (2003). Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research* 125, pp.87-112.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES; A.C.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A. (2004). Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto et al. (Org.) – Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, pp.203-234.

HOEK, E. (2007). Practical Rock Engineering, Analysis of Rockfall Hazards, Chapter 9, Canada, 25p.

HU, K.; WEI, F.; LI, Y. (2011). Real-time measurement and preliminary analysis of debrisflow impact force at jiangjia ravine, china. *Earth Surf Process Landf* 36:1268–1278.

HUANG, H.; YANG, K.; LAI, S. (2007). Impact force of debris flow on filter dam. *Geophysical Research Abstracts Vol 9*, 32p.

HÜBL J.; SUDA, J.; PROSKE, D.; KAITNA, R; SCHEIDL, C. (2009). Debris flow impact estimation. In: Popovska C., Jovanovski M., Eleventh international symposium on water management and hydraulic Engineering, vol 1, pp. 137–148.

HÜBL, J.; HOLZINGER, G. (2003). Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Kleinmassstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern. WLS Report 50 Band 3, Institut of Mountain Risk Engineering.

HUEBL, J.; FIEBIGER, G. (2005). Debris-flow mitigation measures. In: JAKOB, M.; OLDRICH, H. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin, Heidelberg: Praxis-Springer, 2005. Cap. 18, p.445-487.

HUNGR, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 32, pp.610-623.

HUNGR, O. (2005). Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris flow Hazards and Related Phenomena. [S.l.]: Praxis-Springer, 2005. p. 47-61.

HUNGR, O. et al. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, v. VII, n. 3, pp. 221-238.

HUNGR, O. et al. (2002). Rapid flow slides of coal mine waste in British Columbia, Canada. In: EVANS, S. G.; DEGRAFF, J. V. Catastrophic landslides: effects, occurrence and mechanisms. Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*: v. 15, pp.191-208.

HUNGR, O.; MCDOUGALL, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. *Computers & Geosciences*, n. 35, pp.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, pp.663-677.

HUNGR, O.; MORGAN, G. C.; VANDINE, D. F.; LISTER, D. R. (1987). Debris flow defences in British Columbia”, *Debris Flow – Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, *Reviews in Engineering Geology*, Geological Society of America, vol. VII, pp.201-222.

IKEDA, M. (2015). Sabo Facilities: Survey, Planning, Design, Maintenance, Department of Water Resources General Operational Division Yachiyo Engineering Co. Ltd., 151p.

ISHIKAWA, N.; INOUE, R.; HAYASHI, K.; HASEGAWA, Y.; MIZUYAMA, T. (2008). Experimental approach on measurement of impulsive fluid force using debris flow model. In: *Conference proceedings interpraevent 08*.

IVERSON, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Review of Geophysics*, v. 35, n. 3, p.245-296.

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, v. 25, pp.85-138.

JABOYEDOFF, M.; BARDOU, E.; DERRON, M. H. (2004). Sloping local base level: a tool to estimate potential erodible volume and infilling aluvial sediment of glacial valleys, 2nd Swiss Geoscience Meeting, Lausanne.

JACKSON, L. E.; KOSTACHUK, R. A.; MACDONALD, G. M. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans in Canadian Rocky Mountains, *Debris Flows – Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, *Reviews in Engineering Geology*, Geological Society of America.

JAKOB, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering Geology*, v. 79, p. 151-161.

JAKOB, M.; HUNGR, O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Heidelberg: Praxis-Springer.

JICA (2015). *Training in Japan Project to Strengthen the National Integrated Management Strategy Risks in Natural Disasters, Nagasaki Prefecture – Japan*, 84p.

KANJI, M.A.; MASSAD, F.; CRUZ, P.T. (2009). Debris flow at Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Hydrocarbon World (Print)*, London, p.28-29.

KÖRNER, H. J. (1976). Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und FlieBschnelawinen: *Rock Mechanics*, v. 8, pp.225-256.

