



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica – Engenharia Civil**

**USO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS PARA CONTROLE DE FLUXO DE  
DETRITOS**

**Guilherme Alvarez dos Santos**

**Rio de Janeiro**  
**Abril de 2013**

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica – Engenharia Civil**

**USO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS PARA CONTROLE DE FLUXO DE  
DETRITOS**

Guilherme Alvarez dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientadores:

Professor Marcos Barreto de Mendonça

Professor André de Souza Avelar

Examinada por:

---

Prof. Marcos Barreto de Mendonça, D. Sc.

---

Prof. André de Souza Avelar, D. Sc.

---

Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D.

---

Prof. Leonardo De Bona Becker, D.Sc.

Rio de Janeiro  
Abril de 2013

dos Santos, Guilherme Alvarez

Uso de barreiras flexíveis para controle de fluxo de detritos/ Guilherme Alvarez dos Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

xiv, 113 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e André de Souza Avelar.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 95.

1. Introdução. 2. Revisão Bibliográfica. 3. Fluxo de Detritos. 4. Estruturas de Controle de Fluxo de Detritos. 5. Descrição da Área Estudada. 6. Dimensionamento de Barreira Flexível para Controle de Fluxo de Detritos. I. Marcos Barreto de Mendonça. II. André Avelar. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso Engenharia Civil. IV. Título.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que se fizeram presentes nesse período tão importante da minha vida. Agradecer pela força, pelas palavras, pelo ombro amigo, pela distração, pelos ensinamentos, pelos sorrisos, pelo apoio e carinho de todos que me ajudaram a persistir e atingir mais um sonho. Levo comigo ensinamentos não só acadêmicos, mas lições de vida que aprendi pelos lugares onde passei e com todos que conheci. Agradecer na verdade é reconhecer que sozinhos não somos capazes de ir a lugar nenhum.

Agradeço imensamente a minha família, a base de tudo, minha sustentação, minha inspiração, meu desejo de que tudo de certo. A minha mãe e minha vó, Thereza e Lina, se não fossem elas que me deram todo amor, carinho, dedicação, que me ensinaram a nunca desistir, acreditar e que lutaram pela minha educação desde sempre, com todo sacrifício e vontade de que eu tivesse um futuro melhor, sem elas esse trabalho não teria sido concluído. Ainda que viva infinitas vidas jamais conseguirei agradecer e retribuir tudo que fizeram por mim. A vocês dedico este trabalho com todo meu amor. Agradeço também minha vó e tia, Alda e Vera, por sempre torcerem por mim e por participarem ativamente de minha vida, por serem a memória viva de meu pai. Agradeço também ao meu pai, Sérgio, tenho a certeza que está muito feliz e orgulhoso de seu filho. Posso traduzir os sentimentos que tenho agora através da música de João Nogueira: *“Eh, vida voa. Vai no tempo, vai. Ai, mas que saudade. Mas eu sei que lá no céu o velho tem vaidade. E orgulho de seu filho ser igual seu pai.”*.

Agradeço a Deus que ilumina e guia meus passos, meu caminho, dia a dia me reerguendo sempre que preciso e dando saúde para continuar lutando por todos meus objetivos por maiores que sejam os obstáculos.

A todos os meus professores pelos ensinamentos, em especial ao professor Marcos Barreto e Andre Avelar, pela ajuda em todos os momentos, seu tempo doado com dedicação, pela oportunidade e principalmente pela confiança durante a realização desse trabalho. Aos professores Leonardo Becker e Willy Alvarenga Lacerda pela participação na avaliação deste trabalho, contribuindo com seus conhecimentos.

Agradeço também a empresa Geobrugg, em especial ao engenheiro Felipe Gobbi, pelo apoio técnico, pela paciência ao sanar todas minhas dúvidas e por me fornecer acesso ao software DEBFLOW. Sem este auxílio não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos aos meus verdadeiros amigos, em especial ao Leandro, Fred, Guilherme e Marcelo por estarem comigo nos momentos difíceis e nos momentos de descontração, pela palavra amiga, pelo incentivo e por fazerem parte de toda minha vida.

Não posso deixar de agradecer a minha namorada Samanta, que esteve presente me apoiando, incentivando, revisando este trabalho e encorajando sempre com muito carinho e compreensão, acreditando no meu sucesso, me proporcionando momentos de alegria, sorrisos, felicidade e amor quando mais precisei.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Uso de barreiras flexíveis para controle de fluxo de detritos

Guilherme Alvarez dos Santos

Abril/2013

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça

André de Souza Avelar

Curso: Engenharia Civil

No presente trabalho são compiladas as principais relações empíricas para estimativa dos parâmetros de caracterização do fluxo de detritos. É apresentado um estudo de caso na região de Angra dos Reis onde, através das relações empíricas disponíveis na literatura técnica são estimados os parâmetros de caracterização de um possível fluxo de detritos que venha a ocorrer na região de estudo e também, com auxílio do software DEBFLOW se determinou a barreira flexível a ser utilizada para conter o evento.

São apresentados também os resultados encontrados após simulação do fluxo de detritos no software DEBFLOW, onde para conter o volume total de detritos estimado em 8.300 m<sup>3</sup> foi necessária a instalação de um sistema de duas barreiras ao invés de apenas uma, devido à limitação do comprimento do depósito de detritos imposto pela topografia da região.

***Palavras-chave: Fluxo de Detritos, Relações Empíricas, Estruturas de Controle, Barreira Flexível, Parâmetros de Projeto.***

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

## **Use of Flex-Post Fences for Debris Flow control**

Guilherme Alvarez dos Santos

Abril/2013

Advisor:

Marcos Barreto de Mendonça

André de Souza Avelar

Course: Civil Engineer

In this paper are compiled key empirical relations to estimate parameters that characterize debris flow. A case study in the area of Angra dos Reis is presented, are estimated by empirical relations available in the technical literature parameters of characterization of a possible debris flow. With the aid of software DEBFLOW a flexible barrier was designed to contain the event.

The results obtained after the debris flow simulation in software DEBFLOW are also presented to contain the total volume of debris estimated at 8.300 m<sup>3</sup>, was necessary to install a system of two barriers instead of just one, because of space limitations of imposed by topography.

***Keywords: Debris Flow, Empirical Relations, Control Structures, Flex-Post Fences, design parameters.***

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de Movimento de Massa .....	7
Figura 2.2: Local de deposição do fluxo de detritos em Cubatão (Kanji <i>et al.</i> , 2007).....	8
Figura 2.3: Blocos de rocha no fluxo de detritos em Petrópolis em 1988 (Polanco, 2010).....	9
Figura 2.4: Fluxo de detritos em Petrópolis em 1988 (Polanco, 2010).....	9
Figura 2.5: Fluxo de detritos Morro do Quitite em 1996 (Polanco, 2010).....	10
Figura 2.6: Fluxo de detritos na via Anchieta em 1999 (Polanco, 2010).....	11
Figura 3.1: Característica granulométrica e morfológica do fluxo de detritos (Pierson, 1986 <i>apud</i> Hungr, 1999).....	14
Figura 3.2: Classificação dos fluxo de detritos em livre ou canalizado (Polanco, 2010). .....	16
Figura 3.3: Movimento de bloco de solo produzindo uma camada liquefeita (Takahashi, 2007).....	19
Figura 3.4: Mecanismo de início de um fluxo de detritos a partir de um impacto (Modificado Sassa, 1985 <i>apud</i> Avelar, 2003) .....	20
Figura 3.5: Seção transversal esquemática definindo H e L para um caminho de fluxo de detritos (Iverson, 1997). .....	23
Figura 3.6: Vazão de fluxo de detritos medidas. (a) Dados de Name River, Japan (b) Dados de Chemolgan River (Iverson, 1997). .....	24
Figura 3.7: A distribuição espacial das poropressões em uma onda em movimento (Iverson, 1997) .....	25
Figura 3.8: Zona do Fluxo de Detritos Canalizados (adaptado de VanDine, 1996).....	27
Figura 4. 1: Área de depósito desconfinado (VanDine, 1996) .....	30
Figura 4.2: Impedimentos ao fluxo (VanDine, 1996). .....	31
Figura 4.3: Esquema em planta de barreiras sucessivas (VanDine, 1996).....	31
Figura 4.4: Esquema vertical de barreiras sucessivas (VanDine, 1996). .....	32
Figura 4.5: Bermas para delimitação do caminho do fluxo de detritos (VanDine, 1996) .....	32
Figura 4.6: Estrutura de separação dos detritos grosseiros dos finos (VanDine, 1996) .	33
Figura 4.7: Barreira flexível (Geobrug, 2012).....	34
Figura 4.8: barreira flexível construída para testes em Illgraben (McArdell, 2012). .....	34



Figura 4.9: Elementos barreira flexível (Modificado Geobruigg, 2012).....	35
Figura 4.10: Anéis de freio (Wenderler, 2006) .....	36
Figura 4.11: Ancoragens (Geobruigg, 2012).....	36
Figura 4.12: Forças de tensão medidas no cabos (Wendeler, 2006) .....	37
Figura 4. 13: Fluxograma proposto por Rickenmann (1999) para estimar parâmetros de fluxo de detritos empiricamente .....	38
Figura 4. 14: correlação entre volume e área de drenagem da bacia (VanDine, 1996)..	39
Figura 4. 15: Relação entre vazão de pico e volume fluxo de detritos (Rickenmann, 1999).....	43
Figura 4. 16: correlação vazão de pico e volume total do fluxo de detritos (VanDine, 1996).....	46
Figura 4. 17: Relação entre o produto M por He e L (Rickenmann, 1999).....	49
Figura 4. 18: Esquema entre fluxo de detritos e estrutura de controle .....	50
Figura 4. 19: Relação entre força de impacto e diâmetro dos blocos (VanDine, 1996).	51
Figura 4. 20: Situação 01 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobruigg, 2012). .....	52
Figura 4. 21: Situação 02 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobruigg, 2012) .....	53
Figura 4. 22: Situação 03 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobruigg, 2012) .....	53
Figura 4. 23: Situação 04 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobruigg, 2012). .....	54
Figura 4.24: Seção transversal esquemática do modelo de corpo rígido para frente do fluxo de detritos (Iverson, 1997) .....	54
Figura 5. 1: Área de estudo (imagem de satélite, 2013).....	57
Figura 5. 2: Área de estudo com demarcação do canal de drenagem (COPPE-UFRJ, 2010).....	58
Figura 5. 3: Mapa de Susceptibilidade de Angra dos Reis (COPPE-UFRJ, 2010).....	58
Figura 5. 4: Topografia da área de estudo (COPPE-UFRJ, 2010) .....	59
Figura 5. 5: Mapa geológico da região (COPPE-UFRJ, 2010).....	60
Figura 6.1: Perfil topográfico do canal de drenagem .....	61
Figura 6. 2: Variação da estimativa de volume total de detritos .....	70
Figura 6. 3: Variação da estimativa da vazão de pico de fluxo de detritos para o volume estimado de 1.120 m <sup>3</sup> .....	71

Figura 6. 4: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 2.704,80 m <sup>3</sup> .....	71
Figura 6. 5: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 23.171,79 m <sup>3</sup> .....	72
Figura 6. 6: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 17.185,74 m <sup>3</sup> .....	72
Figura 6. 7: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para relações empíricas que não dependem do volume total de detritos.....	73
Figura 6. 8: Variação da estimativa da distância total percorrida de acordo com volume total de detritos .....	74
Figura 6. 9: Variação da estimativa da altura do fluxo de detritos.....	75
Figura 6. 10: Variação da estimativa da força de impacto .....	76
Figura 6. 11: Esquema depósito material retido pela barreira flexível (Wenderler, 2006) .....	81
Figura 6. 12: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada peso específico, número de ondas, volume da primeira onda e vazão de pico .....	85
Figura 6. 13: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada inclinação do canal, inclinação da superfície do depósito e velocidade de impacto.....	86
Figura 6. 14: Tela do DEBFLOW com os dados geométricos da barreira flexível .....	86
Figura 6. 15: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada altura da barreira após enchimento e ângulo entre malha e leito do canal de drenagem .....	87
Figura 6. 16: Tela do DEBFLOW com a capacidade de retenção de detritos da barreira .....	87
Figura 6. 17: Localização das duas barreiras implantadas em relação ao perfil topográfico do canal de drenagem.....	88
Figura 6. 18: Localização em planta das barreiras flexíveis.....	88
Figura 6. 19: Tela do DEBFLOW com altura e velocidade de impacto calculados para barreira 1.....	89
Figura 6. 20: Tela do DEBFLOW com altura e velocidade de impacto calculados para barreira 2.....	90
Figura 6. 21: Tela do DEBFLOW com a especificação das barreiras 1 e 2.....	90
Figura 6. 22: Tela do DEBFLOW com os resultados de solicitação e resistência estática e dinâmica e os fatores de segurança para as condições estática e dinâmica para a barreira 1.....	91

Figura 6. 23: Tela do DEBFLOW com os resultados de solicitação e resistência estática e dinâmica e os fatores de segurança para as condições estática e dinâmica para a barreira 2.....	91
Figura 6. 24: Tela do DEBFLOW com fator de segurança de cada barreira e o fator de segurança global .....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Categorias e Subcategorias do Movimento de Massa .....	4
Tabela 2.2: Características de fluxos de detritos ocorridos no Brasil (Gramani, 2001 <i>apud</i> Polanco, 2010).....	12
Tabela 4.1: Dados de volume e vazão de pico de fluxos de detritos (Rickenmann, 1999) .....	44
Tabela 4.2: Fórmulas empíricas para estimar a vazão de pico em função do volume de fluxo de detritos. $M_w$ representa o volume de água retido atrás da barragem e $r^2$ representa o coeficiente de correlação estatístico da equação (Rickenmann, 1999).....	45
Tabela 6.1: Valores estimados de volume .....	65
Tabela 6.2: Valores estimados para vazão de pico do fluxo de detritos.....	66
Tabela 6.3: Valores estimados para vazão de pico do fluxo de detritos.....	66
Tabela 6.4: Valores estimado da distância total percorrida pelo fluxo de detritos.....	67
Tabela 6.5: Valores estimados de altura do fluxo de detritos.....	68
Tabela 6.6: valores estimados para força de impacto devido choque da massa do fluxo de detritos .....	69
Tabela 6.7: Valores de vazão de pico .....	77
Tabela 6.8: Resumo dos esforços e fatores de resistência para a barreira 1 .....	92
Tabela 6.9: Resumo dos esforços e fatores de resistência para a barreira 2.....	92

## SUMÁRIO

1. <b>Introdução</b> .....	1
2. <b>Revisão Bibliográfica</b> .....	3
2.1 Movimentos de massa.....	3
2.1.1 Deslocamento de corpos rochosos:.....	4
2.1.2 Rastejo .....	5
2.1.3 Escorregamento .....	5
2.1.4 Fluxo.....	6
2.2 Casos históricos de desastres associados a fluxo de detritos .....	7
3. <b>Fluxo de detritos</b> .....	13
3.1 Definição.....	13
3.2 Características do fluxo de detritos.....	13
3.2.1 Início do fluxo de detritos.....	17
3.2.2 Transporte/erosão fluxo de detritos .....	21
3.2.3 Deposição dos detritos.....	26
4. <b>Estruturas de controle de fluxo de detritos</b> .....	28
4.1 Tipos de estrutura.....	28
4.2 Parâmetros de Projeto .....	37
4.2.1 Volume (M).....	38
4.2.2 Vazão de pico ( $Q_p$ ) .....	42
4.2.3 Velocidade Média do Fluxo ( $v$ ).....	47
4.2.4 Distância Total percorrida pelo Fluxo de Detritos (L) .....	48
4.2.5 Força de impacto (F).....	49
4.2.6 Altura do fluxo de detritos (h).....	54
5. <b>Descrição da área estudada</b> .....	57
6. <b>Dimensionamento de barreira flexível para controle de fluxo de detritos</b> .....	61
6.1 Dados de entrada.....	61
6.2 Parâmetros para dimensionamento a partir de recomendações propostas pela literatura .....	63
6.2.1 Parâmetros para caracterização do fluxo de detritos .....	63
6.2.2 Discussão dos parâmetros estimados.....	69
6.3 Dimensionamento da barreira flexível através do DEBFLOW .....	78
6.4 Resultados obtidos com DEBFLOW .....	84

7. Conclusões.....	93
--------------------	----

# 1. Introdução

Os desastres associados a movimentos de massa são cada vez mais frequentes e estão entre os fenômenos naturais mais catastróficos, havendo prejuízos significativos que envolvem inúmeras vítimas fatais e danos materiais expressivos. Os deslizamentos são desastres naturais que provocam o maior número de fatalidades, apesar disso, dentre os tipos de movimentos de massa o fluxo de detritos é um dos que acarreta maiores danos, devido à velocidade elevada com grandes massas de detritos e geradores de energias extremamente elevadas.

