



COPPE/UFRJ

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA FLUXOS DE DETRITOS

Lydice Salome Estrada Polanco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA FLUXOS DE DETRITOS

Lydice Salome Estrada Polanco

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão, Ph.D.

Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D.

Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2010

Estrada, Lydice Salome Polanco

Correlações Empíricas para Fluxos de Detritos/ Lydice Salome Estrada Polanco. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVI, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 105-110.

1. Fluxo de detritos. 2. Relações empíricas. 3. Estimativa de parâmetros. I. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título (série).

*Aprender é a única coisa de que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se
arrepende.*

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMENTOS

À Deus pela coragem, a luz e a força ao percorrer os caminhos que escolhi.

À minha mãe Ada Polanco, meu porto seguro em todas as horas, ao meu pai Rulo Estrada pelo esforço em me dar uma formação, ao meu irmão Israel pelo carinho e conselhos sempre.

Ao Alexandre R. Schuler, pela compreensão e a força em todos os momentos, por ser a pessoa especial que é, a quem respeito, admiro e amo profundamente.

À professora Anna Laura por ter me aceitado como orientada, pela compreensão, pelo carinho, pela força, por não ter me deixado desistir, por toda sua preocupação e ajuda durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos membros da banca pelo tempo e atenção prestada.

Aos professores da COPPE pelas aulas e os conhecimentos transmitidos.

À PCE – Projetos e Consultoria de Engenharia Ltda. por ter me convidado vir trabalhar no Brasil, especialmente ao Eng. Eduardo Massa, pela confiança no meu trabalho e por me permitir evoluir profissionalmente, ao Eng. Gilberto Soares pelas oportunidades e carinho, ao Eng. Claudio Marinho pelas caronas e os conselhos.

Aos engenheiros Luiz Antonio Simões e Rogério Scucato da PCE, pelos conhecimentos transmitidos, pelos momentos de descontração durante as horas de trabalho estressante e por todos os seus conselhos.

Às minhas amigas amadas Anita, Aline, Cristiane, Evana, Laura, Mariana, e Silvana, pelo carinho, os conselhos, as risadas e apoio em todas as horas, estando perto ou longe moram no meu coração.

Aos meus colegas do mestrado, em especial a Alessandra, Diego, Flavia, Harley, Leonardo, Mario, Rafael, Simão e Wander, pela ajuda durante toda esta fase.

Ao Luiz Muniz e Jorge Spada pela amizade e carinho.

A toda minha família e amigos espalhados em vários países do mundo pela força e carinho apesar à distância.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA FLUXOS DE DETRITOS

Lydice Salome Estrada Polanco

Dezembro/2010

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

Os fluxos de detritos estão entre os movimentos de massa mais catastróficos da natureza, devido ao envolvimento de grandes massas de detritos e energias extremamente altas. Os prejuízos provocados por este movimento têm sido significativos com inúmeras vítimas fatais, além de danos materiais expressivos. Tais eventos são de difícil previsão, sendo a maioria estimada por métodos empíricos diversos. Este trabalho objetivou ampliar o conhecimento de fluxo de detritos, elaborando uma base de dados de fluxos de detritos nacionais e internacionais e compilando as principais relações empíricas de estimativa de parâmetros do movimento. Foram selecionados os parâmetros importantes e mais acessíveis para o estabelecimento de novas relações empíricas capazes de representar o comportamento dos fluxos de detritos brasileiros. Estas relações empíricas foram analisadas e comparadas com as da literatura. Os resultados indicam uma representatividade satisfatória das novas relações para estimativa de parâmetros dos fluxos de detritos brasileiros.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EMPIRICAL CORRELATIONS FOR DEBRIS FLOWS

Lydice Salome Estrada Polanco

December/2010

Advisor: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

Debris flows are among the most catastrophic mass movements of nature because they combine large masses of debris with high velocities, producing extremely large energies. The damages caused by these movements have been significant, with numerous fatalities and expressive material losses. This type of event is very difficult to predict because it involves several parameters. Accordingly, most studies make use of empirical methods to estimate the characteristics of potential debris flows. The purpose of this research is to enlarge the knowledge about debris flows by compiling a database of reported debris flows which took place in Brazil and abroad. Moreover, the validity of proposed empirical relationships has been studied for estimating the main characteristics involved in the motion. The study focused on electing the most important and practical parameters to establish new empirical relationships that could adequately represent the behavior of selected Brazilian cases of debris flow. The proposed relationships were compared with others found in the literature, indicating a satisfactory potential for application in studies of debris flows in Brazil.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE FLUXO DE DETRITOS	4
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA	4
2.2 DEFINIÇÃO DE FLUXO DE DETRITOS (<i>DEBRIS FLOW</i>)	7
2.3 CARACTERÍSTICAS DE FLUXOS DE DETRITOS	8
2.4 CLASSIFICAÇÃO DE FLUXO DE DETRITOS	12
2.5 PARÂMETROS IMPORTANTES DE FLUXO DE DETRITOS	14
2.6 DEFLAGRADORES DE FLUXO DE DETRITOS	20
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
CAPÍTULO 3 – CASOS HISTÓRICOS E RELAÇÕES EMPÍRICAS	26
3.1 CASOS HISTÓRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS NA EUROPA, ÁSIA E AMÉRICA DO NORTE.....	26
3.1.1 Fluxo de detritos na Europa.....	26
3.1.2 Fluxo de detritos na Ásia.....	30

3.1.3	Fluxo de detritos nos Estados Unidos e Canadá.....	32
3.2	CASOS HISTÓRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS NA AMÉRICA LATINA	35
3.2.1	Fluxo de detritos no Peru.....	35
3.2.2	Fluxo de detritos na Venezuela	38
3.2.3	Fluxo de detritos no Brasil.....	39
3.3	RELAÇÕES EMPÍRICAS PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS FLUXOS DE DETRITOS	49
3.3.1	Volume do fluxo de detritos	50
3.3.2	Vazão de pico	50
3.3.3	Velocidade do fluxo.....	54
3.3.4	Distância percorrida.....	56
3.3.5	Distância percorrida de deposição.....	57
3.3.6	Força de Impacto	58
3.4	OUTRAS RELAÇÕES EMPÍRICAS DE PARÂMETROS DE FLUXO DE DETRITOS	61
3.4.1	Relações empíricas entre a elevação, distância percorrida e volume	61
3.4.2	Relações empíricas entre área de deposição e volume	65
3.4.3	Relações empíricas entre volume, velocidade e energia	70
3.3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
	CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS.....	81
4.1.	METODOLOGIA DE ANÁLISE	81

4.2. ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	82
4.3. ANÁLISE DA VAZÃO DE PICO.....	90
4.4. ANÁLISE DA DISTÂNCIA PERCORRIDA	94
4.5. ANÁLISE DA VELOCIDADE DO FLUXO E O VOLUME.....	97
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	102
5.1 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES.....	102
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Características das corridas de detritos (NETTLETON <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figura 2.2 - Zonas numa corrida de detritos com fluxo canalizado (VANDINE, 1996).	10
Figura 2.3 – Formas de deposição possíveis de fluxo de detritos livre e canalizado (NETTLETON <i>et al.</i> , 2005).	12
Figura 2.4 - Fluxo de detritos Classe 1 a 3 (JAKOB, 2005).....	18
Figura 2.5 - Fluxo de detritos Classe 4 a 6 (JAKOB, 2005).....	18
Figura 2.6 - Fluxo de detritos ocorrido no Monte <i>Huascarán</i> , Peru (<i>U. S. Geological Survey</i> ,1970).	20
Figura 2.7 - Principais agentes deflagradores de movimentos de massa, locais de atuação e processos associados aos eventos (GRAMANI, 2001).	22
Figura 2. 8 - Caracterização da declividade e o movimento de uma corrida (WU, 2003).	24
Figura 3.1 - Casos de fluxos de detritos na Áustria, Suíça e Itália (SCHEIDL & RICKENMANN, 2009).....	29
Figura 3.2 - Fluxos de detritos em diversas bacias da China (CHEN <i>et al.</i> , 2005).....	31
Figura 3. 3 - Áreas atingidas pelos fluxos de detritos de <i>Huascáran</i> após os eventos de 1962 e 1970.	37
Figura 3.4 - Fluxo de detritos em Cuzco, Peru (www.flickr.com/photos/ josevidal/ 4797615203/in/set – 72157624510270492).	37
Figura 3.5 - Fluxo de detritos com leque de deposição de 5m de espessura em <i>Carabellada</i> , Venezuela (SMITH, 1999).	38
Figura 3.6 - Cicatrizes e depósito do fluxo de detritos de Caraguatatuba em 1967.....	41

Figura 3.7 - Distância percorrida e de deposição do fluxo de detritos de Caraguatatuba em 1967.	41
Figura 3.8 - Grandes volumes de blocos de rocha no fluxo de detritos de Petrópolis em 1988.	42
Figura 3.9 - Fluxo de detritos em Petrópolis em 1988.	43
Figura 3.10 – Cicatrizes do fluxo de detritos nas encostas de Cubatão em 1994.....	44
Figura 3.11 - Deposição de blocos de rocha de grandes volumes e lama na área da planta industrial de Cubatão (1994).	45
Figura 3.12 - Vista do local de deposição do fluxo de detritos em Cubatão (KANJI <i>et al.</i> , 2007).....	46
Figura 3.13 - Fluxo de detritos com mais de 1km de distância percorrida no Morro do Quitite (1996).	47
Figura 3.14 - Fluxo de detritos na Via Anchieta em 1999.	48
Figura 3.15 - Relação entre vazão de pico Q_p e volume do fluxo de detritos M (RICKENMANN, 1999).	51
Figura 3.16 - Relação entre velocidades observada e calculada para fluxo de detritos e fluxos de água (RICKENMANN, 1999).	55
Figura 3.17 - Distribuições de carga em função das forças de impacto observadas e calculadas (HÜBL <i>et al.</i> , 2009).	60
Figura 3.18 - Relação entre a declividade e o volume do deslizamento (RICKENMANN, 2005).	63
Figura 3.19 – Relação entre comprimento de deposição e volume do fluxo de detritos (CROSTA <i>et al.</i> , 2001).	64
Figura 3.20 - Relação empírica apresentada por GRAMANI (2001).	65

Figura 3.21 - Áreas de deposição em função da altura H e a distância L de fluxos vulcânicos (IVERSON <i>et al.</i> , 1998).....	66
Figura 3.22 – Comparação entre as dados avaliados por IVERSON <i>et al.</i> (1998) e CROSTA <i>et al.</i> (2001).....	69
Figura 3.23 - Comparação de áreas de deposição de fluxos de detritos observados e previstos pelo programa computacional <i>TopRunDF</i> (SCHEIDL, 2009).....	71
Figura 3.24 - Barreira flexível para teste, <i>Illgraben</i> (WENDELER <i>et al.</i> , 2006).	72
Figura 3.25 - Barreira de teste no <i>Illgraben</i> , após evento de fluxo de detritos (WENDELER <i>et al.</i> , 2006).....	73
Figura 4.1 – Gráfico de relação H/L e volume (Modificado de RICKENMANN, 2005).	83
Figura 4.2 – Relação entre H/L e volume (V) incluindo os eventos brasileiros.	84
Figura 4. 3 – Relação empírica para os casos no Brasil.	85
Figura 4 4 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso de Caraguatatuba (1967).	86
Figura 4.5 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso Cubatão (1994).	87
Figura 4.6 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso Cubatão (1996).	88
Figura 4.7 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso dos Morros de Quitite e Papagaio (1996).	88
Figura 4.8 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso da Via Anchieta (1999).	89
Figura 4. 9 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso de Lavrinhas (2001).	90

Figura 4.10 – Relação entre vazão de pico e volume dos fluxos de detritos analisados por RICKENMANN (1999) e de Cubatão (1994).....	91
Figura 4.11 – Comparação de relações empíricas de vazão e volume – Caso de Cubatão (1994).	93
Figura 4.12 – Vazões calculadas por relações empíricas para os fluxos de detritos no Brasil.....	94
Figura 4.13 – Relação entre volume e distância percorrida para fluxos de detritos no Brasil.....	95
Figura 4.14 – Curvas de distância percorrida observada e calculada pela relação proposta e a relação de RICKENMANN (2005) para fluxos de detritos no Brasil.....	97
Figura 4.15 – Variações percentuais dos valores de velocidade do fluxo de detritos de Cubatão (1994).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos em encostas segundo VARNES (1978).....	5
Tabela 2.2 - Características dos principais grandes grupos de processos de movimentos em encostas (AUGUSTO-FILHO, 1992).....	6
Tabela 2.3 – Classificação qualitativa de fluxos de detritos em função da concentração (HUNGR <i>et al.</i> 2005 e WANG <i>et al.</i> 2001).....	15
Tabela 2.4 - Classificação do fluxo de detritos em função da velocidade de deslizamentos (CRUDEN & VARNES, 1996).	16
Tabela 2.5 - Classificação das corridas de detritos em função do volume, vazão, área inundável e consequências (Modificado de JAKOB, 2005).....	17
Tabela 2.6 – Exemplo de uma matriz de risco (RICKENMANN <i>et al.</i> , 2008).....	21
Tabela 2.7 - Relação entre a declividade da encosta e as características do movimento (TAKAHASHI, 1991).	24
Tabela 3.1 - Casos de fluxos de detritos analisados por RICKENMANN (1999).....	27
Tabela 3.2 - Características dos casos de fluxo de detritos na Áustria, Itália e Suíça (SCHIELD & RICKENMANN, 2009).	29
Tabela 3.3 - Comparação entre relações empíricas de volume de fluxo de detritos do Japão e China (MIZUHARA, 1994).....	32
Tabela 3.4 - Fluxos vulcânicos e de detritos nos Estados Unidos analisados por IVERSON <i>et al.</i> (1998).	33
Tabela 3. 5 - Fluxos vulcânicos e de detritos acontecidos no Canadá analisados por IVERSON <i>et al.</i> (1998).	35
Tabela 3.6 - Alguns eventos acontecidos no Peru (CHANG & HURTADO, 1991).	36
Tabela 3.7 – Características de alguns fluxos de detritos no Brasil (modificado de GRAMANI, 2001).....	40

Tabela 3.8 - Métodos de estimativa de parâmetros de fluxo de detritos (RICKENMANN, 2005).	49
Tabela 3.9 - Correlações entre vazão de pico e volume total de fluxos de detritos.	52
Tabela 3.10 - Relações entre parâmetros de fluxos de detritos (adapt. GRAMANI, 2001).	53
Tabela 3.11 - Relações para estimar a velocidade média de fluxo de detritos (RICKENMANN, 1999).	54
Tabela 3.12 – Relações para cálculo de velocidade proposta por vários autores.	56
Tabela 3.13 – Valores do coeficiente de mobilização k'_B para fluxos de detritos na Europa (SCHEIDL & RICKENMANN, 2009).	69
Tabela 3. 14 – Ficha de caracterização proposta para levantamento de dados de fluxos de detritos.	76
Tabela 3.15 – Ficha de caracterização do fluxo de detritos na Venezuela em 1999.	77
Tabela 3. 16 – Ficha de caracterização do fluxo de detritos em Cubatão em 1994.	79
Tabela 4.1 - Eventos de fluxo de detritos – Análise de parâmetros geométricos.	82
Tabela 4. 2 – Volumes observados e calculados por relações empíricas para fluxos de detritos brasileiros.	85
Tabela 4. 3 – Valores de vazões de pico calculados por relações empíricas para fluxos de detritos brasileiros.	92
Tabela 4.4 – Valores da distância percorrida observados e calculados pela relação proposta e a de RICKENMANN (1999) para fluxos de detritos brasileiros.	96
Tabela 4.5 – Valores da velocidade observada e calculados, em função da vazão observada e calculada para Cubatão (1994).	98

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

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 de instabilização. 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.

Debris flow ou “corrida de detritos” ou “fluxo de detritos” é um tipo de instabilidade das mais críticas devido a seu fator “catastrófico”. Infelizmente, o conhecimento do movimento é ainda muito restrito. No Brasil o caso mais relevante e o mais estudado foi o ocorrido na região da Serra de Cubatão (SP), que provocou uma inundação em área industrial, causando prejuízos de milhões de dólares. No plano internacional, o evento ocorrido na Venezuela em 1999 foi de grandes proporções com número de mortes estimado em 40mil pessoas.

Tais movimentos de massa podem causar sérios danos em seu entorno, devido à alta mobilidade e energia de impacto envolvidas. Prever o volume do material escorregado, as trajetórias e alcance de material mobilizado é um assunto de extrema complexidade, devido ao fato de se tratar de evento pouco estudado na literatura nacional e internacional. Porém, alguns casos foram recorrentes, possibilitando o entendimento e equacionamento dos movimentos por alguns autores. O uso de relações empíricas possibilita a estimativa de parâmetros do fluxo de detritos em função de características passíveis de fácil determinação, tais como a declividade da encosta. Estas relações empíricas também permitem a avaliação e a delimitação de áreas de risco, assegurando um convívio com tais movimentos. Permitem ainda a elaboração de programas de prevenção e de alerta e a implantação de obras para redução dos danos.

Neste âmbito, esta pesquisa procurou contribuir para um maior conhecimento de fluxos de detritos, através da revisão da literatura para a montagem de uma base de dados, compilação e proposição de relações empíricas para estimativas de parâmetros de fluxos de detritos e aplicação aos casos ocorridos no Brasil.

1.2 OBJETIVO

Esta dissertação tem como principal objetivo o estudo de relações empíricas para estimativa de parâmetros de fluxos de detritos. Esta finalidade pode ser atingida por meio de vários objetivos específicos:

1. Montagem de uma base de dados de fluxos de detritos nacionais e internacionais;
2. Compilação das principais relações empíricas para estimativa de parâmetros de detritos da literatura;
3. Análise dos parâmetros mais importantes de fluxo de detritos e de mais fácil identificação;
4. Análises das relações empíricas da literatura para fluxos de detritos brasileiros;
5. Desenvolvimentos de relações empíricas específicas para os fluxos de detritos nacionais e comparação com as relações da literatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação é dividida em 5 capítulos, sendo este primeiro um capítulo de introdução com os principais objetivos da dissertação e sua organização.

O Capítulo 2 apresenta aspectos gerais de movimentos de massa com enfoque especial para os fluxos de detrito. São descritos os principais parâmetros e características envolvidos nestes eventos catastróficos.

No Capítulo 3 são apresentados os casos históricos de fluxos de detritos reportados na literatura. Os casos são apresentados em grupos condicionados pelas regiões de ocorrência. Também se descrevem os possíveis mecanismos deflagradores que

ocasionaram tais eventos. Finalmente são apresentadas as relações empíricas encontradas na literatura, em função dos parâmetros mais importantes do fluxo, tais como vazão de pico, volume, velocidade e espessura do fluxo de detritos, além da altura e distância percorrida, e a energia cinética do fluxo.

No Capítulo 4 apresenta-se a metodologia adotada para o estudo das relações empíricas da literatura e para o desenvolvimento das novas relações entre parâmetros para fluxos de detritos brasileiros. As análises destas relações são apresentadas, permitindo evidenciar a sua aplicabilidade para os casos de fluxos de detritos analisados.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentados os comentários finais, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE FLUXO DE DETRITOS

Este capítulo apresenta os principais conceitos de movimentos de massa, destacando os aspectos correspondentes ao fluxo de detritos ou *debris flow*, suas características e parâmetros de influência.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

O movimento de massa é considerado um fenômeno natural que faz parte da evolução da paisagem. O termo “*movimento de massa*” tem sido utilizado para designar de forma generalizada todos os processos de deslocamento de massa em encostas, nas margens de rios e lagos, ou no litoral.

Os movimentos de massa, especialmente deslizamentos em solo, têm sido objetivo de diversos estudos tanto no Brasil como no exterior. Ao longo do tempo, a compreensão dos mecanismos que governam os deslocamentos de materiais vem crescendo consideravelmente, proporcionando maiores subsídios para o controle e previsão dos diversos tipos de movimento.

Um maior conhecimento dos mecanismos de instabilização de encostas naturais e artificiais permite a determinação da frequência da ocorrência, projetos de obras mais seguras, monitoramento de áreas de risco e avaliação dos prejuízos e danos às infraestruturas (rodovias, ferrovias, conjuntos habitacionais, etc.).

Segundo GUIDICINI & NIEBLE (1984), os movimentos de massas, ou movimentos de solos e de rochas, têm sido objeto de amplos estudos nas mais diversas latitudes, não apenas por sua importância como agentes atuantes na evolução das formas do relevo, mas também em função de suas implicações práticas e de sua importância do ponto de vista econômico.

Os movimentos de massa são os principais processos geomorfológicos modificadores do relevo nos domínios montanhosos. Dentre eles, os fluxos de detritos são os que

apresentam, geralmente, maior magnitude e intensidade de modificação do relevo, podendo alcançar dimensões catastróficas. Estes fluxos podem se iniciar, por exemplo, após a liquefação do solo na encosta devido à elevação súbita da poro-pressão (INNES, 1983; JOHNSON & RODINE, 1984; SASSA, 1985 e 1989; PIERSON & COSTA, 1987; TAKAHASHI, 2007; IVERSON *et al.*, 2000; HUNGR, 2002).

Variadas classificações de movimentos de massa em encostas têm sido propostas, sendo a mais popular a elaborada por VARNES (1978) e apresentada na Tabela 2.1

Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos em encostas segundo VARNES (1978).

Tipo de movimento		Tipo de material		
		Matriz	Engenharia de Solos	
			Predominantemente Grosseiro	Predominantemente Fino
Quedas		Queda de rochas	Queda de detritos	Queda de terra
Tombamento		Tombamento de rochas	Tombamento de detritos	Tombamentos de terra
Escorregamentos	Rotacional	Deslizamento de rochas	Deslizamento de detritos	Deslizamento de terra
	Translacional			
Expansões laterais		Expansões de rochas	Expansões de detritos	Expansões de terra
Corridas/escoamentos		Corrida de rochas (rastejo profundo)	Corrida de detritos (Rastejo de solo)	Corrida de terra
Complexos: combinação de 2 ou mais dos principais tipo de movimentos				

A classificação dos movimentos em encostas de VARNES (1978) foi ajustada às características dos principais grandes grupos de processos de movimentos, na dinâmica ambiental brasileira por AUGUSTO-FILHO (1992) e é apresentada na Tabela 2.2, assim os movimentos de massa podem ser classificados em quatro tipos: rastejo (*creep*), quedas de bloco (*rock fall*), fluxo ou corrida de detritos (*debris flow*) e deslizamento ou escorregamento (*landslide*).

Tabela 2.2 - Características dos principais grandes grupos de processos de movimentos em encostas (AUGUSTO-FILHO, 1992).

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou fluência	Vários planos de deslocamento (interno) Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (km/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares => solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares => solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha => solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas a massas em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Segundo TERZAGHI (1960), os escorregamentos podem ser entendidos como sendo um deslocamento rápido de uma massa de rocha, solo residual ou sedimentos presentes na encosta, cujo centro de gravidade avança na direção para frente e para baixo.

Segundo o manual da GEORIO (2000), a distinção entre corridas e deslizamentos e/ou escorregamentos nem sempre é fácil. Às vezes, a origem de uma corrida é representada por um deslizamento típico, o que pode significar que a corrida é na verdade um movimento classificável como do tipo complexo.

2.2 DEFINIÇÃO DE FLUXO DE DETRITOS (*DEBRIS FLOW*)

Os movimentos definidos como fluxos diferenciam-se dos demais movimentos de massa devido a características peculiares tais como: velocidade elevada, alta capacidade de erosão e destruição e transporte de “detritos” a grandes distâncias em períodos de tempo muito curtos (MASSAD *et al.*, 1998).

Já GUIDICINI & NIEBLE (1984) denominam os fluxos de “corridas” e os definem como sendo formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico (fluido), ocasionadas pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água.

Uma definição básica de fluxo de detritos (*debris flow*) corresponde a um fluxo de mistura de sedimentos e de água que simula um fluido contínuo conduzido por gravidade e que alcança grande mobilidade, arrastando árvores, rochas, detritos, solo, lama, e outros materiais presentes ao longo de sua trajetória.

Os fluxos de detritos estão entre os perigos naturais mais destrutivos que afetam as encostas, a vida humana e as infra-estruturas. Os residentes das zonas de montanha no Japão têm chamado os fluxos de detritos como *Já-Nuke* (caminho da serpente), *Yama-tsunami* (tsunami na montanha), *Yama-shio* (onda da montanha). Apesar do aumento dos registros e medidas de fluxos nas montanhas escarpadas e em situações adversas de chuva, não tem sido fácil explicar como grandes blocos de rochas e detritos são transportados até as cidades causando grandes desastres. Por esta razão, TAKAHASHI (2007) descreve o fluxo de detritos como um “desastre fantasma”.

Comparado aos movimentos de massa, o fenômeno de corrida de detritos é o mais complexo. Normalmente, ele é investigado em três aspectos: ocorrência (geração), fluxo (transporte) e depósito (sedimentação). Apesar da sua energia extremadamente alta, o que torna este fenômeno violento e imprevisível, ele ainda é muito pouco conhecido.

Uma corrida ou fluxo de detritos transporta partículas grossas e finas, em uma matriz de água e grãos em forma de fluxo parcialmente saturado ou saturado. Estes fluxos movimentam grandes volumes de material e são considerados uma ameaça de

magnitude moderada a alta, uma vez que podem produzir alterações topográficas importantes.

Em alguns casos, as corridas podem se iniciar lentamente, assemelhando-se aos movimentos de rastejo. A diferença entre estes fenômenos é que no caso das corridas existe uma superfície de ruptura definida que separa o material movimentado do subjacente. Já no rastejo, a superfície de ruptura é dificilmente identificável. A ocorrência de uma corrida é geralmente relacionada à saturação dos materiais em superfície ou sub-superfície. Alguns solos absorvem água mais facilmente quando são alterados, fraturados ou rompidos por um movimento inicial. Esta saturação da massa de solo pode ocasionar a ruptura e induzir um fluxo de detritos.

Em adição, segundo COLLINS & ZNIDARCIC (1997), as corridas de detritos também podem ser ativadas pela diminuição da sucção oriunda da saturação do material ou pelo desenvolvimento de forças devido ao movimento de água subterrânea.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE FLUXOS DE DETRITOS

Os fluxos de detritos podem se iniciar sob a forma de um escorregamento que, ao atingir um curso d'água, a massa deslizada agrega fluidez e velocidade, comportando-se como um fluxo (MARCELINO, 2003; CORREA *et al.* 2009).

Os danos ocasionados pelas corridas detríticas podem abranger áreas relativamente grandes. A Figura 2.1 apresenta um esquema do fluxo de detritos com suas principais características. A corrida é uma onda larga de materiais sólidos e líquidos misturados, que se movimenta de forma constante, podendo ser através de um canal, produzindo ondas menores superpostas que se movimentam a velocidades superiores à do próprio fluxo. Quando o canal é menor, o fluxo forma ondas horizontais gerando depósitos laterais.

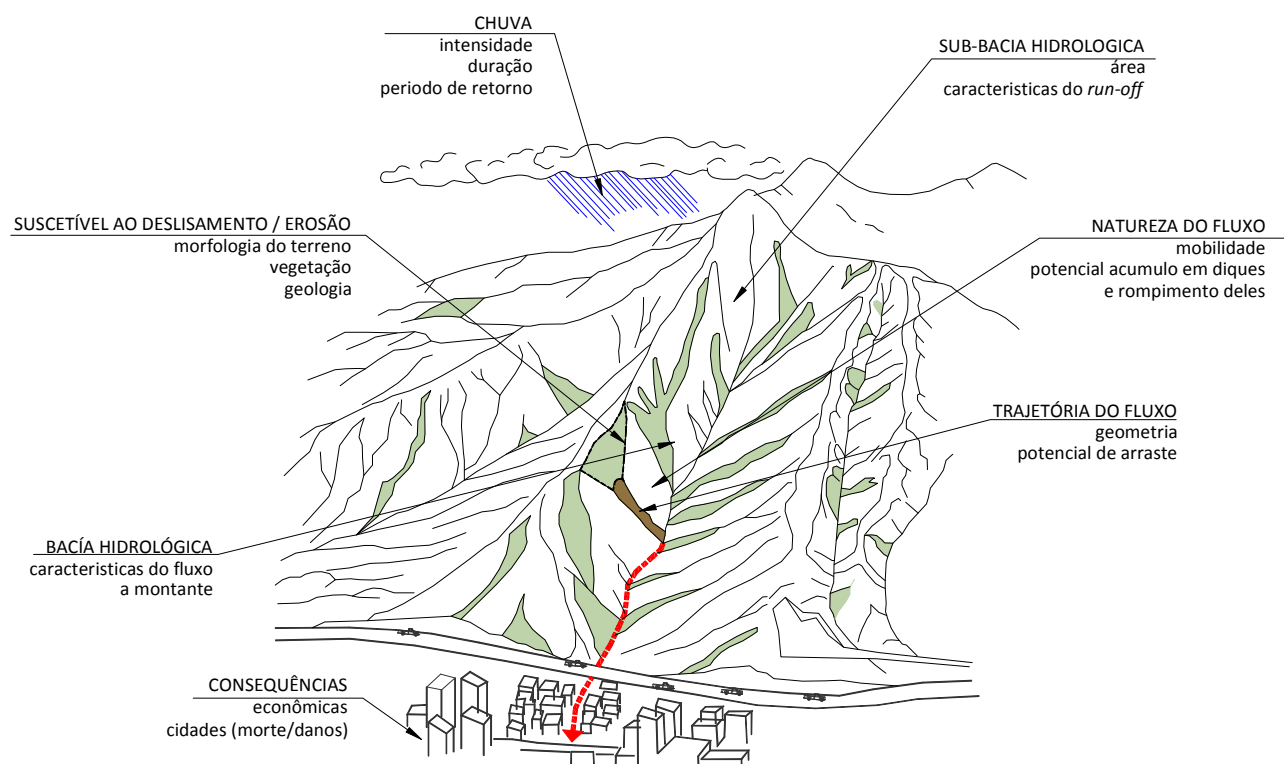


Figura 2.1 - Características das corridas de detritos (NETTLENTON *et al.*, 2005).

Conforme VANDINE (1996), o perfil de um talvegue ou córrego que tem potencial de deflagrar uma corrida pode se dividir em três zonas (Figura 2.2):

- (i) Zona de iniciação correspondente às áreas com declividades superiores a 25°;
- (ii) Zona de transporte e erosão que apresenta declividades maiores que 15°;
- (iii) Zona de deposição que pode ser dividida em zona de deposição parcial, na forma de diques, geralmente com uma declividade menor que 15°, e a zona de deposição final (*debris fan* ou leque de deposição) com declividades menores que 10°.

Outras declividades podem ser encontradas nestas zonas, em função de vários fatores, tais como: confinamento dos canais; composição e gradação dos detritos, que por sua vez depende da geologia da área; e quantidade de água. A zona de acumulação é

geralmente uma área de menor declividade, na qual o fluxo perde velocidade, formando um leque de deposição.