KUWABARA, G.; KONO, K. (1987). Restitution coefficient in a collision between two spheres, *JPN Appl Phys.* 26, pp.1230-1233.

KWAN, J.S.H. (2012). *Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-Resisting Barriers*. Geo Report 270. Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

LANG, T. E.; MARTINELLI, J. R. 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, pp.117-126.

LICHTENHAHN, C. (1973). Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. *Kolloquim über Wildbach-sperren*. Mitteilungen der Forstlichen Bundesanstalt Wien. Heft 102/1973, pp.91-127.

LIEN, H. P. (2002). *Study on Treatments of Debris Flow*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture (COA), Taiwan.

LIMA, I. (2017). Revisitando os Fluxos de Detritos Destrutivos de 2011 em Teresópolis, nos Córregos do Vieira e do Príncipe, *Revista de Ciência, Tecnologia e Inovação*, N. 3, PP.70-77.

LIMA, I. et al. (2020). Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na Região Serrana do Rio de Janeiro, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, nº 2, 21p.

LO, D.O.K. (2000). *Review of Natural Terrain Landslide Debris-resisting Barrier Design*. Geo Report 104. Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

LUIS-FONSECA, R.; RAIMAT, C.; HURLIMANN, M.; ABANCO, C.; MOYA, J.; FERNANDEZ, J. (2011). Debris-flow protection in recurrent areas of the Pyrenees. Experience of the VX systems from output results collected in the pioneer monitoring station in Spain, *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Casa Editrice Università La Sapienza. pp.1063-1071.

LUNA, B. Q. (2011) The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth Systems Science*, v. 11, pp.2047-2060.

LUO, G.; ZHAO, Y.; SHEN, W.; WU, M. (2022). Dynamics of bouldery debris flow impacting onto rigid barrier by a coupled SPH-DEM-FEM method, Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 12p.

MAFFRA, C. Q. T. (2000). Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transpressivo. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 113p.

MCDUGALL, S. (2006). A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain. PhD Thesis. ed. Vancouver, Canadá: The University of British Columbia.

MIZUYAMA, T. (1979). Evaluation of Impact of Debris Flow on Check Dams, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 40–49.

MIZUYAMA, T. (2008). Structural countermeasures for debris flow disasters. *Int J. Eros Control Eng* 1(2): 38–43.

MIZUYAMA, T.; KOBASHI, S. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *INTERPRAEVENT*, v. 4, pp.99-108.

MORAES, L. H. C. (2023). Análise 3D do Fluxo de Detritos no Rio Príncipe, Teresópolis, Brasil, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio, 103p.

MORAES, L. H. C.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. (2023). Análise 3D do debris flow no Rio Príncipe, Teresópolis, Brasil, 18º Congresso Nacional de Geotecnia – Évora, Portugal, pp.1633-1642.

MORGAN, B. A.; WIECKORECK, G. F.; CAMPBELL, R. H.; GORI, P. L. (1997). Debris flow hazards in areas affected by June 27, 1995 storms in Madison County, Virginia, USGS Open File Report 97-438, 14p.

MORIGUCHI, S.; BORJA, R.I.; ASHIMA, A.; SAWADA, K. (2009). Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction, *Acta Geotechnica* 4:84.