Existem vários registros de desastres associados a fluxo de detritos no Brasil, entre os quais se pode citar os seguintes casos: bacias do Rio Quitite e Papagaio na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro em 1996, Serra das Araras em janeiro de 1967, Caraguatatuba, em 1967, Cubatão, em 1994 e 1996 (que atingem a Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras). Todos esses eventos envolveram enormes movimentos de rochas, solo e matéria orgânica pelos canais de drenagem das encostas. Outro evento importante e muito recente envolvendo vários tipos de movimentos de massa, incluindo o fluxo de detritos, ocorreu em janeiro de 2011 na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, causando mais de 1000 mortes nos municípios de Petrópolis, Sumidouro, Bom Jardim, Teresópolis e Nova Friburgo.

A região central do município de Angra dos Reis apresenta diversos problemas associados a movimentos de massa, entre os quais o fluxo de detritos. Em 2011 foi finalizado um trabalho de mapeamento de susceptibilidade e risco pela fundação COPPETEC, a fim de oferecer ao governo local um instrumento de planejamento que torna visível os espaços sob riscos diferenciados, e que deve orientar a elaboração de projetos de engenharia de caráter preventivo ou adaptativo (COPPETEC, 2011).

Neste âmbito, o presente trabalho tem como objetivo analisar a região do morro da Caixa D' água, um dos locais que apresenta elevada susceptibilidade a ocorrência de fluxo de detritos no município de Angra dos Reis e projetar a solução para o controle do movimento através de barreiras flexíveis. Para tal serão adotados métodos empíricos propostos na literatura e o software DEBFLOW da Empresa Geobrug.

De forma a atender a esse objetivo o presente trabalho será dividido nos seguintes capítulos:

No capítulo 1 é feita uma introdução onde é apresentada a relevância e os objetivos do trabalho. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre movimentos de massa. São abordadas nesse capítulo a classificação dos diversos tipos de movimento de massa e casos históricos de desastres associados a fluxo de detritos no Brasil. No capítulo 3 são apresentadas a definição e características de fluxo de detritos. O capítulo 4 traz os tipos possíveis de estruturas de controle do fluxo de detritos e diversos métodos de cálculo de parâmetros de projeto. O capítulo 5 apresenta a descrição da área estudada com suas particularidades. No capítulo 6 são apresentadas as estimativas dos parâmetros através dos métodos apresentados no capítulo 4 e também o dimensionamento da barreira flexível através do software DEBFLOW. Finalmente no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.



## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Movimentos de massa

Segundo Summerfield (1991) *apud* Avelar (2003), o termo “movimento de massa” possui um caráter genérico, usado para descrever o movimento de descida do solo, de rochas e material orgânico, sob o efeito da gravidade, e também a formação geológica resultante. Tais movimentos de massa apresentam diferentes mecanismos que governam o início do movimento passando pelo transporte e até a deposição dos materiais.

Há uma variação ampla na definição e classificação de movimentos de massa, deste modo, diversos autores propuseram classificações para movimentos de massa, como: Baltzer (1875), Heim (1882), Penck (1889), Molitor (1894), Braun (1908), Howe (1909), Almagià (1910) Stini (1910), Terzaghi (1925), Pollack (1925), Ladd (1935), Hennes (1936), Sharpe (1938), Terzaghi (1950), Varnes (1958), Penta (1960), Freire (1965), Ter-Stepanian (1966) e Varnes (1978). Porém a mais utilizada é a classificação de Varnes (1978) que se baseia no tipo dominante de movimento e no material removido.

Segundo Varnes (1978), o movimento de massa se divide em seis categorias, são elas: escorregamento, quedas, tombamento, fluxo, espalhamento lateral e complexos. A Tabela 2.1 apresenta as categorias e subcategorias do movimento de massa.

**Tabela 2.1: Categorias e Subcategorias do Movimento de Massa**

Tipo de Movimento		Tipo de Material		
		Rocha	Solos	
			Grosseiro	Fino
Quedas		de rocha	de detritos	de terra
Tombamentos		de rocha	de detritos	de terra
Escorregamentos	Rotacionais ou Translacionais	Abatimento de rocha ou de blocos rochosos	Abatimento de detritos ou de blocos de detritos	Abatimento de terra ou blocos de terra
	Espalhamentos Laterais		de rocha	de detritos
Corridas/escoamentos		de rocha	de detritos	de terra
		Avalanche de rocha	Avalanche de detritos	-
		Rastejo de rocha	Rastejo de solo	
Complexos: Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos				

A classificação de Varnes (1978) foi ajustada às características das realidades ambientais brasileiras por Augusto Filho (1992), reduzindo para quatro categorias. São elas: rastejo, deslocamento de corpos rochosos (quedas, tombamento ou rolamento), fluxo de detritos e deslizamento ou escorregamento.

## **2.1.1 Deslocamento de corpos rochosos:**

### **2.1.1.1 Queda de blocos**

Segundo Guidicini e Nieble (1984), queda de blocos de rochas são quedas livres por ação da gravidade de blocos deslocados por intemperismo de penhascos verticais ou taludes muito íngremes. A queda pode ser combinada com outros tipos de movimento, como saltos, deslizamento, rolamento e rotação (tombamento). Geralmente, o material envolvido neste tipo de movimento apresenta altas velocidades de movimento e pequenos a médios volumes.

### **2.1.1.2 Tombamento**

O tombamento ocorre quando o maciço apresenta descontinuidades com mergulho vertical, paralelas ao talude. Consiste em uma rotação ou basculamento para fora do talude em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada (Cruden & Varnes, 1996, *apud* Rocha, 2009).

### **2.1.1.3 Rolamento**

O rolamento ocorre quando blocos destacados do maciço se instabilizam devido à perda de apoio, sofrem rotação em torno do seu eixo principal e podem combinar com movimentos de saltos (Dias & Barroso, 2006).

## **2.1.2 Rastejo**

Os rastejos ('creep') são movimentos lentos e contínuos de material nas encostas sem superfície de ruptura determinada, logo seus limites não são definidos. Esta movimentação é provocada pela ação da gravidade, sendo que os efeitos das variações de temperatura e principalmente de umidade intervêm no processo. Para se entender como funciona o mecanismo de deslocamento desta massa de solo, Guidicini e Nieble (1984) comparam o mecanismo de deformação do rastejo ao de um líquido muito viscoso. Tal movimento de massa é evidenciado na superfície através de mudança na verticalidade de árvores e postes, ruptura de sarjetas para drenagem e inflexão de eixos de estradas.

No caso do rastejo em colúvios a superfície de ruptura é bem definida, sendo caracterizada pela massa coluvionar e pela superfície do terreno adjacente. A zona superficial do colúvio está sujeita a rastejo do tipo sazonal, conforme períodos de elevada pluviosidade, já a parte inferior da massa está submetida a rastejos constantes ('creep'). Nos períodos chuvosos a colúvio apresenta grandes velocidades de deformação, sendo as maiores localizadas na parte central da massa.

## **2.1.3 Escorregamento**

Segundo Guidicini e Nieble (1984), escorregamentos são movimentos rápidos, de duração relativamente curta e massas geralmente bem definidas quanto ao volume.

De forma geral para que ocorra um escorregamento é necessário que a relação entre a resistência ao cisalhamento e as tensões de cisalhamento atuantes ao longo da superfície potencial de ruptura tenha decrescido de um valor inicial maior que 1 até a unidade. O escorregamento pode ser de três tipos, rotacional, translacional e cunha.

#### **2.1.3.1 Escorregamento rotacional**

Segundo Augusto Filho (1992), os escorregamentos rotacionais ocorrem quando a massa de solo delimitada pela superfície de ruptura é espessa, homogênea ou em rochas muito fraturadas. As forças que causam o momento resultante responsável pela instabilização da massa se encontram em um ponto acima do centro de gravidade, por isso a superfície de ruptura possui de maneira simplificada forma de um arco de circunferência (Avelar, 2003). O colapso ocorre ao longo da superfície de ruptura e há uma rotação da massa em torno do centro do arco.

#### **2.1.3.2 Escorregamento translacional**

No caso do escorregamento translacional, segundo Augusto Filho (1992), as massas de solo são pouco espessas e apresentam um plano de fraqueza. Tais fenômenos são extensos e ocorrem geralmente em taludes mais abatidos. O movimento ocorre ao longo de uma superfície de ruptura aproximadamente plana e é controlado pelas superfícies de fraqueza, como: fraturas, falhas e foliações.

#### **2.1.3.3 Escorregamento em cunha**

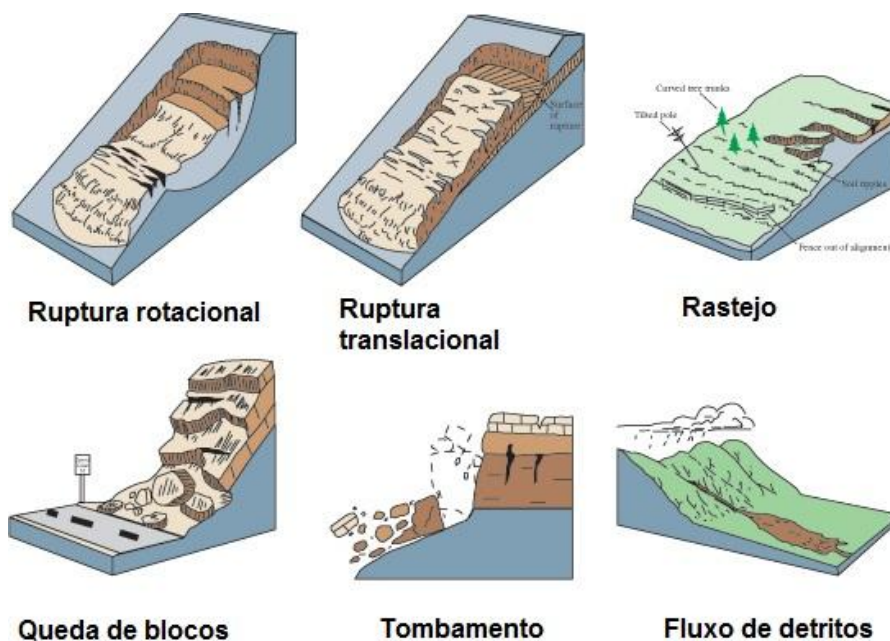
Esta ocorrência se dá, segundo Augusto Filho (1992), em solos e rochas que apresentam duas ou mais famílias de fraturas, cuja interseção deve aflorar na face do talude e mergulhar na direção do mesmo.

#### **2.1.4 Fluxo**

Segundo Guidicini e Nieble (1984), os fluxos são formas rápidas de movimento, de caráter hidrodinâmico e ocasionadas pela perda de atrito interno em virtude da destruição da estrutura interna em presença de excesso de água. A este fenômeno dá-se o nome de liquefação do solo. Tal movimento de massa se assemelha, segundo Augusto Filho (1992), ao de um líquido viscoso, se desenvolvendo ao longo de áreas de

drenagem e com extenso raio de alcance. O fluxo pode mobilizar grandes volumes de solo, rocha, detritos e água.

Segundo Manual da GEORIO (2000) *apud* Polanco (2010), a distinção entre escorregamento e fluxo nem sempre é fácil, pois às vezes a origem de um fluxo é representada por um escorregamento típico. A Figura 2.1 ilustra os possíveis tipos de movimento de massa.



**Figura 2.1: Tipos de Movimento de Massa**

## **2.2 Casos históricos de desastres associados a fluxo de detritos**

São inúmeros os casos de fluxos de detritos no Brasil, no presente trabalho serão apresentados os exemplos mais emblemáticos devido à magnitude do evento ou então aos danos causados.

Em Fevereiro de 1994, um grande fluxo de detritos tornou-se intenso devido ao grande volume de chuva, foram cerca de 60 mm em 1 hora e um total registrado de 140 mm em 3 horas, na chamada Serra de Cubatão (um trecho da Serra do Mar, situada ao longo da costa do estado de São Paulo). Esse evento afetou a refinaria Presidente Bernardes, da Petrobrás. Os danos foram estimados em aproximadamente 40 milhões de dólares e foram necessárias três semanas de interrupção nas operações para que

ocorresse a limpeza e reparos na unidade (Cruz *et al.*, 2004). A Figura 2.2 mostra o local onde ocorreu a deposição do fluxo de detritos em Cubatão.



**Figura 2.2: Local de deposição do fluxo de detritos em Cubatão (Kanji *et al.*, 2007).**

Outro desastre emblemático associado a fluxo de detritos aconteceu em fevereiro de 1988 na cidade de Petrópolis, Rio de Janeiro. Este desastre foi deflagrado por duas condições de chuva: uma muito intensa anterior ao evento e uma condição não muito intensa, mas concentrada na área durante o evento (Figura 2.3 e Figura 2.4).



**Figura 2.3: Blocos de rocha no fluxo de detritos em Petrópolis em 1988 (Polanco, 2010).**



**Figura 2.4: Fluxo de detritos em Petrópolis em 1988 (Polanco, 2010)**

Um desastre conhecido na cidade do Rio de Janeiro ocorreu em 1996 na serra de Jacarepaguá, mais especificamente nas bacias do Rio Quitite e Papagaio. Tal evento foi deflagrado pelas fortes chuvas registradas na região e os fluxos alcançaram mais de 1 Km de extensão (Figura 2.5).



**Figura 2.5: Fluxo de detritos Morro do Quitite em 1996 (Polanco, 2010).**

Em 1999, na via Anchieta no estado de São Paulo, após chuvas bastante intensas um fluxo de detritos se originou a partir de um escorregamento de grandes proporções que ocorreu em uma região de mata fechada. Segundo Gramani (2001) *apud* Polanco (2010), alguns pesquisadores consideram que a origem do fluxo de detritos foi devido ao aumento de poropressão nas fissuras do maciço rochoso.





**Figura 2.6: Fluxo de detritos na via Anchieta em 1999 (Polanco, 2010).**

Outro evento de fluxo de detritos existente na cidade do Rio de Janeiro e muito citado na literatura ocorreu em 14 de Janeiro de 1966 na encosta do Soberbo, localizada na porção inferior da bacia do córrego Santo Antônio, no maciço da Tijuca. Durante Janeiro de 1966 a precipitação total chegou a 617,6 mm, sendo que 472,0 mm em 72 horas consecutivas. Como consequência deste evento a fábrica da Companhia Franco-Brasileira de papéis foi totalmente destruída, a estrada de Furnas obstruída e a estrada do Soberbo parcialmente danificada.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns exemplos de desastres associados a fluxo de detritos e suas respectivas características.

**Tabela 2.2: Características de fluxos de detritos ocorridos no Brasil (Gramani, 2001 *apud* Polanco, 2010)**

Evento	Data	Desnível H/L	Área da Bacia (km <sup>2</sup> )	Chuva registrada (mm)	Velocidade* (m/s)	Volume (m <sup>3</sup> )
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

### **3. Fluxo de detritos**

#### **3.1 Definição**

O fluxo de detritos, por ser um fenômeno complexo, por muitas vezes é confundido com outros tipos de movimento de massa, como: avalanche, inundações e escorregamentos. Porém, segundo Takahashi (2007), fluxo de detritos é um fluxo de uma mistura composta por sedimentos e água que decorrem da liquefação do solo na encosta. A mistura é feita de certa maneira que se comporta como um fluido contínuo dirigido pela gravidade, de modo que tal fluxo alcança grande fluidez a partir do aumento do teor de umidade. O fluxo de detritos pode ser considerado um fenômeno intermediário entre escorregamento ou queda de bloco e transporte fluvial de sedimento (Rickenmann, 1999).

No seu transporte o fluxo de detritos possui uma matriz de água e grãos em forma de fluxo parcialmente ou totalmente saturado, que transportam partículas grossas e finas. Segundo Iverson (1997), podem movimentar grandes volumes de material a grandes distâncias, devido sua alta fluidez. Logo, são considerados uma ameaça de magnitude alta, uma vez que são capazes de produzir alterações topográficas importantes, possuem alto poder de erosão e destruição e altas tensões de impacto (30 a 100 kN/m<sup>2</sup>).