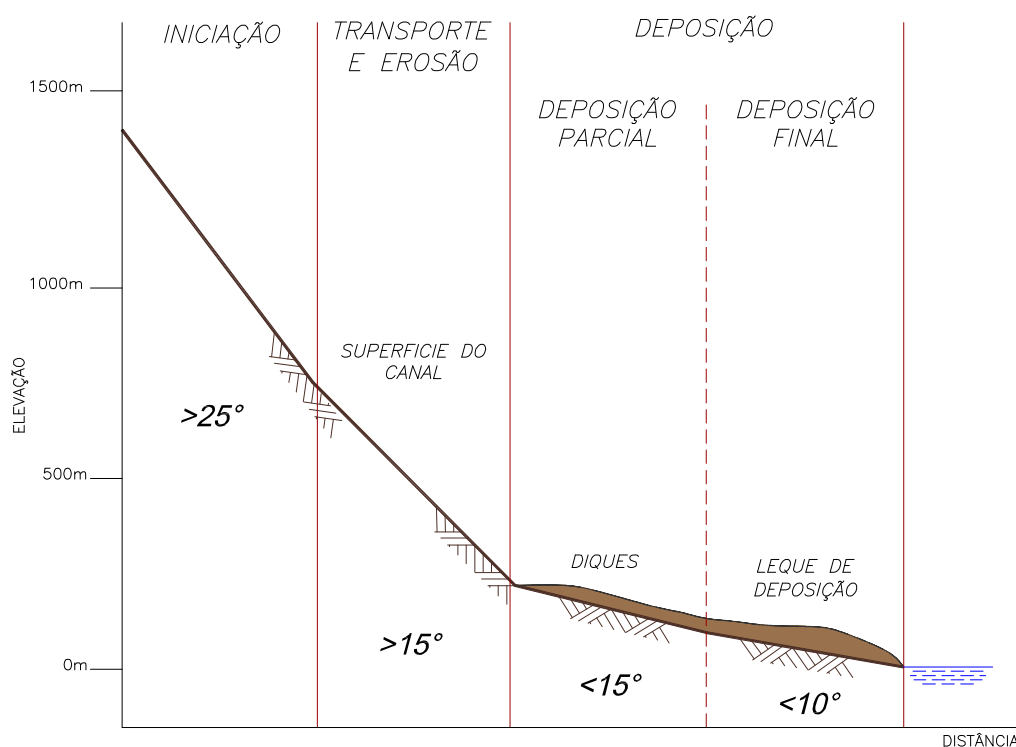


Figura 2.2 - Zonas numa corrida de detritos com fluxo canalizado (VANDINE, 1996).

Vários autores têm dado especial atenção à identificação de áreas de possível ocorrência de fluxo de detritos. A análise da vulnerabilidade a corridas de detritos tem empregado diferentes técnicas, tais como modelagens numéricas e físicas, bem como levantamentos de campo, objetivando determinar o local onde o fenômeno ocorre, como flui e como se deposita. Com o avanço tecnológico na área de geoprocessamento, o mapeamento de áreas de risco de deslizamento vem sendo cada vez mais popular. No entanto, muitos destes trabalhos consideram apenas os locais de ocorrência e não incluem as áreas de deposição, que são aquelas que sofrem os maiores prejuízos tanto sócio-econômicos como ambientais.

Além disto, observa-se a dificuldade de se especificar a seqüência de repetição do evento para fluxo de detritos. Esta seqüência se refere a movimentos que se iniciam numa área localizada e crescem ou se repetem numa determinada direção. VARNES

(1978) recomenda classificar a sequência do movimento por meio da seguinte terminologia:

- (i) Movimento Progressivo: a superfície de ruptura se estende na mesma direção do movimento;
- (ii) Movimento Retrogressivo: a superfície de ruptura se estende em direção oposta ao movimento;
- (iii) Movimento com ampliações: a superfície se estende na direção de uma ou outra margem nas laterais;
- (iv) Movimento com alargamento: a superfície de ruptura se alarga agregando continuamente volume de material movimentado. A superfície de falha pode se alargar numa ou mais direções e, portanto, o termo alargar pode ser usado indistintamente com o termo progressivo;
- (v) Movimento confinado: O movimento apresenta um desenvolvimento incipiente, existindo uma cicatriz, mas não um plano de ruptura visível na base da massa afetada. O deslocamento a montante é compensado pela compressão dos materiais envolvidos e não se prolonga muito para jusante.
- (vi) Movimento com diminuição: o material mobilizado em cada reativação tem, progressivamente, volume menor.

No entanto, observa-se que as corridas de detritos se encaixam em vários termos desta sequência, o que dificulta a identificação do movimento.

Os diferentes tipos de fluxos podem ser definidos em função do material movimentado, da velocidade de movimentação, da intensidade do movimento ou do potencial catastrófico.

Na classificação de GUIDICINI & NIEBLE (1984), modificada de Freire (1965), os fluxos são divididos em corrida de terra (menores graus de fluidez), corrida de areia ou silte (relacionada à liquefação), corrida de lama (extrema fluidez) e avalanche de detritos (movimentos catastróficos).

ORTIGÃO & KANJI (2004) consideram que os fluxos podem ser diferenciados em fluxo de lama (*mudflow*) quando compostos predominantemente por solos finos e em

fluxo de detritos (*debris flow*) quando contém uma faixa extensa de diâmetros de partículas.

Segundo EVANS (1982), o termo genérico *debris flow* pode ser amplamente dividido em *open slope debris flow* (ou fluxo livre) e *channelized debris flow* (fluxo canalizado).

A Figura 2.3, modificada de CRUDEN & VARNES (1996), mostra duas situações possíveis de deposição para fluxos de detritos aqui denominados de deposição livre e deposição canalizada. Observa-se que, no caso da deposição livre, há tendência de formação de leque ou cunha dependendo da topografia. No caso da deposição canalizada, o depósito tende a assumir a forma do canal.

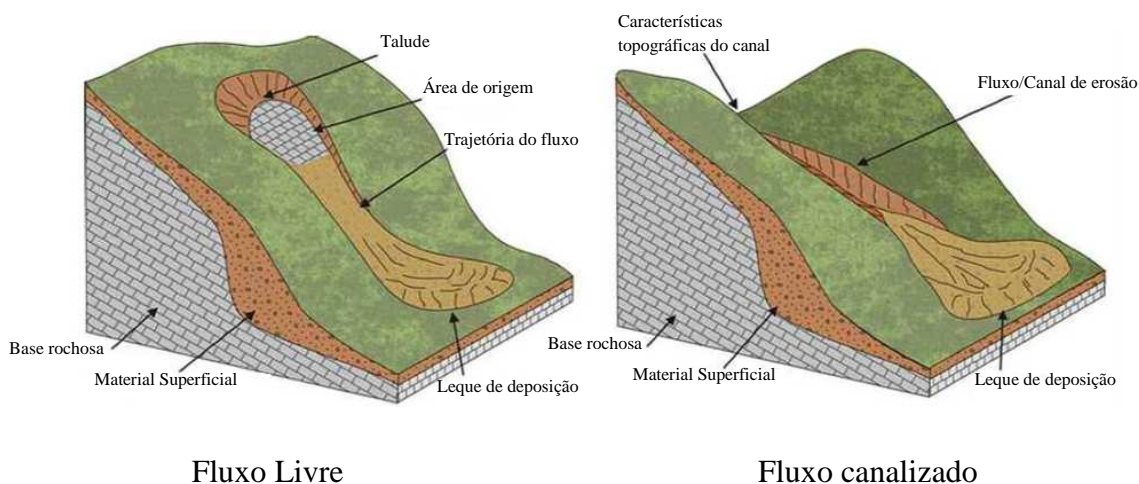


Figura 2.3 – Formas de deposição possíveis de fluxo de detritos livre e canalizado (NETTLETON *et al.*, 2005).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DE FLUXO DE DETRITOS

A classificação de fluxos de detritos exige uma revisão dos termos que descrevem os materiais envolvidos neste tipo de movimento. Contrariando a sugestão de VARNES (1978) e sua modificação (CRUDEN & VARNES, 1996), HUNGR *et al.* (2001) propõem a consideração de somente dois tipos de material de deslizamentos: *debris* (detritos), representados por mais de 20% de material rochoso e outros, e solo quando esta porcentagem de material rochoso é menor que 20%.

Desta forma, o termo solo deve representar um material argiloso sem classificação e colúvios derivados das argilas e rochas intemperizadas, com consistência mais perto do limite plástico que do limite líquido. Esta composição produz movimentos lentos a rápidos que deslizam com discretas superfícies de ruptura.

Geologicamente, o termo *mud* (lama) refere-se a um material argiloso líquido ou semi-líquido (BATES & JACKSON, 1984 e HUNGR *et al.*, 2001). Para HUNGR *et al.* (2001), o termo *mud* é usado para solos argilosos cuja matriz (areia e finos) é significativamente plástica (solos moles). 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), ou de atividade humana (exploração de minas). Em função da textura, os *debris* são uma mistura de areia, rocha, blocos de rocha geralmente com distintas proporções de silte e lama, podendo conter uma proporção significativa de material orgânico.

HUNGR *et al.* (2001) classificam os fluxos de detritos 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, afloramento de água, com grandes quantidades de detritos, confinado;
- (iv) Avalanche de detritos (*Debris avalanche*), movimento muito a extremamente rápido de material superficial, parcial ou totalmente saturado, sem confinamento em canal.

A classificação apresentada por HUNGR *et al.* (2001) possibilita desenvolver uma tipologia dos detritos, muito conveniente para investigações e/ou aplicação prática. Por exemplo, a distinção entre uma corrida de detritos e uma avalanche de detritos é extremamente importante em estudos de locais de risco. No caso de se confirmar uma área com potencial de fluxo de detritos, o estudo pode se concentrar no canal do movimento e no leque de deposição (SCHEIDL, 2009).

Por sua vez, a diferenciação entre um fluxo de detritos e corrida de lama deve considerar a concentração dos sedimentos, ou ainda os valores de vazão de pico observada ou estimada.

Mais recentemente, TAKAHASHI (2007) introduziu uma classificação modificada de movimentos de massa do tipo fluxo de detritos baseada nos mecanismos de ativação do fenômeno.

2.5 PARÂMETROS IMPORTANTES DE FLUXO DE DETRITOS

ZNAMENSKY (2001) considera três parâmetros importantes para a definição do fluxo de detritos: concentração, densidade e viscosidade. Estas três grandezas definem as propriedades físicas e reológicas dos fluxos de detritos e os diferenciam de outros movimentos de massa. Além disto, estes parâmetros informam a velocidade e a vazão do processo de escoamento e, portanto, determinam o volume das corridas.

2.5.1 Concentração de partículas sólidas

IVERSON (2001) define as corridas detríticas como uma massa formada por misturas de água, sedimentos finos, rocha e detritos originados nas encostas, indicando a importância do estudo da concentração de sedimentos numa corrida. Os resultados de experimentos chineses possibilitaram a proposição de uma classificação por concentração, apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação qualitativa de fluxos de detritos em função da concentração (HUNGR *et al.* 2005 e WANG *et al.* 2001).

Categoria	Classificação		Limite	Regime do Fluxo	Caráter do fluxo
Solo	-		-	Sólido	Fluxo Não-Newtoniano
Fluxo de detritos	Viscoso Fluxo de detritos	Alta	Limite plástico	Sub sólido	
		Media	Limite líquido	Laminar	
		Baixa			
	Sub viscoso Fluxo de detritos		Limite lama	Turbo-laminar	
Diluído Fluxo de detritos		Limite turbulento	Turbulento		
Hidráulica	Enxurrada	Turbulento			
	Fluido	Água	Fluxo Newtoniano		

As concentrações relatadas na literatura de amostras de depósitos de fluxos de detritos apresentam concentração volumétrica muito variável.

2.5.2 Velocidade do movimento

A determinação da velocidade de uma corrida de detritos é bastante complexa e muito mais difícil do que a determinação da velocidade de escoamento de água sem sedimentos. CRUDEN & VARNES (1996) sugerem uma escala de velocidade de deslizamentos, ressaltando que o fluxo de detritos pode ocorrer de forma extremamente rápida a lenta (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Classificação do fluxo de detritos em função da velocidade de deslizamentos (CRUDEN & VARNES, 1996).

Descrição	Classificação	Limites de velocidade	Resposta
Extremadamente rápido	7		Nula
Muito rápido	6	5 m/s	Nula
Rápido	5	3 m/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

2.5.3 Volume

O volume de uma corrida de detritos representa um dos principais parâmetros geométricos deste tipo de movimento. Na maioria dos casos, é um parâmetro de fácil determinação após a ocorrência da corrida de detritos. Os estudos desenvolvidos e grande parte das fórmulas empíricas encontradas na bibliografia provêm do estudo de eventos acontecidos e do volume medido em cada um deles.

JAKOB (2005) apresenta uma classificação de fluxo de detritos baseada na magnitude do movimento. São considerados volume, vazão e área inundável do fluxo de detritos e suas possíveis consequências (Tabela 2.5). É interessante notar a relação entre o volume e a vazão, muito explorada nas diversas formulações empíricas de fluxo de detritos. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam esquematicamente esta classificação.

Tabela 2.5 - Classificação das corridas de detritos em função do volume, vazão, área inundável e consequências (Modificado de JAKOB, 2005).

Classificação	Volume V (m³)	Vazão Q_b (m³/s)	Área inundável B_b (m²)	Possíveis Consequências
1	< 10 ²	< 5	< 4x10 ²	Danos muito localizados, pode ocasionar a morte de trabalhadores florestais em pequenos talwegues, danos em construções menores.
2	10 ² - 10 ³	5 - 30	4x10 ² - 2x10 ³	Destruição de carros, pequenas construções de madeira, árvores, bueiros, e descarrilamento de veículos.
3	10 ³ - 10 ⁴	30 - 200	2x10 ³ - 9x10 ³	Destruição de edifícios de maior dimensão, danos em pilares de pontes de concreto, bloco ou danos em rodovias e gasodutos.
4	10 ⁴ - 10 ⁵	200 - 1500	9x10 ³ - 4x10 ⁴	Destruição de aldeias, corredores de infraestrutura, pontes, poderia bloquear riachos.
5	10 ⁵ - 10 ⁶	1500 - 12,000	4x10 ⁴ - 2x10 ⁵	Destruição de partes das cidades, florestas de 2 km ² de área, penhascos e obstrução de rios.
6	10 ⁵ - 10 ⁶	Não observado	> 2x10 ⁵	Destruição de partes de cidades, vales ou até várias dezenas de km ² em tamanho, pequenas barragens.
7	10 ⁶ - 10 ⁷	Não observado	Não observado	Destruição de partes de cidades, vales ou até várias dezenas de km ² de área de barragem e grandes rios.
8	10 ⁷ - 10 ⁸	Não observado	Não observado	Destruição de cidades, inundações de grandes vales até 100 km ² de área da barragem e grandes rios.
9	> 10 ⁸	Não observado	Não observado	Vasta e completa destruição de centenas de km ² .

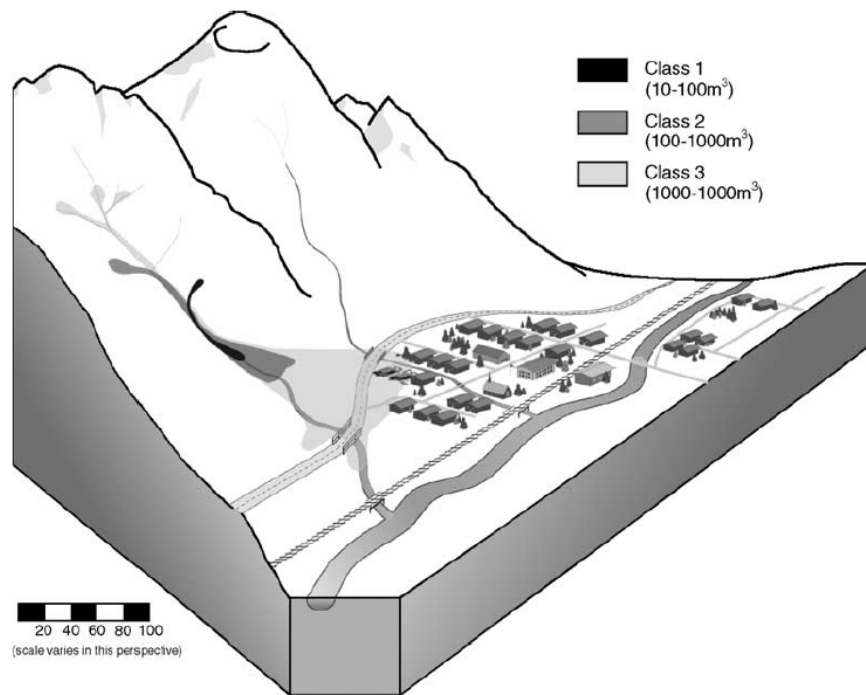


Figura 2.4 - Fluxo de detritos Classe 1 a 3 (JAKOB, 2005).

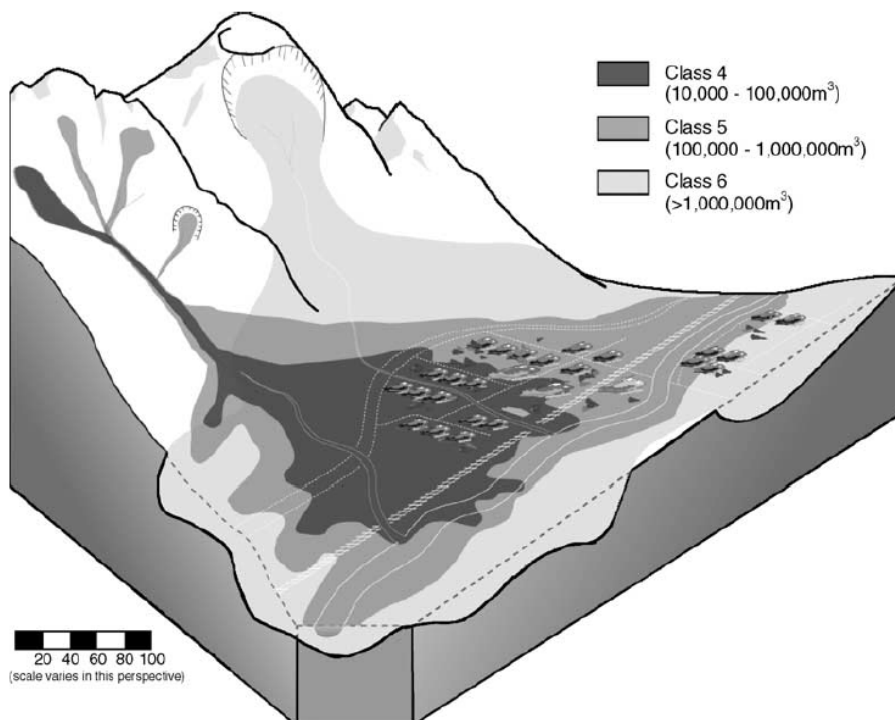


Figura 2.5 - Fluxo de detritos Classe 4 a 6 (JAKOB, 2005).

2.5.4 Vazão ou Descarga de pico

Um dos parâmetros mais importantes em fluxo de detritos é a descarga ou vazão de pico, visto que é diretamente relacionada à intensidade dos danos provocados pelo movimento. HUNGR (2000) escreve sobre a importância da vazão ou descarga de pico e a define como a característica mais importante de um fluxo de detritos, sendo a causa principal do surgimento de grandes ondas de arraste.

A vazão de pico pode ser o melhor parâmetro para distinguir uma corrida de detritos de uma avalanche de detritos (fluxo hiperconcentrado). Ambos são capazes de transportar grandes quantidades de sedimentos mal classificados. A vazão máxima de curta duração pode ser até 40 vezes maior do que a de uma inundação extrema (VANDINE, 1985).

A estimativa da vazão de pico é de vital importância para a análise dos fluxos de detritos, pois auxilia na determinação da velocidade máxima e profundidade do fluxo, impulso, forças de impacto, capacidade dos canais e das barreiras, assim como da distância atingida pelo movimento.

2.5.5 Distância percorrida de deposição

Quando a energia potencial do fluxo de detritos se transforma em energia cinética, a distância percorrida pelo movimento de massa pode ser relativamente grande. A literatura reporta várias relações entre o volume do fluxo de detritos e a distância percorrida. A análise destas relações permite resumir as seguintes observações:

- (i) A relação entre o volume e a distância percorrida depende do nível de umidade e/ou saturação dos materiais envolvidos;
- (ii) A distância percorrida geralmente aumenta com o volume do fluxo de detritos;
- (iii) A energia e a distância percorrida aumentam com a altura do deslizamento.

Em relação à energia, ressalta-se ainda que a energia produzida por um evento sísmico pode gerar energias cinéticas superiores às de um evento estático, como o acontecido na cidade de *Yungai* no Peru em 1970. Um violento sismo sacudiu o Monte *Huascarán*, provocando o desprendimento de gigantescos blocos de gelo, com velocidade média de 280km/h, gerando uma massa instável com volume de 50 a 100 milhões de metros cúbicos que percorreu 16 km, ocasionando a morte de 22.000 pessoas (Figura 2.7).



Figura 2.6 - Fluxo de detritos ocorrido no Monte *Huascarán*, Peru (*U. S. Geological Survey, 1970*).

2.6 DEFLAGRADORES DE FLUXO DE DETRITOS

O perigo pode ser definido como a probabilidade de ocorrência, dentro de um período específico de tempo e numa determinada área, de um fenômeno potencialmente prejudicial (VARNES, 1984). Assim, os parâmetros necessários para cada ponto em um mapa de risco são a probabilidade de ocorrência e magnitude do dano ou a intensidade do processo.

Geralmente, estes dois parâmetros são correlacionados em uma matriz de risco, visando representar o perigo qualitativamente por classes de grau de risco (por exemplo, baixa, moderada e alta) ou quantitativamente por um valor que varia de zero a unidade. De modo geral, utilizam-se as classes de risco qualitativas com a finalidade de ter uma melhor correlação, por exemplo, com outro tipo de classificação de riscos (sismos, inundações, etc.).

Um exemplo de uma matriz de risco qualitativa dos fluxos de detritos é dado na Tabela 2.6, onde risco é definido como uma função da probabilidade de ocorrência (P) e intensidade do fluxo de detritos (I). A probabilidade de ocorrência de fluxos de detritos futuro é normalmente determinada por diferentes cenários, que são baseados na relação magnitude-frequência (JAKOB, 2005).

A intensidade de um fluxo de detritos é geralmente definida pela energia potencial de impacto do fluxo. A vazão, velocidade e profundidade do fluxo têm sido também propostas como indicadores de impacto. A Tabela 2.6 apresenta dois exemplos de classificação de intensidade do fluxo de detritos propostas por BUWAL (1997) e RICKENMANN (2005b).

Tabela 2.6 – Exemplo de uma matriz de risco (RICKENMANN *et al.*, 2008).

Características do fluxo de detritos				Probabilidade de ocorrência, P		
	Buwal (1997)	Rickenmann (2005)		Alta	Media	Baixa
Intensidade, I	h > 1,0 m e v > 1,0 m/s	h > 1,0 m e v > 1,5 m/s	Alta	Alta	Alta	Moderado
	h < 1,0 m e v < 1,0 m/s	h < 1,0 m e 0,4m/s < v < 1,5m/s	Media	Moderado	Moderado	Baixa
	Não existe	h < 0,4 m e v < 0,4 m/s	Baixa	Baixa	Baixa	Muito baixa
Sem áreas afetadas				Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa
h: altura do fluxo (m) v: velocidade do fluxo (m/s)						

Uma corrida de detritos pode ser deflagrada por diversos motivos. KANJI *et al.* (2000) e GRAMANI & KANJI (2001) consideram os seguintes parâmetros importantes: chuva, inclinação da encosta, declividade do canal, área da bacia, altura da encosta, uso e ocupação/vegetação e aspectos geológicos. Cabe destacar que os aspectos geológicos incluem depósitos que indiquem a recorrência do fenômeno, o que é muito comum no caso de corridas de detritos. No caso das bacias do Quitite e Papagaio, por exemplo, observou-se a existência de antigos depósitos decorrentes de eventos anteriores nos locais de deposição atual (RODRIGUEZ, 2005).

A Figura 2.8 resume os principais agentes, limites e características de fluxo de detritos segundo GRAMANI (2001).

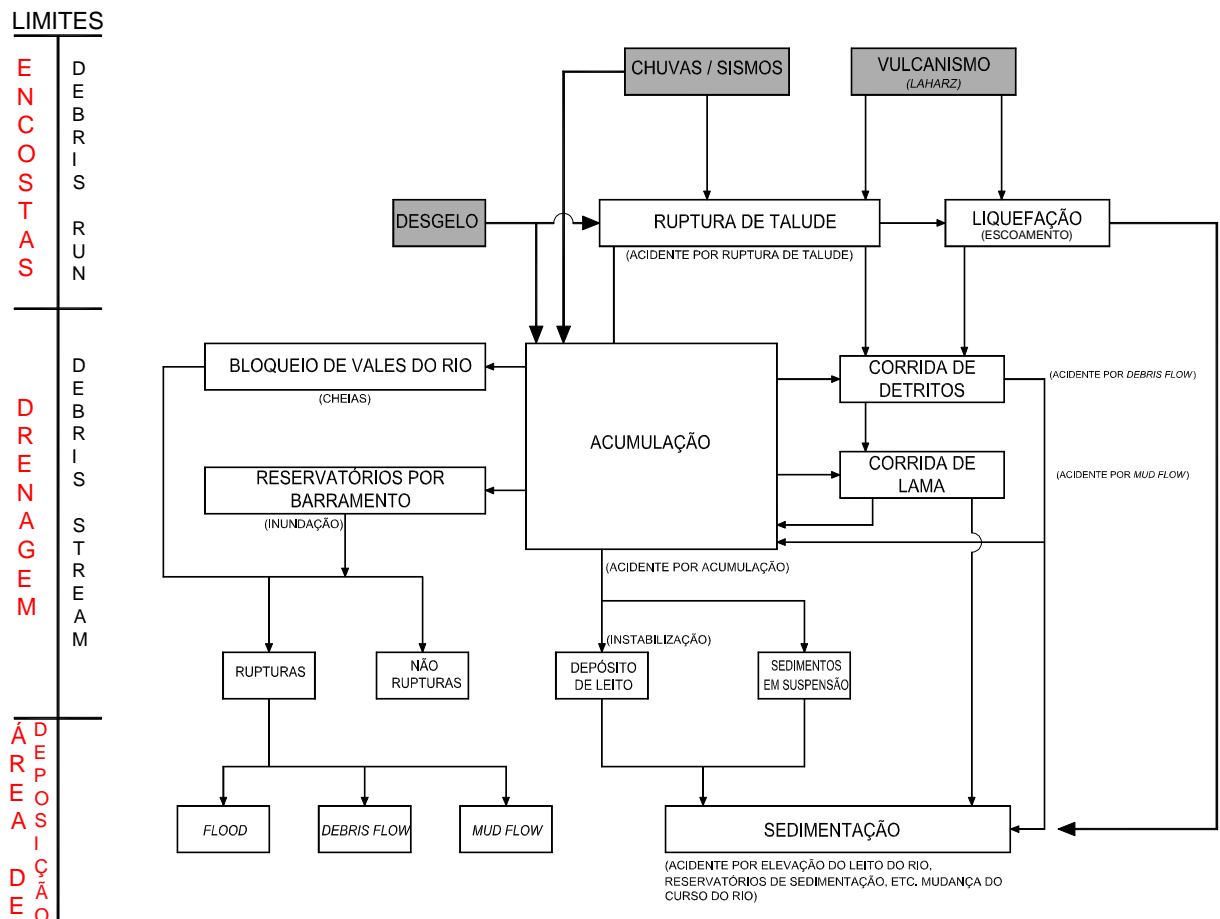


Figura 2.7 - Principais agentes deflagradores de movimentos de massa, locais de atuação e processos associados aos eventos (GRAMANI, 2001).

2.6.1 Umidade ou teor de água no solo

A umidade do solo tem uma importante influência na formação de uma corrida. As condições de umidade variam desde o estado úmido com porcentagem reduzida de água ao estado saturado. A massa pode comportar-se como um solo plástico (não líquido) a um solo com água suficiente para se comportar como um líquido e, portanto, com capacidade de fluir em declividades mínimas.

Um mecanismo de ação no qual a água pode iniciar uma corrida é representado pela precipitação, podendo ser uma precipitação intensa num período curto de tempo, ou uma precipitação média durante longos períodos de tempo. Este mecanismo é o principal detonador na maioria das corridas, pois o fluxo de água em materiais porosos aumenta a poro-pressão, reduzindo a sua resistência, além de auxiliar o transporte uma vez iniciado o movimento. Outros mecanismos deflagradores são representados pelo degelo, sismo e rompimento de uma barragem.

2.6.2 Estrutura geológica

A formação geológica do local do fluxo de detritos é um fator determinante no mecanismo instabilização, pois há ambientes que apresentam materiais passíveis de mobilização. Estruturas geológicas complexas, falhas ou dobras intemperizadas e sujeitas a atividades sísmicas, camadas não consolidadas e encostas instáveis são fontes primárias para a ocorrência de fluxo de detritos.

GRAMANI (2001) conclui que as litologias e as estruturas geológicas controlam a qualidade do maciço rochoso e, portanto, afetam diretamente na ocorrência de escorregamentos e fluxos de detritos. Influem ainda no tamanho e resistência das partículas.

2.6.3 Declividades da encosta

A declividade da encosta é um fator potencial para a ocorrência de fluxo de detritos. Quanto maior a inclinação, maior será a força de arraste. A Figura 2.8 ilustra

esquemáticamente quatro zonas distintas do movimento por fluxo de detritos. A Tabela 2.7 apresenta as relações entre a declividade da encosta e as características do movimento, proposta por TAKAHASHI (1991).

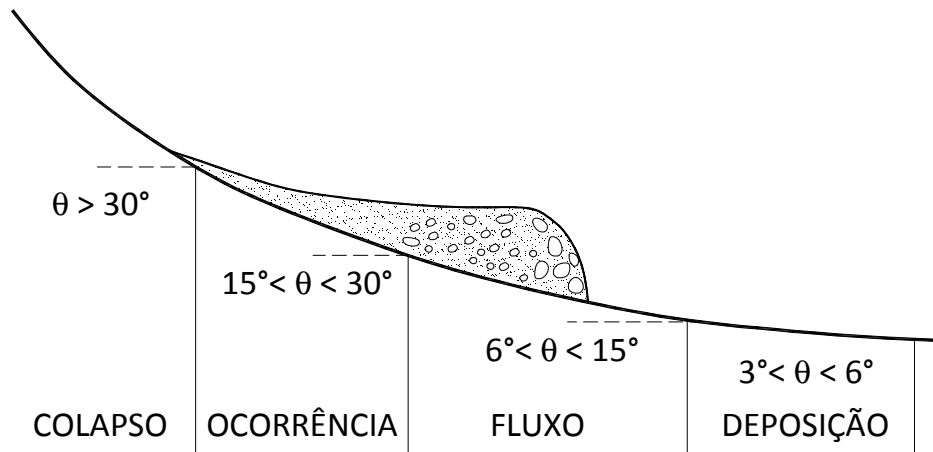


Figura 2. 8 - Caracterização da declividade e o movimento de uma corrida (WU, 2003).

Tabela 2.7 - Relação entre a declividade da encosta e as características do movimento (TAKAHASHI, 1991).

Ângulo	Características do Movimento
$20^\circ < \theta$	Ocorrência
$15^\circ < \theta < 20^\circ$	Início do fluxo
$10^\circ < \theta < 15^\circ$	Início de decréscimo da velocidade e continuação do fluxo
$3^\circ < \theta < 10^\circ$	Diminuição de velocidade e parada da região frontal do fluxo
$0^\circ < \theta < 3^\circ$	Deposição

Mais recentemente, RICKENMANN *et al.* (2008) apresentaram um método para distinguir os fluxos de detritos e os fluxos de talvegues de montanha. Baseia-se na área de captação máxima de 25 km² e uma declividade longitudinal mais pronunciada do que o intervalo entre 5 e 10%.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as definições de movimentos do tipo fluxo de detritos, suas características e parâmetros mais importantes, visando uma melhor compreensão do comportamento de fluxo de detritos e sua diferenciação em relação a outros movimentos de massa.

São apresentadas também diversas classificações de fluxo de detritos em função dos mecanismos de instabilização, concentração e densidade de sedimentos, velocidade, volume e vazão do movimento, área inundável e consequências. São também definidos os parâmetros mais importantes para a caracterização do fluxo de detritos, sendo eles o volume, a vazão de pico e a distância percorrida.

O capítulo também reporta os agentes deflagradores de fluxos de detritos e exemplos de matriz de risco e probabilidade de ocorrência do evento.

CAPÍTULO 3 – CASOS HISTÓRICOS E RELAÇÕES EMPÍRICAS

Nas duas últimas décadas do século XX, mais de 30 mil pessoas perderam suas vidas em acidentes, tais como terremotos, vulcões, inundações repentinas e movimentos de massa, especificamente avalanches e fluxos de detritos (SMITH, 2001). Associam-se às perdas humanas, bilhões de dólares em danos materiais, indicando que mais ênfase deve ser dada à avaliação e mitigação de tais riscos.