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. G. (2014). Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 263p.
- NUNES, A. L. L. S. (2013). Convivência com Rupturas – Barreiras contra Quedas de Blocos, VI Conferência Brasileira de Encostas, ABMS, Angra, pp.41-73.
- NUNES, A.L.L.S.; RIOS FILHO, M.G. (2009). Barreiras Flexíveis para Mitigação de Fluxo de Detritos, 5a Conf. Bras. Estabilidade de Encostas, ABMS, SP, 8p.
- NUNES, A.L.L.S.; SAYÃO, A.S.F.J. (2014). Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência, 14CNG – Congresso nacional de Geotecnia. Geotecnia nas infraestruturas, Covilhã, Portugal, pp. 83 – 123.
- PELIZONI, A. B. (2014). Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 153p.
- PERLA, R.; CHENG, T. T.; MCCLUNG, D. M. (1980). A two parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, v. 26, pp.197-207.
- PIERSON, T. (1986). Flow behaviour of channelized debris flows, Mt. St. Helens. In: ABRAHAMS, A. D. *Hillslope processes*. Boston: Allen and Unwin, pp. 1173-1176.
- PIERSON, T. C.; COSTA, J. E. (1987). A rheological classification of subaerial sedimentwater flows. In: *Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation. Reviews in Engineering Geology Volume VII*, 1-12. Boulder, CO: Geological Society of America.
- POLANCO, L. S. E. (2010). Correlações empíricas para fluxos de detritos. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 110p.
- PORTELLA, F. E.; SILVA, L. F. M.; RIOS FILHO, M. G.; PEREIRA, G. I. M. (2013). O Evento no Córrego D’Antas – Mapeamento Geológico – Geotécnico em Área de Difícil Acesso, pp. 211–215.
- REVELLINO, P. et al. (2004). Velocity and runout simulation of destructive debris flow and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy. *Environmental Geology*, v. 45, p. 295-311.
- REVERTE, F. C.; GARCIA, M. G. M. (2016). O patrimônio geológico de São Sebastião – SP: inventário e uso potencial de geossítios com valor científico, *UNESP, Geociências*, v. 35, n. 4, pp.495-511.
- RICKENMANN, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards, Netherlands*, n. 19, p.47-77.

- RICKENMANN, D.; KOCH, T. (1997). Comparison of debris flow modelling approaches. In: CHEN, C. L. Proceedings of 1st International DFHM Conference. San Francisco, California. pp.576-585.
- ROTH, A.; KÄSTLI, A.; FRENEZ, T. (2004). Debris flow mitigation by means of flexible barriers, Internacionales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA/TRIENT, pp. 289-300.
- SACOTO, C. A. G. (2017). Análise dos esforços de impacto de debris flows. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 165p.
- SCHEIDL, C.; CHIARI, M.; KAITNA, R.M.U.; LLEGGER, M.; KRAWTSCHUK, A.; ZIMMERMANN, T.; PROSKE, D. (2013). Analyzing debris flow impact models, based on a small scale modelling approach. *Surv Geophys* 34:121–140.
- SCOTTON, P.; DEGANUTTI, A. M. (1997). Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments, in Proceedings of the 1st ASCE International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, edited by C.-L. Chen, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va. pp.777–786.
- SEGALINI, A.; FERRERO, A.; MIGLIAZZA, M.; VAGNON, F. (2016). Applicazione di misure fotogrammetriche applicate per lo Studio di barriere para debris flow. Metodi di rilievo di pareti rocciose per il monitoraggio e la progettazione di interventi. Politecnico di Torino, 53p.
- SHELBY, M. (1993). Hillslope materials and proceses. 2nd. ed. Oxford: Oxford University Press.
- STEVENS, A; HRENYA, C. (2005). Comparison of soft-sphere models to measurements of collision properties during normal impacts. *Powder Technology* 154, pp.99-109.
- STEVENS, W.D. (1998) Rocfall: A Tool for Probabilistic Analysis. Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. Master Thesis of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.
- STINY, J. (1910) Die Muren. Verlag der Wagner'schen. Universitätsbuchhandlung. Innsbruck.
- SUN, H. W.; LAM, T. T. M.; TSUI, H. M. (2003). Design basis for standardised modules of landslide debris-resisting barriers, GEO report n° 174, Geotechnical Engineering Office, The Government of Hong Kong, 164p.
- SUWA, H.; OKUDA, S. (1983). Deposition of debris flows on a fan surface, Mt. Yakedake, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 46: pp.79–101.
- TAKAHASHI, T. (1991). Debris flow. Balkema. Rotterdam, p. 165.