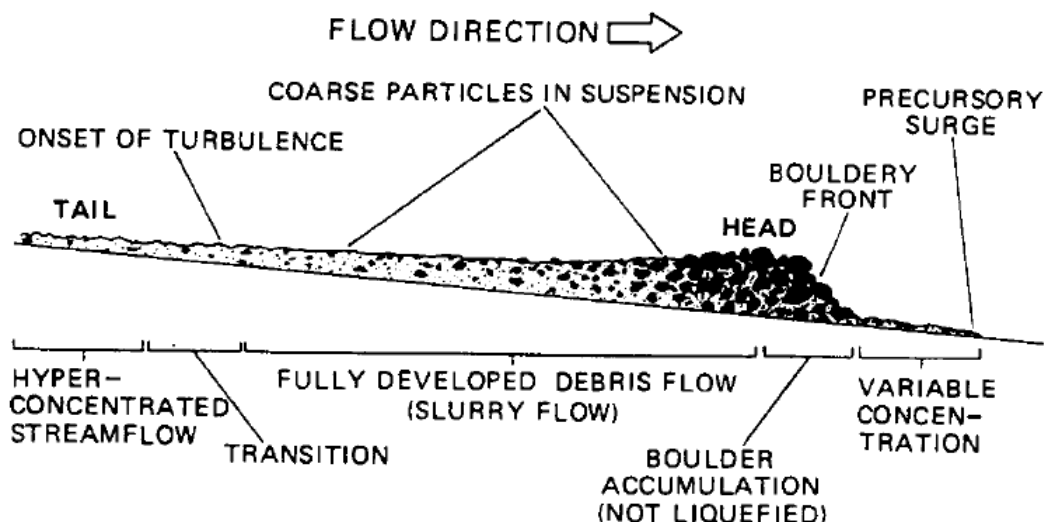
#### **3.2 Características do fluxo de detritos**

Nos fluxos de detritos a distribuição granulométrica é muito complexa, devido à grande diversidade de materiais envolvidos. Ao analisar os materiais presentes pode-se encontrar água, pedregulhos, bloco de rocha, troncos de árvores e detritos de uma forma geral, sendo que a diversidade e quantidade de materiais dependem de quantas fontes de detritos diferentes estão envolvidas no evento.

Segundo Znamensk & Gramani (2000) *apud* Avelar (2003), de acordo com o predomínio de frações granulométricas na matriz de solo existirão diferenças no comportamento reológico do fluxo de detritos. Quando há o predomínio de argila, silte e água tende a ocorrer o comportamento visco-elástico, e quando há predomínio de areia e água o comportamento tende a ser colisional-friccional.

Além do estudo da granulometria dos fluxos de detritos deve-se entender como os grãos interagem entre si. Segundo Znamensk e Gramani (2000) *apud* Avelar (2003), pode-se afirmar que tais movimentos de massa se caracterizam por serem sistemas dispersos com fases sólidas e líquidas, porém apresentando características reológicas fortemente ligadas aos seus componentes sólidos e seu teor de umidade. Segundo Takahashi (2007), o mecanismo do fluxo de detritos permite que os sólidos sejam carregados devido à suspensão das partículas causada pela colisão entre as mesmas, caracterizando uma mistura densa. Enquanto os deslizamentos são dominados pelas forças entre as partículas sólidas, que seguem um comportamento por atrito e adequadas as condições concebidas pela equação de Coulomb, e as inundações são regidas pelas forças hidráulicas, que seguem a lei de viscosidade de Newton, nos fluxos de detritos as forças dos sólidos e as forças hidráulicas devem atuar em conjunto.

Em linhas gerais os fragmentos grosseiros tendem a se acumular na parte frontal do fluxo e à montante segue um material mais ou menos homogêneo, seguindo a granulometria da área fonte de detritos (Johnson & Rodine, 1984 *apud* Avelar, 2003). A Figura 3.1 ilustra o perfil longitudinal típico de um fluxo de detritos, onde há um acúmulo de fragmentos grosseiros na parte frontal, e uma superfície livre da massa em movimento apresentando uma forma senoidal. Forma essa, que demonstra que o fluxo apresenta ondas com vazões de pico ao longo do percurso.



**Figura 3.1: Característica granulométrica e morfológica do fluxo de detritos (Pierson, 1986 *apud* Hungr, 1999).**

Após ter sido apresentada uma revisão acerca dos materiais envolvidos no fluxo de detritos pode-se introduzir uma classificação deste movimento relacionada a granulometria. Segundo Hungr *et al.* (2001) *apud* Polanco (2010), existem somente dois tipos de materiais envolvidos em deslizamentos, sendo: detritos e solos. O material é classificado como detrito quando o percentual de material rochoso supera 20% do total, no caso da classificação para solo este percentual deve ser inferior a 20%.

O termo solo deve representar um material argiloso sem subclassificações e com consistência mais perto do limite plástico do que do limite elástico. Para descrição do termo detritos deve-se considerar, segundo Hungr *et al.* (2001) *apud* Polanco (2010), um material solto e de baixa plasticidade. Os detritos são uma mistura de areia, rocha, blocos de rocha com distintas proporções de silte e lama, podendo haver ainda uma quantidade significativa de matéria orgânica.

Desta forma Hungr *et al.* (2001) *apud* Polanco (2010), classificam os fluxos de detritos da seguinte forma:

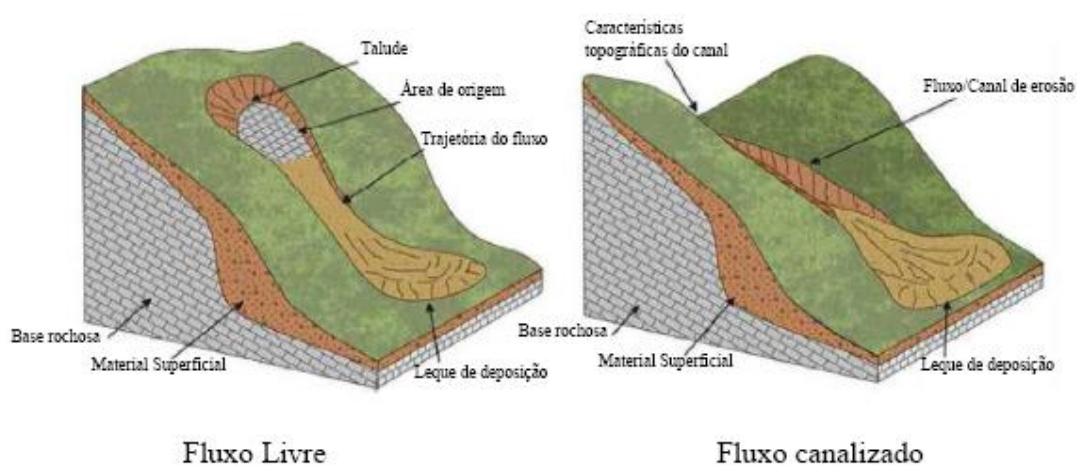
- ✓ Fluxo de detritos: movimento rápido a extremamente rápido de detritos saturados, não plásticos, em canais com índice de plasticidade menor do que 5% na fração do solo.
- ✓ Fluxo de lama: movimento rápido a extremamente rápido de lama em canais com alto teor de água e alta plasticidade, maior do que 5%, na fração do solo.
- ✓ Enxurrada de detritos: movimento confinado muito rápido e com grande quantidade de detritos.
- ✓ Avalanche de detritos: movimento muito rápido a extremamente rápido de material superficial e sem confinamento do canal.

Tal classificação é de extremo valor em estudos com objetivo de projetar estruturas de controle de fluxos de detritos, já que permite desenvolver uma tipologia para os detritos e assim concentrar os esforços no comportamento respectivo de cada classe de fluxo de detritos. Por exemplo: caso a área estudada em Angra dos Reis apresente potencial para fluxo de lama ao invés de fluxo de detritos o estudo poderá se

concentrar nos valores das vazões de pico e concentração de sedimentos para escolha da melhor solução de engenharia a fim de conter o fluxo de detritos.

Além da classificação relacionada a granulometria do fluxo de detritos, Evans (1982) *apud* VanDine (1996) propôs uma nova classificação para o movimento, relacionada a topografia e característica geológica da área onde ocorre o evento. O fluxo é dividido em dois grandes grupos. Sendo o primeiro o fluxo de detritos canalizado – torrente de fluxo de detritos – e o segundo grupo os fluxos de detritos livres.

A Figura 3.2 ilustra os dois grupos possíveis para fluxo de detritos segundo Evans (1982) *apud* VanDine (1996).



**Figura 3.2: Classificação dos fluxos de detritos em livre ou canalizado (Polanco, 2010).**

O fluxo de detritos canalizado é um tipo de fluxo que envolve água carregada predominantemente de material de granulometria grosseira fluindo rapidamente em um fundo de vale ou canal pré existente (VanDine, 1996). Já o fluxo de detritos livre forma seu próprio caminho através das encostas até a área final de deposição (Cruden e Varnes, 1996 *apud* Nettleton, 2005). No presente trabalho será abordado o fluxo de detritos canalizado.

A fim de se entender melhor o comportamento reológico do fluxo de detritos ao longo de toda sua duração, são abordadas individualmente as três etapas do evento propostas por VanDine (1996): início, transporte/erosão e deposição.

### **3.2.1 Início do fluxo de detritos**

A primeira etapa consiste na mobilização da massa do fluxo de detritos, ou parte dela. Para uma melhor previsão de quando e onde ocorrerá esta mobilização de massa deve-se conhecer os parâmetros mais importantes envolvidos no processo e entender os possíveis mecanismos para iniciar tal movimento. Segundo Cruz *et al.* (2004) e Gramani & Kanji (2001) *apud* Polanco (2010), os principais parâmetros a se conhecer são: índice pluviométrico médio da região; inclinação da encosta; declividade do canal já existente; área da bacia; altura da encosta; uso e ocupação/vegetação; aspectos geológicos. Para os possíveis mecanismos capazes de mobilizar massas que iniciam o fluxo de detritos, Takahashi (2007), relacionou três:

- ✓ Erosão de depósitos em canais de drenagem;
- ✓ Aumento da poropressão por mecanismos de infiltração;
- ✓ Ruptura do talude gerando deslizamentos.

Além dos três mecanismos citados por Takahashi (2007), existe um quarto mecanismo, onde o fluxo de detritos é formado devido ao aumento de poropressão provocado por um carregamento muito rápido sobre depósitos de fundo de vale. Impactos estes causados pela chegada de outros eventos de movimentos de massa originados nas encostas a montante. Tal condição foi estudada por Avelar (2003) e se mostrou bastante possível em colúvios porosos do sudeste do Brasil.

#### **3.2.1.1 Erosão de depósitos em canais de drenagem**

A primeira causa mecânica para início do fluxo de detritos, a erosão, ocorre em talvegues onde normalmente o fluxo de água é muito pequeno, formando depósitos de detritos com passar do tempo. Em períodos de elevada pluviosidade tem-se um intenso fluxo de água entrando abruptamente nos talvegues, provocando a erosão das partículas de solo e rocha ali depositadas. O produto final da mistura de material erodido mais água apresenta geralmente um peso específico variando entre 2 e 3 kN/m<sup>3</sup>, e é considerado como uma torrente e não um fluxo de detritos, pois se trata de um processo fluvial. Geralmente apenas autores ligados à disciplina de recursos hídricos consideram este evento como se tratando de um fluxo de detritos.

### **3.2.1.2 Aumento da poropressão por mecanismos de infiltração**

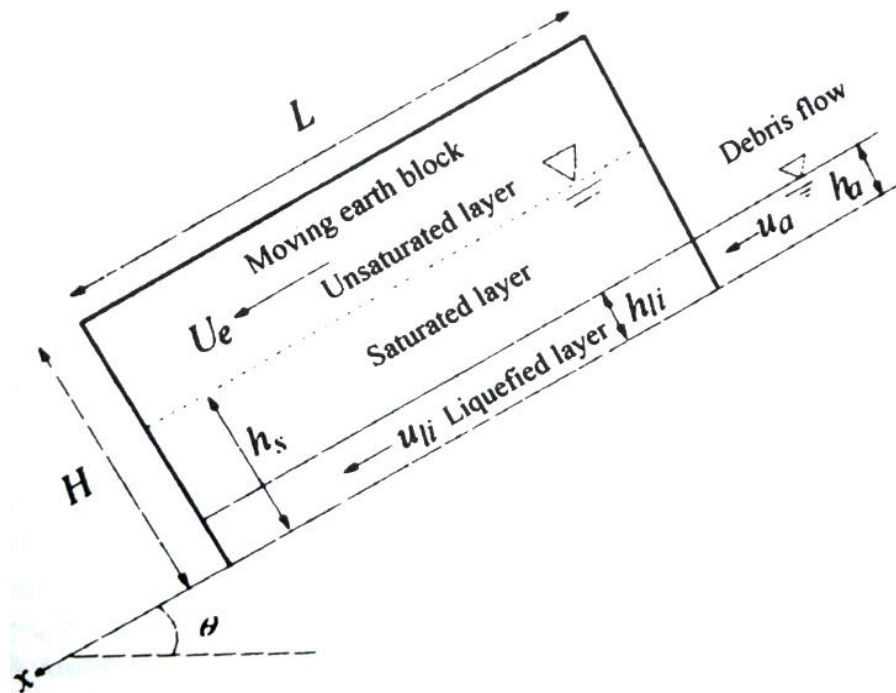
A segunda causa mecânica para início de um fluxo de detritos, aumento da poropressão, está relacionada à elevação abrupta do nível do lençol freático. Esta elevação acarreta no aumento da poropressão no interior da massa de solo, e assim uma redução da tensão efetiva e perda de resistência. Com a perda da resistência ocorre tanto uma ruptura por cisalhamento no interior do substrato de solo por onde passa o fluxo de água como também a liquefação de uma porção do solo, que irá compor o fluxo propriamente dito (Avelar, 2003).

### **3.2.1.3 Ruptura do talude gerando deslizamento**

De acordo com Takahashi (2007), a terceira causa mecânica, ruptura de taludes, trata dos deslizamentos que se transformam em fluxo de detritos devido à liquefação da massa de solo. A liquefação ocorre na presença de um elevado grau de saturação, de modo que haja água suficiente para a produção do fluxo. Após a massa de solo se liquefazer o comportamento passa de sólido para fluido. A liquefação pode ser definida, do ponto de vista geotécnico, como: “a transformação do estado sólido para o estado líquido, como consequência da geração de poropressão responsável pela redução da tensão efetiva” (Kubota & Takeda, 1998 *apud* Avelar, 2003).

O modelo geométrico do mecanismo descrito no parágrafo acima foi idealizado por Takahashi (2007) e está representado na Figura 3.3. A parte inferior do bloco de solo atinge a condição de liquefação devido ao esforço cisalhante entre o bloco de solo e a superfície de deslizamento (Takahashi, 2007).





**Figura 3.3: Movimento de bloco de solo produzindo uma camada liquefeita (Takahashi, 2007).**

Onde:

$U_e$  – velocidade da massa de solo

$h_s$  – espessura da camada saturada

$u_l$  – velocidade média da camada liquefeita

$h_l$  – espessura da camada liquefeita

$H$  – espessura do bloco de solo

$L$  – comprimento do bloco

$H_a$  – espessura do fluxo de detritos situado à montante do bloco de solo e que acompanha a massa rompida

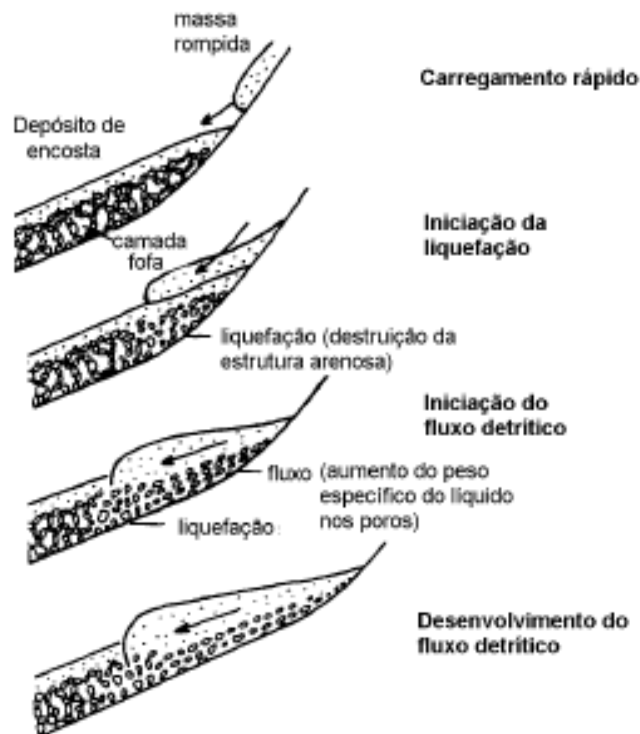
$u_a$  – velocidade média deste fluxo de detritos á montante

Segundo Iverson (1997), o cisalhamento ocorre apenas entre a camada liquefeita e o leito. Toda a espessura do fluxo acima da camada liquefeita se move como um corpo rígido.