Um dos desastres mais devastadores em termos de vítimas e perdas econômicas tem sido atribuído aos fluxos de detritos (JAKOB & HUNGR, 2005).

Neste capítulo são apresentados os casos históricos ocorridos em diversos locais do mundo que ilustram a capacidade destrutiva do fluxo de detritos e, portanto, o perigo que tal fenômeno representa. Ainda são apresentadas as relações empíricas para estimativa de parâmetros de fluxo de detritos, provenientes da observação e estudos destes eventos analisados por diversos autores em distintos locais do mundo.

3.1 CASOS HISTÓRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS NA EUROPA, ÁSIA E AMÉRICA DO NORTE

3.1.1 Fluxo de detritos na Europa

É frequente a publicação de artigos sobre estudos de casos de fluxos de detritos registrados em vários países europeus tais como Áustria, Alemanha, França, Espanha e Itália, pois a recorrência destes eventos permitiu o desenvolvimento de vários estudos e pesquisas de métodos de monitoramento, controle e contenção de fluxos de detritos.

Nos Alpes Europeus, os fluxos de detritos são comuns e ameaçam centenas de povoados localizados nas áreas de deposição dos talwegues destas montanhas. Já em 1910, Stiny escrevia no prefácio de seu livro, *“Apenas outra força da natureza destrói grande parte do valor econômico da nossa montanha, a desastrosa atividade das*

torrentes, que alcançam seu ponto culminante e catastrófico na liberação dos fluxos de detritos” (SKERMER & VANDINE, 2005).

Os primeiros estudos sobre fluxos de detritos foram desenvolvidos em função dos eventos dos Alpes Europeus, visando desenvolver medidas de proteção e prevenção destes desastres. A Tabela 3.1 apresenta os casos analisados por RICKENMANN (1999).

Tabela 3.1 - Casos de fluxos de detritos analisados por RICKENMANN (1999).

Região (País)	N*	Volume mínimo (m ³)	Volume máximo (m ³)	Descarga mínima (m ³ /s)	Descarga máxima (m ³ /s)	Referência
Alpes Suíços	11	4.000	60.000	120	650	[1]
Montanhas Rochosas (Canadá)	23	1.500	3.000.000	10	70.000	[2]
Vale Kamikamihori (Japão)	26	214	14.800	13	124	[3]
Jiangia (China)	33	400	999.000	46	3.133	[4]
Monte St. Helens (USA)	3	810	8.000	25	68.000	[5]
Outros casos (incluindo mov. vulcânicos)	22	6.000	70.000.000	15	48.000	[6]
Canal artificial (USG)	4	10	-	2,00	-	[7]
Fluxos em laboratório	26	0,005	0,02	0,001	0,01	[8]

* Número de casos analisados para cada local.

[1] Rickenmann & Zimmermann (1993). M. Zimmermann *et al.* (1996)

[2] Hungr *et al.* (1984); VanDine (1985), M. Jakob *et al.* (1995)

[3] Okuda & Suwa (1981); H. Suwa *et al.* (1997)

[4] M. Jakob *et al.* (1995); Z. Wang *et al.* (1997)

[5] Pierson (1985); Pierson (1986)

[6] Arattano *et al.* (1996), Aulitzky (1970), Gallino & Pierson (1985), Han & Wang (1996), Harris & Gustafson (1993), Kermculov & Zuckerman (1983), Pierson (1980), Pierson (1995), Rutherford *et al.* (1994), Watanabe & Ikea (1981), Webb *et al.* (1988)

[7] Iverson & LaHusen (1993)

[8] Davies (1994)

Inúmeros casos de fluxos de detritos têm afetados as cidades dos Alpes Europeus durante anos. Estes casos têm sido documentados por MONTANDON (1993) e EISBAHER & CLAGUE (1984). Várias destas cidades têm uma longa história de atividade de fluxo de detritos. Um caso mencionado por SKERMER & VANDINE (2005) corresponde ao povoado de *Meiringen* situado ao norte do *Passo de Grimsel* no lado este do *Rio Aare* na Suíça. Este povoado foi completamente enterrado por um fluxo de detritos em 1764, originado na bacia de *Alpbach*, um afluente do *Rio Aare*.

Conforme SCHRAML (2007), na Áustria foram registrados 39 eventos torrenciais entre 1938 e 2005, que incluem 12 fluxos de detritos com volumes variando entre 5500 a 450000 m³, assim como 27 enxurradas de detritos e fluxos de sedimentos com volumes de 2730 a 500000 m³.

No verão de 1987 na Suíça, foram registrados 150 a 300 mm de chuva em 40 horas, correspondendo a uma precipitação de intensidade média a alta e longa duração. Isto ocasionou 35 eventos de fluxos de detritos com volumes entre 2000 a 214000 m³ (VAW, 1992; RICKENMANN & ZIMMERMANN, 1993).

Nos Alpes do Norte, principalmente na Suíça central, fortes precipitações em agosto de 2005 causaram grandes fluxos de detritos e deslizamentos de terra (BEZZOLA & HEGG, 2007; RICKENMANN *et al.*, 2008a; RICKENMANN *et al.*, 2008b). Nesse período foram registrados 15 eventos de fluxos de detritos com volumes variando entre 6000 a 400000 m³. Muitas das medidas usadas na mitigação de fluxo de detritos nos Alpes Europeus foram também implantadas na Índia, especificamente para os eventos no Himalaia.

Igualmente na Itália, desde 1999 até 2005 foram registrados 44 fluxos de detritos com volumes variando entre 1000 até 30000 m³ (SCHEILD, 2009).

A Figura 3.1 apresenta a localização dos fluxos de detritos descritos e a Tabela 3.2 apresenta um resumo das características destes eventos.

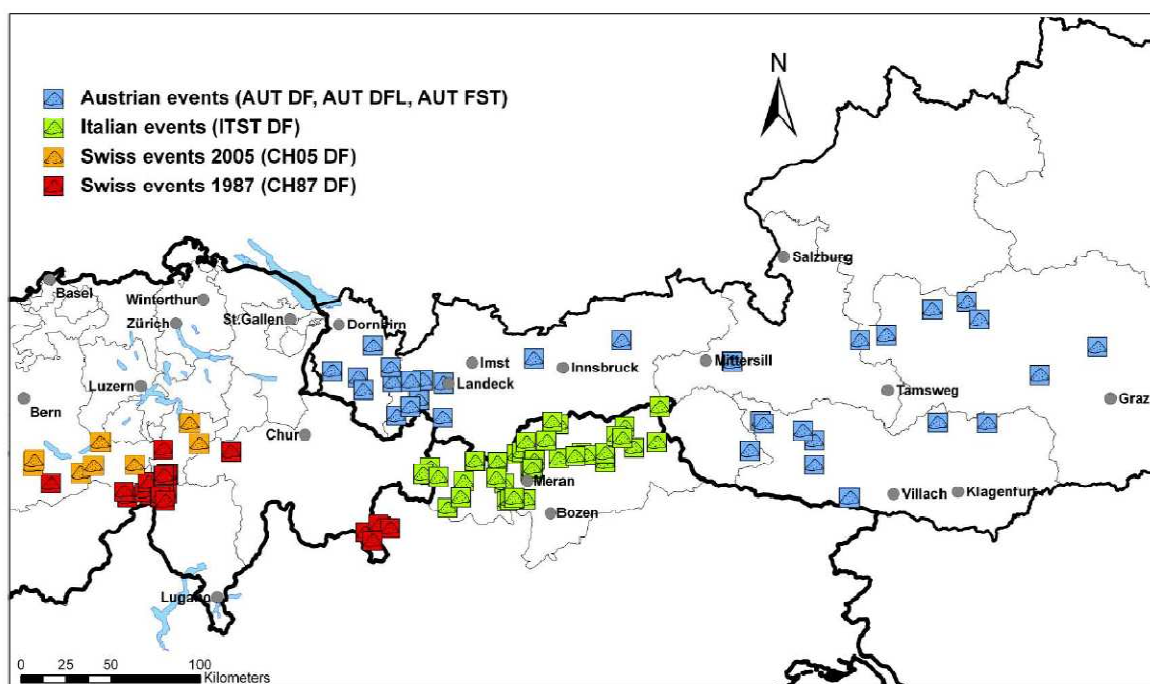


Figura 3.1 - Casos de fluxos de detritos na Áustria, Suíça e Itália (SCHEIDL & RICKENMANN, 2009).

Tabela 3.2 - Características dos casos de fluxo de detritos na Áustria, Itália e Suíça (SCHIEDL & RICKENMANN, 2009).

Região	N	Chuva Registrada (mm)	Volume mínimo (m ³)	Volume máximo (m ³)	Referência
Eventos Austríacos	12	-	5.500	450.000	SCHRAML (2007)
Eventos Italianos	44	-	1.000	30.000	SCHIEDL & RICKENMANN (2009)
Eventos Suíços 1987	35	150-300 em 40h	2.000	214.000	VAW (1992)
Eventos Suíços 2005	15	-	6.000	400.000	BEZZOLA (2007) RICKENMANN (2008a e 2008b)

N: Número de casos analisados para cada local.

3.1.2 Fluxo de detritos na Ásia

SKENER & VANDINE (2005) reportam que o vale *Pokhara*, a oeste do Nepal, sofreu dois fluxos de detritos que datam do final da última glaciação, cobrindo por completo a região e os rios tributários e gerando a formação de lagos, que na maioria encontram-se totalmente assoreados. Os fatores deflagradores destes dois eventos catastróficos não são conhecidos, mas sugerem-se que estes podem ter sido provocados por uma forte tormenta, precipitações elevadas, terremotos, quedas de rochas ou gelo (FORT, 1987).

O Japão é bem conhecido pela elevada ocorrência de fluxos de detritos e também pelas estruturas de controle desenvolvidas. Encostas montanhosas e muito íngremes, susceptibilidade a sismos e vulcões, além de fortes chuvas provocadas por tufões fazem do Japão um local favorável à formação de fluxos de detritos. Porém, é sem dúvida um dos países que mais investe em pesquisas e obras de engenharia de fluxos de detritos. Nos últimos 40 anos, os resultados das pesquisas e a experiência em obras têm sido usados em outros países tais como Indonésia, Nepal, Filipinas, Costa Rica, Honduras, Venezuela, Peru, Áustria, Estados Unidos e Canadá. (MATSUSHITA, 1999).

Em 2000, o Japão apresentou um decreto com leis referentes à prevenção de desastres relacionada a sedimentos (*The sediment related disaster prevention laws*). Estas leis promovem um sistema não estrutural de prevenção de desastres através da disseminação de informação de áreas de risco, restrição de crescimento urbano nessas áreas e o desenvolvimento de sistemas de alerta e evacuação (ONDA, 2001; KONDO, 2002; SKENER & VANDINE, 2005).

Embora pouco se saiba sobre os fluxos de detritos na história da China, pelo menos para o mundo exterior, sabe-se da ocorrência passada deste tipo de movimento nesse país. Uma área particular com um longo histórico de fluxos de detritos é *Jiangjia Ravine* na província de *Yunnan*, que produziu fluxos gigantes de detritos e lama com cerca de 3 a 5 milhões de m³ durante os últimos 300-400 anos desde que a floresta foi removida.

A maioria dos fluxos de detritos acontecidos na China é acionada por chuvas intensas, sem contar que a área é caracterizada por intenso tectonismo. O caso de *Jiangjia Ravine*

tem atraído uma atenção global em função da recorrência de fluxos de detritos de grande porte provocados por episódios de fortes chuvas. A Figura 3.2 apresenta um mapa dos fluxos de detritos em diversas bacias da China.

A Tabela 3.3 apresenta uma comparação entre relações propostas para fluxo de detritos no Japão e a China que auxiliam na comparação dos eventos nos dois países (MIZUHARA, 1994). Estas expressões relacionam parâmetros como volume de sedimentos ou detritos transportados, vazão máxima de água e área da bacia. É interessante observar que as relações são similares, independentemente do país onde foram registrados os eventos de fluxo de detritos.

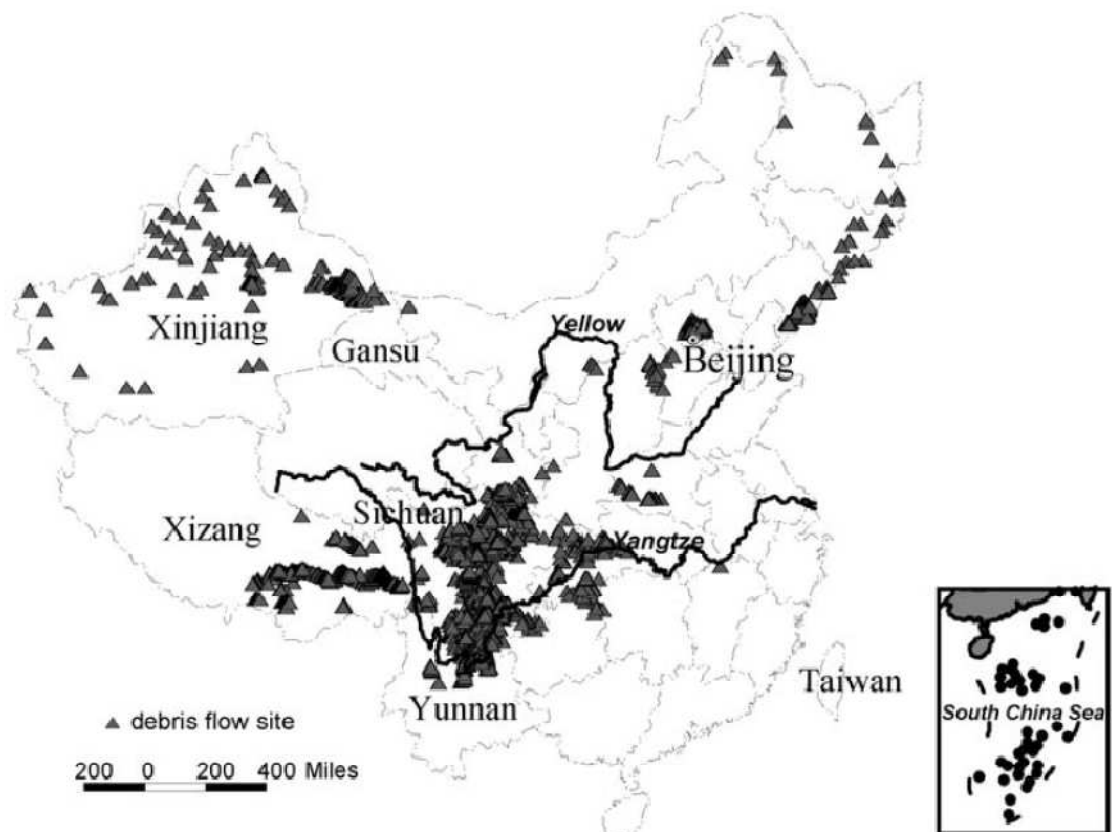


Figura 3.2 - Fluxos de detritos em diversas bacias da China (CHEN *et al.*, 2005).

Tabela 3.3 - Comparação entre relações empíricas de volume de fluxo de detritos do Japão e China (MIZUHARA, 1994).

Japão	China
$V_d = 1.17 * 10^4 * A^{0.599}$	$V_d = 1.73 * 10^4 * A^{0.808}$
$V_d = 1.51 * 10^4 * A_{15}^{0.546}$	-
$V_d = 2.05 * 10^3 * Q_{máx}^{0.639}$	$V_d = 1.58 * 10^3 * Q_{máx}^{0.724}$
$V_d = 6 * V_s^{0.761}$	$V_d = 24.3 * V_s^{0.543}$
$V_d = 4440 * A_{15}^{0.287} * Q_{máx}^{0.364}$	$V_d = 3501 * A_{15}^{0.565} * Q_{máx}^{0.399}$
V_d : volume de sedimentos transportados (m ³) V_s : volume de detritos escorregados (m ³) $Q_{máx}$: vazão máxima de água (m ³ /s) A_{15} : área da bacia com declividades superiores a 15° (km ²) A : área da bacia (km ²)	

3.1.3 Fluxo de detritos nos Estados Unidos e Canadá

Um dos casos mais conhecidos é o fluxo de detritos das encostas do Monte Santa Helena. O Monte Santa Helena nos Estados Unidos é um vulcão de grandes dimensões. O evento mais estudado e mais amplamente relatado na bibliografia corresponde ao evento do dia 18 de maio de 1980. Neste evento estimou-se um volume mobilizado de aproximadamente $2,8 \times 10^9$ m³ de lama e detritos. VOIGTH *et al.* (1983) apresentam maiores detalhes deste fluxo de detritos, incluindo um esquema do processo de desencadeamento do movimento.

GRAMANI (2001) apresenta uma relação das principais áreas de estudos nos Estados Unidos representadas pelo Arizona, Califórnia, Colorado, Hawaii, Oregon, região do *Grand Canyon*, Virginia e Utah, destacando-se, portanto, a porção oeste do país.

A Tabela 3.4 apresenta a compilação de casos de fluxos vulcânicos e de detritos acontecidos nos Estados Unidos estudados por IVERSON *et al.* (1998).

Tabela 3.4 - Fluxos vulcânicos e de detritos nos Estados Unidos analisados por IVERSON *et al.* (1998).

Evento	Local e data	Referência	Volume (m³)	Seção Transversal de inundação A (m²)	Área planialtimétrica de inundação B (m²)
<i>Osceola</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 5000 B.P.	Vallance & Scott, 1999	4.000.000.000	150.000	550.000.000
<i>Electron</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 530-550 B.P.	Crandell, 1971	250.000.000	37.000	60.000.000
<i>Round Pass</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 2700 B.P.	Crandell, 1971	200.000.000	N.D.	50.000.000
<i>Dead Man Flat</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 1100 B.P.	Scott et al., 1995; Vallance *	180.000.000	14.000	90.000.000
<i>National</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 500-1800 B.P.	Scott et al., 1995; Vallance *	150.000.000	10.000	78.000.000
<i>Paradise</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 4500-5000 B.P.	Crandell, 1971	100.000.000	N.D.	34.000.000
<i>Zigzag</i>	Monte <i>Hood</i> , EUA 1700 B.P.	Vallance*	73.000.000	12.000	55.000.000
<i>Trout Lake</i>	Monte <i>Adams</i> , EUA 6000 B.P.	Vallance, 1998	66.000.000	N.D.	27.000.000
<i>Middle Fork Nooksack</i>	Monte <i>Baker</i> , EUA 6000 B.P.	Hyde & Crandell, 1978	50.000.000	N.D.	20.000.000
<i>Kautz Creek</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA, 1947	Crandell, 1971; Scott & Vallance, 1995	40.000.000	5.000	4.500.000
<i>Salt Creek</i>	Monte <i>Adams</i> , EUA 200 B.P.	Vallance, 1998	15.000.000	N.D.	16.000.000
<i>Tahoma</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA 400-500 B.P.	Scott et al., 1995	15.000.000	19.000	6.000.000
<i>Pine Creek + Muddy River</i>	Monte <i>St. Helens</i> , EUA, 1980	Pierson, 1995	14.000.000	2.100	18.000.000
<i>South Fork Toutle</i>	Monte <i>St. Helens</i> , EUA, 1980	Jancia et al., 1981; Fairchild & Wigmosta, 1983	12.000.000	1.500	30.000.000
<i>Whitney Creek</i>	Monte <i>Shasta</i> , EUA, 1935	Osterkamp et al., 1986	4.000.000	N.D.	8.000.000
<i>Bolum Creek</i>	Monte <i>Shasta</i> , EUA, 1897	Osterkamp et al., 1986	1.500.000	N.D.	3.000.000
<i>Tahoma Creek</i>	Monte <i>Rainer</i> , EUA, 1988	Walder & Driedger, 1994; Walder*	600.000	190	1.000.000
<i>Blue Lake</i>	Monte <i>St. Helens</i> , EUA, 1980	Major, 1984; Major, & Voigth, 1986	380.000	320	750.000
<i>Butte Canyon</i>	Monte <i>St. Helens</i> , EUA, 1980	Major, 1984; Major, & Voigth, 1986	380.000	300	500.000
<i>Middle</i>	Monte <i>St. Helens</i> , EUA, 1980	Major, 1984; Major & Voigth, 1986	140.000	N.D.	400.000
<i>Polallie Creek</i>	Monte <i>Hood</i> , EUA, 1980	Gallino & Pierson, 1984; Pierson*	80.000	300	470.000

Tabela 3.4 (cont.) - Fluxos vulcânicos e de detritos nos Estados Unidos analisados por IVERSON *et al.* (1998).

Evento	Local e data	Referência	Volume (m ³)	Seção Transversal de inundação A (m ²)	Área planialtimétrica de inundação B (m ²)
<i>West Dodson</i>	<i>Columbia George, Oregon, EUA, 1996</i>	Iverson*	80.000	90	100.000
<i>Mayflower Gulch</i>	<i>Tenmile Range, Colorado, EUA, 1961</i>	Curry, 1966	17.000	30	160.000
<i>Oddstad</i>	<i>Pacífica, Califórnia, EUA, 1982</i>	Howard et al., 1988	2.300	15	N.D.
<i>Big Bend</i>	<i>Pacífica, Califórnia, EUA, 1982</i>	Howard et al., 1988	660	5	N.D.
<i>Yosemite</i>	<i>Pacífica, Califórnia, EUA, 1982</i>	Howard et al., 1988	610	11	N.D.
Ensaio de fluxo USGS	30 experimentos, 1993-1996	Major, 1996; Iverson, 1997	10	0,4-0,6	200-300

* Dados não publicados

Já no Canadá, a região de *British Columbia* é conhecida pela ocorrência de fluxos de detritos em bacias pequenas e de inclinações favoráveis ao transporte e ao escoamento das partículas que se concentram nas águas provenientes da precipitação e do degelo. GRAMANI (2001) ressalta que a *British Columbia* é a área de melhor documentação de *debris torrent* no Canadá, e apenas recentemente (década de 80) se fez a distinção entre processos de fluxos de detritos (*debris flows, water floods, mudslides, mudflows e landslides*).

VANDINE (1985) apresenta uma compilação das principais ocorrências de fluxos de detritos no Canadá, totalizando 34 casos. Considera o fenômeno comum e natural em Alberta, *Yucon* e *British Columbia*.

Na Tabela 3.5 são apresentados os casos analisados por IVERSON *et al.* (1998) no Canadá para fluxos vulcânicos na tentativa de achar similaridade com o comportamento dos fluxos de detritos.

Tabela 3. 5 - Fluxos vulcânicos e de detritos acontecidos no Canadá analisados por IVERSON *et al.* (1998).

Evento	Local e data	Referência	Volume (m ³)	Seção Transversal de inundação A (m ²)	Área planialtimétrica de inundação B (m ²)
B1	<i>Nigel Pass</i> , Canadá, recente	Owens, 1972	300	3	2.000
N32	<i>Nigel Pass</i> , Canadá, recente	Owens, 1972	100	3	600
N2	<i>Nigel Pass</i> , Canadá, recente	Owens, 1972	10	1	200

3.2 CASOS HISTÓRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS NA AMÉRICA LATINA

3.2.1 Fluxo de detritos no Peru

Um caso de fluxos de detritos, que remonta a 3000 anos atrás, refere-se ao evento ocorrido na área conhecida como *Patrimônio Mundial Chavin de Huantar* no Peru, a 250 quilômetros ao norte de Lima (BURGER, 1984). Chavin de Huantar é um dos centros mais importantes da civilização Pré-Inca, com uma população máxima estimada de 2000 habitantes, localizada na junção do Rio *Huachesca* e o Rio *Mosna*.

A cidade representa o maior centro para o estudo das primeiras sociedades andinas e local de importantes escavações arqueológicas, ao longo dos últimos 80 anos. Entretanto, a ocorrência destes fluxos de detritos tem dificultado as escavações. Por exemplo, em 1945, o colapso de uma barragem provocou um forte fluxo de detritos que desceu pelo Rio *Huachesca*, cobrindo a parte sul da cidade com depósitos de até 4 metros de espessura.

Fluxos de detritos são bem conhecidos na história peruana. Este fenômeno é chamado em língua nativa por *huaico*, que corresponde a uma mistura de partículas de diversos tamanhos, incluindo rochas, areia e lama. Este termo foi publicado por SUTTON (1933), ao descrever as condições de fluxos de detritos observadas nos Andes Peruanos.

CHANG & HURTADO (1991) apresentam alguns dos eventos catastróficos acontecidos no Peru, os quais são listados na Tabela 3.5.

Tabela 3.6 - Alguns eventos acontecidos no Peru (CHANG & HURTADO, 1991).

Nome	Data	Descrição
<i>Aluvión de Huaraz</i>	13/12/1941	Ruptura do dique na lagoa <i>Cojup</i> a 4500m originando uma avalanche de gelo e água, formando ondas gigantes que destruíram a barragem a jusante. Volume de cerca de 810.10^6 m ³ . Destruição parcial da cidade de <i>Huaraz</i> .
<i>Aluvión de Chavin de Huantar</i>	17/01/1945	Repentino deslizamento de rochas e gelo do <i>Cerro Huatsán</i> ; deslocou água das lagoas de <i>Ayhuiñaraju</i> e <i>Carhuacocha</i> , nas nascentes do vale sepultando várias pessoas.
<i>Aluvión de Ranrahirca</i>	10/01/1962	Massa de gelo do Nevado <i>Huascarán</i> se desprende a uma velocidade 100km/h, atingindo o vale do Rio Santa a 30 km/h. Extensão de 16km e desnível de 4km. Volume estimado em 12.10^6 m ³ , altura de depósito de 3 a 4m numa área de 440 ha.
<i>Aluvión de Yungay y Ranrahirca</i>	31/06/1970	Após sismo, uma enorme massa de gelo e rochas se desprende do cume do Pico Norte do Nevado <i>Huascarán</i> . Velocidade de 400km/h, volume estimado de 1.10^6 m ³ em queda livre de 1000m. Cerca de 30.000 pessoas perderam a vida (Figura 3.3).
<i>Derrumbe de Mayunmarca</i>	25/05/1974	Repentino acidente em <i>Huancavelica</i> , velocidade de 140km/h, arrasando em 3 minutos a fazenda <i>Mayunmarca</i> e cobrindo outras 2 fazendas. 460 pessoas mortas, terras agrícolas perdidas e 30 km de rodovias destruídas.

Recentemente, mapas de risco de varias regiões vêm sendo elaborados pelo *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico* (Peru). Na Figura 3.4 apresenta-se uma imagem de fluxo de detritos recente acontecido em de janeiro de 2010 em Cuzco (Peru).

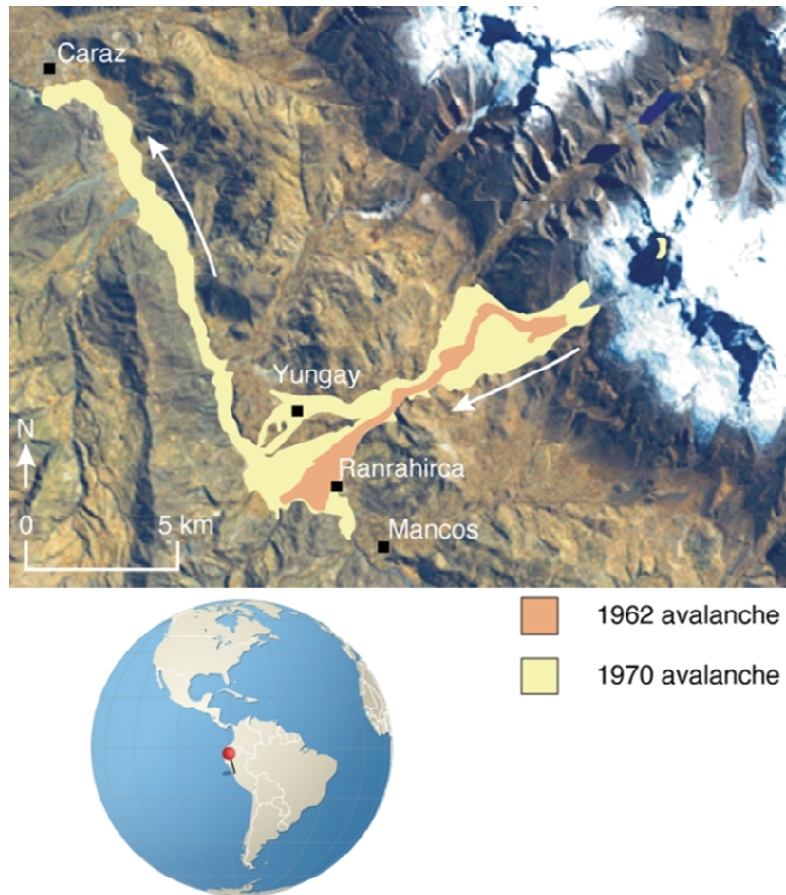


Figura 3. 3 - Áreas atingidas pelos fluxos de detritos de *Huascáran* após os eventos de 1962 e 1970.



Figura 3.4 - Fluxo de detritos em Cuzco, Peru ([www.flickr.com/photos/josevidal/4797615203/in/set – 72157624510270492](http://www.flickr.com/photos/josevidal/4797615203/in/set-72157624510270492)).

3.2.2 Fluxo de detritos na Venezuela

Um dos mais espetaculares eventos de fluxos de detritos na história latino-americana ocorreu em Dezembro de 1999 na costa norte da Venezuela na América do Sul, como mostra a Figura 3.5. Uma alta intensidade de chuva induziu numerosos fluxos de detritos simultâneos em 24 córregos/talvegues em uma faixa de 50 km no litoral norte do estado de Vargas, Venezuela, resultando na devastação e destruição de muitas áreas habitadas na costa e a perda de milhares de vidas (WIECZOREK *et al*, 2001; GARCIA-MARTINEZ & LOPEZ, 2005). Foram registrados valores extremos de precipitação durante os dias 14 a 16 de dezembro de 1999, precedidos por chuva persistente de baixa intensidade do dia 1 a 13 de dezembro, a qual também desempenhou um papel importante no evento. Medições na estação em *Maiquetia* indicaram precipitação de 293mm até o dia 13 de dezembro, que corresponde a mais da metade da média anual (GARCIA-MARTINEZ & LOPEZ, 2005). Com a chuva persistente, as rochas metamórficas e sedimentares saturadas subjacentes à bacia da montanha de Ávila (de declividades acentuadas) perderam ou sofreram redução significativa de resistência. As camadas de rochas se romperam subitamente durante a tempestade do dia 16 de dezembro, formando fluxos de detritos e inundações de proporções catastróficas.



Figura 3.5 - Fluxo de detritos com leque de deposição de 5m de espessura em *Carabellada*, Venezuela (SMITH, 1999).

3.2.3 Fluxo de detritos no Brasil

GRAMANI (2001) apresenta 16 casos de eventos de fluxos de detritos acontecidos no Brasil. Um resumo das características destes eventos é apresentado na Tabela 3.6.

Os fluxos de detritos ocorridos em diversos locais do Brasil têm sido amplamente estudados, permitindo conhecer os principais parâmetros e características envolvidos. Porém muitos destes parâmetros foram estimados ou calculados mediante a aplicação de diferentes relações empíricas. GRAMANI (2001) descreve estes eventos, objetivando ressaltar as principais características dos fluxos de detritos no Brasil.

O fluxo de detritos acontecido na Serra das Araras em janeiro de 1967 na cidade do Rio de Janeiro, envolveu uma enorme movimentação de solo, rocha e matéria orgânica pelas encostas e canais de drenagem, provocada por fortes chuvas. GRAMANI (2001) ressalta que o ano de 1967 foi um ano anormalmente chuvoso. Nesse mesmo ano, outro fluxo de detritos foi deflagrado na cidade de Caraguatatuba, São Paulo. Neste caso foram registrados deslizamentos com características de grande violência. Os escorregamentos na Serra de Caraguatatuba foram governados pelos altos declives associados às chuvas extraordinárias do que pela natureza das rochas ou interferências antrópicas na área GRAMANI (2001). Este acidente é considerado o maior desastre natural ocorrido em território brasileiro por uma série de pesquisadores com grau de destruição elevado (Figuras 3.6 e 3.7).