TAKAHASHI, T. (2006). Mechanisms of sediment runoff and countermeasures for sediment hazards, Kinmirai Sha: 420p (in Japanese).

TAKAHASHI, T. (2007). Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures, Taylor and Francis Group, Londres 448p.

TAKAHASHI, T. et al. (2001). Flood and sediment disasters triggered by 1999 rainfall in Venezuela: A river restoration plan for an alluvial fan, *Journal of Natural Disaster Science*, v. 23, pp. 65-82.

TAKAHASHI, T.; NAKAGAWA, H. (1992). Routing debris flows with particle segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, n. 118, pp.1490-1507.

THURBER CONSULTANTS LTD. (1984). Debris Torrents: A review of mitigative measures. Report to ministry of transportation & highways , british Columbia, 32 p.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; VALERIANO, C.; PORTO JÚNIOR, R.; BLANCO DE DIOS, F.; MACHADO, N.; EIRADO SILVA, L.G.; ALMEIDA, J.C.H. (2012). Juvenile contribution of the Neoproterozoic Rio Negro Magmatic Arc (Ribeira Belt, Brazil): Implications for Western Gondwana Amalgamation. *Gondwana Research* 21, pp.422-438.

VAGNON, F; SEGALINI, A. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*2016-80. 17p.

VALVERDE, A. M. (2016). Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio, 146p.

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. et al. (1997). Channelized debris flows mitigative structures in British Columbia, Canada. In: CHEN, C. Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. ASCE, New York: Proceedings of First International Conference, pp. 606-615.

VARNES, D. J. (1958). Landslides Types and Process, in Landslides and Engineering Practice: National Research Council, Highway Research Board Special Report 29, USA, p. 20-47.

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 catastróficos: a bacia de drenagem do córrego do Príncipe, Teresópolis – RJ. In: VIII Simpósio Latino-americano de Geografia Física & IV Simpósio Iberoamericano de Geografia Física, Santiago, pp.1185-1192.

WALTON, O.; BRAUN, R. (1986). Viscosity granular – temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *Rheol.* 30, pp.949-980.

WATANABE, M.; IKEYA, H. (1981). Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima. Japan. Erosion sediment transport measurement. International Association on Hydrology, Florence. Science Publication 133, pp. 245-256.

WENDELER, C. (2008). Murgangsruckhalt in wildbachen. grundlage zur planung und berechnung von flexiblen barrieren. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich.

WENDELER, C.; VOLKWEIN, A.; DENK, M.; ROTH, A.; WARTMANN, S. (2007). Field measurements used for numerical modelling of flexible debris flow barriers. In: Chen C., Major J., Debris-flow hazards mitigation mechanics, prediction and assessment, Millpress, Rotterdam. 12p.

WU, J.; TIAN, L.; KANG, Z.; ZHANG, Y.; LIU, J. (1993). Debris flow and its comprehensive control. Science Press, 332p.

XAVIER SILVA, J. (2015). Análise numérica 3D do fluxo de detritos do Córrego D'Antas, Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 151p.

YAMAGUCHI, I. (1985). Erosion Control Engineering, ISBN: 4-8049-5064-8.

YOSHIDA, H. (1999). Recent experimental studies on Rockfall Control in Japan, Proceedings Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impacts Loads by Rock Falls and Design of Protection Structures, Kanazawa, Japan.

YU, F.C. (1992). A study on the impact force of debris-flow. Proceedings of the national science council. Part A: Physical Science and Engineering. Taipei. Taiwan. Vol. 16. N. 1: pp.32-39.

ZANUTTIGH, B.; LAMBERTI, A. (2006). Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, N. 4, pp.522-534.

ZHANG, S. (1993). A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in china. *Nat Hazards* 7:1–23.

ZHANG, S.; CHEN, J.; YE, M. (1990). Measurement and research of physical parameters of debris flow in Jiangjia Ravine, in J. Wu et al., Debris Flow Observation and Research in Jiangjia Ravine, Yunnan, Science Press, Beijing, pp. 141-164.