### 3.2.1.4 Aumento da poropressão devido a carregamentos muito rápidos

No quarto mecanismo para início do fluxo de detritos, aumento de poropressão provocado por um carregamento muito rápido não drenado, podemos considerar carregamento muito rápido qualquer impacto sobre um depósito de partículas no fundo de um vale ou então na base de uma encosta.

Para ilustrar este mecanismo de impacto Sassa (1985) *apud* Avelar (2003), propôs um modelo onde a ruptura, na parte alta de uma encosta, leva a massa rompida, massa essa que pode ser de solo e/ou de blocos rochosos, a se chocar sobre um depósito arenoso e fofo no fundo de um vale ou na base de uma encosta. Tal choque provoca a liquefação do depósito e propagação do fluxo de detritos vale abaixo. Este mecanismo é ilustrado pela Figura 3.4. Tal evento apenas pode ocorrer em depósitos de fundo de vale pois se tratam de materiais fofos e que contém grande quantidade de água, elemento vital para se permitir a iniciação de um fluxo de detritos.



**Figura 3.4: Mecanismo de início de um fluxo de detritos a partir de um impacto (Modificado Sassa, 1985 *apud* Avelar, 2003)**

### 3.2.2 Transporte/erosão fluxo de detritos

A física do transporte/erosão é muito complexa, pois as variáveis, como massa, geometria do fluxo, densidade do material, velocidade e vazão do fluxo variam rapidamente ao longo da duração do evento. Não apenas as variáveis se alteram, mas também a intensidade das interações entre grãos, interações entre os grãos e o leito da calha e as interações entre grãos e fluido viscoso.

A massa de sólidos é uma das variáveis que mais se alteram ao longo da duração do evento. Segundo Cruz e Massad (1997), a variação da massa pode ser da ordem de 60% de incremento ao longo do percurso, conforme uma retroanálise feita no fluxo de detritos que ocorreu na Serra do mar em Cubatão no ano de 1994. De acordo com Pierson *et al.* (1990) *apud* Iverson (1997), o ganho de massa se dá devido a erosão das margens e leito do canal.

Para que ocorra a erosão das margens e leitos dos canais é necessária que se consuma energia incorporada no movimento, energia esta que se origina da transformação da energia potencial em energia cinética. Porém nem toda energia potencial é transformada em energia cinética, já que existem as perdas de energia para formas irreversíveis, como calor.

A energia potencial é dada por:

$$E_p = mgH \quad (3.1)$$

Onde:

m – massa do fluxo de detritos

g – aceleração da gravidade

H – elevação vertical da área fonte do fluxo de detritos em relação à área de depósito final

Já a energia total degradada para formas irrecuperáveis pelas forças de resistência é dada por:

$$Ed = mgRL \quad (3.2)$$

Onde:

R - um coeficiente de resistência adimensional

L - distância horizontal da área fonte até a área de depósito

O coeficiente de resistência (R) incorpora os efeitos das forças internas, mas também depende das forças externas que atuam no leito do canal a fim de converter potencial gravitacional em translação horizontal. O coeficiente de resistência foi estabelecido por Takahashi (2007) para fluxos de detritos que se desenvolvam em canais onde a declividade varia continuamente, sendo utilizado nas equações de conservação de massa e de momento. Tais equações não serão abordadas no presente trabalho. Para fluxo de detritos o coeficiente de resistência pode ser descrito como (Takahashi, 2007):

$$R = \frac{2}{5d_L} \left[ \frac{g}{0,02} \left\{ C_L + (1 - C_L) \frac{\rho_m}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \frac{C_{*DL}^{1/3}}{C_L} - 1 \right\} \quad (3.3)$$

Onde:

$d_L$  - diâmetro médio dos grãos

$C_L$  - concentração em volume da fração de grãos no volume total de material

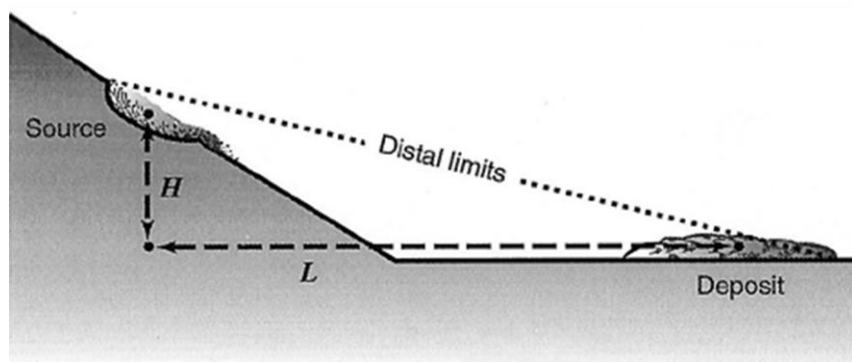
$C_{*DL}$  - concentração em volume da fração de grãos no leito do canal quando os grãos do fluxo são depositados

$\rho_m$  - densidade aparente do fluido

Logo após o fluxo percorrer todo seu caminho até o depósito temos:

$$Ep = Ed \rightarrow mgH = mgRL \quad (3.4)$$

A Figura 3.5 apresenta uma seção transversal esquemática de um fluxo de detritos com objetivo de definir as coordenadas H e L que descrevem o deslocamento do centro da massa do fluxo de detritos durante o movimento.



**Figura 3.5: Seção transversal esquemática definindo H e L para um caminho de fluxo de detritos (Iverson, 1997).**

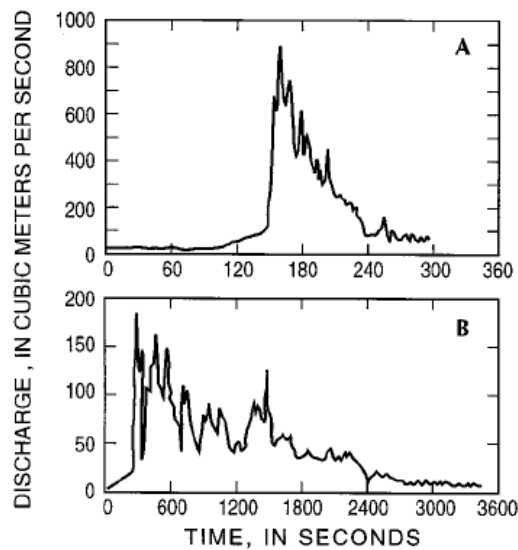
Dividindo os dois termos da Eq. 3.4 por MgHR temos:

$$\frac{1}{R} = \frac{L}{H} \quad (3.5)$$

Segundo Iverson (1997), o termo esquerdo da Eq. 3.5, chamado de eficiência líquida, aumenta conforme a distância de percurso aumenta para um H constante. Porém com H fixo a eficiência líquida será diferente para cada tipologia de movimentos de massa, por exemplo: avalanches de rocha possuem metade da eficiência líquida de um fluxo de detritos de mesmo volume (Iverson, 1997). Tal fato se deve a presença de água, que confere maior mobilidade ao movimento. A eficiência líquida também varia dentro da mesma categoria de movimento de massa, dependendo dos materiais envolvidos e as condições de contorno do evento. Por exemplo, para cada classificação do fluxo de detritos, aberto ou canalizado, a eficiência será uma. No caso do fluxo de detritos aberto, o valor de L/H se aproxima de 2, já no caso do fluxo de detritos canalizado L/H é maior do que 2 (Iverson and La Husen, 1993 *apud* Iverson, 1997).

Ao longo do movimento translacional do fluxo de detritos o mesmo apresenta sucessivas ondas intermitentes. Sendo que cada onda apresenta uma parte frontal ("snout") mais protuberante, e a montante um corpo cônico alongado de profundidade relativamente constante ("tail").

A Figura 3.6 ilustra a afirmação do parágrafo anterior, sendo que as ondas intermitentes são caracterizadas pelos picos de vazões ao longo do tempo.



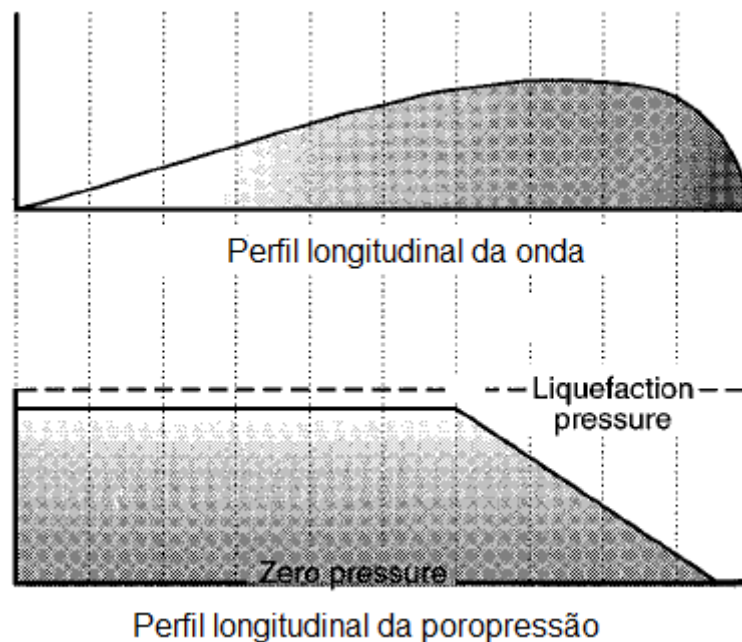
**Figura 3.6: Vazão de fluxo de detritos medidas. (a) Dados de Name River, Japan (b) Dados de Chemolgan River (Iverson, 1997).**

Segundo Takahashi (2007), a parte frontal do fluxo apresenta uma velocidade constante durante o movimento, já a parcela do fluxo referente à “cauda” apresenta um perfil decrescente de velocidade ao longo da seção transversal, sendo a maior velocidade junto à superfície e a menor junto ao leito do canal. Devido a este perfil de velocidade apresentado ocorre que as partículas que se encontram na superfície do fluxo tendem gradualmente a se encaminhar para parte frontal do movimento e lá chegando se depositam. Dependendo das características do fluxo de detritos essas partículas são capazes de formar uma barreira e impedir a continuidade do movimento, ou então essa barreira é galgada e o fluxo se mantém. Tais partículas que se depositam na parte frontal do fluxo chegam a possuir grandes dimensões, do tamanho de pedregulhos. No fluxo de detritos registrado na Venezuela em 1999 foram transportados blocos de mais de 10 metros de diâmetro.

A capacidade de suportar e movimentar grandes e pesados blocos rochosos que o fluxo de detritos possui advém das forças dispersivas desenvolvidas pelas colisões destes blocos com muitas outras partículas pequenas, forças essas que estão sempre associadas à viscosidade e flutuabilidade. Assim para quem observa parece que os blocos rochosos estão “surfando” na superfície de um fluxo de detritos. Este fenômeno

de “surf” ocorre até a região onde a declividade da encosta reduz ou então o fluxo se espalha. Ao se espalhar a camada liquefeita atinge uma espessura crítica e não consegue mais suportar os blocos rochosos.

Com o acúmulo de grandes blocos rochosos na parte frontal do fluxo a permeabilidade nesta região é muito alta, logo praticamente não se retém água e a poropressão é quase zero. Em contrapartida a poropressão medida ao longo do corpo do fluxo de detritos se aproxima ou até mesmo excede os limites para liquefação do material. Segundo Iverson (1997) a distribuição de poropressão ao longo de uma seção transversal de um fluxo de detritos genéricos pode ser representada pela Figura 3.7.



**Figura 3.7: A distribuição espacial das poropressões em uma onda em movimento (Iverson, 1997)**

De uma forma geral Takahashi (2007), pontuou as características usuais das ondas que compõem o fluxo de detritos:

- ✓ A frente de onda possui um comprimento de 3 a 5 metros, onde a profundidade e velocidade são máximas;
- ✓ A velocidade frontal é usualmente 6 a 8 m/s, as vezes chegando à 10 m/s;
- ✓ Após a violenta e turbulenta frente de onda passar, 10 a 20 metros de fluxo menos turbulento passa, onde a velocidade não é muito diferente da velocidade da frente de onda;

- ✓ Após passagem da etapa anterior se encaminha uma longa ondulação de 30 a 50 metros, onde a profundidade e velocidade reduzem gradualmente;
- ✓ Por fim 50 a 80 metros de fluxo laminar contínua.

### 3.2.3 Deposição dos detritos

A última etapa de um fluxo de detritos é a deposição que ocorre, segundo Iverson (1997), quando toda a energia cinética se degrada para formas irrecuperáveis. As primeiras deposições são constituídas pelos grãos mais grosseiros do fluxo, e as deposições subsequentes são formadas de grãos mais finos. Os depósitos formados pelos grãos grosseiros são ditos “secos”, já que a poropressão é quase zero devido à alta permeabilidade do depósito. Tais depósitos formam uma barreira que reduz ou até mesmo interrompe o fluxo dos detritos formado por grãos mais finos. Os depósitos formados pelos grãos mais finos são, segundo Iverson (1997), ditos “molhados” e de baixa resistência no interior. Esta característica dos depósitos no seu interior é devido à poropressão se manter elevada muito tempo depois da deposição, mantendo o material liquefeito (Hampton, (1979), Pierson, (1981) e Major, (1996) *apud* Iverson, 1997). Conforme ocorre o adensamento do material a água vai sendo expulsa e a poropressão reduzida gradualmente, marcando o final do estágio do comportamento fluido e iniciando o comportamento sólido.

Segundo VanDine (1996), as causas para deposição são:

- ✓ Redução na declividade da encosta;
- ✓ Perda do confinamento dos detritos, quando o fluxo deixa de ser canalizado;
- ✓ Qualquer impedimento para o fluxo, natural ou artificial.

Segundo Johnson e Rodine (1984) *apud* VanDine (1996), pode haver uma quarta causa que promova a deposição, seria quando o fluxo de detritos atinge uma espessura crítica, dada por:

$$T_c = \frac{c}{[\gamma \cos\theta (\tan\theta - \tan\phi)]} \quad (3.6)$$



Onde:

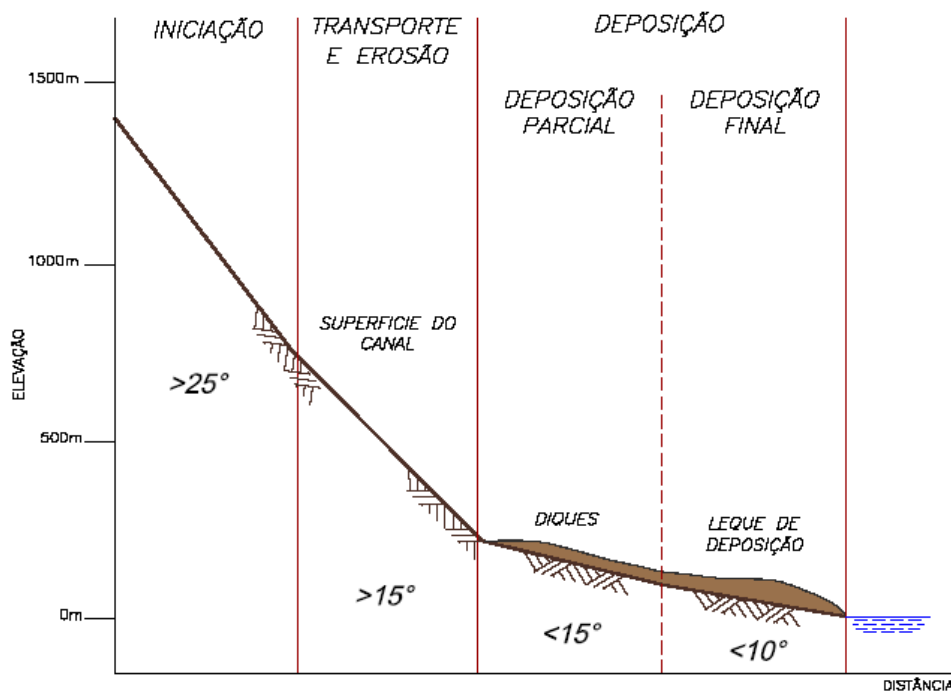
$T_c$  = espessura crítica

$c$  = coesão

$\theta$  = gradiente do canal

$\phi$  = ângulo de atrito interno do fluxo

Em seu trabalho, VanDine (1996), estabeleceu intervalos de inclinação da encosta para cada etapa do evento fluxo de detritos. De acordo com o autor, a primeira etapa (início do evento) requer uma declividade maior que  $25^\circ$ . Já para a etapa de transporte e erosão a declividade deve ser maior que  $15^\circ$  e, para etapa de deposição o gradiente deve ser menor que  $15^\circ$ , sendo que para valores próximos de  $15^\circ$  a deposição em questão é parcial em forma de diques. Para deposição final a declividade deve ser menor do que  $10^\circ$ . A Figura 3.8 apresenta um esquema das declividades em cada etapa.