O fluxo de detritos no local conhecido como Viaduto IV, na cidade de São Paulo em 1971, foi composto principalmente de lama e blocos de rochas de diversas dimensões, que geraram uma grande energia, destruindo o viaduto e atingindo também a estrada de ferro Santos-Jundiaí.

O evento de fluxo de detritos registrado no estado de Santa Catarina em 1974, especificamente na Bacia do Rio Tubarão, foi deflagrado após fortes chuvas, gerando muitos escorregamentos transformados em fluxos de detritos e lama.

Tabela 3.7 – Características de alguns fluxos de detritos no Brasil (modificado de GRAMANI, 2001).

Evento	Data	Desnível H/L	Área da Bacia (km²)	Chuva registrada (mm)	Veloci- dade* (m/s)	Volume (m³)
Serra das Araras, RJ	23 jan 1967	-	-	114/1h – 275/24h	-	10.000.000
Caraguatatuba, SP	18 mar 1967	0,07	-	420/24h – 586/48h	-	7.600.000
Viaduto IV, Ferrovia de Santos, SP	1971	0,15	-	-	-	100.000
Tubarão, SC	1974	-	-	394/72h – 742/16d	-	-
Maranguape, CE	1974	0,28	10,4	140/24h	-	-
Grota Funda, SP	1975	0,15	-	-	8,40	1.000.000
Rio Cachoeira, Cubatão, SP	1976	-	4	40/1h – 276/24h	-	100.000
Petrópolis, RJ	1988	-	-	145/24h – 414/144h	-	-
Córrego das Pedras, Cubatão (RPBC), SP	1994	0,27	2,64	60/1h	10	300.000
Timbé do Sul, SC	1995	0,35	23,10	500/1h	2,2	3.000.000
Córrego das Pedras, Cubatão (RPBC), SP	1996	0,27	2,64	-	10	16.000
Estrada de Ubatuba, SP	1996	-	-	10/10min – 442/13h	-	-
Morro do Quitite, RJ	1996	0,47	2,13	202/24h	5,3	90.000
Morro do Papagaio, RJ	1996	0,47	2,53	-	2,8	42.000
Via Anchieta, SP	1999	0,18	-	128/24h – 274/72h	-	300.000
Lavrinhas, SP	2000	0,13	17,50	70/1h	22	1.6000.000
H, L: altura e comprimento total do fluxo de detritos * Velocidade estimada e/ou calculada						



Figura 3.6 - Cicatrizes e depósito do fluxo de detritos de Caraguatatuba em 1967.



Figura 3.7 - Distância percorrida e de deposição do fluxo de detritos de Caraguatatuba em 1967.

O acidente ocorrido na Serra de Maranguape no estado de Ceará em 1974 é considerado como avalanche de detritos devido às altas velocidades registradas. A elevada inclinação das encostas favoreceu a movimentação de grande quantidade de solo.

GRAMANI (2001) relata que o gigantesco escorregamento de 1975, conhecido como Grota Funda, ocorreu nas escarpas da Serra do Mar nas proximidades do Município de Paranapiacaba, estado de São Paulo, expondo uma área de aproximadamente 300.000m². O escorregamento provocou uma profunda cicatriz na encosta, com dezenas de metros de largura, mostrando o elevado estado de instabilidade presente no local.

O fluxo de detritos na cidade Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, acontecido em fevereiro de 1988, foi deflagrado por duas condições chuvosas: um valor elevado de precipitação acumulada antes do evento e uma precipitação não muito intensa, mas concentrada na área (GRAMANI, 2001). As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram alguns aspectos deste evento.



Figura 3.8 - Grandes volumes de blocos de rocha no fluxo de detritos de Petrópolis em 1988.



Figura 3.9 - Fluxo de detritos em Petrópolis em 1988.

O acidente ocorrido em 1995, na região sul do estado de Santa Catarina, reflete um aspecto geológico-geomorfológico do fluxo de detritos. GRAMANI (2001) menciona que a formação de *cumulonimbus* (nuvens convectivas de trovoadas que se desenvolvem verticalmente até grandes altitudes) foi a responsável pela catástrofe ocorrida nas bacias dos rios Pinheirinho e Figueira, pois os níveis de precipitação medidos não poderiam explicar a ocorrência dos escorregamentos generalizados.

Em Cubatão, São Paulo, a área da Refinaria Presidente Bernardes Cubatão sofreu os efeitos de 2 fluxos de detritos em 1994 e 1996. A RPBC é uma importante unidade da Petrobras, produtora de uma ampla variedade dos produtos. Na época do evento, a taxa de produção era de aproximadamente 200.000 barris por dia.

A refinaria se encontra no pé da Serra do Mar a 800m de altura, paralela a costa brasileira. O local foi escolhido principalmente por condições estratégicas de características topográficas e localização. A área plana da refinaria é coberta por depósitos recentes, aluviais e colúvios, e até sedimentos marinhos, em cotas inferiores a 7m.

O fluxo de detritos ocorreu nas encostas da Serra do Cubatão (Figura 3.10), ao longo de três bacias hidrográficas na frente da Refinaria. Originou-se na bacia ao norte, maior e mais importante, e se desenvolveu ao longo do córrego das Pedras, o principal afluente.



Figura 3.10 – Cicatrizes do fluxo de detritos nas encostas de Cubatão em 1994.

Este evento ocorreu no início da noite de 6 de fevereiro e teve como principal agente deflagrador uma chuva com intensidade de 60mm em 1 hora, num total registrado de cerca de 140mm em 3 horas. O período de retorno das chuvas foi calculado em cerca de 200 anos.

Os fluxos de detritos causaram danos e até mesmo a destruição de estruturas e equipamentos diversos da refinaria, incluindo um dique de proteção lateral na base do talude. Além disto, provocou o assoreamento completo de um grande reservatório de água com lama e blocos de rocha de grandes dimensões e inundações de várias áreas de estocagem e da própria indústria (Figura 3.11). Como consequência, as operações da refinaria foram interrompidas por cerca de três semanas. Os danos atingiram cerca de 40 milhões de dólares (KANJI *et al*, 2007). A Figura 3.12 ilustra o leque de deposição do fluxo de detritos na Refinaria.



Figura 3.11 - Deposição de blocos de rocha de grandes volumes e lama na área da planta industrial de Cubatão (1994).



Figura 3.12 - Vista do local de deposição do fluxo de detritos em Cubatão (KANJI *et al.*, 2007).

No evento ocorrido na cidade de Ubatuba, estado de São Paulo, em 1996, foram registrados 182 pontos de escorregamentos de dimensões variáveis. As fortes chuvas de longa duração foram consideradas como o deflagrador principal do acidente.

Fortes chuvas registradas na cidade do Rio de Janeiro em 1996 provocaram escorregamentos e fluxos de detritos em diversos pontos da serra, mais especificamente nas bacias do Rio Quitite e Papagaio, na zona oeste da cidade. GRAMANI (2001) relata que os fluxos alcançaram mais de 1 km de extensão (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Fluxo de detritos com mais de 1km de distância percorrida no Morro do Quitite (1996).

O fenômeno registrado na Via Anchieta, no estado de São Paulo em 1999, ocorreu após chuvas bastante intensas. O fluxo de detrito iniciou-se com um escorregamento de grande proporção num local de mata fechada (Figura 3.14). GRAMANI (2001) reporta que alguns pesquisadores consideram que a origem do fluxo foi devido ao aumento de pressão de água nas fissuras do maciço rochoso.



Figura 3.14 - Fluxo de detritos na Via Anchieta em 1999.

O evento ocorrido próximo da cidade de Lavrinhas, no estado de São Paulo em 2000, foi causado por chuvas que atingiram a área. O material depositado durante o evento é composto por grandes blocos de rochas na porção frontal do fluxo, seguido de material com menores dimensões, envoltos numa matriz areno-argilosa.

Finalmente, é interessante observar que a maioria dos casos de fluxos de detritos no Brasil (Tabela 3.6) tem sua ocorrência localizada nas principais áreas montanhosas tais como a Serra do Mar, da Mantiqueira, de Maranguape e Serra Geral.

3.3 RELAÇÕES EMPÍRICAS PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS FLUXOS DE DETRITOS

Os casos históricos apresentados na primeira parte deste capítulo serviram para muitos autores coletar informações para formular relações com a finalidade de representar os fluxos de detritos e os diversos parâmetros envolvidos.

A literatura apresenta vários métodos baseados em conceitos distintos para estimativa de parâmetros de fluxo de detritos. Os principais conceitos são a distância de percurso total e o comprimento de deposição do fluxo de detritos. A Tabela 3.7 resume os métodos mais importantes da literatura.

Tabela 3.8 - Métodos de estimativa de parâmetros de fluxo de detritos (RICKENMANN, 2005).

Abordagem Geral	Palavra chave para caracterizar o método	Principais referências
<i>Distância de percurso total (comprimento total do caminho)</i>		
Distância de percurso e magnitude do evento	Distância de percurso Volume e altura de descida	Corominas (1996) Rickenmann (1999)
Volume	Sem arraste	Cannon (1993) Fannin & Wise (2001)
Modelos de massa	Abordagem de Voellmy Abordagem de Iverson	Zimmermann <i>et al.</i> (1997) Lancaster <i>et al.</i> (2003)
Critérios de limite	Inclinação crítica e ângulo de junção	Benda & Cundy (1990)
<i>Comprimento de deposição (parte depositada do fluxo)</i>		
Inclinação crítica e leque de deposição	Vários métodos empíricos	Vandine (1996) Bathurst <i>et al.</i> (1997)
Volume	Área de deposição e seção transversal do fluxo	Iverson <i>et al.</i> (1988) Crosta <i>et al.</i> (2003)
Abordagem analítica	Modelos de massa	Körner (1980) Perla <i>et al.</i> (1980)
	Modelo de descarga constante	Hungr <i>et al.</i> (1984) Takahashi (1991)
<i>Comprimento de deposição (percurso total ou apenas parte depositada)</i>		
Modelos de simulação com base de dados contínua	Várias equações constitutivas	Iverson (1997) McDougall & Hungr (2003)

3.3.1 Volume do fluxo de detritos

Do ponto de vista da avaliação de riscos e danos, o volume do fluxo de detritos é um dos parâmetros mais importantes. Em geral, uma gama de volumes de fluxo de detritos poderá ocorrer com probabilidades diferentes. No entanto, muitas vezes um intervalo aceitável de ocorrência associado à magnitude de um determinado evento poderá definir as medidas de proteção a serem implementadas. O volume do fluxo de detritos (M) permite estimar a vazão de pico associada ao movimento (Q_p), a distância total percorrida (L) e também a distância de desvio na área de deposição (L_F).

Diversos parâmetros têm sido adotados para estimar o volume máximo de fluxo de detritos. RICKENMANN (1999), baseado em cerca de 200 fluxos de detritos, propôs equações empíricas específicas para o cálculo do volume M . Entretanto, verificou-se que estas equações podem superestimar em até 100 vezes o volume de detritos real. Em consequência, recomenda-se fazer uma avaliação geomorfológica do material, considerando os fluxos de detritos como fluxos hiperconcentrados (parte sólida e líquida) e as propriedades hidráulicas do fluxo (viscosidade, densidade, etc.). Este estudo diferenciado foi detalhado por vários autores, destacando-se TAKAHASHI (2001), ZNASMESKY (2001) e IVERSON (2005).

Algumas das relações empíricas da literatura também incluem informações sobre as condições de chuva e as características litológicas da bacia hidrológica. É provável que uma análise mais pormenorizada, tendo em conta uma subdivisão dos sistemas de captação de acordo com as unidades litológicas que possivelmente estão contribuindo para o rendimento do material escorregado, possa levar a estimativas mais precisas.

3.3.2 Vazão de pico

A determinação da vazão de pico do fluxo de detritos é importante para avaliar a capacidade de condução do canal do escorregamento, principalmente quando alcança seções críticas tais como vãos de pontes e barreiras de proteção.

A Figura 3.15 apresenta um conjunto de dados de fluxos de detritos avaliados por

RICKENMANN (1999). São plotados valores de vazão de pico e volume, permitindo a determinação de uma relação semi teórica derivada da hipótese de fluxos de diferentes tamanhos, mas com as mesmas propriedades físicas, conhecida como *Escala de Froude*.

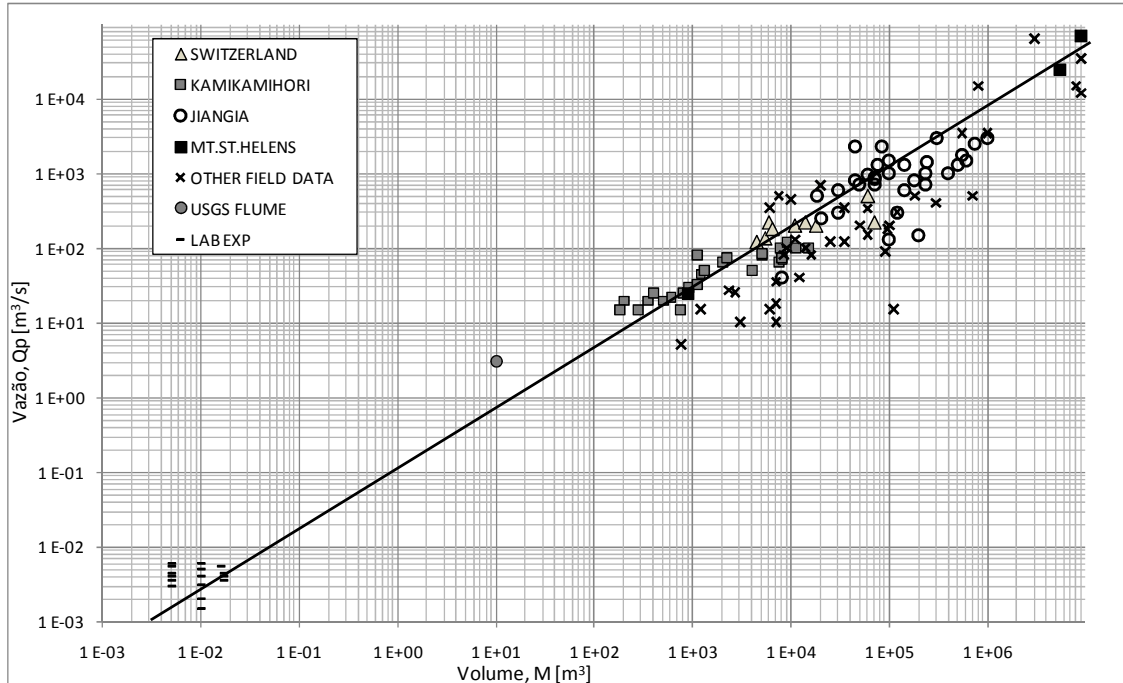


Figura 3.15 - Relação entre vazão de pico Q_p e volume do fluxo de detritos M (RICKENMANN, 1999).

A equação correspondente proposta por RICKENMANN (1999) tem a seguinte forma:

$$Q_* = 0,1M_*^{0.833} \quad (3.1)$$

$$Q_* = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (3.2)$$

$$M_* = \frac{M_1}{M_2} \quad (3.3)$$

Onde os índices 1 e 2 se referem a dois fluxos com propriedades de material semelhantes, mas de magnitudes diferentes.

Vários autores propõem relações empíricas estabelecidas entre a vazão de pico (Q_p) e o volume do fluxo (M), tais como HUNGR *et al.* (1984), MIZUYAMA *et al.* (1992) e TAKAHASHI (1994) e RICKENMANN (1999).

A Tabela 3.8 apresenta as principais relações empíricas entre vazão de pico e volume para fluxos de detritos, lama, fluxos vulcânicos e fluxos provocados por rupturas de barragens.

Tabela 3.9 - Correlações entre vazão de pico e volume total de fluxos de detritos.

Relação	Tipo	Referência
$Q_p = 0,293M_w^{0,56}$	Fluxos por ruptura de barragens	Costa (1988b)
$Q_p = 0,016M_w^{0,64}$	Fluxos glaciares	Costa (1988b)
$Q_p = 0,135M^{0,78}$	Fluxos granulares	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
$Q_p = 0,019M^{0,79}$	Fluxos de lama	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
$Q_p = 0,001M^{0,87}$	Fluxos vulcânicos (Japão)	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
$Q_p = 0,006M^{0,83}$	Fluxos vulcânicos (Indonésia)	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
$Q_p = 0,04M^{0,90}$	Fluxos granulares	Bovis & Jakob (1999)
$Q_p = 0,003M^{1,01}$	Fluxos vulcânicos	Bovis & Jakob (1999)
$Q_p = 0,1M^{0,83}$	Fluxos granulares	Rickenmann (1999)
Q_p : Vazão de pico (m^3/s); M : Volume do fluxo (m^3); M_w : Volume de água no reservatório (m^3)		

Observa-se na Tabela 3.8 que MIZUYAMA *et al.* (1992) propõem duas relações diferenciando fluxos granulares de fluxos de lama, acontecidos no Japão. Por sua vez, COSTA (1988b) sugere relações empíricas para fluxos glaciares e fluxos resultantes de rupturas de barragens, nas quais M_w é o volume de água acumulado no reservatório. Quando comparado ao fluxo de detritos, o fluxo de água da barragem rompida pode incorporar grande quantidade de material ao longo do percurso, resultando em um volume até duas vezes superior ao volume de inundações ocasionadas por degelo (HAEBERLI, 1983).

Na realidade, a vazão de pico de um fluxo de detritos deve ser relacionada ao volume

que se acumula ao longo do escorregamento e não ao volume final total de escombros depositado no leque. Infelizmente, este volume não é identificável na grande maioria dos casos.

No âmbito brasileiro, CRUZ & MASSAD (1997) apresentaram uma compilação das principais relações encontradas na bibliografia para o cálculo de vazões de pico de fluxos de detritos, considerando principalmente as experiências em países tais como Chile, Canadá e Japão. O resumo destas expressões é apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.10 - Relações entre parâmetros de fluxos de detritos (adapt. GRAMANI, 2001).

Relação	Referência
$q_t = 65 \times \sqrt{Q_{200}}$ ou $q_t = 10 \times Q_{200}$	Vandine (1985)
$\frac{V_s}{A} = 30000 - 85000 \frac{m^3}{km^2}$ $V_s = c \times V_t$	IPT (1990) (dados do Japão)
$V_t = 665 \times q_t^{0,85}$	Takahashi (1991)
$q_t = 1,4 \times \frac{1}{(1-c)} \times 0,85 \times A \times I_{24} \times \frac{H^{0,19}}{L^{0,58}}$	Araya Moya (1994)
$q_t = \frac{2}{(1-c)} \times A \times I_1$	Massad <i>et al.</i> (1997)
$V_t = 500 \times q_t$	Dados do Japão e Canadá
$q_t = v \times h \times l$ (conhecida a velocidade, altura e largura do fluxo)	Geral
q_t : vazão de pico $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ v : velocidade $\left(\frac{m}{s}\right)$ h : altura do fluxo (m) l : largura do canal (m) Q_{200} : vazão (200 anos) c : concentração de sólidos (%)	I_{24} : $\frac{mm}{24 \text{ horas}}$ I_1 : $\frac{mm}{hora}$ h : altura (m) l : distância (m) V_s : volume de sólidos (m^3) V_t : volume total (m^3) A : área da bacia (km^2)

Baseados nas expressões da Tabela 3.9, MASSAD *et al.* (1997) modificaram a equação de ARAYA MOYA (1994) para a determinação da vazão do fluxo de detritos ocorrido em Cubatão.

3.3.3 Velocidade do fluxo

A velocidade média de um fluxo de detritos é muito difícil de ser medida. A maioria das relações empíricas propostas são baseadas em informações de testemunhas ou velocidades medidas em laboratório onde se estudam misturas simplificadas de materiais para simular o fluxo de detritos. Além disso, SUWA *et al.* (1993) salientam que a velocidade máxima do fluxo não coincide necessariamente com a parte onde a profundidade da calha é máxima.

A Tabela 3.10 apresenta várias relações para determinação da velocidade do fluxo, analisadas por RICKENMANN (1999).

Tabela 3.11 - Relações para estimar a velocidade média de fluxo de detritos (RICKENMANN, 1999).

Relação	Tipo de fluxo
$V = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{S}{\mu}$	Fluxo laminar Newtoniano
$V = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \xi \cdot H^{1,5} \cdot S$	Fluxo de grãos dilatados
$V = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot H^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$	Fluxo turbulento Newtoniano
$V = C \cdot H^{\frac{1}{2}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$	Equação Maning-Strickler para fluxo turbulento Newtoniano
$V = C_1 \cdot H^{0,3} \cdot S^{0,5}$	Equação empírica de Chezy

Ressalta-se que a última equação da Tabela 3.10 (relação empírica de Chezy) tem oferecido resultados satisfatórios em simulações numéricas de fluxos de detritos (KOCH, 1998).

RICKENMANN (1999) propõe uma expressão geral que representa todas as relações de estimativa de velocidade do fluxo de detritos, dada por:

$$V = C_2 H^\alpha S^\beta \quad (3.4)$$

Onde: C_2 é uma constante empírica que depende dos valores de α e β .

COSTA (1984) apresenta também uma série de equações empíricas para o cálculo da velocidade do fluxo, considerando casos da Rússia, China e Japão. Todas elas têm a mesma forma da expressão proposta por RICKENMANN (1999), com a seguinte variação dos expoentes $0,5 < \alpha < 0,67$ e $0,25 < \beta < 0,5$.

É interessante observar que as velocidades médias dos fluxos de detritos e dos fluxos de água podem ser representadas por equações semelhantes, conforme indicado na Figura 3.16. Desta forma, RICKENMANN (1999) propõe uma expressão simplificada dada por:

$$V = 2,1Q^{0.33}S^{0.33} \quad (3.5)$$

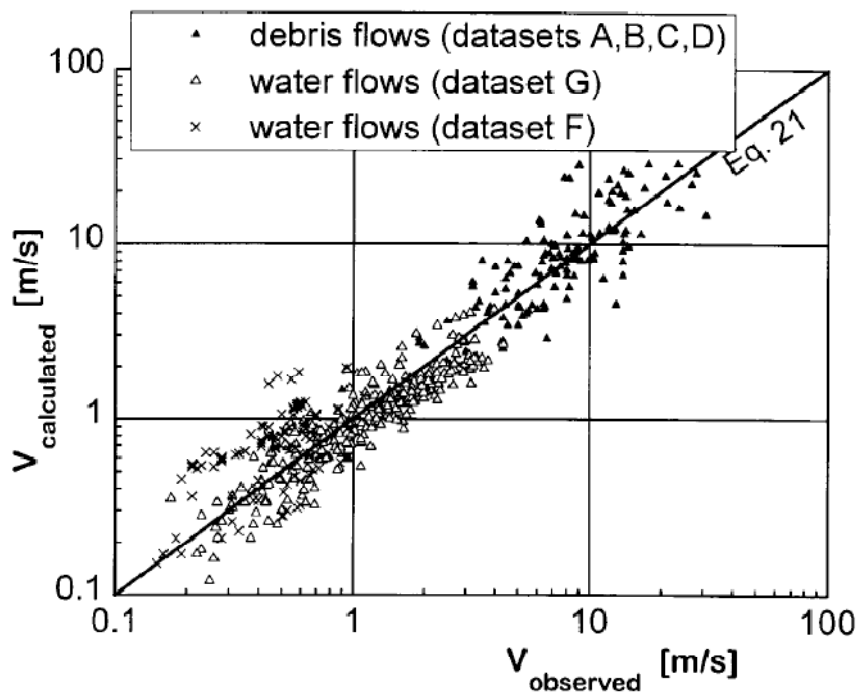


Figura 3.16 - Relação entre velocidades observada e calculada para fluxo de detritos e fluxos de água (RICKENMANN, 1999).

As velocidades calculadas através da Equação 3.5 fornecem valores razoáveis quando comparados aos das velocidades observadas de fluxo de detritos e com dispersão similar à obtida para os fluxos de água (Figura 3.16). A Tabela 3.11 resume várias expressões para o cálculo da velocidade de fluxo de detritos resgatadas da literatura.

Tabela 3.12 – Relações para cálculo de velocidade proposta por vários autores.

Relação	Referência
$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{S_e \cdot x \cdot r}{w}}$	Haiden (1925)
$V = \left\{ \frac{[g \cdot r_c (h_2 - h_1)]}{w} \right\}^{0,5}$	Chow's (1959) <i>apud</i> Rodolfo <i>et al.</i> (1989)
$V = 5,15 \cdot y^{0,67} \cdot S^{0,25}$	Sribnuy (1966)
$V = 3,15 \cdot y^{0,17} \cdot d^{0,33}$	Shamova (1966)
$V_{m\acute{a}x} = 10,75 \cdot y^{0,55} \cdot S^{0,33}$	Kherkheulidze (1967)
$V_f = 1,5[g \cdot y \cdot \cos S(1 + 1,5 \sin S)]^{0,5}$	Syanozhetsky <i>et al.</i> (1973)
$V = 5,8 \cdot y^{0,55} \cdot S^{0,33}$	Kherkheulidze (1975)
$V = \frac{2}{5d} \left\{ \frac{g}{0,042 \sin S} \left[C_d + (1 - C_d) \frac{\delta_f}{\delta_s} \right] \right\}^{0,5} \left[\left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{0,33} - 1 \right] y^{1,5} (\sin S)^{0,5}$	Takahashi (1981)
$V_f = 2,5(g \cdot y \cdot \sin S)^{0,5}$	Tsubaki <i>et al.</i> (1981)
$V_f = 13,5 \left(\frac{d}{y} \right)^{0,062} \left(\frac{c}{\delta_f} \right)^{0,025} (g \cdot y \cdot S)^{0,5}$	Li Jian <i>et al.</i> (1983)
$V = \frac{\gamma \cdot S \cdot h^2}{(k \cdot \mu)}$	Hungr <i>et al.</i> (1984); Vandine (1985)
$V = 21 \cdot H^{0,48} \cdot S^{0,5}$; H=y	Zhang <i>et al.</i> (1985)
$V = 1,3 \sin^{0,2}(S) \cdot q_0^{0,6} \cdot \frac{g^{0,2}}{d_{50}^{0,4}}$; $q_0 = \frac{Q_0}{L}$	Takahashi (1991)
$V = 6,06 \cdot R^{0,667} \cdot tgS^{0,25} \frac{(2,675 - \varphi_d)}{(2,454 - 0,798\varphi_d)}$	Yablonskiy <i>et al.</i> (1992)
$V_{m\acute{a}x}^2 = R \cdot g \cdot tgS \rightarrow V_{m\acute{a}x} = (R \cdot g \cdot tgS)^{1/2}$	Lu & Cruden (1996)
$V = ay^b \cdot (tgS)^c$	Sribnuy (n\~ao conhecido)
<p>V: velocidade m\u00e9dia (m/s); $V_{m\acute{a}x}$: velocidade m\u00e1xima (m/s); V_f: velocidade da por\u00e7\u00e3o frontal do fluxo de detritos (m/s); h=y: profundidade m\u00e9dia (m); S: inclina\u00e7\u00e3o da superf\u00edcie ($^\circ$); d: di\u00e2metro m\u00e9dio da part\u00edcula (d_{50} em metros); a, b e c: constantes; L: largura do canal (m); φ_d: densidade do fluxo; S_e: supereleva\u00e7\u00e3o; g: acelera\u00e7\u00e3o gravitacional (m/s²); C: % gr\u00e3os <0,005mm; C_d: concentra\u00e7\u00e3o gr\u00e3os por volume em movimento; C_*: concentra\u00e7\u00e3o gr\u00e3os por vol. Em camadas est\u00e1ticas de fluxo; δ_f: densidade do fluido; δ_s: densidade dos gr\u00e3os; q_0: descarga espec\u00edfica do fluxo; Q_0: descarga de \u00e1gua estimada para TR=100 anos; $R=r_c$: raio hidr\u00e1ulico; μ: viscosidade din\u00e2mica</p>	

3.3.4 Dist\u00e2ncia percorrida

A dist\u00e2ncia total percorrida por um fluxo de detritos (L) \u00e9 de importante determina\u00e7\u00e3o, principalmente para a defini\u00e7\u00e3o de mapas de \u00e1reas de risco. IVERSON (1997) reporta que a dist\u00e2ncia percorrida \u00e9 fun\u00e7\u00e3o da diferen\u00e7a de cota entre o ponto de partida do

movimento e o ponto mais baixo de deposição do movimento de massa (H_e) e do volume do fluxo de detritos (M).

Considerando a Escala de Froude (fluxos de detritos de tamanhos diferentes, mas propriedades físicas iguais), RICKENMANN (1999) propõe uma equação para a estimativa da distância percorrida pelo fluxo de detritos, dada por:

$$L = 30(MH_e)^{1/4} \quad (3.6)$$

Nota-se que o produto de M e H_e pode ser considerado como a energia potencial do movimento.

RICKENMANN (1999) também apresenta outra expressão em função de L, M e H_e derivada da observação de diferentes fluxos de detritos, dada por:

$$L = 1,9M^{0,16}H_e^{0,83} \quad (3.7)$$

É interessante observar que as quedas de blocos rochosos parecem seguir uma tendência similar à de fluxo de detritos. Porém, as distâncias percorridas são menores que a dos fluxos devido à pouca ou ausência de água no material contido no deslizamento.

Cabe ressaltar que H_e não é conhecido em primeira instância, motivo pelo qual o emprego das Equações 3.6 e 3.7 para fins de prognóstico exige definir uma relação entre L e H_e que descreva o perfil longitudinal potencial do fluxo. Para um valor de M estimado, o valor de L pode ser calculado gráfica ou matematicamente. H_e em combinação com L pode determinar a declividade média da trajetória potencial do fluxo. SCHILLING & IVERSON (1997) propõem um procedimento específico para a determinação do parâmetro H_e em um perfil longitudinal estimado.

3.3.5 Distância percorrida de deposição

Para delimitar mais detalhadamente os locais de risco potencial, a extensão do leque de deposição deve ser conhecida. A distância percorrida de deposição (L_f) é definida como

a distância entre o extremo da bacia de deposição e o ponto mais baixo do material depositado. Do ponto de vista geométrico, pode-se afirmar que L_f é função do volume do fluxo de detritos.

RICKENMANN (1999) propõe uma relação que satisfaz a Escala de Froude e permite determinar a distância de deposição, dada por:

$$L_f = 15M^{1/3} \quad (3.8)$$

Entretanto, RICKENMANN (1999) não recomenda a aplicação desta equação, pois a dispersão entre os resultados observados e os resultados calculados é muito grande.

3.3.6 Força de Impacto

Os fluxos de detritos quando acionados exercem enormes forças de impacto sobre os objetos localizados na sua trajetória. HÜBL *et al.* (2009) apresentam vários modelos para estimar a força de impacto dos fluxos de detritos sobre as barreiras. Estes modelos são classificados em modelo hidráulico e modelo sólido de colisão. Ainda, o modelo hidráulico é sub classificado em modelo hidro-estático e hidro-dinâmico.

Assim, para os modelos hidro-estáticos, os autores apresentam a fórmula de *Lichtenhahn* como a mais simples, pois só é requerida a altura do fluxo. Considerando que, na maioria dos casos, a altura da estrutura de impacto é adotada igual a altura do fluxo de detritos, não há incógnitas na fórmula.

Em geral a fórmula para o modelo hidro-estático é dada por:

$$p_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad (3.9)$$

Onde:

$p_{m\acute{a}x}$: a pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m^2 (representa o valor da pressão máxima no gráfico de carregamento sob a estrutura);

k: constante empírica;

ρ_{Mu} : densidade do fluxo de detritos em kg/m^3 ;

g : gravidade em m/s^2 ;

h_{Mu} : altura do fluxo de detritos em m.

Já para os modelos hidro-dinâmicos, a expressão é dada por:

$$p_{m\acute{a}x} = a \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad (3.10)$$

Onde:

$p_{m\acute{a}x}$: a pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N;

a : constante empírica, valores recomendados variam de 3 a 5 (ZHANG, 1993);

v : velocidade do fluxo de detritos em m/s.