**Figura 3.8: Zona do Fluxo de Detritos Canalizados (adaptado de VanDine, 1996).**

Foram realizados diversos estudos no mundo todo para melhorar a acurácia dos valores das declividades para cada etapa. Hungry *et. al.* (1984) *apud* VanDine (1996) sugere que, para fluxo de detritos canalizados, a deposição deve começar a ocorrer quando a declividade do canal estiver entre  $12^\circ$  e  $8^\circ$ . Já no Japão pesquisas

demonstraram que a deposição ocorre entre 10° e 8° (Ikeya, (1976,1981) *apud* VanDine (1996). Na Califórnia a deposição para fluxo de detritos canalizados ocorre para declividade de 11° ou menos (Campbell, 1975 *apud* VanDine,1996).

Além da declividade para início da deposição foram pesquisadas as declividades ao final da deposição. De acordo com Tripp e Poulim (1986) *apud* VanDine (1996) a declividade média do canal no término do fluxo de detritos é 2°. Este é o mesmo valor encontrado na pesquisa realizada no Japão por Ikeya (1981) *apud* VanDine (1996).

Os desastres referentes à fluxo de detritos são fruto do processo de deposição em regiões onde a calha do canal não suporta o volume total, assim ocorre um transbordamento da calha e os detritos começam a se depositar, com uma forma cônica, na área ao entorno (Takahashi, 2007).

## **4. Estruturas de controle de fluxo de detritos**

### **4.1 Tipos de estrutura**

As estruturas de controle do fluxo de detritos têm por objetivo proteger edificações, estradas, pontes e plantas industriais do grande poder destrutivo deste evento. Países como Suíça, Canadá e Japão vêm desenvolvendo trabalhos para proteção há mais de um século, investindo grandes somas de recursos em pesquisa e em projetos de engenharia (Cruz *et al.*, 2004).

De acordo com Cruz *et al.* (2004), alguns objetivos fundamentais devem ser considerados nos projeto de intervenções para controle do fluxo de detritos. São eles:

- ✓ Proteção das encostas naturais para evitar sua ruptura, quando possível.
- ✓ Proteção das calhas dos rios contra erosão
- ✓ Redução da erosão da margem durante a corrida de detritos
- ✓ Redução da energia do fluxo de detritos
- ✓ Redução da vazão de pico
- ✓ Retenção dos grandes blocos de rocha, do material granular e matacões

- ✓ Retenção de galhos de arvores, árvores e vegetação transportada pelo fluxo de detritos
- ✓ Reservatórios de acumulação para reter os sedimentos
- ✓ Projetos de desvio e deflexão para proteger áreas cultivadas
- ✓ Condução da mistura lama mais água para o mais próximo curso de água ou mesmo oceano.

Os objetivos definidos acima dependem das condições da topografia local, dos objetos a serem protegidos, dos requisitos ambientais sobre a disposição dos sedimentos, da vegetação transportada, dos cursos d'água ou margens a receberem os finos e da manutenção do fluxo de água.

Segundo Cruz *et al.* (2004), os projetos de engenharia são principalmente barreiras, reservatórios e canais. As barreiras são projetadas para diferentes propósitos, podendo ser localizada à montante da área final de deposição para serem utilizadas com objetivo de reduzir a energia e reter os maiores blocos. Caso as barreiras sejam posicionadas logo abaixo do início potencial do evento a finalidade delas é formar um grande reservatório a fim de reter parte dos sedimentos, principalmente matacões, cascalho e areia, contribuindo para redução do pico de vazão. As barreiras podem ser rígidas feitas de concreto ou aço ou flexíveis feitas de malha de aço. Os canais possuem a finalidade de conduzir a água remanescente do barramento com finos suspensos para um rio próximo. E os reservatórios devem reter o volume de detritos provenientes do evento.

De acordo com VanDine (1996), os métodos de controle do fluxo de detritos têm por objetivo controlar o movimento e minimizar a quantidade de detritos grosseiros, e parte dos grãos finos, que entra em corpos d'água vizinhos. Quando é dito controlar o movimento deve-se entender como controlar o volume e a velocidade dos detritos.

Hungr *et al.* (1987) e Thurber Consultants (1983) *apud* VanDine (1996), descreveram as três formas possíveis de consequências associadas ao fluxo de detritos:

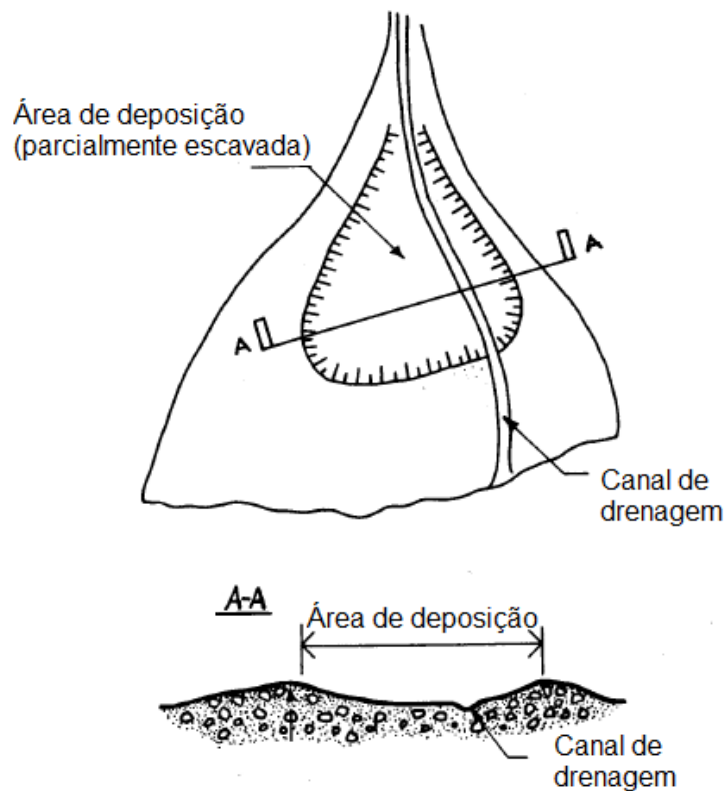
- ✓ Impacto de alta energia, geralmente detritos grosseiros que podem destruir estruturas.
- ✓ Impacto de baixa energia, grãos grosseiros e finos que podem enterrar estruturas.

✓ Inundações que são forçadas para fora do canal normal pelo depósito de detritos e tem potencial para erodir superfícies desprotegidas.

VanDine (1996) relaciona, em seu trabalho, diversas estruturas possíveis a fim de mitigar os efeitos do fluxo de detritos, sendo as mesmas exemplificadas a seguir.

### - Área de depósito

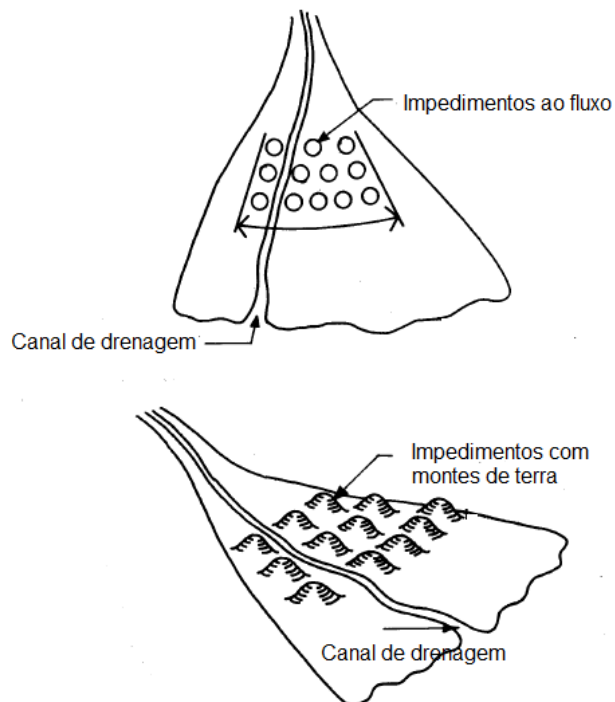
No primeiro exemplo uma área é escavada a fim de motivar os detritos a se depositarem ali, dando a oportunidade deles se espalharem como é apresentado na Figura 4. 1.



**Figura 4. 1: Área de depósito desconfinado (VanDine, 1996)**

### - Obstáculos ao fluxo

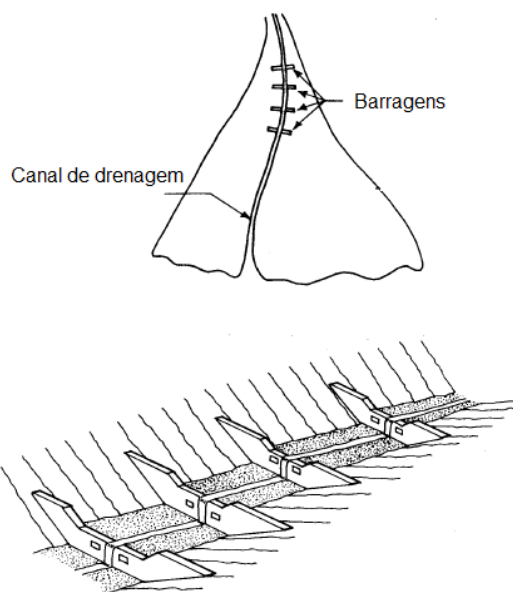
No exemplo apresentado na Figura 4.2 são construídos obstáculos a fim de dissipar a energia cinética do fluxo.



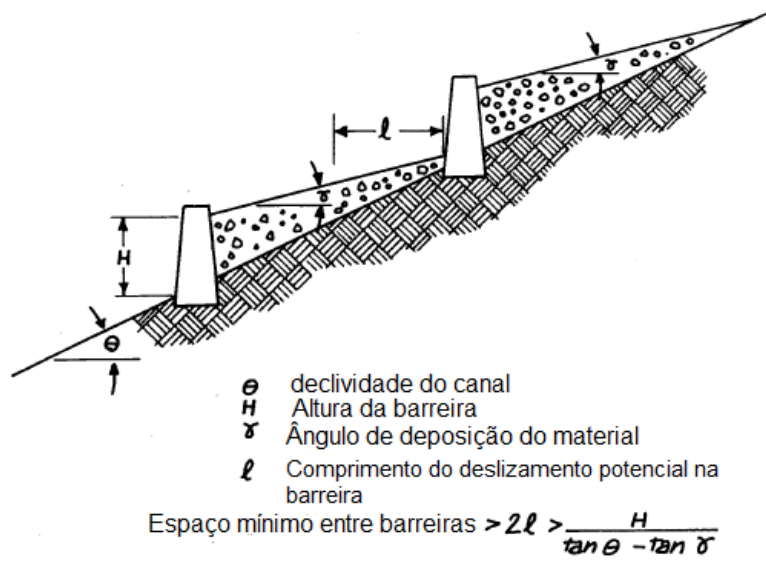
**Figura 4.2: Impedimentos ao fluxo (VanDine, 1996).**

### **- Barragens**

As Figura 4.3 e Figura 4.4 apresenta uma estrutura de controle cujo objetivo é reduzir a profundidade do canal e a energia do fluxo construindo barreiras



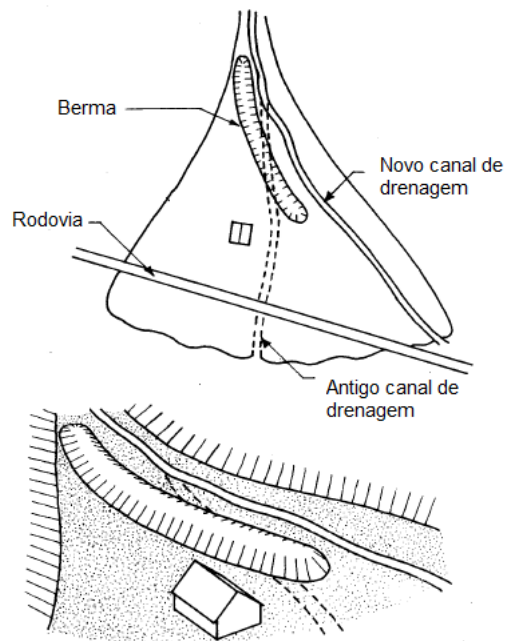
**Figura 4.3: Esquema em planta de barreiras sucessivas (VanDine, 1996).**



**Figura 4.4: Esquema vertical de barreiras sucessivas (VanDine, 1996).**

#### - Bermas

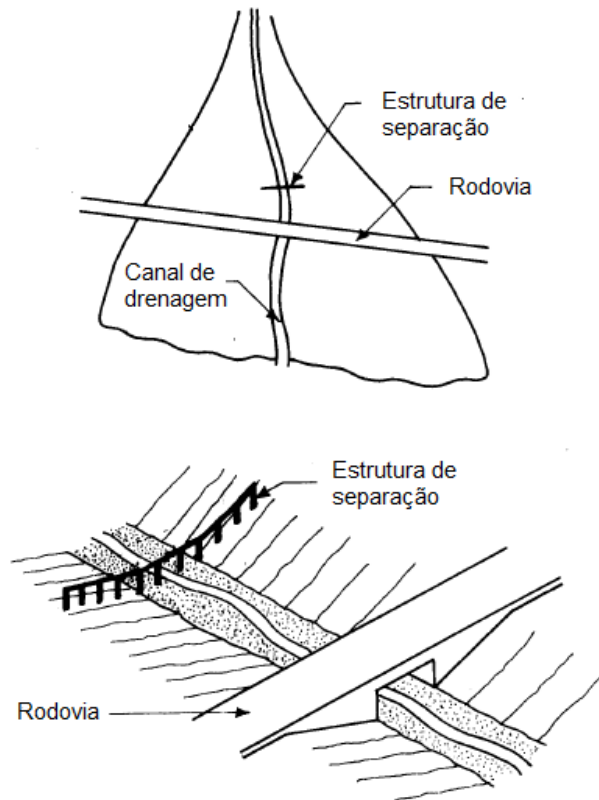
No exemplo apresentado na Figura 4.5 são construídas bermas a fim de definir o caminho a ser traçado pelo fluxo de detritos.



**Figura 4.5: Bermas para delimitação do caminho do fluxo de detritos (VanDine, 1996)**

### - Estrutura para separação de partículas grosseiras

A Figura 4.6 apresenta uma estrutura que tem como objetivo separar os detritos grosseiros dos detritos finos e a água do fluxo de detritos.



**Figura 4.6: Estrutura de separação dos detritos grosseiros dos finos (VanDine, 1996)**

### - Barreiras flexíveis de aço

Existe outro grupo de estruturas, denominado de barreiras flexíveis, cujo objetivo básico é o de conceder deslocamentos controlados para dissipação de energia e ao mesmo tempo possuir robustez suficiente para frear o fluxo de detritos em tempo e distância compatíveis com a necessidade (Figura 4.7 e Figura 4.8).



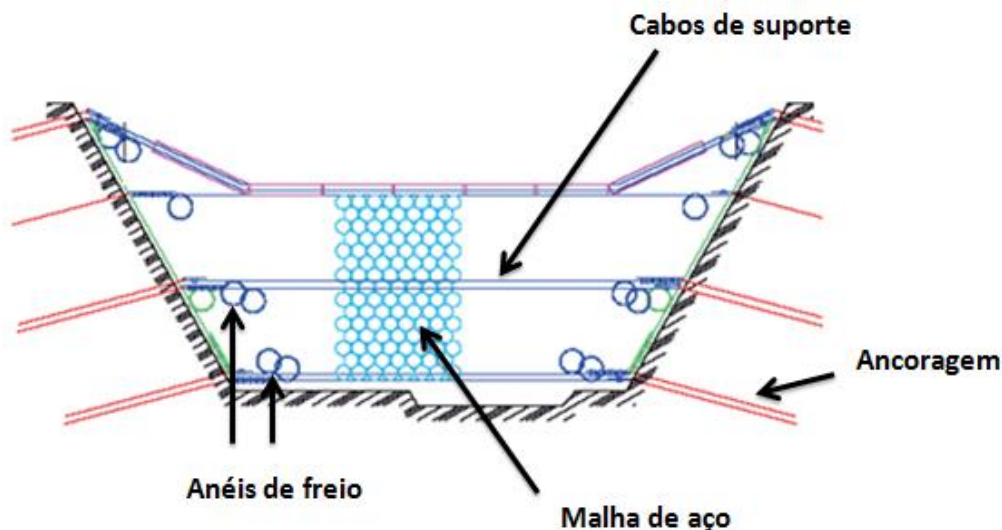
**Figura 4.7: Barreira flexível (Geobruigg, 2012).**



**Figura 4.8: barreira flexível construída para testes em Illgraben (McArdell, 2012).**

As barreias flexíveis são formadas por cinco partes (Figura 4.9): ancoragem, cabos de sustentação, anéis de freio, malha de anéis e proteção contra abrasão.





**Figura 4.9: Elementos barreira flexível (Modificado Geobruigg, 2012)**

A malha de aço tem por objetivo transferir a carga recebida pelo impacto do fluxo de detritos para os cabos de aço horizontais, cabos de suporte, os quais descarregam nas ancoragens e as mesmas descarregam no terreno. Cargas maiores que 400 kN podem ser carregadas e transportadas seguramente para as ancoragens.

A malha de aço é um elemento de elevada resistência e deformabilidade, possuindo um comportamento elastoplástico capaz de absorver energia enquanto se deforma. Este comportamento permite a dissipação da energia e também o suporte da carga estática de empuxo de terra após o preenchimento da barreira.

Segundo Wendeler (2006), a malha de aço deve possuir uma abertura aproximadamente igual ao diâmetro do D90 que é o diâmetro do sedimento onde 90% dos sedimentos em massa possuem diâmetro menor. As barreiras devem ter diâmetro do anel entre 0,3 a 0,5m para alcançar um desempenho de retenção viável. A abertura na base entre o cabo de suporte mais baixo e o leito do rio devem também possuir a mesma dimensão.

Os anéis de freio (Figura 4.10) são instalados nos cabos de suporte e absorvem parte da energia vinda da malha de anéis. Este dispositivo é do tipo “gatilho” e são mobilizados quando a energia se aproxima da máxima suportada pelo sistema. A cada mobilização dos anéis de freio os mesmos devem ser trocados, pois estão alongados e sem capacidade para uma nova dissipação de cargas.



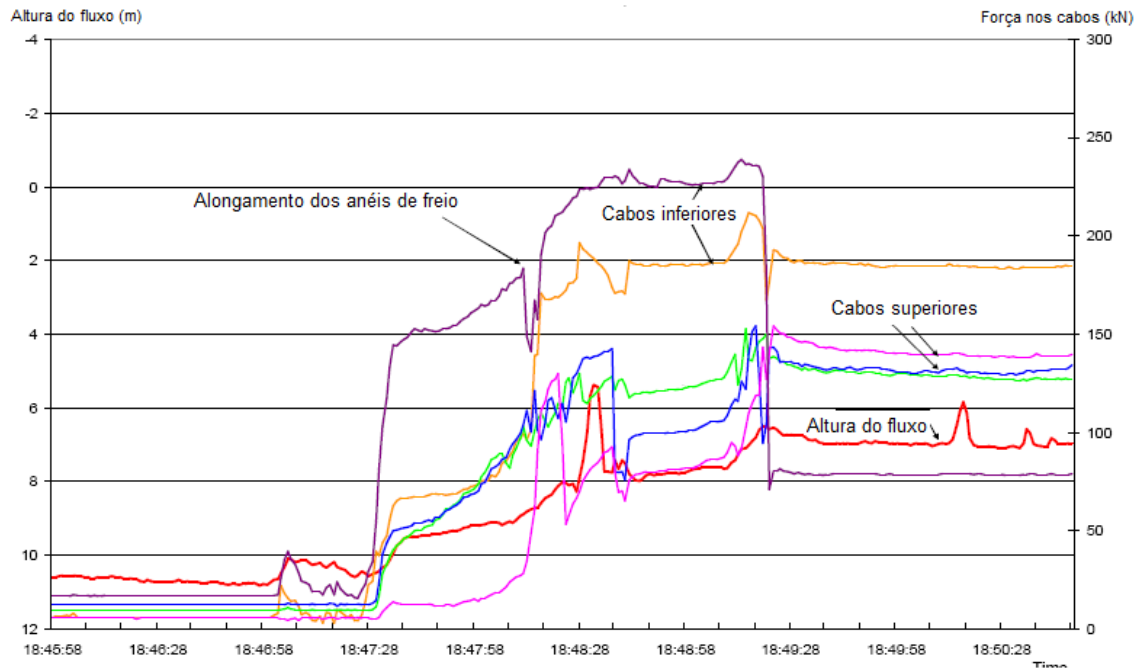
**Figura 4.10: Anéis de freio (Wenderler, 2006)**

As ancoragens, conforme exposto anteriormente, transferem toda a energia absorvida do fluxo de detrito para o terreno. O aço que constitui os cabos de ancoragem possui resistência em média de  $1.770 \text{ N/mm}^2$  (Figura 4.11).



**Figura 4.11: Ancoragens (Geobrugg, 2012).**

A partir de um experimento realizado na localidade de Illgraben na Suíça em 2006 pode-se chegar a algumas conclusões acerca do funcionamento da barreira durante o impacto do fluxo de detritos. A Figura 4.12 apresenta um gráfico dos esforços solicitantes nos cabos de suporte de uma barreira flexível durante o evento do fluxo de detritos. Observando o gráfico pode-se concluir que durante o enchimento da barreira os cabos inferiores são mais solicitados do que os cabos superiores, porém esta tendência se altera quando a barreira começa a ser galgada, quando o cabo superior passa a ser mais solicitado.



**Figura 4.12: Forças de tensão medidas no cabos (Wendeler, 2006)**

## 4.2 Parâmetros de Projeto

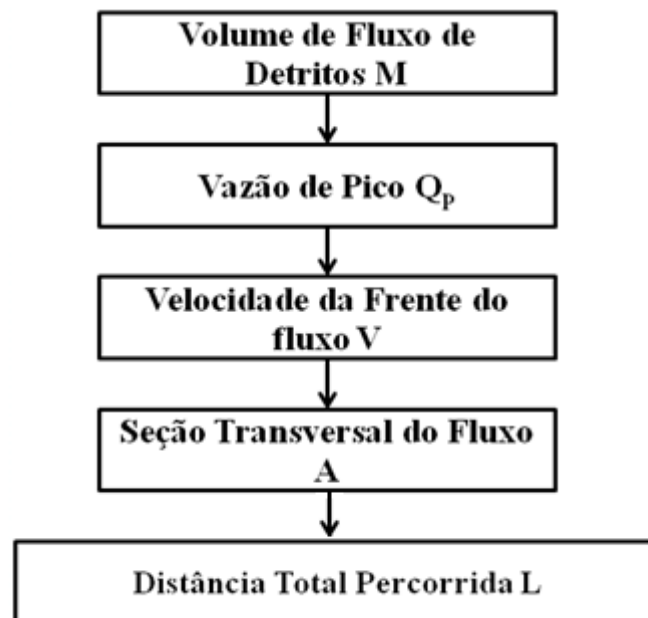
O fenômeno fluxo de detritos é muito complexo e, por esse motivo, segundo Rickenmann (1999), são utilizadas relações empíricas para estimar os parâmetros mais importantes do projeto para controle do fluxo de detritos. Segundo Cruz e Massad (1997), estes parâmetros chave são:

- ✓ Vazão do fluxo de detritos;
- ✓ Velocidade do fluxo de detritos;
- ✓ Força de impacto e pressão aplicados na estrutura;
- ✓ Volume de sedimentos transportados pela corrida de detritos.

Tais relações empíricas estão disponíveis na literatura para que se possa elaborar um projeto de controle do fluxo de detritos. Porém, uma análise crítica dos resultados obtidos deve ser minuciosamente realizada, pois pode haver grandes diferenças entre os parâmetros calculados e os parâmetros reais. Takahashi (2007) ilustra tal afirmação encontrando uma grande diferença entre a velocidade medida em campo e a velocidade calculada em um dado evento de fluxo de detritos. A diferença obtida foi bastante

grande e o autor a atribui a: aumento de massa durante o fluxo pela incorporação do material da calha do rio; o atrito entre o canal e a massa do fluxo de detritos serem diferente da utilizada nas relações empíricas; o fluxo de detritos não percorrer toda a distância que havia sido estimada.

Para determinação dos principais parâmetros do fluxo de detritos, Rickenmann (1999) propôs uma sequência de cálculo. Iniciando-se pelo volume de detritos, passando para vazão de pico, depois para velocidade da frente do fluxo, em seguida a seção transversal do fluxo (largura e altura) e, por fim, distância total percorrida (Figura 4. 13).



**Figura 4. 13: Fluxograma proposto por Rickenmann (1999) para estimar parâmetros de fluxo de detritos empiricamente**

Os parâmetros de projeto segundo o fluxograma proposto por Rickenmann (1999), apresentado na Figura 4. 13, serão descritos a seguir.

#### **4.2.1 Volume (M)**

O primeiro parâmetro a ser calculado é o volume do fluxo de detritos.

Ikeya (1989), Mizuyama *et al.* (1992) e Iverson (1997) sugerem calcular a vazão de pico e distância total percorrida a partir do volume de detritos. Rickenmann

(1999) chama atenção para o fato de que o valor do volume encontrado através de relações empíricas pode ser superestimado em até 100 vezes do valor real.

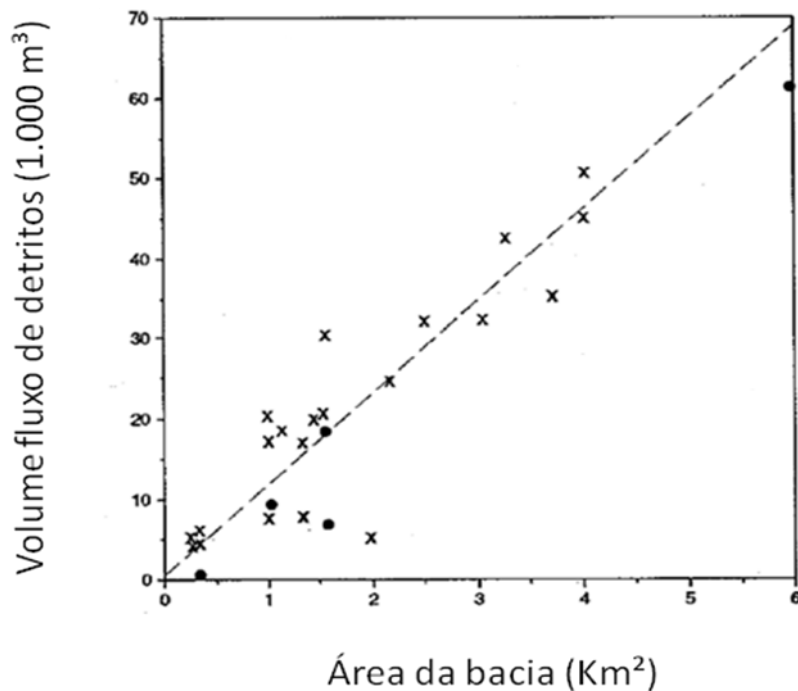
VanDine (1996) propôs correlacionar o volume total do fluxo de detritos com a área de drenagem de corpos d'água, obtendo a seguinte equação (Figura 4. 14).

$$M = 10.000A_b \quad (4.1)$$

Onde:

$M$  - volume do fluxo de detritos em  $m^3$

$A_b$  - área da bacia em  $Km^2$



**Figura 4. 14: correlação entre volume e área de drenagem da bacia (VanDine, 1996)**

Cruz *et al.* (1997) propõe calcular o volume total de detritos a partir do conhecimento da concentração de sólidos em volume ( $C$ ). Sabendo-se que:

$$C = \frac{M_s}{M} \quad (4.2)$$

Onde:

$M_s$  - volume de sólidos no fluxo de detritos em  $m^3$

$M$  - volume total do fluxo de detritos em  $m^3$

Tem-se:

$$M = \frac{M_a}{1-C} \quad (4.3)$$

Onde:

$M_a$  - volume de água presente no fluxo de detritos

Segundo Takahashi (2007), aplicando-se para fluxos uniformes em canais abertos a hipótese de Bagnold (1954), onde a dispersão dos grãos em um fluido é causada pela colisão das partículas entre si, pode se propor para cálculo de  $C$  a Eq. 4.4.:

$$C = \gamma_0 \frac{tg\theta}{(\gamma_s - \gamma_0)(tg\varphi - tg\theta)} \quad (4.4)$$

Onde:

$\gamma_0$  = peso específico da lama (água mais finos)

$\gamma_s$  = peso específico real dos grãos

$\varphi$  = ângulo de atrito das partículas envolvidas no fluxo de detritos

$\theta$  = média da inclinação do canal

Segundo Takahashi (2007), a Eq. 4.4 é válida para  $10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ . Caso contrário  $C$  deve satisfazer a seguinte condição:

$$0,3 \leq C \leq 0,9 C^\circ \quad (4.5)$$

Sendo:

$C^\circ$  - concentração de sólidos nos depósitos de detritos existentes no canal

Devido à dificuldade em se encontrar o valor de  $C^\circ$ , Takahashi (2007) recomenda a utilização de  $C^\circ = 0,6$ , fazendo  $c$  variar entre 30 e 54%.

Para determinação do  $M_a$ , a experiência japonesa propõe o cálculo do volume de água que escoou na bacia de contribuição no período de 24 horas (Eq. 4.6):

$$M_a = A_b I_{24} f \quad (4.6)$$

Sendo:

$A_b$  = área da bacia hidrográfica

$I_{24}$  = intensidade da chuva em 24 h

$f$  = fator de runoff

A partir do conhecimento de  $M_a$  (Eq. 4.6) e de  $C$ , pode-se determinar  $M$ .

Ainda segundo Massad *et al* (1997) a experiência japonesa indica a seguinte relação entre  $M_s$  e  $A_b$ :

$$\frac{M_s}{A_b} = 30.000 \text{ a } 85.000 \frac{m^3}{Km^2} \quad (4.7)$$

A partir do conhecimento da área da bacia de contribuição pode-se determinar o  $M_s$  pela Eq. 4.7 e conhecendo-se  $c$ , determina-se  $M$ .

Caso o valor da vazão de pico do fluxo de detritos, vide item 4.2.2, seja conhecido, o valor do volume total do fluxo de detritos pode ser determinado pela equação empírica 4.8, baseada em dados de campo do Japão e Canadá e proposta por Takahashi (2007).

$$M = 500 \cdot Q_p \quad (4.8)$$

Massad *et al* (1997) propõe alterações na Eq. 4.6, mais especificamente no coeficiente de run-off e no índice pluviométrico a serem utilizados. Tal alteração é motivada pela experiência do autor no fluxo de detritos ocorrido em Cubatão em 1976, onde o solo se encontrava já totalmente saturado, devido ao longo e intenso período de chuvas, e toda água proveniente da maior precipitação que ocorreu em uma hora que antecedeu o evento escoou superficialmente. Dessa forma, o coeficiente de run-off é considerado igual a 1 e o índice pluviométrico igual a  $I_1$ . Assim, tem-se:

$$M_a = A_b I_1 \quad (4.9)$$

Onde:

$I_1$  = índice pluviométrico máximo da hora que antecede o evento

Sabendo que:

$$M = \frac{M_a}{(1-c)}$$

Tem-se:

$$M = \frac{I_1 A_b}{(1-c)} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2 Vazão de pico ( $Q_p$ )

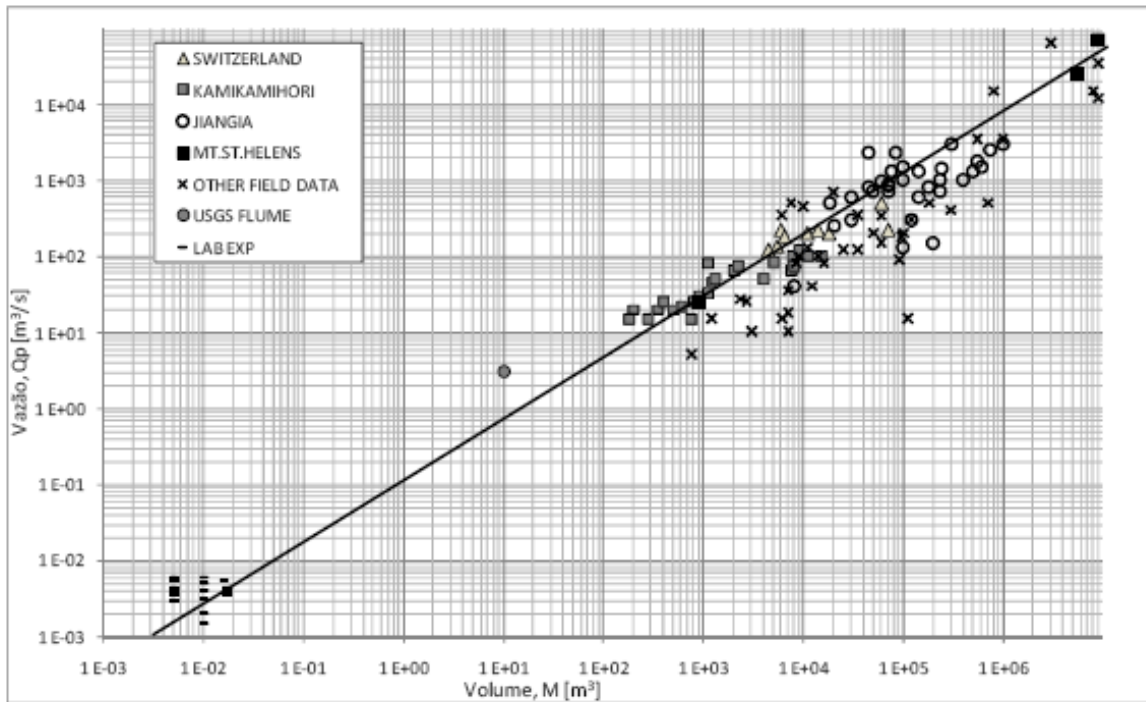
Segundo VanDine (1996), a vazão de pico de um fluxo de detritos depende da geometria do canal de drenagem e da velocidade do fluxo.