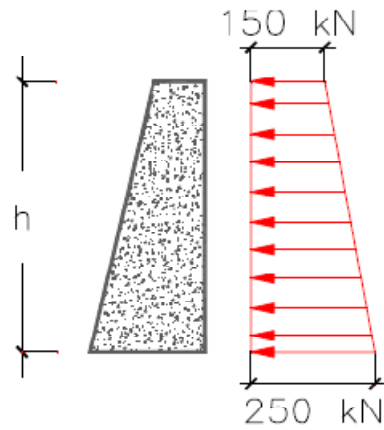
HÜBL *et al.* (2009) apresentam uma representação especial da fórmula para modelos hidro-dinâmicos. Aqui, a força de impacto medido (testes miniaturizados) é normalizada em função da fórmula hidro-dinâmica. Além disso, o número de Froude também tem sido usado para normalizar a força do impacto.

Portanto, HÜBL *et al.* (2009) propõem a seguinte correlação para cálculo da força de impacto na estrutura:

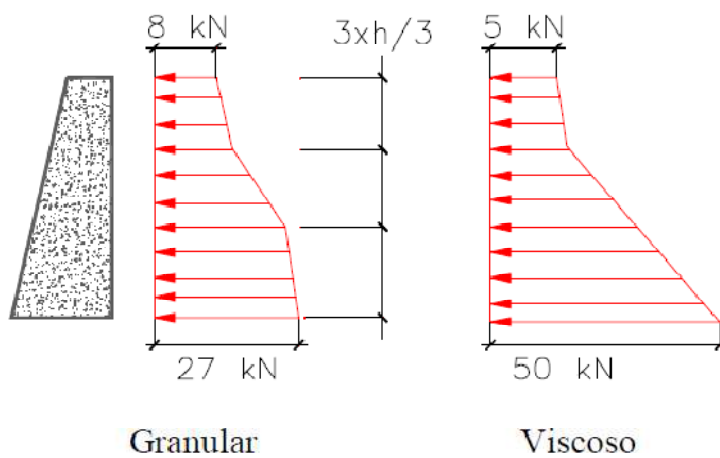
$$p_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6} \quad (3.11)$$

Além dos modelos hidráulicos apresentados, a literatura também apresenta os modelos de corpo sólido típicos de queda de blocos, os quais são utilizados para a estimativa das forças de impacto do fluxo de detritos. A principal diferença entre fluxo de detritos e o movimento de queda de bloco reside na hipótese de comportamento elástico do material para o segundo caso.

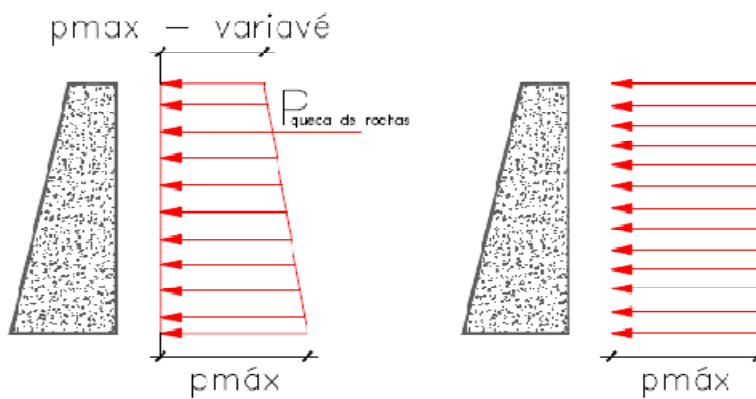
A Figura 3.17 apresenta os padrões de distribuição de carga devido às forças de impacto observadas e calculadas nas estruturas de proteção.



(a) Medido in situ (Wendeler et al., 2007)



(b) Modelos a escala (Hübl & Holzinger, 2005)



(c) Padrão sugerido (ONR 24800, 2007)

Figura 3.17 - Distribuições de carga em função das forças de impacto observadas e calculadas (HÜBL *et al.*, 2009).

É importante ressaltar que os fluxos de detritos não se chocam necessariamente com a barreira de forma reta. Muitas vezes o fluxo de detritos atinge a barreira em um ângulo

diferente daquele exibido durante a trajetória. Portanto, as forças de impacto lateral têm que ser consideradas. Infelizmente, até o momento nenhum estudo ou dados de medição de campo são disponíveis.

Finalmente, HÜBL *et al.* (2009) recomendam o emprego de $1/5$ até $1/3$ da força de impacto frontal para o dimensionamento de uma estrutura de proteção.

3.4 OUTRAS RELAÇÕES EMPÍRICAS DE PARÂMETROS DE FLUXO DE DETRITOS

3.4.1 Relações empíricas entre a elevação, distância percorrida e volume

COROMINAS (1996) sugere uma relação direta entre volume e distância percorrida pelo fluxo de detritos. Esta relação é o resultado da análise de 52 casos de fluxos de detritos, deslizamentos e avalanches de detritos que ocorreram nos Pirineus e 19 casos de fluxos de detritos ocorridos em outros locais.

A relação empírica entre volume e distância percorrida é expressa por:

$$\tan \beta = H/L_{m\acute{a}x} = 0,97V^{0,105} \quad (3.12)$$

Onde:

H: altura elevação referente ao ponto inicial e final do fluxo;

$L_{m\acute{a}x}$: distância máxima horizontal do percurso do movimento de massa;

β : ângulo de declividade.

COROMINAS (1996) também propõe uma equação que relaciona os parâmetros geométricos de volume (V) com a elevação (H) e a distância horizontal (L) do escorregamento. A expressão proposta é dada por:

$$V = \left(\frac{L}{H \cdot 1,03} \right)^{\left(\frac{1}{0,105} \right)} \quad (3.13)$$

De forma análoga, RICKENMANN (1999) elaborou uma relação semelhante à de COROMINAS (1996), a partir dos dados de 140 fluxos de detritos e 51 avalanches, registrados nos Alpes Suíços. Segundo este autor, um dos elementos geométricos de grande impacto na análise é o volume do fluxo de detritos. Desta forma, RICKENMANN (1999) sugere a seguinte expressão:

$$V = \left(\frac{L}{H^{0,83 \cdot 1,9}} \right)^{\left(\frac{1}{0,16} \right)} \quad (3.14)$$

Onde:

H: elevação entre o ponto inicial e o ponto final do deslizamento (m);

L: distância horizontal do percurso (m);

V: volume em metros cúbicos.

A Figura 3.18 ilustra a relação entre a declividade ($\tan \beta = H/L$) e o volume do deslizamento proposta por RICKENMANN (2005). Observa-se que os valores correspondentes aos fluxos de detritos se concentram em uma faixa bem definida, enquanto os valores de avalanches de rochas apresentam grande dispersão.

CORREA *et al.* (2009) utilizam as Equações 3.13 e 3.14 para analisar um caso de fluxo de detritos registrado no município de Rio dos Cedros no estado de Santa Catarina no Brasil. Os resultados mostram diferenças que *a priori* parecem incoerentes, pois os valores de volume para uma mesma declividade se diferenciam em cerca 2 e de 20 vezes para as Equações 3.13 e 3.14, respectivamente. No entanto, COROMINAS (1996) explica que essa variação de volume, para um mesmo valor de $\tan \beta$, corresponde ao fato de pequenos fluxos resultarem em valores de L iguais aos de grandes fluxos em virtude da topografia peculiar e de possíveis obstáculos existentes no percurso de cada escorregamento.

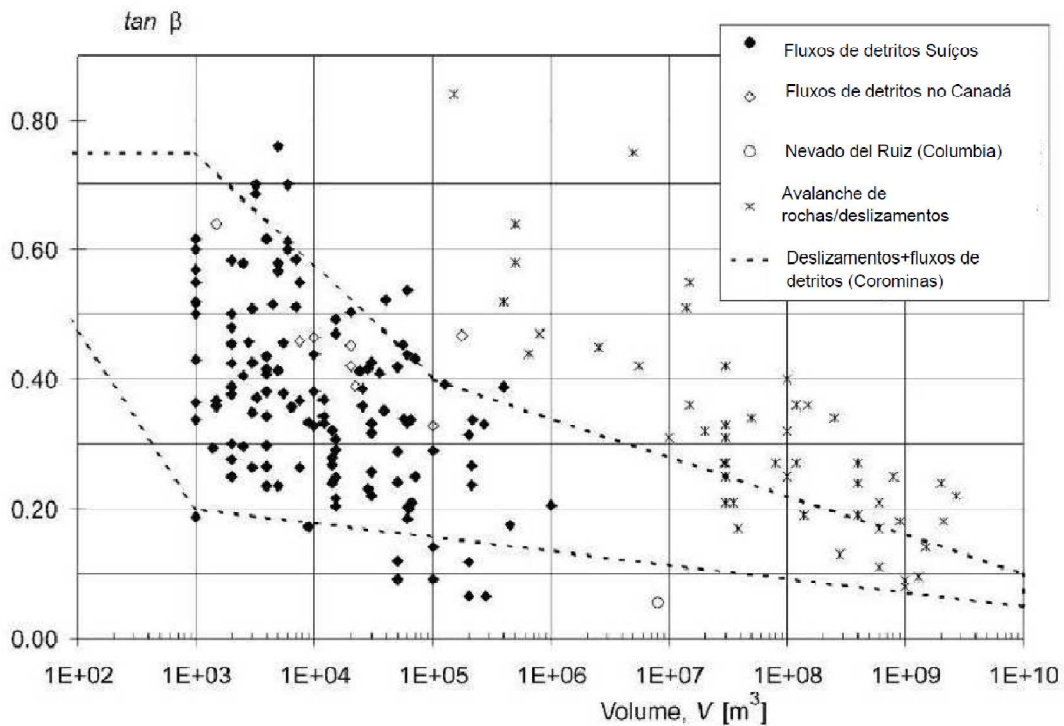


Figura 3.18 - Relação entre a declividade e o volume do deslizamento (RICKENMANN, 2005).

Outra relação direta entre os parâmetros geométricos e o volume do fluxo foi proposta por CROSTA *et al.* (2001), a partir das análises de fluxos de detritos monitorados *in situ* no Alto Valtellina, Lombardia, norte da Itália, e é dada por:

$$L(m) = 7V^{0,275} \quad (3.15)$$

Onde V é o volume em m³.

CROSTA *et al.* (2001) apresentam na Figura 3.19 uma comparação entre os valores da distância de deposição em função do volume calculados pela expressão de RICKENMANN (1999) e a Equação 3.15 e os valores medidos nos fluxos de detritos do norte da Itália. Observa-se que a relação proposta por RICKENMANN (1999) corresponde a um limite superior dos valores medidos. A relação de CROSTA *et al.* (2001) situa-se mais próxima do limite inferior dos valores reais medidos.

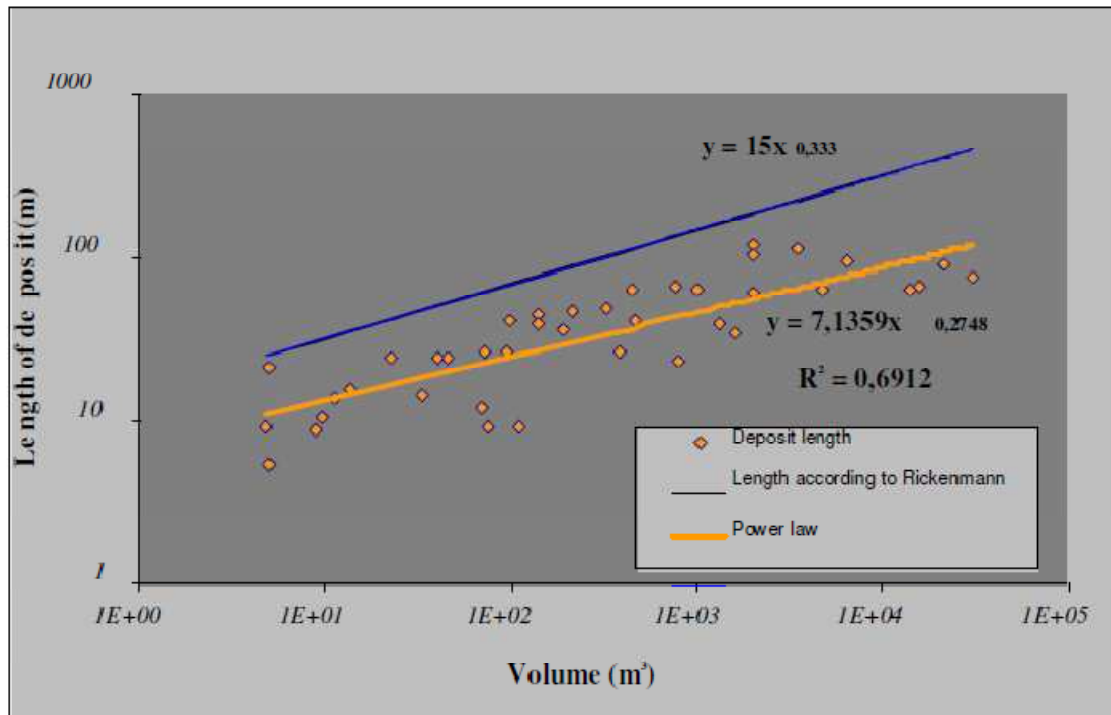


Figura 3.19 – Relação entre comprimento de deposição e volume do fluxo de detritos (CROSTA *et al.*, 2001).

GRAMANI (2001) também contribui com uma relação empírica desenvolvida a partir de dados de eventos de fluxos de detritos e outros movimentos de massa. O autor considera especialmente 9 casos brasileiros apresentados na Figura 3.20. Observa-se que a relação proposta para fluxos de detritos estabelece um limite máximo para os eventos acontecidos nos Brasil. Este limite é representado pela reta B na Figura 3.19, cuja expressão é dada por:

$$H/L(m) = 1,87V^{-0,15} \quad (3.16)$$

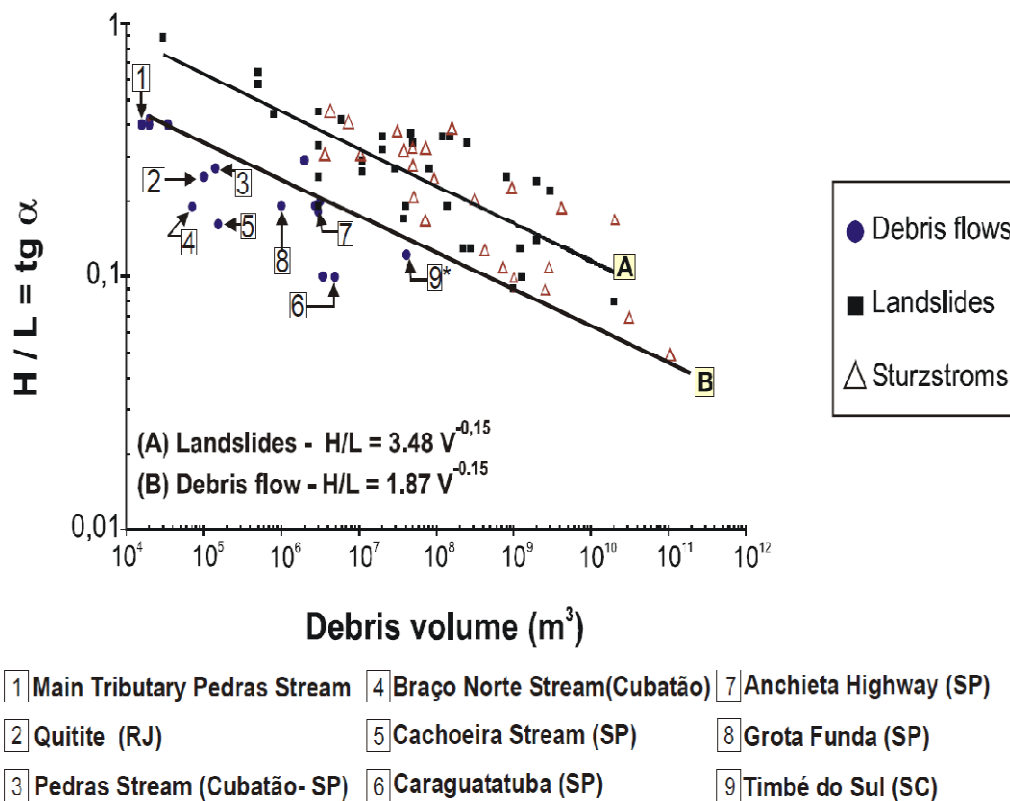


Figura 3.20 - Relação empírica apresentada por GRAMANI (2001).

3.4.2 Relações empíricas entre área de deposição e volume

IVERSON *et al.* (1998) propõem relações entre área de deposição e volume subsidiados pelas análises estatísticas de 27 trajetórias de fluxos vulcânicos originados de 9 vulcões. As relações semi empíricas para determinar a área transversal do vale (A) e a área planimétrica (B) em função do volume do fluxo de detritos (V) são dadas por:

$$A = 0,05V^{2/3} \quad (3.17)$$

$$B = 200V^{2/3} \quad (3.18)$$

Estas equações proporcionam informação necessária para calcular e traçar os limites de inundação nos mapas topográficos provocada por eventos de fluxos de detritos.

O método proposto por IVERSON *et al.* (1998) prevê áreas de inundação nos vales que distam da origem do vulcão. A identificação destas áreas de origem constitui um problema adicional. MALIN & SHERIDAN (1982) assumem que as áreas “fonte” para fluxos vulcânicos podem ser definidas por meio da interseção de um “cone de energia” com a superfície topográfica do vulcão. Este “cone de energia” tem seu vértice na crista do vulcão e a inclinação é determinada pela relação característica de altura (H) e a distância lateral (L) dos fluxos vulcânicos ou avalanches de rochas que geram estes fluxos. A Figura 3.21 ilustra as relações para determinação das áreas de deposição transversal (A) e planimétrica (B) dos fluxos vulcânicos.

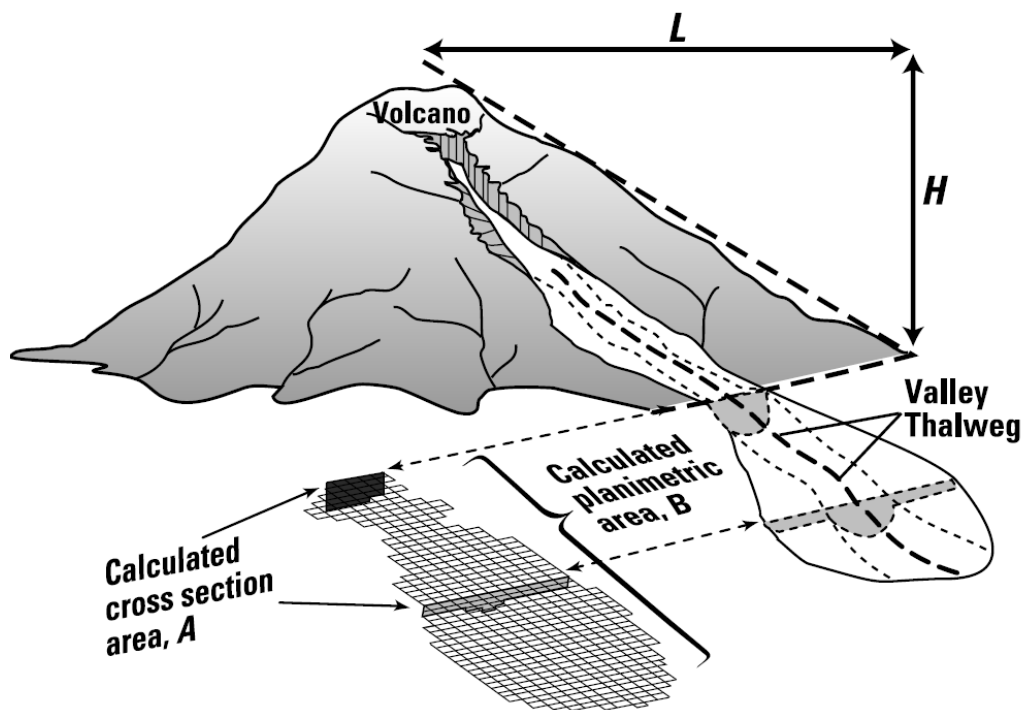


Figura 3.21 - Áreas de deposição em função da altura H e a distância L de fluxos vulcânicos (IVERSON *et al.*, 1998).

IVERSON *et al.* (1998) acrescentam que o emprego destas equações de estimativa é simples, bastando apenas uma régua para traçar os limites de inundação em mapas topográficos. Entretanto, recomendam automatizar o processo de mapeamento, incorporando as equações preditivas em um SIG (Sistema de Informação Geográfica), programa de computador que utiliza um modelo de elevação digital (DEM) de topografia. O SIG permite delinear, simultaneamente, as áreas de inundação previstas

para uma variedade de volumes de fluxos vulcânicos e os mapas de perigo de inundação.

Ressalta-se que os volumes dos fluxos vulcânicos adotados por IVERSON *et al.* (1998) envolvem algumas incertezas, pois o volume pode variar conforme o avanço do fluxo e as alterações do volume não são necessariamente monótonas.

Na Tabela 3.4 apresentada anteriormente (item 3.1.3) são listados os dados adotados por IVERSON *et al.* (1998). Eles ressaltam a dificuldade na coleta de dados para pequenos fluxos vulcânicos e fluxos de detritos, embora sejam os mais frequentes. Para superar este déficit, ele inclui os dados de nove fluxos de detritos (não-vulcânicos) com volumes menores a 8.10^4m^3 . Os fluxos de detritos apresentam uma variedade de composições de material e um comportamento intermediário entre as avalanches de rochas e enxurradas de água (IVERSON, 1997). Porém, os fluxos de detritos geralmente têm maiores concentrações de fragmentos de rochas e outros materiais quando comparados aos fluxos vulcânicos (TAKAHASHI, 1991).

As características de fluxos de detritos analisados por IVERSON *et al.* (1998) e apresentados na Tabela 3.4 se afastam da tendência típica dos fluxos vulcânicos. Os fluxos de detritos reduzidos inundam a maior parte do canal de seção transversal, resultando em pequenas áreas planimétricas. Além disto, os fluxos de detritos vulcânicos analisados geralmente se comportam de uma maneira menos fluida, originando depósitos de maior espessura do que a maioria dos fluxos vulcânicos típicos. IVERSON *et al.* (1998) ainda ressaltam que esta diferença nos padrões de inundação pode ser o resultado de um efeito de escala ou de uma menor mobilidade. Uma possível razão poderia ser uma elevada concentração de fragmentos grandes, que provocam maior atrito na trajetória.

IVERSON *et al.* (1998) ainda evidenciam que, em média, fluxos vulcânicos de qualquer volume inundam áreas planimétricas aproximadamente 20 vezes maiores do que aquelas inundadas por avalanches de rocha de volume similar.

Em contraste com as análises de IVERSON *et al.* (1998), CROSTA *et al.* (2001) sugerem que os fluxos granulares são menos móveis que os fluxos vulcânicos e propõem as seguintes relações para determinação das áreas de deposição:

$$A = 6,5V^{0,69} \quad (3.19)$$

$$B = 7V^{0,66} \quad (3.20)$$

Onde:

A: área de deposição transversal em m²;

B: área de deposição planialtimétrica em m²;

V: volume do fluxo de detritos em m³.

A comparação entre os dados de eventos de fluxos de detritos analisados por IVERSON *et al.* (1998) e CROSTA *et al.* (2001) é apresentada na Figura 3.22. Observa-se que a relação proposta por IVERSON *et al.* (1998) não consegue representar adequadamente os fluxos de detritos analisados por CROSTA *et al.* (2001). Neste caso, portanto, as Equações 3.19 e 3.20 são mais representativas do comportamento dos eventos analisados.

Ainda SCHEIDL & RICKENMANN (2009) propõem uma relação para o cálculo de áreas de inundação na ocorrência de um fluxo de detritos tendo como base de dados os eventos acontecidos na Áustria, Suíça e Itália e as relações propostas por IVERSON *et al.* (1998) para fluxos vulcânicos. A expressão proposta é dada por:

$$B = k'_B \cdot V^\beta \quad (3.21)$$

Onde:

B: área planialtimétrica de deposição;

V: volume do fluxo de detritos;

β : expoente fixo igual a $2/3$;

k'_B : coeficiente adimensional de mobilização.

O coeficiente k'_B é determinado para diferentes grupos de eventos de fluxo de detritos. Considerando os casos estudados por SCHEIDL & RICKENMANN (2009), os valores de k'_B variam entre 7,43 a 323,81, conforme apresentado na Tabela 3.12.

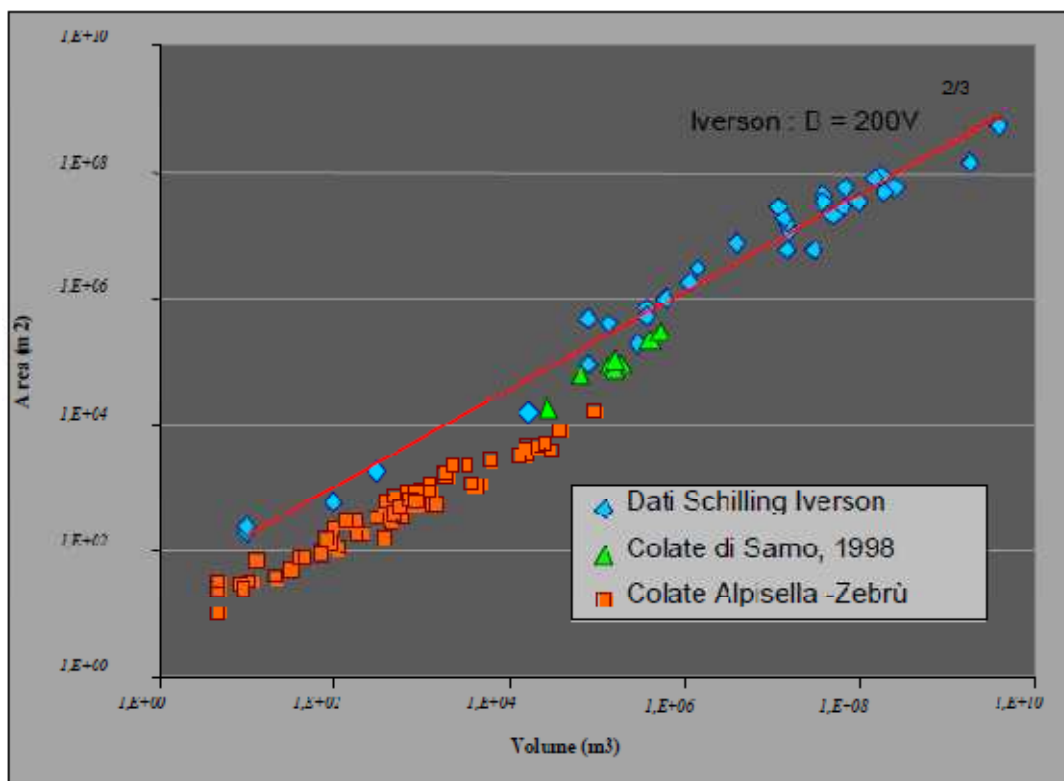


Figura 3.22 – Comparação entre as dados avaliados por IVERSON *et al.* (1998) e CROSTA *et al.*(2001).

Tabela 3.13 – Valores do coeficiente de mobilização k'_B para fluxos de detritos na Europa (SCHEIDL & RICKENMANN, 2009).

País de ocorrência do fluxo de detritos	k'_B
Áustria 1	47,75
Áustria 2	13,47
Suíça 1	323,81
Suíça 2	57,20
Itália	7,43

Comparando ainda com os dados de outros eventos estudados por CROSTA *et al.* (2003) e IVERSON *et al.* (1998), SCHEIDL & RICKENMANN (2009) observaram

valores de k'_B na faixa de 6 a 200, dependendo do tipo de fluxo que varia de fluxos de detritos granulares (valores de k'_B baixos) para fluxos vulcânicos (valores de k'_B elevados).

SCHEIDL & RICKENMANN (2009) propõem o uso do coeficiente de mobilização k'_B , além da topografia da encosta e o volume do fluxo de detritos, como parâmetros de entrada do programa numérico *TopRunDF*. Este programa permite determinar a área de inundação potencial de fluxos de detritos em regiões de risco. Estudos comparativos entre as áreas de inundação de fluxos de detritos observadas com as áreas previstas pelo programa mostram resultados bastante favoráveis.

A Figura 3.23 apresenta quatro exemplos de aplicação do programa para previsão da área de deposição do fluxo de detritos e sua comparação com as áreas observadas. Os eventos ocorreram em quatro cidades na Suíça. Na Figura 3.23, SP representa o ponto de início do movimento. Observa-se que as áreas previstas pelo programa são semelhantes às áreas de deposição observadas após os eventos de fluxos de detritos.

3.4.3 Relações empíricas entre volume, velocidade e energia

Os fluxos de detritos, como já anteriormente descrito, ocorrem com velocidades classificadas como muito a extremamente rápidas, acentuando o caráter catastrófico deste tipo de evento. Velocidades típicas variam de 3m/min a 5m/s, muito maiores que a velocidade de corrida de uma pessoa, o que implica em uma resposta humana nula para o controle, redução ou eliminação do movimento, quando este é deflagrado (NUNES & RIOS FILHO, 2009).

As barreiras flexíveis foram originalmente projetadas para proteger cidades, rodovias e ferrovias contra as quedas de blocos de rocha. O princípio de funcionamento consiste em reduzir a energia ou estacionar o movimento de massa nas barreiras (WENDELER *et al.*, 2006). Além das quedas de bloco, as barreiras flexíveis também podem ser utilizadas para uma variedade de outros problemas, tais como avalanches de neve e fluxos de detritos.

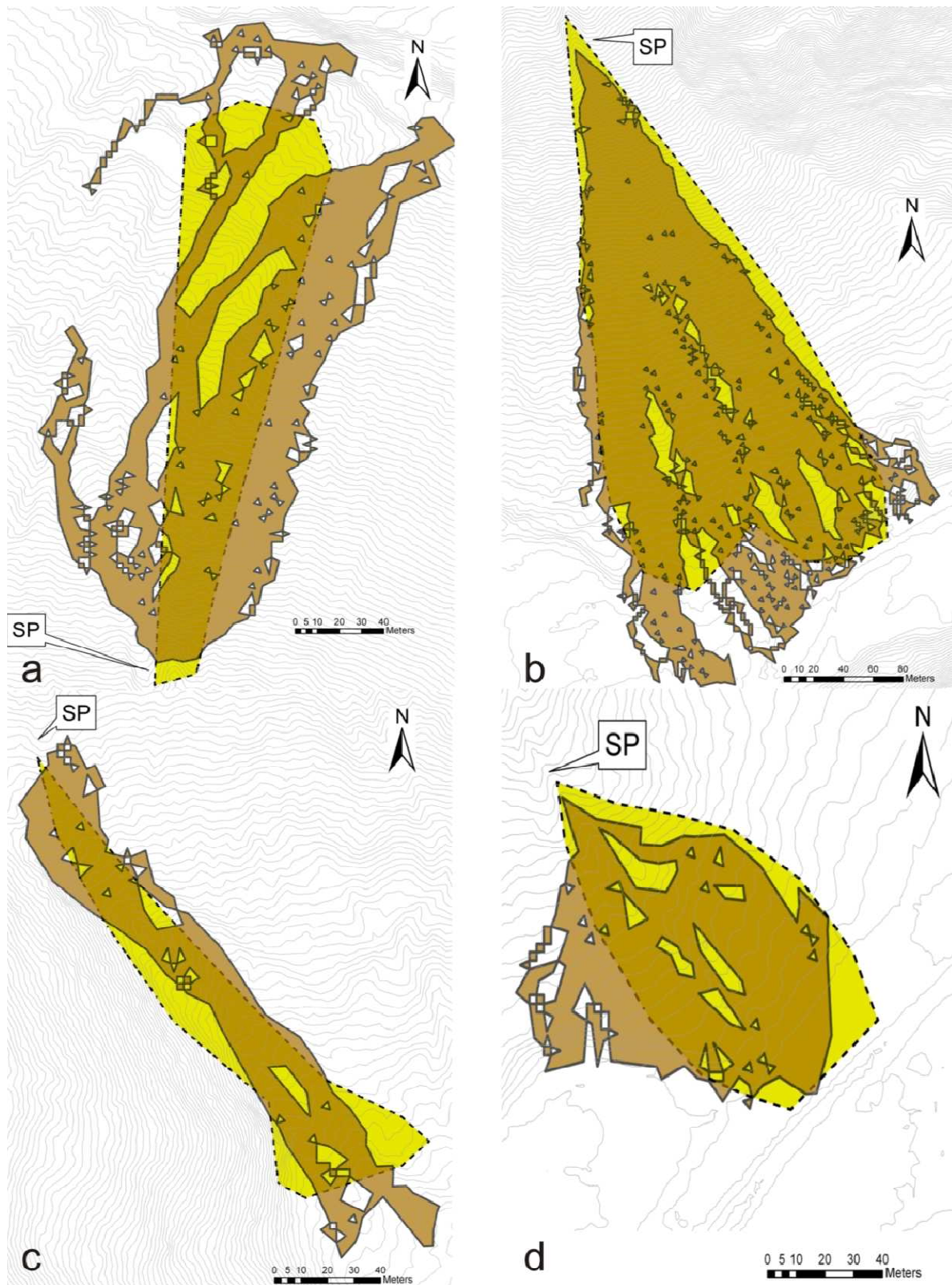


Figura 3.23 - Comparação de áreas de deposição de fluxos de detritos observados e previstos pelo programa computacional *TopRunDF* (SCHEIDL, 2009).

Estes fenômenos são dificilmente evitados, o que exige o emprego de medidas de mitigação e/ou convivência com o problema. As barreiras flexíveis de impacto têm grandes vantagens, pois não interferem com a geometria do talude e não exigem espaços livres para a sua instalação, além de se adaptarem facilmente a grandes extensões de área instável. A utilização deste tipo de estrutura ainda não é prática corrente no Brasil, conforme menciona NUNES & RIOS FILHO (2009).

Contrariamente a queda de rochas, onde os esforços de impacto são definidos para o bloco em movimento, os esforços típicos de fluxos de detritos não são facilmente determinados.

WENDELER *et al.* (2006) reportam um programa experimental desenvolvido para analisar as características mais adequadas de barreiras flexíveis contra fluxo de detritos. As Figuras 3.24 e 3.25 apresentam uma barreira de teste, instalada no *Illgraben*, na Suíça, para este fim.



Figura 3.24 - Barreira flexível para teste, *Illgraben* (WENDELER *et al.*, 2006).



Figura 3.25 - Barreira de teste no *Illgraben*, após evento de fluxo de detritos (WENDELER *et al.*, 2006).

Os parâmetros para a caracterização dos fluxos de detritos e dimensionamentos das barreiras são limitados e em alguns casos ainda não investigados. Uma das limitações tem origem na mecânica complexa das duas fases do fluxo e outra na dificuldade de medição de parâmetros do tipo energia do movimento.

Enfoques simplificados podem ser encontrados em RICKENMANN (1999) e ROTH *et al.* (2004), nos quais é necessário estimar o volume do fluxo de detritos. WENDERLER *et al.* (2006) informam que volume de material, que potencialmente poderá ser retido numa barreira flexível, encontra-se entre 100 m^3 e 1000 m^3 .

Como já mencionado, o volume é relacionado à vazão máxima do fluxo, portanto, as relações propostas por MIZUYAMA *et al.* (1992), RICKENMANN (1999), entre outros, podem ser aplicadas para o cálculo de fluxos granulares e fluxos de lama.

Por sua vez, a velocidade do fluxo pode ser estimada através da vazão de pico, mediante a expressão proposta por RICKENMANN (1999) dada por:

$$v = 2,1 \cdot Q_p^{0,33} \cdot S^{0,33} \quad (3.22)$$

Onde:

Q_p : vazão máxima (m³/s);

S: inclinação da calha do canal de fluxo.

No Japão, o PWRI (1988) recomenda o cálculo da velocidade média por médio da equação de Manning-Strickler, dada por:

$$v = \frac{1}{n_d} \cdot h^{0,67} \cdot S^{0,5} \quad (3.23)$$

Onde:

n_d : coeficiente de Manning que varia entre 0,05 s/m^{1/3} e 0,18 s/m^{1/3};

h: espessura do fluxo;

S: declividade do canal de fluxo.

ROTH *et al.* (2004) propõem que a carga máxima de impacto na barreira seja determinada através da comparação das velocidades máximas calculadas por meio das Equações 3.22 e 3.23.

A espessura do fluxo pode ser calculada em função da largura da seção transversal e da vazão máxima, através da expressão, na qual h varia entre 0,1m e 1 m:

$$h = \frac{Q_p}{v \cdot b} \quad (3.24)$$

A densidade do material depende de diversos fatores, geralmente variando entre $\rho_d = 1800 \text{ kg/m}^3$ e 2300 kg/m^3 . Nos testes da barreira de *Illgraben*, já foi medida uma densidade igual a 2100 kg/m^3 (WENDELER *et al.*, 2006).

O processo de acumulação de material na barreira é um dos menos conhecidos, pois depende do tempo de enchimento e do impacto. WENDELER *et al.* (2006) assumem que apenas uma parte do fluxo de detritos fica retida na barreira. O valor da massa de detritos diretamente retida pela barreira pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$M = \rho_d \cdot Q_p \cdot T_{imp} \quad (3.25)$$

com M variando entre 10 000 e 200 000 kg.

A energia cinética da barreira da barreira pode ser estimada considerando a velocidade média de fluxo calculada com as equações propostas anteriormente. Portanto, a energia cinética é calculada por:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \quad (3.26)$$

com E_{kin} entre 100 – 3 000 kJ.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados diversos casos de fluxos de detritos na Europa, Ásia, Estados Unidos, América Latina, com especial destaque para os eventos brasileiros. As características destes movimentos foram utilizadas como base de dados para a formulação de relações empíricas representativas do comportamento dos fluxos de detritos. Estas relações empíricas permitem a determinação dos principais parâmetros de fluxo de detritos em função de características mais facilmente identificáveis destes fenômenos.

Apesar da importância de se registrar as características de fluxo de detritos, um exame da literatura mostra que vários aspectos destes movimentos não são considerados e/ou observados após a sua ocorrência. Desta forma, procurou-se elaborar uma ficha geral de caracterização de fluxo de detritos com a finalidade de facilitar o registro da ocorrência e, como consequência, facilitar a montagem de uma base de dados. A Tabela 3.13 apresenta uma proposta de ficha de caracterização de fluxos de detritos.

É importante salientar que uma das maiores dificuldades encontradas nesta pesquisa foi a montagem de uma base de dados com todos os parâmetros essenciais para emprego das relações empíricas. Na maioria dos eventos, alguns parâmetros não são registrados, dificultando a caracterização do fluxo de detritos.

Tabela 3. 14 – Ficha de caracterização proposta para levantamento de dados de fluxos de detritos.

DADOS GERAIS		
Caso		
Origem		
Classificação		
Local (Cidade - País)		
Data		
Referência		
Mecanismos de accionamento		
Conseqüências		
GEOMETRIA		
MORFOLOGIA		
	Fonte	Depósito
Superfície da área		
Material arrastado ao longo do caminho		
Manto superficial		
Água		
DETALHES GEOMETRIA		
Volume (m ³)		
Descarga pico (m ³ /s)		
Ângulo de inclinação (°)	Caminho	
	Fonte	
	Depósito	
Falha visível na superfície?		
PARÂMETROS DO MOVIMENTO		
Velocidade do escorregamento (m/s)	Máxima :	
	Media :	
Espessura do mat depositado (m)	Máxima :	
	Media :	
Tempo de duração (s)		
Distância percorrida (m)		
OUTROS DETALHES IMPORTANTES		
SOLUÇÕES PROPOSTAS		

A Tabela 3.14 apresenta como exemplo a ficha de caracterização do evento ocorrido na Venezuela em dezembro de 1999. Esta ficha contém os dados mais importantes do fluxo de detritos, compilados de diversas referências.

A ficha de cadastro ou caracterização foi elaborada visando a montagem de um banco de dados para uso posterior em análises das relações empíricas de fluxo de detritos. Ressalta-se que diversos parâmetros ou características foram relacionados para a composição da ficha de cadastro. Entretanto, alguns dados são desconhecidos, impossibilitando a caracterização completa do evento.

De maneira análoga ao caso da Venezuela, a Tabela 3.14 apresenta a ficha de caracterização do fluxo de detritos de Cubatão com suas principais características.

Tabela 3.15 – Ficha de caracterização do fluxo de detritos na Venezuela em 1999.



DADOS GERAIS	
Caso	Venezuela 1999
Origem	Deslizamento
Classificação	Debris flow
Local (Cidade - País)	Estado de Vargas - Venezuela
Data	16/dez/99
Referência	Mathias Jakob & Oldrich Hungr (2006)
Mecanismos de accionamento	2 estações: Maiquetia e Mamo. Maiquetia registrou, nos primeiros 17 dias de dezembro, 1207mm de precipitação. Mamo registrou 438mm. O período de retorno em 1999 foi de aproximadamente 270 anos, muito superior ao previsto de 52 anos.
Consequências	40000 mortes. 23000 casas destruídas e 65000 casas com danos graves. Perdas econômicas estimadas em 2 bilhões de dólares. Material depositado no mar estimado em 150 ha.
GEOMETRIA	
 <p>Antes</p>	 <p>Depois</p>

Tabela 3.14 (cont.) – Ficha de caracterização do fluxo de detritos na Venezuela em 1999.

MORFOLOGIA	
	Fonte
	Depósito
Superfície da área	
Material arrastado ao longo do caminho	
Manto superficial	
Água	
DETALHES GEOMETRIA	
Volume (m ³)	20 000 000
Descarga pico (m ³ /s)	1.670
Ângulo de inclinação (°)	Caminho
	Fonte
	Depósito
Falha visível na superfície?	
PARAMETROS DO MOVIMENTO	
Velocidade do escorregamento (m/s)	Máxima :
	Média :
Espessura do mat. depositado (m)	Máxima :
	Média :
Tempo de duração (s)	
Distância percorrida (m)	40.000
OUTROS DETALHES IMPORTANTES	
SOLUCOES PROPOSTAS	
Medidas estruturais e não estruturais. Medidas estruturais: bacias de acumulação, barreiras flexíveis e diques de contenção, mapas de risco, implementação de sistema de alerta, leis de uso de terras e planos de contingência.	

Tabela 3. 16 – Ficha de caracterização do fluxo de detritos em Cubatão em 1994.



DADOS GERAIS											
Caso	Cubatão 1994										
Origem	Deslizamento										
Classificação	Fluxo de detritos										
Local (Cidade - País)	Serra da Cubatão - São Paulo - Brazil										
Data	06 de fevereiro de 1994										
Referência	Cruz <i>et al</i> (2000); Massad <i>et al</i> (2007)										
Mecanismos de accionamento	Chuvas intensas na zona montanhosa na cota 800 m. Intensidade de chuva de 60 mm em 1 h, precipitação total alrededor de 140 mm em 3 h. Na madrugada do 06 de fevereiro, registrou-se chuvas de 105 mm em 2 h (70 mm em 1 h).										
Consequências	Danos na Refinaria Presidente Bernardes. Gastos de 10 milhões de dólares na limpeza e nas reparações. 3 semanas de interrupção das operações.										
GEOMETRIA											
 <p>Antes</p>  <p>Depois</p>											
MORFOLOGIA											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fonte</th> <th>Depósito</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Superfície da área</td> <td>Refinaria da Petrobrás</td> </tr> <tr> <td>Material amontado ao longo do caminho</td> <td>Pedras de tamanhos variados, galhos de árvores, material coluvionar, etc.</td> </tr> <tr> <td>Manto superficial</td> <td>Vegetação densa. Mata atlântica.</td> </tr> <tr> <td>Água</td> <td>Sim</td> </tr> </tbody> </table>	Fonte	Depósito	Superfície da área	Refinaria da Petrobrás	Material amontado ao longo do caminho	Pedras de tamanhos variados, galhos de árvores, material coluvionar, etc.	Manto superficial	Vegetação densa. Mata atlântica.	Água	Sim
Fonte	Depósito										
Superfície da área	Refinaria da Petrobrás										
Material amontado ao longo do caminho	Pedras de tamanhos variados, galhos de árvores, material coluvionar, etc.										
Manto superficial	Vegetação densa. Mata atlântica.										
Água	Sim										
DETALHES GEOMETRIA											
Volume (m ³)	300.000										
Descarga pico (m ³ /s)	780										
Ângulo de inclinação (°)	Caminho										
	Fonte	35									
	Depósito										
Falha visível na superfície?											

Tabela 3.15 (cont.) - Ficha de caracterização do fluxo de detritos em Cubatão em 1994.

PARAMETROS DO MOVIMENTO	
Velocidade do escoamento (m/s)	Máxima
	Media
Espessura do mat. depositado (m)	Máxima
	Media
Tempo de duração (s)	
Distância percorrida (m)	
OUTROS DETALHES IMPORTANTES	
SOLUÇÕES PROPOSTAS	
Obras de contenção e redução de energia do fluxo. Barreiras de concreto, diques para acumulação do material; num possível novo fluxo de detritos, bacias de dissipação.	

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS

Neste capítulo são analisadas algumas das fórmulas empíricas apresentadas no capítulo anterior, visando determinar uma relação que inclua casos de fluxos de detritos do Brasil aos casos internacionais. Desta forma, o capítulo apresenta as análises das principais relações empíricas da literatura que caracterizam os fluxos de detritos tanto brasileiros quanto internacionais.

4.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Foram selecionadas, para a avaliação e comparação, relações empíricas da literatura que envolvesse parâmetros de fluxo de detritos de fácil determinação e grande importância para avaliar zonas de potencial risco de ocorrência do movimento. *A priori* não é possível a quantificação dos parâmetros envolvidos num fluxo de detritos, porém as relações empíricas simplificadas podem subsidiar a estimativa das magnitudes do evento.

A base de dados para o desenvolvimento das análises foi elaborada com os eventos publicados de fluxos de detritos acontecidos no Brasil e no mundo. É importante ressaltar que alguns casos não foram considerados para certas análises, pois careciam de valores dos parâmetros envolvidos. Representadas por meio de relações gráficas objetivou-se analisar as formulações empíricas, apresentadas no capítulo anterior, e determinar novas relações mais representativas das condições destes eventos.

Considerando que o volume de fluxo de detritos varia de valores pequenos a muito grandes, usou-se a escala *log* em vários destes gráficos com a finalidade de representar melhor os intervalos de ocorrência dos eventos analisados.

Estabeleceu-se como premissa inicial as análises das relações empíricas propostas por RICKENMANN (1999). Estas relações são mais acessíveis para o cálculo de parâmetros de fluxos de detritos quando comparadas a outras da bibliografia mundial, devido à relativa simplicidade de determinação dos parâmetros envolvidos.

Estas análises subsidiaram a elaboração de novas relações empíricas em função das características de fluxo de detritos ocorridos no Brasil. As relações propostas neste trabalho foram comparadas com as existentes. Além disto, os valores determinados foram comparados aos valores medidos em fluxo de detritos ocorrido em Cubatão (1996). Isto possibilitou a avaliação do grau de confiança das relações da literatura e da proposta neste trabalho em relação ao caso brasileiro.

4.2. ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Nesta primeira etapa da análise, procurou-se associar os parâmetros comuns e mais facilmente reconhecíveis do fluxo de detritos, tais como a altura total (H), e a distância percorrida total (L).

Foram considerados 10 eventos de fluxos de detritos para esta análise, os quais são apresentados na Tabela 4.1. Ressalta-se que não são apresentados todos os eventos acontecidos no Brasil e resumidos na Tabela 3.6, devido ao fato dos parâmetros de altura total e distância percorrida não terem sido observados e registrados.

Tabela 4.1 - Eventos de fluxo de detritos – Análise de parâmetros geométricos.

Evento	Geometria			Volume*
	H/L	L	H	(m ³)
Caraguatatuba, SP (1967)	0,07	9.000	700	7.600.000
Viaduto IV, Ferrovia de Santos, SP (1971)	0,15	-	-	100.000
Grota Funda, SP (1975)	0,15	-	-	1.000.000
Córrego das Pedras, Cubatão (RPBC), SP (1994)	0,27	2.400	650	150.000
Timbé do Sul, SC (1995)	0,35	-	-	3.000.000
Córrego das Pedras, Cubatão (RPBC), SP (1996)	0,41	1.600	650	16.000
Morro do Quitite, RJ (1996)	0,47	1.500	750	90.000
Morro do Papagaio, RJ (1996)	0,47	1.500	750	42.000
Via Anchieta, SP (1999)	0,18	3.200	576	300.000
Lavrinhas, SP (2000)	0,13	6.000	800	16.000.000
* valores calculados e/ou observados				

Numa primeira fase, tomou-se como referência o gráfico elaborado por RICKENAMNN (2005) e apresentado na Figura 3.9 (Capítulo 3). Esta relação foi alterada de forma a apresentar um gráfico modificado na Figura 4.1, no qual foram desconsiderados os eventos referentes à queda de blocos, pois não fazem parte deste estudo.

Desta forma, a Figura 4.1 mostra a relação entre a inclinação dada pela razão entre altura e distância percorrida (H/L) e o volume de fluxo de detritos (V) considerando os eventos do Canadá, Suíça e Nevado Del Ruiz na Colômbia. Nesta figura ainda são apresentados os limites inferior e superior propostos por COROMINAS (1994).

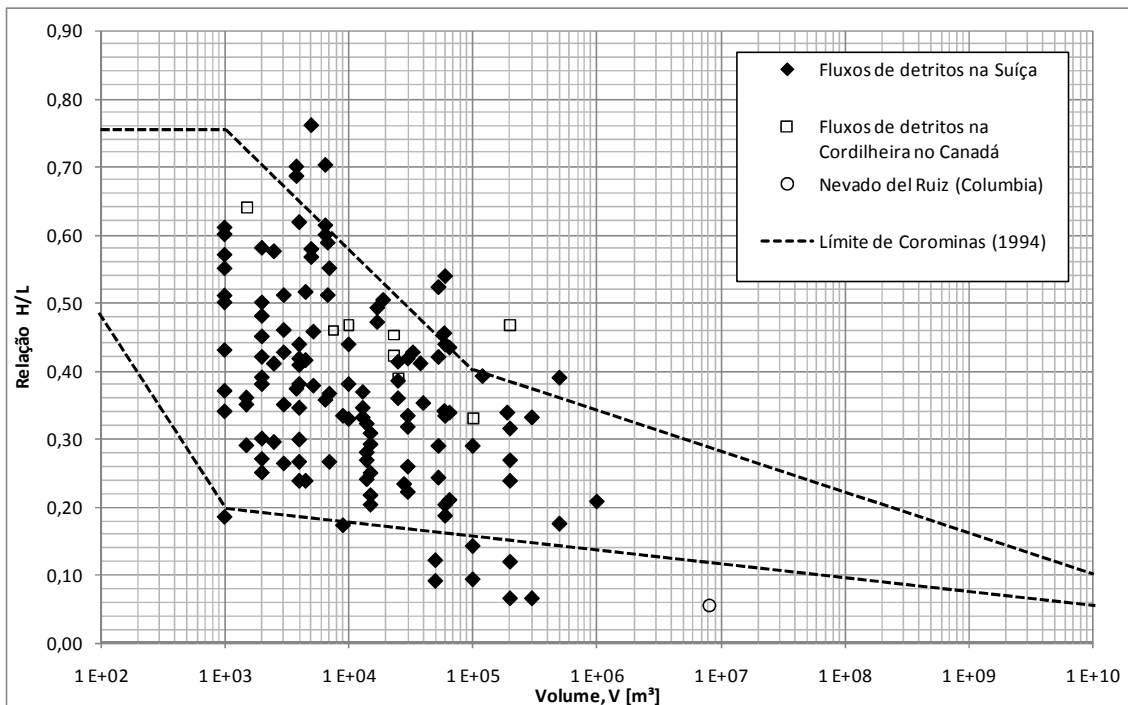


Figura 4.1 – Gráfico de relação H/L e volume (Modificado de RICKENMANN, 2005).

A Figura 4.2 apresenta a relação modificada de RICKENMANN (1999) incluindo-se os casos dos eventos de fluxos de detritos no Brasil listados na Tabela 4.1. Observa-se que somente dois eventos de fluxos de detritos brasileiros se situam fora dos limites propostos por COROMINAS (1994), a saber, Morro do Quitite e Caraguatatuba. Os eventos do Viaduto IV da Ferrovia de Santos, Via Anchieta, Grota Funda, Timbé do Sul e Lavrinhas se situam próximos ao limite superior. Enquanto os demais eventos brasileiros se posicionam mais próximos ao limite superior.

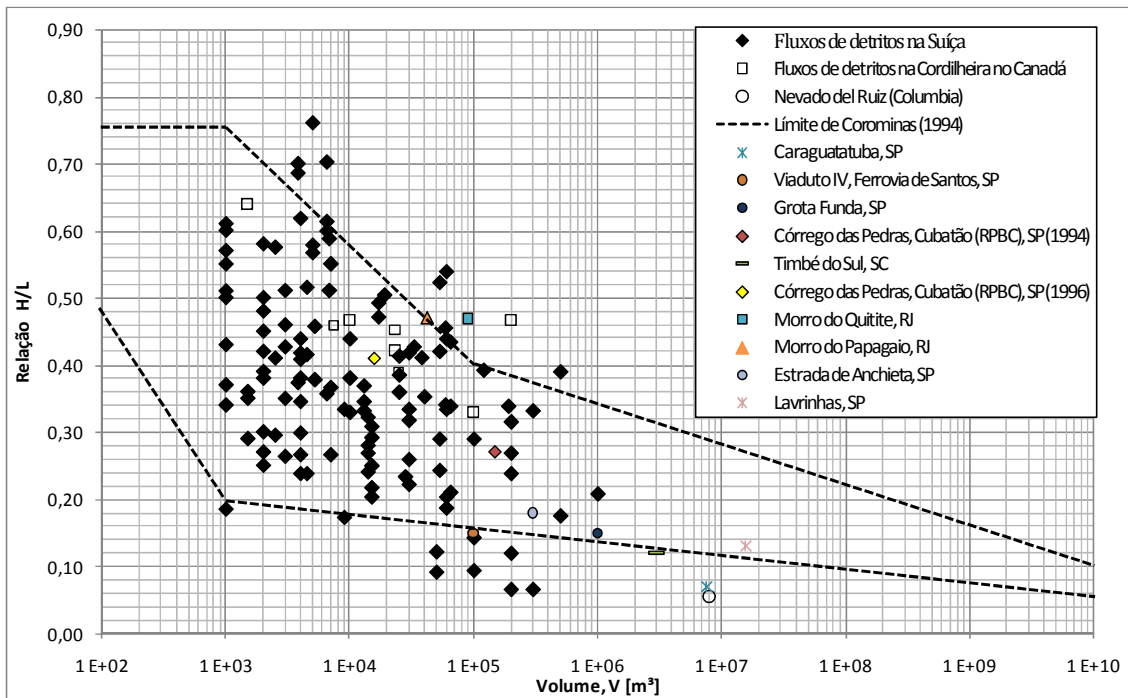


Figura 4.2 – Relação entre H/L e volume (V) incluindo os eventos brasileiros.

Considerando somente os casos acontecidos no Brasil e apresentados na Figura 4.3, procurou-se definir uma relação entre a razão H/L e o volume dos fluxos de detritos que se ajustasse aos casos analisados. Esta relação é dada por:

$$\frac{H}{L} = 3,2315 \cdot V^{-0,212} \quad (4.1)$$

Sendo assim, o volume do fluxo de detritos pode ser expresso por:

$$V = 252,84 \left(\frac{L}{H}\right)^{4,72} \quad (4.2)$$

Com V em m³.

A relação entre volume e razão H/L proposta para os eventos de fluxos de detritos do Brasil, foi comparada com 3 formulações da literatura, a saber, as relações propostas por COROMINAS (1996), RICKENMANN (1999) e GRAMANI (2001), anteriormente apresentadas no Capítulo 3. Desta forma, os volumes dos fluxos de detritos de 7 casos brasileiros foram comparados aos valores de volume calculados pelas relações

empíricas, incluindo-se a proposta neste trabalho. A Tabela 4.2 apresenta os valores de volume medidos e calculados para fins de comparação.

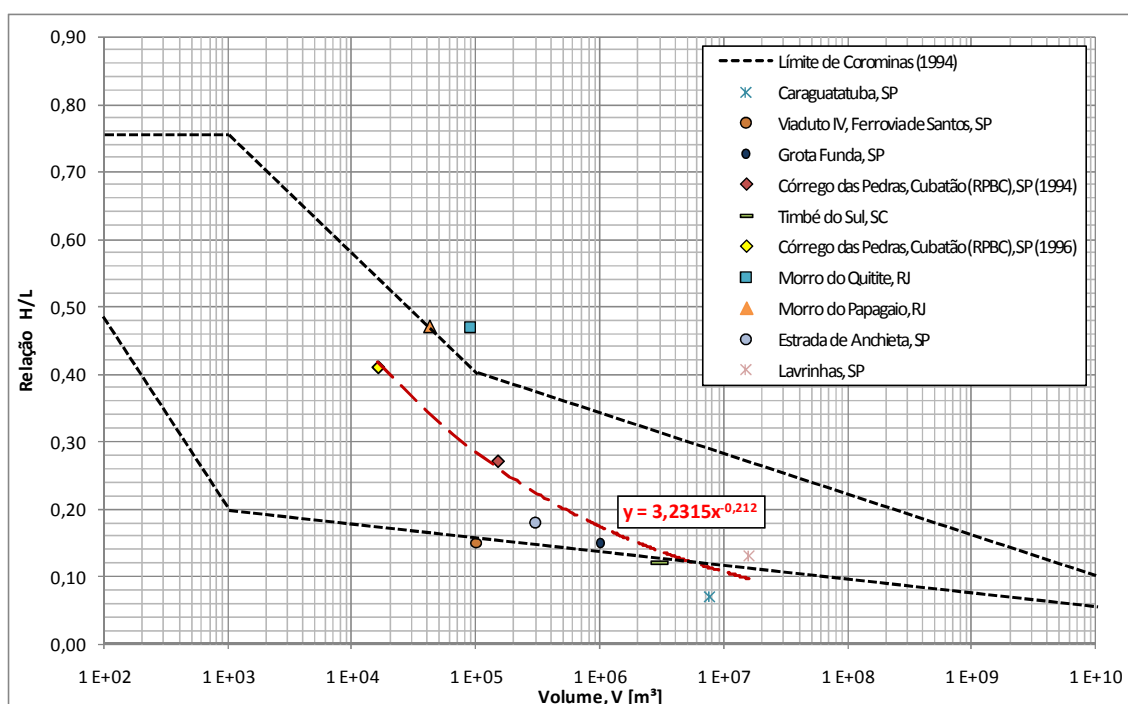


Figura 4. 3 – Relação empírica para os casos no Brasil.

Tabela 4. 2 – Volumes observados e calculados por relações empíricas para fluxos de detritos brasileiros.

Evento	Geometria			Volume (m ³)				
	H/L	L (km)	H	Observados *	Corominas (1996)	Gramani (2001)	Rickenmann (1999)	Eq. Proposta (2010)
Caraguatatuba (1967)	0,07	9	700	7.600.000	27.607.137.499	2.876.131.506	163.252.408	70.876.223
Córrego das Pedras, Cubatão (1994)	0,27	2,4	650	150.000	190.800	559.153	61.962	119.890
Córrego das Pedras, Cubatão (1996)	0,41	1,6	650	16.000	4.013	34.788	4.915	17.708
Morro do Quitite (1996)	0,47	1,5	750	90.000	556	8.390	1.563	6.650
Morro do Papagaio (1996)	0,47	1,5	750	42.000	556	8.390	1.563	6.650
Via Anchieta (1999)	0,18	3,2	576	300.000	9.340.788	9.179.141	700.303	823.598
Lavrinhas (2000)	0,13	6	800	16.000.000	162.801.166	71.696.690	6.478.225	3.392.324

* Valores de volume de fluxo de detritos reportados por GRAMANI (2001).

Para uma melhor apreciação dos resultados da Tabela 4.2, as Figuras 4.4 a 4.9 apresentam os volumes calculados e observados em forma de histograma para cada caso.

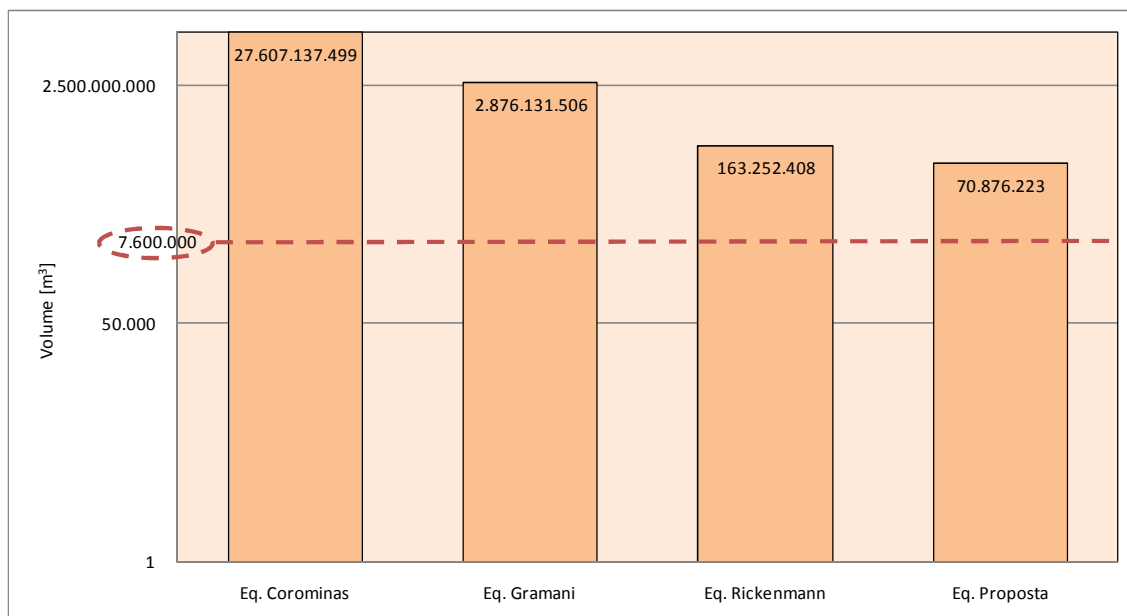


Figura 4 4 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso de Caraguatatuba (1967).

Pode-se observar na Tabela 4.2 e Figura 4.4 que nenhuma das relações adotadas é capaz de estimar o volume do fluxo de detritos de Caraguatatuba (1967). Todas as relações fornecem valores de volume muito maiores que o observado, com variações percentuais que atingem 933% para a relação proposta neste trabalho (Eq. 4.1). No caso das outras relações as variações são ainda expressivamente maiores. Isto provavelmente é consequência dos reduzidos valores da relação H/L.

Considerando o fluxo de detritos de Cubatão (1994), os volumes calculados pelas equações de COROMINAS (1996) e a proposta nesta pesquisa são iguais, respectivamente, a 127% e 80% do volume observado, indicando maior adequabilidade ao caso analisado (Tabela 4.2 e Figura 4.5). Entretanto, as equações de GRAMANI (2001) e de RICKENEMANN (1999) fornecem valores de volume de fluxo de detritos muito diferentes do observado, atingindo 373% e 41% de variação.