Tem sido demonstrado que relações empíricas podem ser estabelecidas entre vazão de pico ( $Q_p$ ) e volume de fluxo de detritos ( $M$ ) (Hungry *et al*, 1984; Mizuyama *et al.*, 1992; Takahashi *et al.*, 1994, *apud* Rickenmann (1999)).

A Figura 4. 15 apresenta um conjunto de dados de fluxos de detritos avaliados por Rickenmann (1999), relacionando vazão de pico e volume total de detritos. Também é plotada uma linha semi teórica derivada da hipótese que a escala de froude deve ser satisfeita para fluxos de diferentes tamanhos, mas que possuem essencialmente as



mesmas propriedades físicas. O número de froude é um número adimensional utilizado na hidráulica de condutos abertos, representando a razão entre força inercial e força gravitacional. Por sua vez a escala de froude separa os tipos de regime de escoamento possíveis – torrencial para número de froude maior que 1; críticos para número de froude igual a 1; fluvial para número de froude menor do que 1.



**Figura 4. 15: Relação entre vazão de pico e volume fluxo de detritos (Rickenmann, 1999)**

A equação correspondente a Figura 4. 15 proposta por Rickenmann (1999), apresenta a seguinte forma:

$$Q_{p_*} = 0,1 M_*^{0,833} \quad (4.11)$$

Sendo:

$$Q_{p_*} = \frac{Q_{p2}}{Q_{p1}} \quad (4.12)$$

$$M_* = \frac{M_2}{M_1} \quad (4.13)$$

Os índices 1 e 2 se referem a dois fluxos diferentes com propriedades dos materiais iguais, porém com tamanhos diferentes. Tais fluxos devem atender o requisito de possuírem a mesma escala de froude.

A Tabela 4.1 apresenta vazões de pico e volume de diversos eventos ocorridos em todo mundo, segundo Rickenmann (1999). O “N” descrito na tabela significa o número de observações dos diferentes autores considerados.

**Tabela 4.1: Dados de volume e vazão de pico de fluxos de detritos (Rickenmann, 1999)**

País/Região	N	M (m <sup>3</sup> )	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Referência
Alpes Suíços	11	4,000-60,000	120-650	Rickenmann & Zimmermann (1993); M. Zimmermann (1996)
Cordilheira Canadense	23	1500-3,000,000	10-70,000	Hungr <i>et al.</i> (1984); VanDine (1985); M. Jakob, (1995)
Japão-Vale Kamikamihori	26	214-14,800	13-124	Okuda & Suwa (1981); H. Suwa, (1997)
China, Jiangia	33	400-999,000	46-3133	M. Jakob, written comm. (1995); Z. Wang (1997)
Estados Unidos, Monte St. Helens	3	810-8,000,000	25-68,000	Pierson (1985); Pierson (1986)
Outros dados de campo	22	6,000-70,000,000	15-48,000	Vários autores*
Calha USGS	1	10	2	Iverson & LaHusen (1993)
Fluxos Laboratório	26	0,005-0,02	0,00126-0,0102	Davies (1994)

\* 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).

A Tabela 4.2 apresenta uma série de equações propostas para cálculo da vazão de pico a partir do volume total do fluxo de detritos. (Rickenmann, 1999).

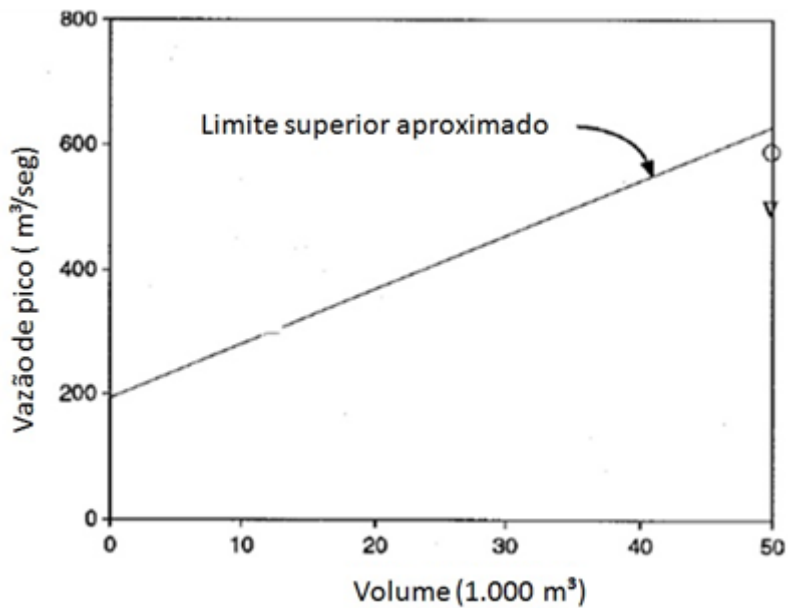
**Tabela 4.2: Fórmulas empíricas para estimar a vazão de pico em função do volume de fluxo de detritos.  $M_w$  representa o volume de água retido atrás da barragem e  $r^2$  representa o coeficiente de correlação estatístico da equação (Rickenmann, 1999)**

Base de Dados	Fórmula	Equação	N	$r^2$	Referência
Fluxos de detritos granulares (Japão)	$Q_p = 0.135M^{0.780}$	(4.14)	~50	nn	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
Fluxos de resíduos lamacentos (Japão)	$Q_p = 0.0188M^{0.790}$	(4.15)	~100	nn	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
Merapi vulcão (Indonésia)	$Q_p = 0.00558M^{0.831}$	(4.16)	~200	0.95	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
Sakurajima vulcão (Japão)	$Q_p = 0.00135M^{0.870}$	(4.17)	~100	0.81	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
Falhas de deslizamentos em barragens	$Q_p = 0.293M_w^{0.56}$	(4.18)	9	0.73	Costa (1988b)
Falhas em barragens glaciais	$Q_p = 0.0163M_w^{0.56}$	(4.19)	20	0.80	Costa (1988b)

As Eq. 4.16 e 4.17 da Tabela 4.2 estão associadas a fluxo de detritos vulcânico, logo composto por detritos mais fino. As Eq. 4.11 e 4.15 possuem claramente vazões de pico bem menores quando comparadas com equações referentes a fluxo de detritos granulares. Já as Eq. 4.18 e 4.19 estão associadas a ondas de fluxo que contém grande quantidade de água (Rickenmann, 1999).

Segundo Rickenmann (1999), no senso físico mais estrito de vazão de pico, dever-se-ia considerar o volume de água correspondente. Mas devido à dificuldade de se conhecer tal variável, abdica-se deste rigor e utiliza-se somente o volume total do fluxo de detritos para se estimar a vazão de pico.

Ainda na tentativa de correlacionar vazão de pico com volume total do fluxo de detritos Hungr *et al.* (1984) *apud* VanDine (1996) estabeleceu o gráfico apresentado na Figura 4. 16.



**Figura 4. 16: correlação vazão de pico e volume total do fluxo de detritos (VanDine, 1996)**

Segundo a experiência canadense a vazão de pico pode ser determinada através da vazão de projeto de uma bacia considerando um tempo de recorrência de 200 anos ( $Q_{200}$ ), baseando-se em observações em 22 rios ao longo da região de Howe Sound (Eq. 4.20, VanDine, 1996).

$$Q_p = 65\sqrt{Q_{200}} \quad (4.20)$$

Segundo a experiência chilena, a vazão de pico pode ser determinada através da equação abaixo (Araya Moya, 1994).

$$Q_p = 1,4 \frac{1}{(1-c)} 0,85 A_b I_1 \frac{H^{0,19}}{L^{0,58}} \quad (4.21)$$

Sendo:

$C$  - concentração dos sólidos no volume

$A_b$  - área da bacia ( $\text{km}^2$ )

$I_1$  - intensidade máxima média horária de chuva que antecede o fluxo de detritos

$H$  - máxima diferença de altura dentro na bacia

$L$  - comprimento total do rio

Massad *et al.*(1997) sugerem considerar  $I_l$  como a quantidade de chuvas que ocorreu durante 60 minutos que antecederam o fluxo de detritos.

Por fim, segundo a experiência japonesa, a vazão de pico pode também ser determinada através da equação abaixo (Takahashi, 2007).

$$Q_p = \frac{2}{(1-c)} f A_b I_{24} \quad (4.22)$$

Sendo:

$f$  - fator de runoff

$A_b$  - área da bacia

$I_{24}$ - intensidade da chuva em 24 h

### 4.2.3 Velocidade Média do Fluxo (v)

A determinação deste parâmetro é muito difícil, logo, a maior parte das abordagens para determinação da velocidade do fluxo são baseadas em dados empíricos obtidos em protótipos de fluxo em laboratório. (Rickenmann, 1999)

Rickenmann (1999) propôs uma fórmula que vem, segundo Massad *et al.* (1997), apresentando resultados razoáveis em retroanálises.

$$v = 1,3 \text{sen}^{0,2} \theta q_o^{0,6} \frac{g^{0,2}}{d_{50}^{0,4}} \quad (4.23)$$

Sendo:

$\theta$  - declividade do canal

$g$  - aceleração da gravidade;

$d_{50}$  - média dos tamanhos de grãos

$q_o$  - vazão específica, dada por:  $q_o = \frac{Q_o}{b}$

$Q_o$  - vazão de água da bacia para tempo de recorrência de 100 anos

$b$  - largura do canal

#### 4.2.4 Distância Total percorrida pelo Fluxo de Detritos (L)

A determinação da distância total percorrida pelo fluxo de detritos (L) é de vital importância para definição de mapas de áreas de risco. Segundo Iverson (1997), a distância percorrida é função do volume total do fluxo de detritos (M). O produto M por He pode ser considerado como sendo a energia potencial do movimento.

Rickenmann (1999), a partir de dados empíricos de fluxo de detritos e queda de blocos (Figura 4. 17) propôs a seguinte fórmula para cálculo da distância total percorrida:

$$L = 30(MH_e)^{1/4} \quad (4.24)$$

Onde:

L - distância total percorrida

M – volume total da massa do fluxo de detritos

He - diferença de cota entre o ponto de início do fluxo e o ponto mais baixo de deposição da massa

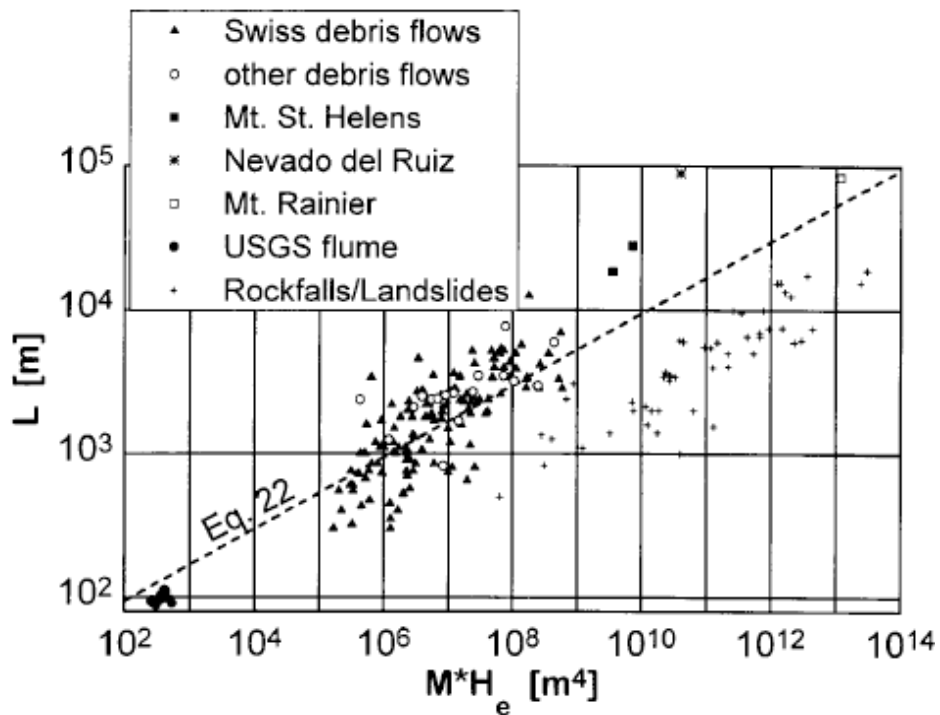


Figura 4. 17: Relação entre o produto M por He e L (Rickenmann, 1999)

#### 4.2.5 Força de impacto (F)

Segundo VanDine (1996), a força de impacto em barreiras rígidas resulta de dois tipos de solicitação: força devido ao choque da massa da frente do fluxo de detritos contra a estrutura e a força pontual devido ao choque de blocos rochosos contra a mesma estrutura.

De acordo com VanDine (1996), a força devido ao choque da massa pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$F = \frac{\gamma_0}{g} Av^2 \text{sen}\beta \quad (4.25)$$

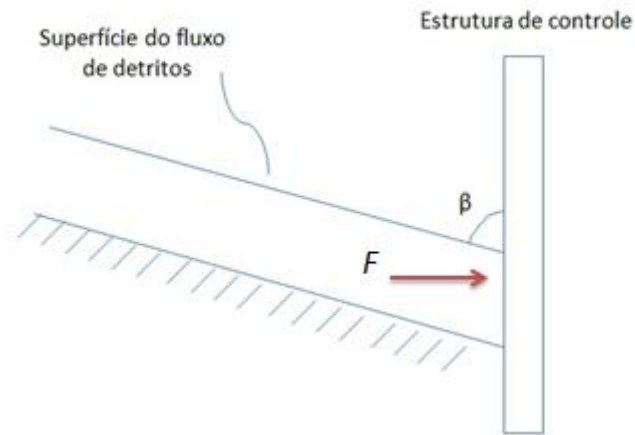
Sendo:

A - área da seção transversal do fluxo

$\gamma_0$  - peso específico da lama (detritos mais água)

$V$  - velocidade do fluxo

$\beta$  - ângulo entre a direção que se movimentava o centro de massa do fluxo e a face da estrutura de controle do evento, conforme Figura 4. 18.

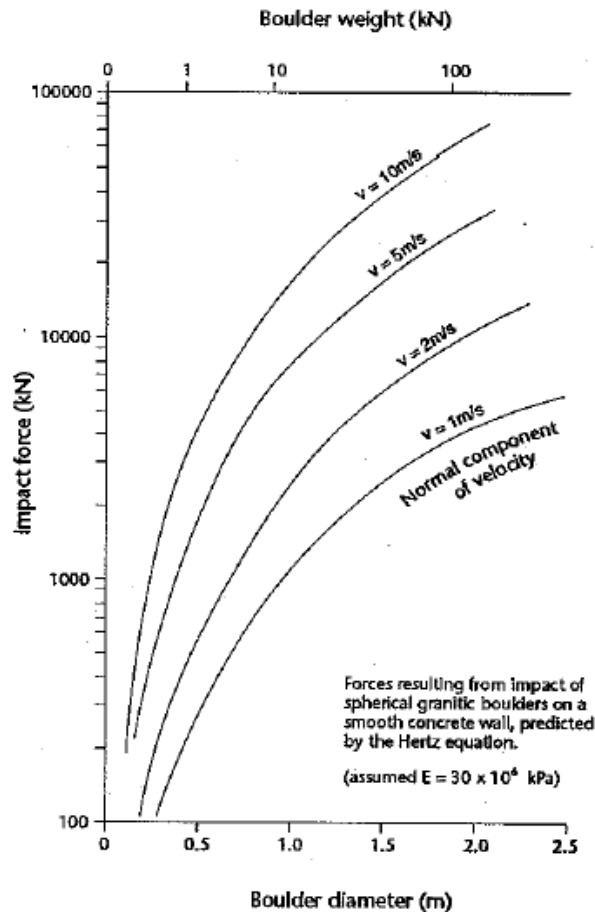


**Figura 4. 18: Esquema entre fluxo de detritos e estrutura de controle**

A Eq. 4.25, proposta por VanDine (1996), calcula a componente horizontal ( $F$ ) da força de impacto do fluxo de detritos contra a estrutura de controle, que atua na direção do fluxo.