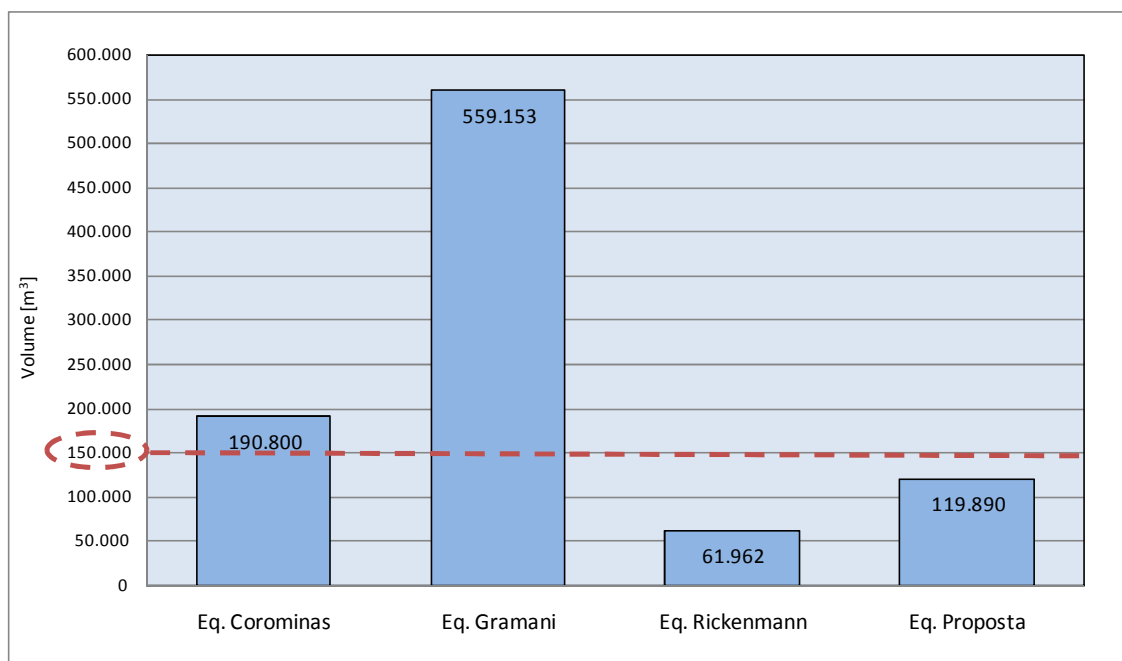


Figura 4.5 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso Cubatão (1994).

No caso de Cubatão (1996), observa-se pela Tabela 4.2 e Figura 4.6 que a melhor estimativa de volume é dada pela nova relação proposta com valor superior ao observado de apenas 11%. Novamente a relação de GRAMANI (2001) supera o volume em 217%, enquanto as relações de COROMINAS (1996) e RICKENMANN (1999) subestimam em 25% e 31%, respectivamente.

Nos eventos de fluxo de detritos dos Morros do Quitite e Papagaio (Tabela 4.2 e Figura 4.7), nota-se que nenhuma das relações analisadas é capaz de estimar os volumes observados, muito superiores aos calculados. As variações de volumes calculados em relação ao observado para Quitite se situam entre 1% e 9% (sendo igual a 7% para a relação proposta). Para o Morro do Papagaio, as variações de volume se situaram entre 1% e 20%, sendo igual a 16% para a nova relação.

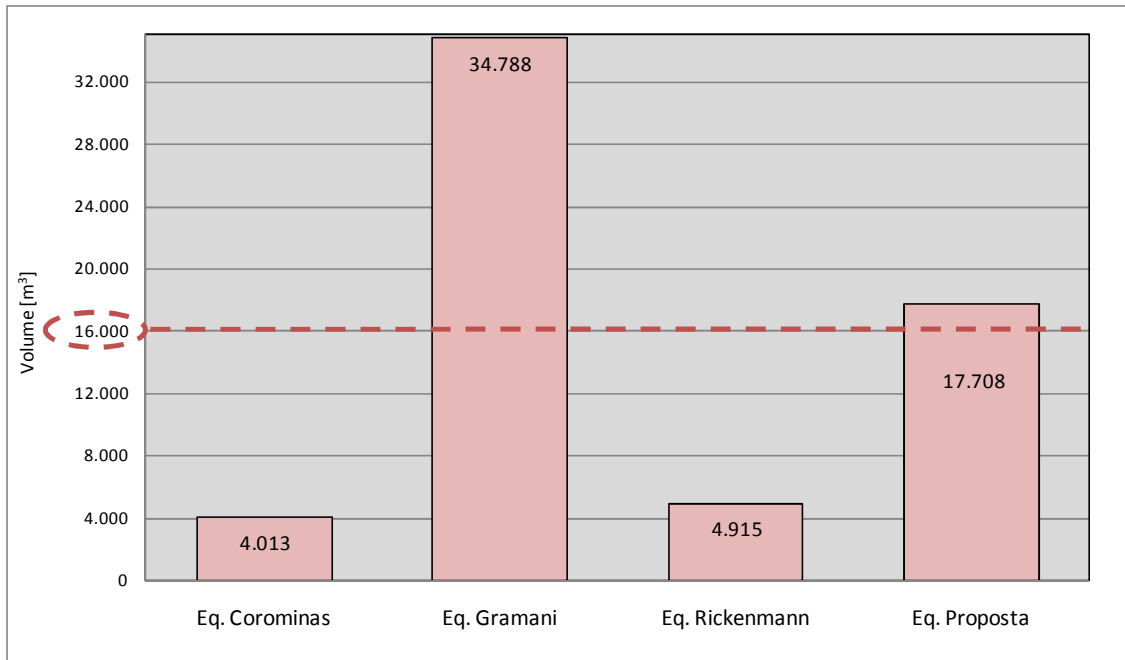


Figura 4.6 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso Cubatão (1996).

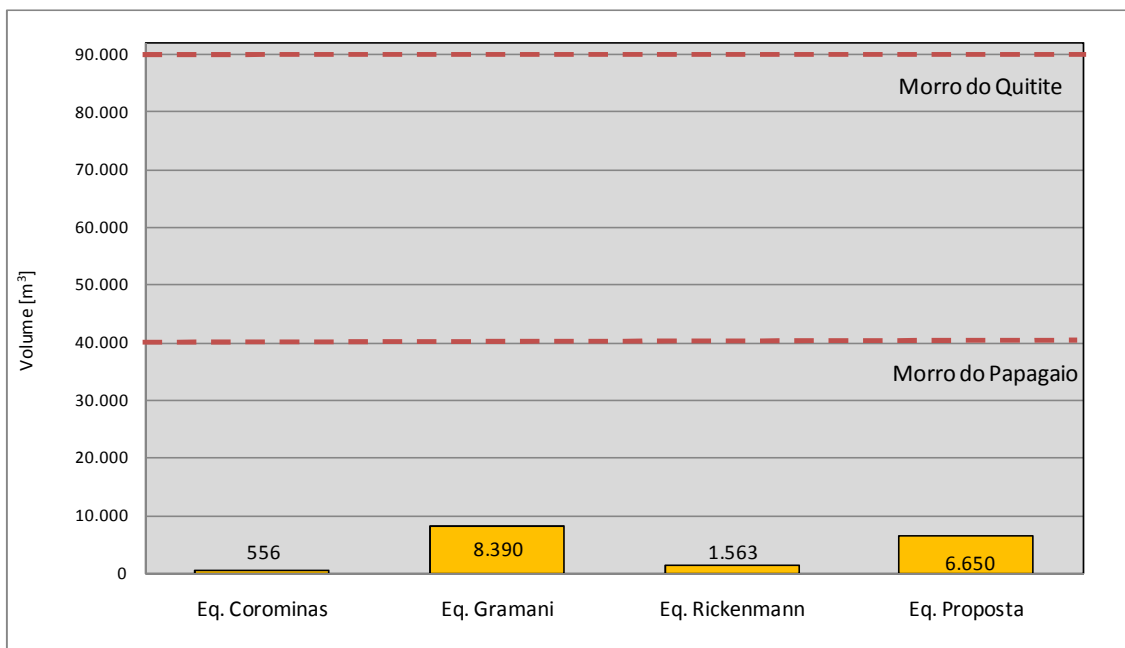


Figura 4.7 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso dos Morros de Quitite e Papagaio (1996).

No caso do fluxo de detritos da Via Anchieta também é possível observar volumes calculados muito superiores ao volume observado com variações entre 233% (Equação de RICKENMANN (1999) a 3114% (Equação de COROMINAS (1996)). A relação proposta ofereceu um volume de fluxo de detritos 275% maior que o observado (Tabela 4.2 e Figura 4.8).

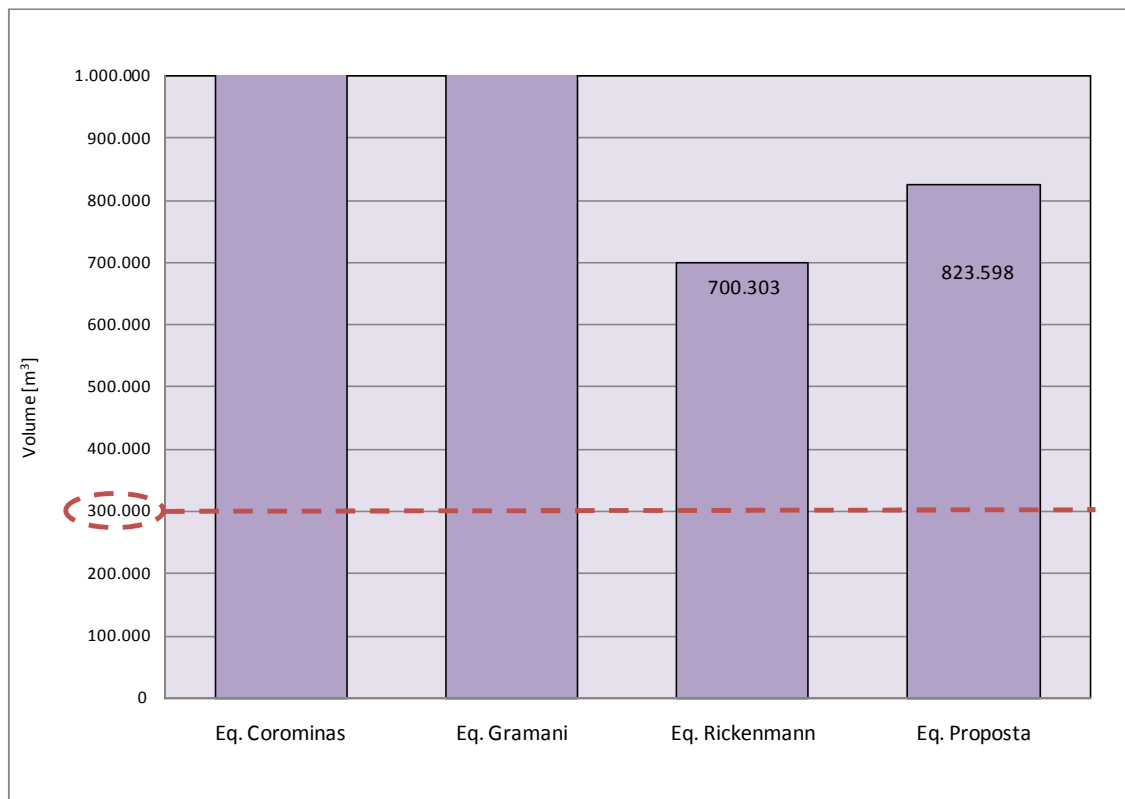


Figura 4.8 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso da Via Anchieta (1999).

Em relação ao evento de Lavrinhas (Tabela 4.2 e Figura 4.9), as relações de COROMINAS (1996) e GRAMANI (2001) superestimaram os volumes em 1018% e 448%, respectivamente. Enquanto as relações de RICKENMANN (1999) e a proposta neste trabalho subestimaram em 40% e 21%, respectivamente.

De forma geral, pode-se concluir que a relação proposta neste trabalho é capaz de representar adequadamente os eventos de Cubatão (1994 e 1996). Para os outros casos analisados, os resultados não são satisfatórios, independentemente das relações empíricas adotadas. Portanto, é recomendável uma condição de emprego ou validade da

nova relação proposta. Esta condição seria representada pela relação H/L compreendida no intervalo de 0,20 a 0,45.

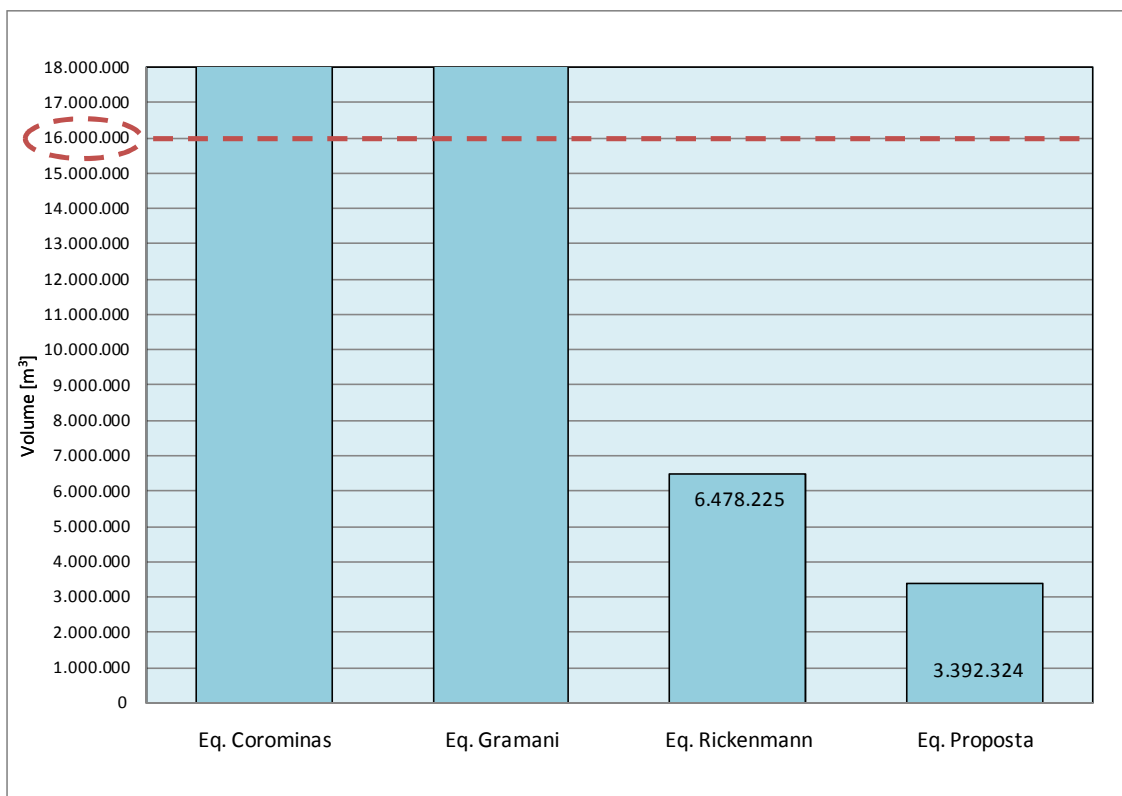


Figura 4. 9 – Comparação de relações empíricas de volume e H/L - Caso de Lavrinhas (2001).

4.3. ANÁLISE DA VAZÃO DE PICO

De maneira análoga à análise dos parâmetros geométricos foi adotada como referência a relação entre vazão de pico e volume proposta por RICKENMANN (1999), considerando os casos por ele estudados (Figura 3.15).

Desta forma, os valores de vazão de pico e volume dos fluxos de detritos analisados por RICKENMANN (1999) foram plotados em escala logarítmica, conforme apresentado na Figura 4.10. O evento de Cubatão (1994), que dispõe dos dois parâmetros, vazão e volume, foi adicionado ao gráfico desta figura.

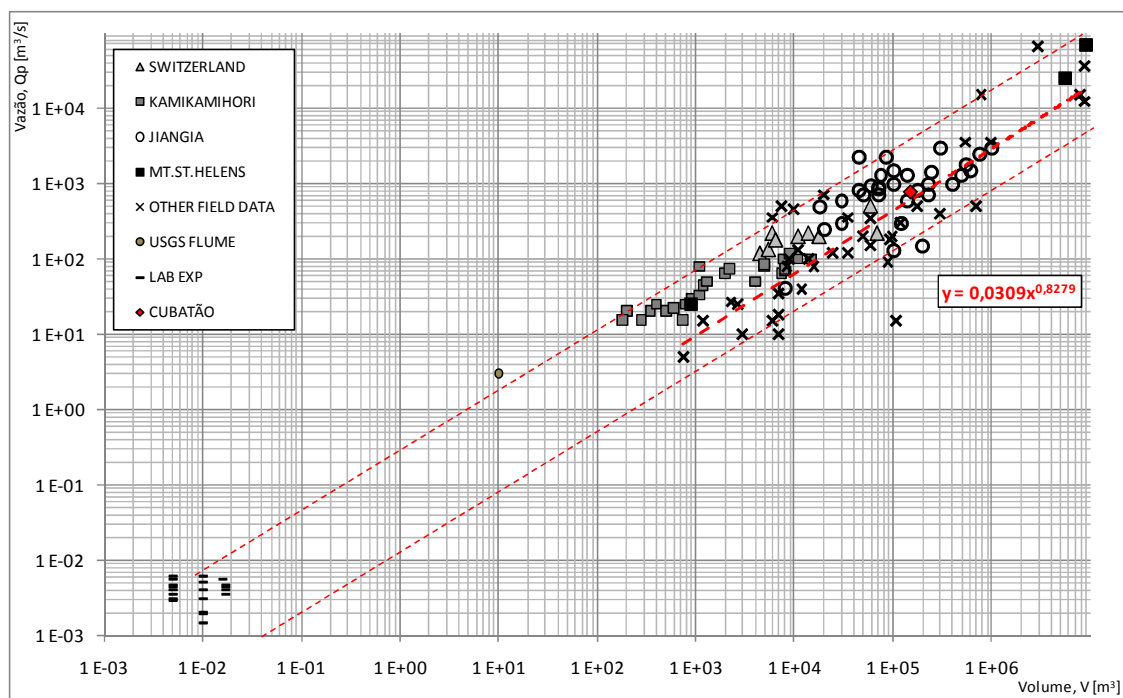


Figura 4.10 – Relação entre vazão de pico e volume dos fluxos de detritos analisados por RICKENMANN (1999) e de Cubatão (1994).

É importante ressaltar que da pequena base de dados de eventos de fluxos de detritos acontecidos no Brasil, somente para Cubatão foi medido o valor de vazão.

A partir da relação apresentada na Figura 4.10, procurou-se identificar limites de máximo e mínimo para a concentração de pontos, os quais são representados pelas duas linhas tracejadas finas em vermelho. A linha tracejada grossa também em vermelho representa a média dos valores, cuja expressão é dada por:

$$Q_p = 0,0309 \cdot V^{0,8279} \quad (4.3)$$

Onde

Q_p : Vazão de pico em m^3/s ;

V : Volume do fluxo de detritos em m^3 .

Esta relação foi comparada a outras da literatura para conferir seu real comportamento e confiança de resultados. As relações adotadas para a comparação são as propostas por MIZUYAMA *et al.* (1994), BOVIS & JAKOB (1994) e RICKENMANN (1999). A

Tabela 4.3 apresenta o resultado desta análise. Pode-se observar que somente o caso de Cubatão (1994) tem o valor da vazão observada. Desta forma, somente é possível fazer a comparação de valores observados com os valores de vazão de pico calculados pelas relações empíricas para o fluxo de detritos de Cubatão (1994). Nesta condição, pode-se afirmar que a relação proposta neste trabalho é a única capaz de calcular uma vazão de pico (596 m³/s) próxima da observada durante o evento (780 m³/s).

Tabela 4. 3 – Valores de vazões de pico calculados por relações empíricas para fluxos de detritos brasileiros.

Evento	Volume (m ³)	Vazão de pico (m ³ /s)					
		Real *	Eq. Proposta (2010)	Rickenmann (1999)	Mizuyama <i>et al.</i> (1992) Granular	Mizuyama <i>et al.</i> (1992) Lama	Bovis & Jakob (1999) Granular
Viaduto IV, Ferrovia de Santos (1971)	100.000		426	1.462	1.072	168	1.265
Grota Funda (1975)	1.000.000		2.867	9.954	6.462	1.033	10.048
Rio Cachoeira, Cubatão (1976)	100.000		426	1.462	1.072	168	1.265
Córrego das Pedras, Cubatão (1994)	150.000	780	596	2.050	1.471	231	1.822
Timbé do Sul (1995)	3.000.000		7.118	24.857	15.223	2.461	27.007
Córrego das Pedras, Cubatão (1996)	16.000		93	318	257	39	243
Morro do Quitite (1996)	90.000		390	1.339	988	154	1.150
Morro do Papagaio (1996)	42.000		208	710	545	84	579
Via Anchieta (1999)	300.000		1.058	3.651	2.526	399	3.400
Lavrinhas (2001)	16.000.000		28.461	100.238	56.176	9.234	121.834
* Valor observado e apresentado na literatura							

A Figura 4.11 ilustra o grau de confiança da relação proposta para o cálculo da vazão de pico do fluxo de detritos de Cubatão (1994). As relações de MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos granulares, RICKENMANN (1999) e BOVIS & JAKOB (1999) superestimam expressivamente o valor real da vazão de pico.

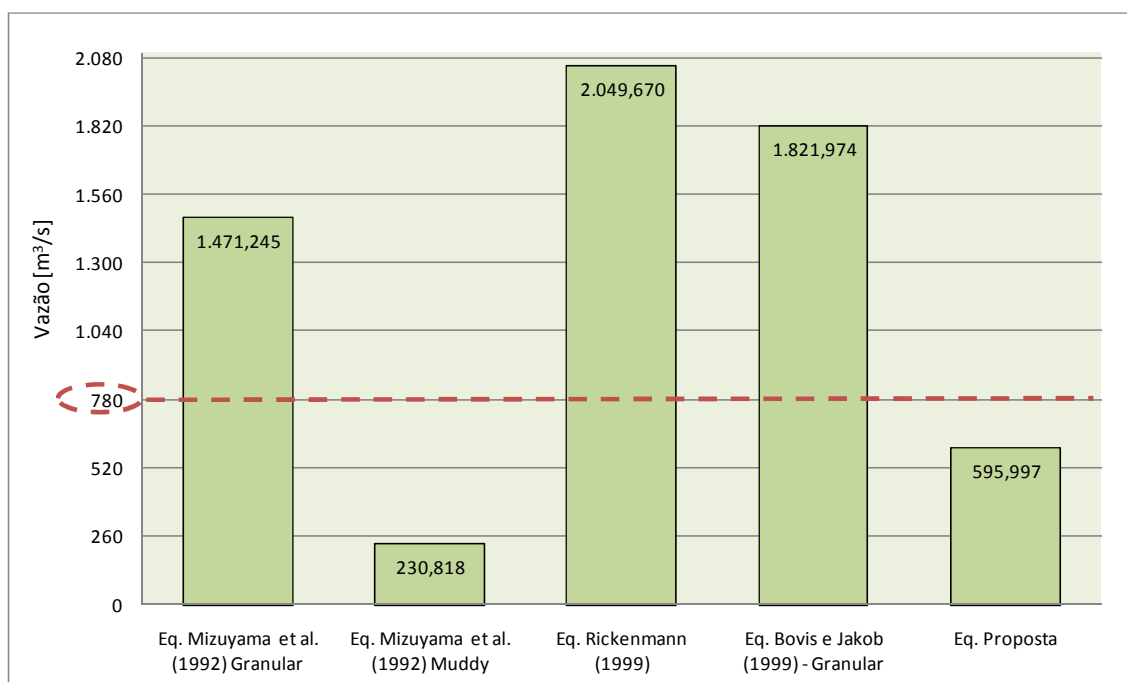


Figura 4.11 – Comparação de relações empíricas de vazão e volume – Caso de Cubatão (1994).

Na Tabela 4.3 também é possível observar, através dos valores de vazão máxima calculados para todos os eventos, que as relações empíricas de RICKENMANN (1999), MIZUYAMA *et al.* (1992) e BOVIS & JAKOB (1999) oferecem os maiores valores. No entanto, a relação MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos de lama subestima a vazão de pico.

A Figura 4.12 apresenta as correlações entre vazão pico e volume do fluxo de detritos calculados mediante as equações empíricas adotadas e a proposta neste trabalho.

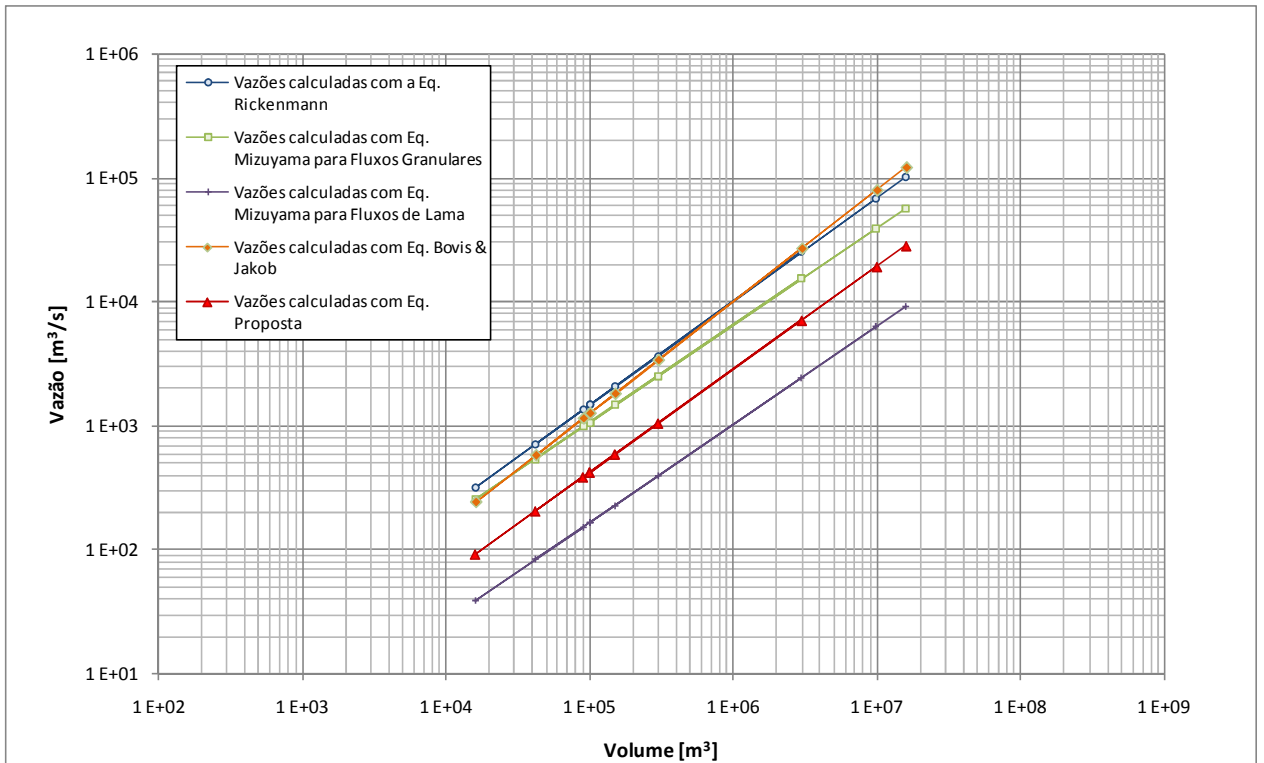


Figura 4.12 – Vazões calculadas por relações empíricas para os fluxos de detritos no Brasil.

4.4. ANÁLISE DA DISTÂNCIA PERCORRIDA

Para a análise da distância percorrida pelos fluxos de detritos no Brasil, foram analisados os mesmos eventos apresentados na Tabela 4.1. O objetivo é determinar uma relação entre a distância percorrida e o volume de detritos depositado considerando somente eventos brasileiros e compará-la com a relação proposta por RICKENMANN (1999) representada pela Equação 3.7.

A Figura 4.13 apresenta esta relação, dada por:

$$L = 106,61 \cdot V^{0,2591} \quad (4.4)$$

Com V em m³.

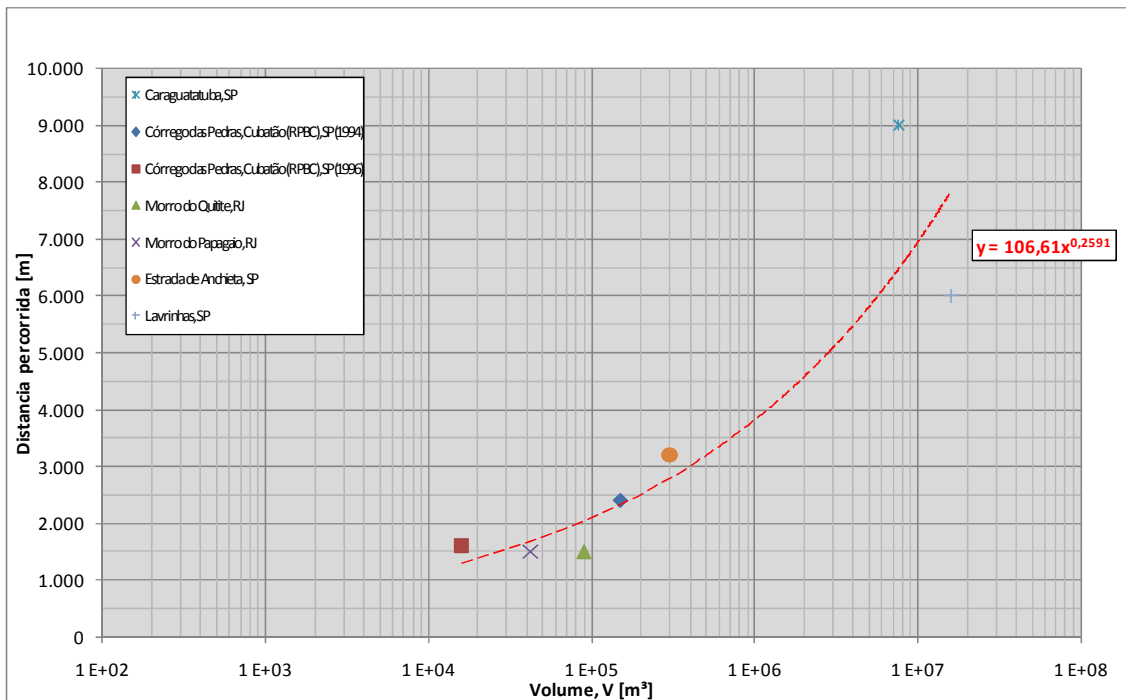


Figura 4.13 – Relação entre volume e distância percorrida para fluxos de detritos no Brasil.

A Equação 4.4 foi comparada com a formulação de RICKENMANN (2005) desenvolvida a partir dos numerosos casos de fluxo de detritos estudados pelo autor.

A Tabela 4.4 apresenta os valores da distância percorrida observados e calculados em função do volume através da Equação 4.4 proposta e da Equação 3.7 de RICKENMANN (1999). A Figura 4.14 resume graficamente a variação de valores das distâncias percorridas pelos fluxos de detritos tanto observadas quanto calculadas para os 7 casos brasileiros.

No caso de Caraguatatuba, observa-se que os valores de L calculados pela relação proposta e a de RICKENMANN (1999) são iguais a 72% e 61% da distância observada, respectivamente (Tabela 4.4 e Figura 4.14).

Em relação aos fluxos de detritos de Cubatão (1994) e (1996), as distâncias calculadas pela equação proposta foram iguais, respectivamente, a 97% e 82% do valor observado. Os valores calculados por RICKENMANN (1999) foram iguais a 115% e 121%, respectivamente.

Tabela 4.4 – Valores da distância percorrida observados e calculados pela relação proposta e a de RICKENMANN (1999) para fluxos de detritos brasileiros.

Evento	H/L	H (m)	Volume (m ³)	L (m)		
				Observado *	Rickenmann (1999)	Eq. Proposta (2010)
Caraguatatuba (1967)	0,07	700	7.600.000	9.000	5.510	6.466
Córrego das Pedras, Cubatão (1994)	0,27	650	150.000	2.400	2.765	2.338
Córrego das Pedras, Cubatão (1996)	0,41	650	16.000	1.600	1.933	1.309
Morro do Quitite (1996)	0,47	750	90.000	1.500	2.869	2.049
Morro do Papagaio (1996)	0,47	750	42.000	1.500	2.540	1.681
Via Anchieta (1996)	0,18	576	300.000	3.200	2.794	2.798
Lavrinhas (2001)	0,13	800	16.000.000	6.000	6.934	7.841
*Valores calculados e/ou observados reportados na literatura						

As distâncias calculadas para os fluxos do Morro do Quitite e Papagaio foram superiores aos valores observados. Segundo a equação proposta, os valores calculados foram iguais a 137% (Quitite) e 112% (Papagaio) do valor real. Segundo RICKENMANN (1999), as distâncias calculadas foram iguais a 191% (Quitite) e 169% (Papagaio).

No caso da Via Anchieta, as distâncias calculadas pelas duas relações foram iguais a 87% do valor observado.

No entanto, para o fluxo de detritos de Lavrinhas, a equação proposta forneceu uma distância percorrida igual a 131% do valor observado e a de RICKENMANN (1999) foi igual a 116%.

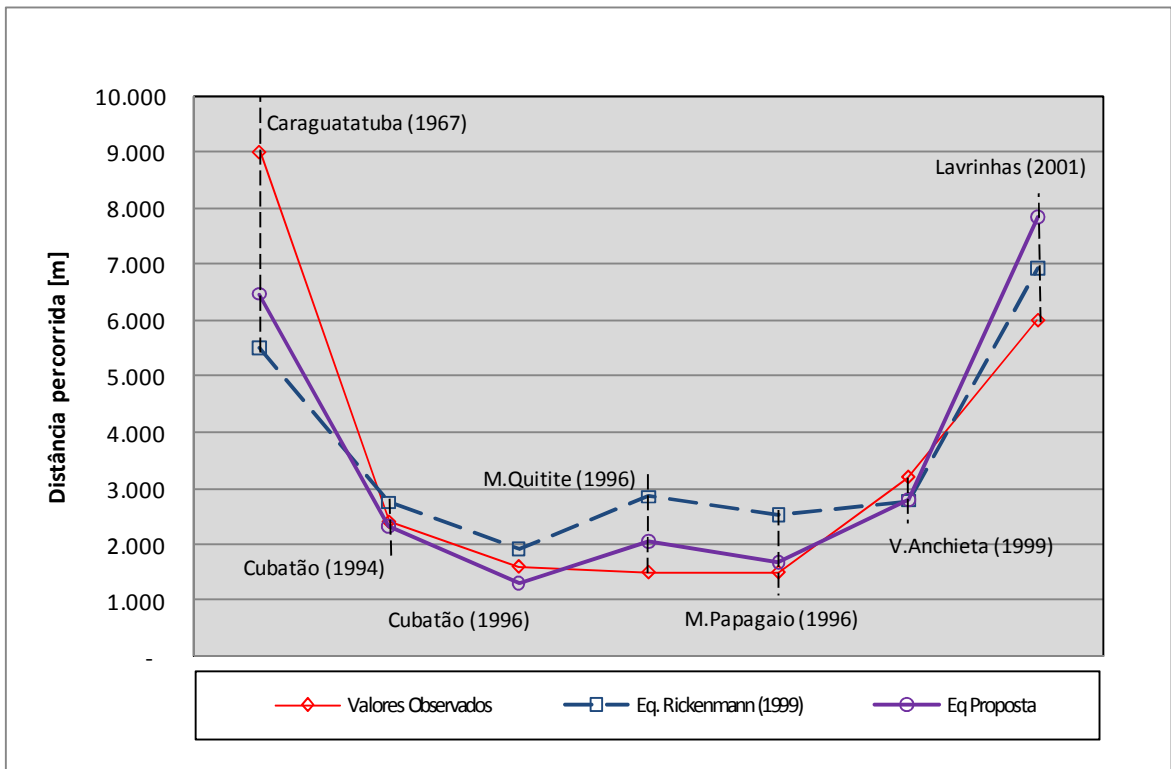


Figura 4.14 – Curvas de distância percorrida observada e calculada pela relação proposta e a relação de RICKENMANN (2005) para fluxos de detritos no Brasil.

Apesar das variações de L calculadas em relação a L observada atingirem um máximo de 137% para a equação proposta, pode-se concluir que esta relação empírica oferece resultados satisfatórios e mais próximos da realidade, quando comparadas com os resultados da relação de RICKENMANN (1999).

4.5. ANÁLISE DA VELOCIDADE DO FLUXO E O VOLUME

GRAMANI (2001) reporta que as velocidades dos fluxos de detritos naturais podem variar de 0,5 a 20 m/s, sendo comuns velocidades em torno de 8 a 10m/s. Porém, podem atingir valores elevados, da ordem de 100m/s.

Para a avaliação do parâmetro de velocidade, RICKENMANN (1999) propõe a relação apresentada na Equação 3.22, na qual relaciona a velocidade com a vazão do fluxo de detritos e a inclinação do canal ($V = 2,1Q^{0.33}S^{0.33}$). A dificuldade em se utilizar esta

equação reside no fato de que somente a vazão é conhecida para o evento de Cubatão (1994), conforme apresentado por KANJI *et al.* (2009).

Desta forma, foi realizada uma análise comparativa das velocidades de fluxo de detritos, usando a Equação (3.22), adotando-se valores de vazão de pico calculados pelas relações propostas por:

- (i) Este trabalho, correspondente à Equação 4.3;
- (ii) RICKENMANN (1999) correspondente à Equação 3.1;
- (iii) MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos granulares, apresentada na Tabela 3.8;
- (iv) MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos de lama, apresentada na Tabela 3.8;
- (v) BOVIS & JAKOB (1999) para fluxos granulares, apresentada na Tabela 3.8.

Os valores de vazão de pico assim calculados são apresentados, anteriormente, na Tabela 4.3 para o fluxo de detritos de Cubatão (1994). Com estes valores de vazão de pico, as velocidades de fluxo foram calculadas e são apresentadas na Tabela 4.5 em função das diferentes relações empíricas para estimativa de vazão.

Tabela 4.5 – Valores da velocidade observada e calculados, em função da vazão observada e calculada para Cubatão (1994).

Origem dos Valores de Vazão de Pico	Vazão de Pico (m³/s)	Velocidade ⁽²⁾ (m/s)
Observado ⁽¹⁾	780	10,00
Bovis & Jakob (1999) - Fluxos Granulares	1.822	16,24
Mizuyama et al (1992) – Fluxos Granulares	1.471	15,13
Mizuyama et al (1992) – Fluxos de Lama	231	8,21
Rickenmann (1999)	2.050	16,88
Eq. Proposta (2010)	596	11,23
⁽¹⁾ Valor observado reportado na literatura.		
⁽²⁾ Velocidade calculada usando a relação de RICKENMANN (1999) para todos os casos.		

Observa-se na Tabela 4.5 que a vazão calculada por meio da equação proposta oferece um valor de velocidade (11,2 m/s) bastante próximo ao medido e/ou calculado no evento (10,0 m/s) e informado por GRAMANI (2001).

As variações percentuais dos valores de velocidades calculados a partir dos valores de volume fornecidos pelas relações empíricas da literatura são apresentadas na Figura 4.15. Observa-se que as relações de BOVIS & JACOB (1999), MIZYAMA *et al.* (1992) para fluxos granulares e RICKENMAN (1999) são as mais inadequadas, fornecendo valores de velocidade, respectivamente, maiores que 51%, 62% e 69% do valor observado em Cubatão. Entretanto, a relação de MIZYAMA *et al.* (1992) para fluxos de lama oferece um valor mais e igual a 82% da velocidade observada. No caso da equação proposta, o valor calculado é apenas 12% superior ao valor de velocidade observado, o que permite confirmar a confiança desta relação para a estimativa de velocidade de fluxos de detritos.

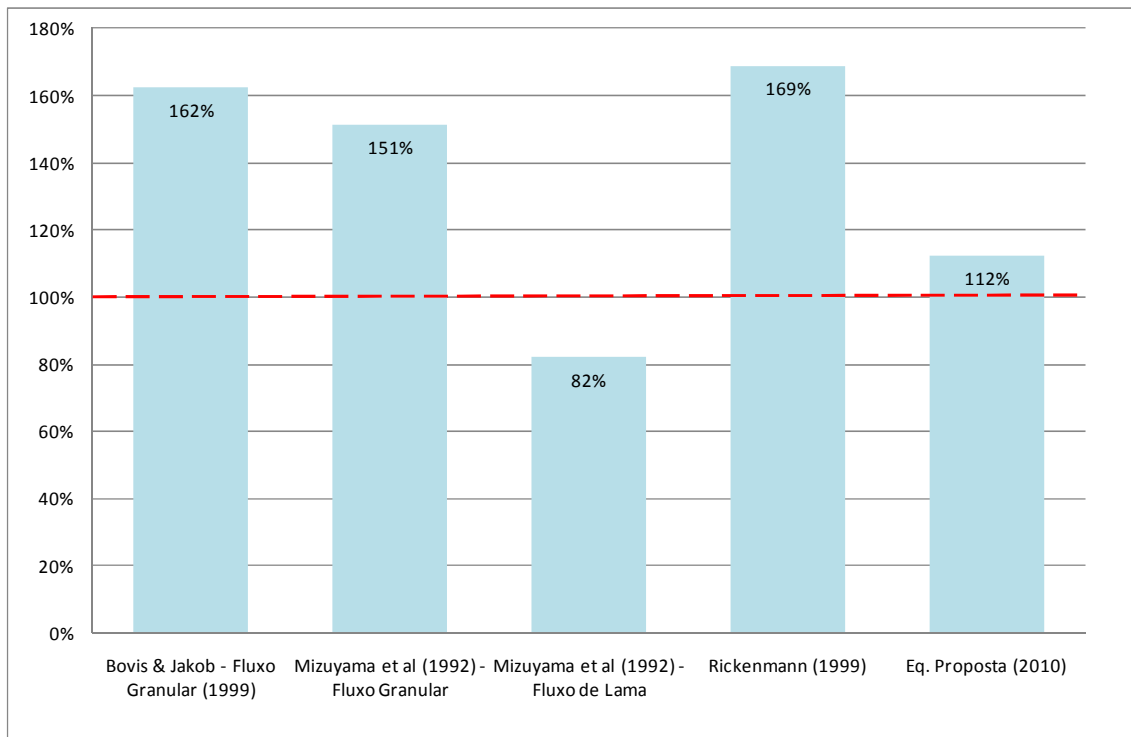


Figura 4.15 – Variações percentuais dos valores de velocidade do fluxo de detritos de Cubatão (1994).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

São diversos e distintos os parâmetros considerados na análise dos fluxos de detritos. Neste trabalho foram selecionados alguns destes parâmetros considerados mais importantes e, principalmente, mais acessíveis. Com estes parâmetros de mais fácil identificação, procurou-se estabelecer relações empíricas capazes de representar o comportamento dos fluxos de detritos brasileiros.

Os parâmetros selecionados correspondem à altura total do movimento e distância percorrida pelo fluxo de detritos, chamados de parâmetros geométricos, vazão de pico, volume e velocidade. Foram selecionados eventos de fluxos de detritos brasileiros com registros de alguns destes parâmetros para as análises de correlações. Os casos brasileiros são representados por Caraguatatuba, SP (1967), Viaduto IV da Ferrovia de Santos, SP (1971), Grota Funda, SP (1975), Córrego das Pedras, Cubatão (RPBC), SP (1994) e (1996), Timbé do Sul, SC (1995), Morro do Quitite, RJ (1996), Morro do Papagaio, RJ (1996), Via Anchieta, SP (1999) e Lavrinhas, SP (2000).

A relação entre volume e razão H/L proposta para os eventos de fluxos de detritos do Brasil foi comparada com as expressões empíricas de COROMINAS (1996), RICKENMANN (1999) e GRAMANI (2001), oferecendo os melhores resultados para casos de fluxos de detritos com relação H/L compreendida no intervalo de 0,20 a 0,45.

A relação entre vazão de pico e volume dos fluxos de detritos foi comparada às de MIZUYAMA *et al.* (1994), BOVIS & JAKOB (1994) e RICKENMANN (1999), para o caso de Cubatão (1994) que tem o valor da vazão observada. A nova relação proposta neste trabalho é a única capaz de calcular uma vazão de pico ($596 \text{ m}^3/\text{s}$) próxima da observada durante o evento ($780 \text{ m}^3/\text{s}$).

As velocidades de fluxo de detritos calculadas a partir dos valores de volume fornecidos pelas relações empíricas de BOVIS & JACOB (1999), MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos granulares e RICKENMAN (1999) são as mais inadequadas, fornecendo valores superestimados em relação ao valor observado em Cubatão (1994). Entretanto, a equação proposta neste trabalho fornece um valor apenas 12% superior ao valor de

velocidade observado, o que permite confirmar a confiança desta relação para a estimativa de velocidade de fluxos de detritos.

Desta forma, pode-se concluir que o grau de confiança das relações propostas variam de acordo com os parâmetros envolvidos, e, sobretudo, permitem reconhecer a complexidade dos fluxos de detritos, sejam nacionais ou internacionais.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Debris flow ou “corrida de detritos” ou “fluxo de detritos” é um tipo de instabilidade das mais críticas devido a seu fator “catastrófico”. Todavia, apesar do seu poder de destruição, este tipo de movimento é ainda pouco conhecido. Isto se deve principalmente à complexidade do fenômeno de instabilização. Muitos estudos sobre fluxos de detritos têm sido desenvolvidos na Europa, Ásia e América do Norte. No Brasil, ainda são incipientes as informações e pesquisas deste tipo de movimento.

Neste âmbito, esta pesquisa procurou contribuir para um maior conhecimento de fluxos de detritos, através de extensa revisão da literatura para a montagem de uma base de dados. Teve também como objetivo analisar as relações empíricas para estimativa de parâmetros relevantes de fluxo de detritos aplicada a eventos ocorridos no Brasil. Buscou ainda desenvolver relações empíricas específicas baseadas nas características de fluxos de detritos brasileiros e compará-las com as diversas relações da literatura.

Desta forma, este capítulo apresenta as principais conclusões oferecidas por esta pesquisa:

1. Os fluxos de detritos mais recentemente ocorridos na Europa são os que apresentam maiores e melhores registros de parâmetros do movimento;
2. Os fluxos de detritos brasileiros, apesar de numerosos, são pouco documentados e muitas vezes, seus parâmetros de caracterização não são registrados, dificultando a elaboração de um banco de dados de fluxos de detritos nacionais;
3. Os parâmetros de fluxos de detritos de mais fácil determinação são os representados pela altura de início do movimento e distância percorrida, sendo função da área de ocorrência. Os parâmetros mais importantes são os representados pelo volume, vazão e velocidade de fluxo de detritos, pois permitem estimar a área atingida e a energia do movimento, possibilitando delimitar áreas de risco. Porém, são parâmetros de mais difícil determinação;

4. O emprego de uma ficha de caracterização do fluxo de detritos, como a proposta neste trabalho, é útil para o levantamento dos parâmetros importantes do evento e pode ser preenchida por testemunhas não especialistas em encostas e instabilizações;

5. A avaliação das características de fluxos de detritos brasileiros permitiu a elaboração de relações empíricas que correlacionam: (i) A razão entre altura total e distância percorrida total com volume ($H/L = 3,2315 \cdot V^{-0,212}$); (ii) A vazão de pico e volume ($Q_p = 0,0309 \cdot V^{0,8279}$); e (iii) A distância percorrida e o volume de detritos depositado ($L = 106,61 \cdot V^{0,2591}$);

6. A relação da razão entre altura total e distância percorrida total com volume proposta neste trabalho é capaz de representar adequadamente os eventos de Cubatão (1994 e 1996). Para os outros casos analisados, os resultados não são satisfatórios, independentemente das relações empíricas adotadas, o que implica em uma condição de utilização restrita ao intervalo de $0,20 < H/L < 0,45$;

7. A relação entre vazão de pico e volume dos fluxos de detritos elaborada nesta pesquisa forneceu valor compatível com a vazão de pico observada em Cubatão (1994), enquanto as relações de MIZUYAMA *et al.* (1994), BOVIS & JAKOB (1994) e RICKENMANN (1999) estimaram valores inconsistentes com a vazão real deste caso de fluxo de detritos;

8. O emprego da relação empírica entre vazão de pico e volume dos fluxos de detritos proposta neste trabalho para estimativa de velocidade de fluxo por meio da equação proposta por RICKENMANN (1999) forneceu excelentes resultados, com valor igual a 11,2m/s, similar ao observado e igual a 10m/s no fluxo de detritos de Cubatão (1994). As relações de RICKENMANN (1999), MIZUYAMA *et al.* (1992) para fluxos granulares e BOVIS & JAKOB (1999) forneceram valores superestimados de velocidade;

9. A relação entre a distância percorrida e o volume de detritos depositado desenvolvida neste trabalho forneceu resultados muito satisfatórios, variando entre 72% e 137% do valor de distância registrado nos casos brasileiros analisados. Ao contrário da relação de

RICKENMANN (1999), a qual forneceu distâncias percorridas variando de 61% a 191% do valor observados nos eventos selecionados para esta análise.

Finalmente, pode-se concluir que as relações propostas neste trabalho se mostraram satisfatórias para representar os casos brasileiros analisados. Todavia, é importante ressaltar que o número de fluxos de detritos selecionados para as análises é, infelizmente, muito reduzido e insuficiente para garantir o uso irrestrito destas relações.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O desenvolvimento desta pesquisa indicou algumas sugestões para pesquisas futuras, tais como:

1. Elaboração e constante atualização de uma base de dados de fluxos de detritos mais completa e abrangente, que permita análises estatísticas de relações empíricas da literatura;
2. Aplicação das relações entre parâmetros elaboradas nesta pesquisa em outros eventos de fluxos de detritos para verificação da representatividade;
3. Montagem de experimentos *in situ* para determinação de parâmetros de fluxos de detritos em grande escala e verificação da validade das relações empíricas da literatura e as propostas neste trabalho;
4. Elaboração de tabela de avaliação de riscos em função dos parâmetros de caracterização dos fluxos de detritos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, L., 2006, *Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o Método de Elementos Discretos*. Dissertação (mestrado) Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 154 p.
- ARAYA-MOYA, V., 1994, “Genesis de aluviones em la costa de zonas desérticas”. In: *Symposium Panameño de Deslizamientos*, 1º, pp. 185-200.
- AUGUSTO-FILHO, O. 1992, “Caracterização Geológico-Geotécnica voltada a Estabilização de Encostas: uma proposta metodológica”. In: *Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1ª COBRAE, Rio de Janeiro*. ABMS/ABGE, v. 2, pp. 721-733.
- BOVIS, M.J.; JAKOB, M., 1999, “The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity”. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 24, pp. 1039-1054.
- BATHURST, J.C.; BURTON, A.; WARD, T.J., 1997, “Debris flow run-out and landslide sediment delivery model test”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.123, n. 5, pp. 410-419.
- BENDA, L.E. & CUNDY, T.W., 1999, “Predicting deposition of debris flows in mountain channels”. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 27, pp. 409-417.
- BERTI, M.; A. SIMONI, 2007. “Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships”. *Geomorphology*, v. 90, pp. 144–161.
- BEZZOLA, G.R.; HEGG, C., 2007, *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse*. Schäden und eine erste Einordnung, Bundesamt für Umwelt BAFU, Umwelt-Wissen Nr. 0707. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL: Birmensdorf; 215
- BRUNSDEN, D.; PRIOR, C. B., 1984, *Slope instability*. Chichester – UK, Wiltshire: John Wiley & Sons.
- BURGER, R.L., 1984, “The Prehistoric Occupation of Chavín de Huánta, Perú”. In: Anthropology Series, n. 14, pp. 403, University of California Press, Berkeley.
- CANNON, S.H., 1993, “An empirical model for the volume-change behavior of debris flow”. In: H.W. Shen, S.T Su, & F. Wen (eds), *Hydraulic Engineering*, v. 2, pp. 1768-1773. American Society of Civil Engineers, New York.
- COLLINS, B.; ZNIDARCIC, D., 1997, “Triggering Mechanisms of Rainfall Induced Debris Flows”. *II Simposio Panamericano de Deslizamientos*, Río de Janeiro, pp. 277-286.
- COROMINAS, J. 1996, “The angle of reach as a mobility index for small and large landslides”. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, pp. 260-271.

- COSTA, J. E., 1988, "Floods from dam failures", In: V. R. Baker *et al.* (eds), *Flood Geomorphology*, John Wiley & Sons, New York, pp. 439–463.
- CORRÊA, G.; KOBIYAMA, M.; GIGLIO, J.; MICHEL, G.; TASCA, A.; GOERL, R., 2009, "Análise geométrica para estimativa de volume em fluxo de detritos". In: *V Seminário Internacional de Defesa Civil – DEFENCIL*, São Paulo – 18, 19 e 20 de Novembro de 2009 Anais Eletrônicos – Artigos.
- CROSTA G.B.; CUCCHIARO, S.; FRATTINI, 2001, *Granular Flows* -Thematic Report.
- CROSTA, G.B.; CUCCHIARO, S.; FRATTINI, P., 2003, "Validation of semi-empirical relationships for the definition of debris-flow behavior in granular materials". In: D. Rickenmann and C-L. Chen (eds), *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Proceedings 3rd International DFHM Conference*, Davos, Switzerland, pp. 821-831. Millpress, Rotterdam.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J., 1996, "Landslide types and processes", In: *Landslides: Investigation and Mitigation*, Chapter 3, TRB, Special Report 247.
- CRUZ, P.T.; MASSAD, F., 1997, "Debris Flow: an attempt to define design parameters". In: *Symposium on recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, RJ, Brasil, pp.6.
- EVANS, S.G. 1982, "Landslides and superficial deposits in urban areas of British Columbia": a review. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 19, pp. 269-288.
- FANNIN, R. J.; ROLLERSON, T. P., 1993, "Debris flows: some physical characteristics and behavior", *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, pp. 71–81.
- FREIRE, 1965, "Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática", *Revista Construção*, Rio de Janeiro, Março, pp.10-18. In. GUIDICINI & NIEBLE (1984).
- GEORIO (2000). "Manual Técnico de Encostas – Ancoragens e Grampos", 2a Edição, Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 188p.
- GRAMANI, M., 2001, *Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos ("Debris FLOws) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 372 p.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M, 1984, *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*, 2ª Edição Revisada e Ampliada, Editora Edgard Blücher.
- HAEBERLI, W., 1983, "Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps", *Ann. Glaciology*, v. 4, pp. 85–90.

- HÜBL, J.; SUDA, J.; PROSKE, D.; KAITNA, R.; SCHEIDL, C., 2009, “Debris flow impact estimation”. In: C. Popovska and M. Jovanovski (Eds.), *Eleventh International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, v.1, pp. 137–148. University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, Skopje, Macedonia.
- HUNGR, O.; MORGAN, G. C.; KELLERHALS, R., 1984, “Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures”, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 21, pp. 663–677.
- HUNGR, O., 1995. “A model for the run-out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches”. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 32, n.4, pp. 610-623.
- HUNGR, O., 2000, “Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow”. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 25, pp. 483-495.
- HÜRLIMANN, M.; RICKENMANN, D.; MEDINA, V.; BATEMAN, A., 2008, “Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment”. *Engineering Geology*, v. 102, pp. 152–163.
- INNES, J. L., 1993, “Debris flows”, *Prog. Phys. Geographic.*, v. 7, pp. 469–501.
- IVERSON, R. M., 1997, “The Physics of debris flow”. *Reviews of Geophysics*, v. 35, n. 3, pp. 245-296.
- IVERSON, R.M.; SCHILLING, S.P.; VALLANCE, J.W., 1998, “Objective delineation of lahars-inundation zones.” *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, n. 8, pp. 972-984.
- IVERSON, R. M., 2005, “Debris flow mechanics.” In: M. Jakobs and O. Hungr (eds), *Debris flow hazards and related phenomena*, chapter 6, New York, USA, Springer, 2005.
- JAKOB, M, 2005, “A size classification for debris flows”. *Engineering Geology*, v. 79 , pp. 151–161.
- JAKOB, M.; HUNGR, O., 2005, *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*.1 ed. Chichester - UK, Springer-Praxis Publishing.
- JOHNSON, A. M.,1984, “Debris flow”, In: D. Brunsten and D. B. Prior, *Slope Instability*, pp. 257–361, John Wiley, New York.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F.; MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; ARAUJO, H. A., 2000, “Main factors intervening in the risk assessment of debris flows”, In: *International Workshop on the Debris Flow Disaster of Dec 1999*, Caracas, Venezuela.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F., 2001, “Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas”, *3a COBRAE, ABMS*, Rio de Janeiro, v.1, pp. 75-82.

- KOCH, T., 1998, "Testing of various constitutive equations for debris flow modeling", In: K. Kovar *et al.* (eds), *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*, IAHS Publ. No. 248, Merano, Italy, pp. 249–257.
- KÖRNER, H.J., 1980, "Modelle zur Berechnung der Bergsturz und Lawinenberechnung". *Internationals Symposium "Interpraevent"*, Bad Ischl, Austria (Tagungspublikation, Band 2, pp. 15-55).
- LANCASTER, S.T.; HAYES, S.K.; GRANT, G.E., 2003, "Effects of wood on debris flow run-out in small mountain watersheds". *Water Resources Research*, v. 39, n. 1168, doi: 10.1029/2001wr001227, pp. 21.
- MALIN, M. C.; SHERIDAN, M. F., 1982, "Computer-assisted mapping of pyroclastic surges", *Science*, v. 217, pp. 637–640.
- MARCELINO, E.V., 2003, *Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos no Município de Caraguatatuba (SP) Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto*, Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos.
- MASSAD, F.; KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; VEMARA, K.; ISHITANI, H., 1998, "Debris flows" em Cubatão, S. Paulo: obras de controle e impactos ambientais", *XI COBRAMSEG*, ABMS, Brasília, v.II, pp.1265-1272.
- MCDUGALL, S.D.; HUNG, O., 2003, "Objectives for the development of an integrated three-dimensional continuum model for the analysis of landslide run-out". In: D. Rickenmann and C-L. Chen (eds), *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Proceedings 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, pp. 821-831. Millpress, Rotterdam.
- MATUSUSHITA, T., 1999, *Messages for the 21st. Century*. Sabo Works and Its Achievements. pp 71. Sabo Publicity Centre. Tokyo.
- MIZUYAMA, T.; KOBASHI, S.; OU, G., 1992, "Prediction of debris flow peak discharge". In *International Congress Interpraevent*, v. 4, pp. 99–108.
- NETTLETON, M.I.; MARTIN, S.; HENCHER, S.; MOORE, R., 2005, "Debris flow types and mechanisms". In: *Press. Scottish road network Landslides study summary report*.
- NUNES, A.L.L.S.; RIOS FILHO, M.G., 2009, "Barreiras flexíveis para mitigação de fluxo de detritos". In: *5a COBRAE*, ABMS, SP, Brasil.
- ORTIGÃO, J. A. R.; KANJI, M. A., 2004, "Landslide classification and risk management". In: Ortigao & Sayão (eds), *Handbook of Slope Stabilization*, Germany, Ed. Springer.
- PERLA, R.; CHENG, T.T.; MCCLUNG, D.M., 1980, "A two parameter model of snow avalanche motion". *Journal of Glaciology*, v. 26, n. 94, pp. 197-208.

- PIERSON, T. C.; COSTA, J. E., 1987, "A rheologic classification of subaerial sediment- water flows", In: *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation, Rev. Eng. Geol.*, vol. 7, edited by J. E. Costa and G. F. Wieczorek, pp. 1–12, Geol. Soc. of Am., Boulder, Colo.
- RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. 1993, "The 1987 debris flow in Switzerland: documentation and analysis". *Geomorphology*, v. 8, pp. 175-189.
- RICKENMANN, D., 1999, "Empirical relationships for debris flows". *Natural Hazards*, v. 19, pp. 47–77.
- RICKENMANN, D., 2005, "Run-out prediction methods". In: M.Jakob and O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, pp. 305–324. Praxis. Springer Berlin Heidelberg.
- RICKENMANN, D.; LAIGLE, D.; MCARDELL, B. W.; HÜBL, J., 2006, "Comparison of 2d debris-flow simulation models with field events". *Computational Geosciences*, v. 10, pp. 241–264.
- RICKENMANN, D.; HUNZINGER, L.; KOSCHNI, A., 2008a, "Flood events and sediment transport during the rainstorm of august 2005 in Switzerland". In: *Conference Proceedings Interpraevent*, v. 8, pp. 465–476.
- RICKENMANN, D.; KOSCHNI, A.; CHIARI, M.; SCHEIDL, C.; CANUTO, N., 2008b, "Estimate of solids in torrents and mountain rivers". In: Bezzola GR, Hegg C. (eds), 2005 flood event analysis, Part 2 - *Analysis of processes, measures and risk fundamentals*. Bern, Federal Office of Environment, Birmensdorf, Swiss Federal Institute WSL, Environmental studies No 2508, pp. 152-162.
- RODINE, J. D.; JOHNSON, A. M., 1976, "The ability of debris heavily freighted with coarse clastic materials to flow on gentle slopes," *Sedimentology*, v. 23, pp. 213–224.
- ROTH, A.; WARTMANN, S.; KÄSTLI, A., 2004. "Debris Flow Mitigation by Means of Flexible Barriers", In: *Interpraevent*, Riva del Garda, Italy.
- SASSA, K., 1985, "The mechanism of debris flow", In: *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, S. Francisco, ISSMFE, pp. 1173–1176, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- SCHEIDL, C.; RICKENMANN D., 2009. "Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans". *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, pp. 157–173.
- SCHRAML C. 2007. *Ablagerung von Feststoffen auf Wildbachkegeln*. Master Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.
- SKERMER, A. N.; VANDINE, F. D., 2005, "Debris flows in history". In: M.Jakob and O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, pp. 25-51. Praxis. Springer Berlin Heidelberg.

- SUWA, H.; OKUNISHI, K.; SAKAI, M., 1993, “Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakedake, Japan”, In: *Proc. of Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control*, Yokohama, IAHS Publ. No. 217, pp. 239–247.
- TAKAHASHI, T., 1991, *Debris flow*. Holanda: *International Association for Hydraulics Research*, 1991. 165 p., il., 17 cm x 25 cm. (Monograph Series).
- TAKAHASHI, T., 2007. *Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. 1a ed. London, UK. Taylor & Francis Group.
- TURNER, A. K., 1996, “Colluvium and Talus”, In: *Landslides: Investigation and Mitigation*, Chapter 3, Transportation Research Board, Special Report 247.
- VANDINE, D.F., 1985. “Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Codillera”, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 22, pp. 44-68.
- VANDINE, D. F., 1996. *Debris flow control structures for forest engineering*. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996.
- VARNES D.J., 1978. “Slope movement types and processes”. In: R.L. Schuster and R.J. Krizek, (eds.), *Special report 176-Landslides: Analysis and control*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- VAW, 1992, “Debris flows 1987: documentation and analysis”. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Unpublished Report, No. 97.6.
- WENDELER, C.; VOLKWEIN, A.; DENK, M.; ROTH, A.; WARTMANN, S., 2007, *Field measurements used for numerical modeling of flexible debris flow barriers*. In C. Lung Chen and J. J. Major, (eds.), *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Millpress-Rotterdam.
- YI, W.; CHENG, L., 2003, *Numerical Modeling on the motion and deposition behaviors of debris flow*. 168 f. Master Thesis, Engineering School - NCKU, Tainan, Taiwan.
- ZHANG, S., 1993, “A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flow in China”. *Natural Hazards*, v. 7, pp. 1-23.
- ZIMMERMANN, M.; MANI, P.; GAMMA, P.; GSTEIGER, P.; HEINIGER, O.; HUNZIKER, G., 1997, “Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz” [Debris flow risk and climatic change – a GIS-based approach], Schlussbericht NFP 31, vdf-ETH Zürich, Switzerland (in German).
- ZNASMENSKY, D., 2001, *Corridas de Detritos ou “Debris flows” - avaliação de parâmetros*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 198p.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)