No caso da força pontual localizada, VanDine (1996) apresenta um gráfico da força versus diâmetro de blocos que atingem a estrutura de controle do evento em diversas velocidades (Figura 4. 19), tendo sido considerado o impacto de pedregulhos esféricos graníticos contra uma parede de concreto.





**Figura 4. 19: Relação entre força de impacto e diâmetro dos blocos (VanDine, 1996).**

A partir de observações feitas na Califórnia por Hollingsworth e Kovacs (1981) *apud* VanDine (1996), foi determinado que a força devido ao choque da massa de detritos é aproximadamente  $20 \text{ kN/m}^3$ . Este valor reduz drasticamente quando se inicia a deposição dos detritos (Baldwin *et al.*, 1987 *apud* VanDine, 1996).

Para as barreiras flexíveis segundo a empresa Geobrugg (“Flexible ring net barriers for debris flow protection: The economic solution”), existem quatro situações relacionadas à força de impacto que ocorrem quando o fluxo de detritos atinge uma estrutura de controle flexível.

Situação 01: A primeira onda de impacto atinge a estrutura de controle do fluxo de detritos (Figura 4. 20). Nesta situação temos duas formas de solicitação, são elas:

- solicitação estática, representada pelo diagrama triangular atuando ao longo de toda profundidade do fluxo de detritos ( $h$ ). Pelo método de cálculo da empresa Geobrugg,

comprovado experimentalmente, como não há tempo para dissipação da poropressão o diagrama triangular consiste no diagrama hidrostático considerando um fluido com peso específico igual ao do fluxo de detritos (lama+água). O diagrama triangular é representado pela equação abaixo:

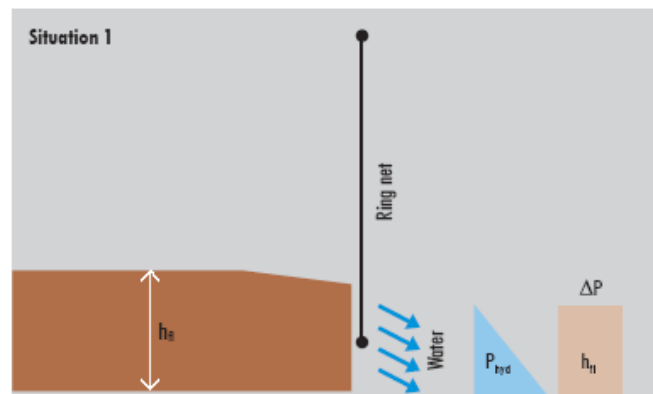
$$F_s = \frac{1}{2} \gamma_0 h^2 \quad (4.26)$$

- solicitação dinâmica, representada pelo diagrama retangular e atuando ao longo de toda profundidade do fluxo de detritos (h). O diagrama retangular é representado pela equação abaixo:

$$F_d = C_d \frac{\gamma_0}{g} v^2 h \quad (4.27)$$

Onde:

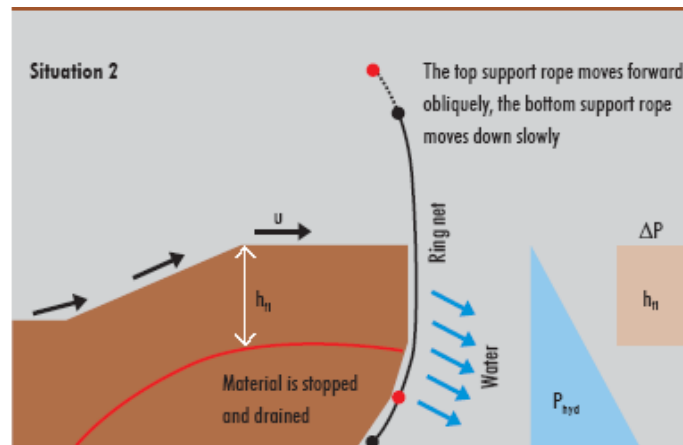
$C_d$  - coeficiente de impacto dinâmico. Para fluxos de detritos granulares é igual a 2 e para fluxo de detritos lamacento é igual a 0,7.



**Figura 4. 20: Situação 01 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobrug, 2012).**

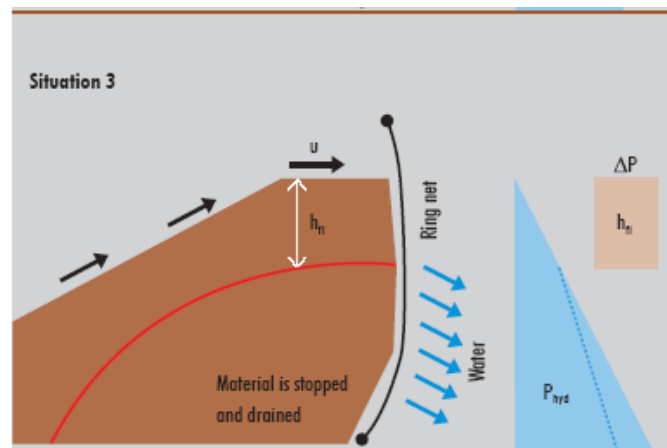
Situação 02: A segunda onda de impacto galga, com uma altura de h, o depósito formado pela primeira onda. Agora a pressão hidrostática atua em toda a altura de preenchimento da barreira, igual a 2\*h. No segundo impacto o carregamento dinâmico atua apenas na altura h de material que galgou o depósito proveniente da primeira onda. O carregamento extra do segundo impacto inicia o processo de drenagem do material do primeiro impacto. A rigor o diagrama hidrostático deveria sofrer uma redução, porém como a diferença é pequena (comprovado experimentalmente pela empresa Geobrug) e

de difícil avaliação o dimensionamento é realizado com a pior condição, hidrostático. Nesta situação o cabo de suporte superior se move para cima de forma oblíqua enquanto o cabo inferior se move lentamente para baixo (Figura 4. 21).



**Figura 4. 21: Situação 02 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobrugg, 2012)**

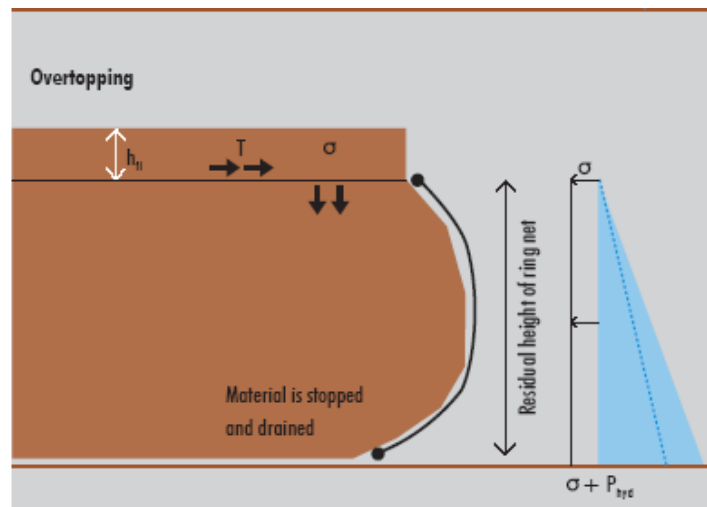
Situação 03: A sequência é idêntica à situação 02, a terceira onda galga o material já depositado. A pressão hidroestática atua em toda a altura de preenchimento da barreira enquanto a carga dinâmica atua apenas na altura do fluxo  $h$  da terceira onda (Figura 4. 22).



**Figura 4. 22: Situação 03 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobrugg, 2012)**

Situação 04: A próxima onda galga a estrutura de controle já completamente preenchida. Nenhuma pressão a mais é exercida na estrutura após enchimento total. O peso ( $\sigma$ ) e a tensão de cisalhamento provocada pelo material que galga a estrutura ( $\tau$ ) atuam no material retido. Logo, por se considerar que o material está saturado,

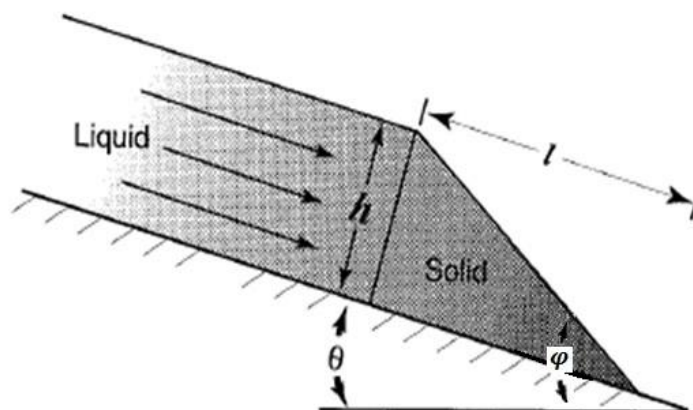
comportamento não drenado, a carga vertical ( $\sigma$ ) é igual a carga horizontal e atuará como uma componente adicional na pressão hidrostática ( $\sigma + P_{hyd}$ ) (Figura 4. 23).



**Figura 4. 23: Situação 04 de esforços atuando na estrutura de controle fluxo de detritos (Geobruigg, 2012).**

#### 4.2.6 Altura do fluxo de detritos (h)

Segundo Coleman, 1993, Whipple, 1994, Major, 1996 *apud* Iverson 1997 o movimento do fluxo de detritos pode ser analisado de forma simplificada, assumindo que a parte frontal do fluxo se movimenta como um corpo rígido sendo empurrada por uma massa liquefeita. A Figura 4.24 ilustra esta esquematização para uma seção transversal do fluxo de detritos.



**Figura 4.24: Seção transversal esquemática do modelo de corpo rígido para frente do fluxo de detritos (Iverson, 1997)**

A partir deste modelo pode-se chegar a uma equação para determinação da altura do fluxo de detritos. Para tal, deve ser feito o equilíbrio da tensão de cisalhante ( $\tau$ ) atuante na base da frente do fluxo de detritos, a tensão ( $\omega$ ) exercida pela massa liquefeita empurrando a frente do fluxo de detritos e a resistência ao deslizamento ( $\sigma \tan \varphi$ ), conforme equação abaixo:

$$\tau + \omega = \sigma \tan \varphi \quad (4.28)$$

Segundo Iverson (1997), a massa do material da frente do fluxo de detritos (Massa), a força cisalhante paralela a inclinação do canal ( $\tau$ ), a força normal devido a gravidade atuando na frente do fluxo de detritos ( $\sigma$ ) e a força exercida pela massa liquefeita (F) podem ser estimados a partir das equações abaixo, respectivamente:

$$Massa = \frac{1}{2} \rho_r l w \quad (4.29)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \rho_r g h l w \sin \theta \quad (4.30)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_r g h l w \cos \theta \quad (4.31)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho_b g h^2 w \cos \theta \quad (4.32)$$

Onde:

$\rho_r$  - massa específica do material da frente do fluxo de detritos

$\rho_b$  - massa específica da massa liquefeita

$l$  - comprimento da frente do fluxo de detritos

$w$  - largura do fluxo de detritos

$h$  - altura do fluxo de detritos

$l$  – comprimento da frente do fluxo de detritos, medido paralelo à inclinação do canal

$\varphi$  – ângulo de atrito das partículas

$\theta$  - inclinação do canal

A partir das Eq. 4.30 a 4.32 tem-se:

$$\frac{1}{2}\rho_h g h l w \operatorname{sen}\theta + \frac{1}{2}\rho_b g h^2 w \cos\theta = \frac{1}{2}\rho_h g h l w \cos\theta \operatorname{tg}\theta \quad (4.33)$$

Segundo Whipple (1994) *apud* Iverson (1997) a combinação dos termos a Eq. 4.33 pode ser reduzida a:

$$\frac{h}{l} = \frac{\rho_h}{\rho_b} (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\theta) \quad (4.34)$$

Segundo Iverson (1997) a massa específica da massa liquefeita pode ser considerada equivalente à massa específica da frente de onda, esta aproximação é razoável para fluxo de detritos, logo a Eq. 4.34 pode ser expressa como:

$$\frac{h}{l} \approx \operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\theta \quad (4.35)$$

A análise do movimento da frente do fluxo de detritos como sendo um movimento de corpo rígido deve ser feita com cuidado, pois ignora diversos fatores, por exemplo: alteração na forma do fluxo de detritos com o tempo, efeitos diversos que ocorram nas direções não consideradas nesta análise unidimensional, etc. Desta forma para uma análise mais realista do problema o estado da arte atual aplica modelos hidráulicos que consideram a teoria das misturas. Esta abordagem não será apresentada no presente trabalho.

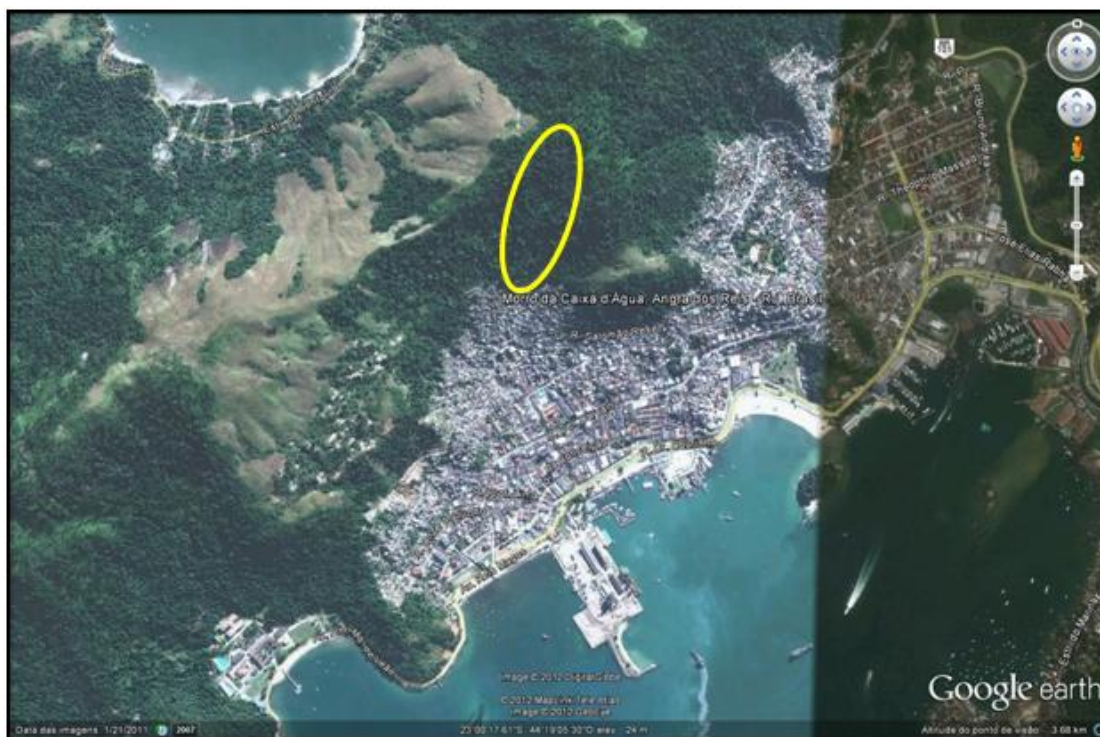
Pode-se calcular a altura do fluxo de detritos a partir do valor conhecida a vazão de pico, velocidade do fluxo e largura do canal, conforme Eq. 4.36.

$$h = \frac{Q_p}{vb} \quad (4.36)$$

## 5. Descrição da área estudada

O município de Angra dos Reis é reconhecidamente um dos atrativos turísticos do Estado do Rio de Janeiro e possui no turismo importante vocação econômica, impulsionado principalmente por seus elementos naturais. Localiza-se no setor sul do Estado do Rio de Janeiro em uma área mais conhecida como ‘Costa Verde’. O município possui diversas encostas e alto índice pluviométrico, por esses fatos, sofre constantemente com deslizamentos. Em 2010 ocorreu um dos mais graves eventos que trouxe diversos prejuízos ao município, pois prejudicou bastante o turismo na região naquele ano e no seguinte. De acordo com o censo do ano de 2012, aproximadamente 36% da população de Angra vive em favelas, construídas em morros ou áreas de mangue, estando as primeiras bastante vulneráveis a esse tipo de desastre.

As Figura 5. 1 e Figura 5. 2, apresentam a demarcação da região estudada no município de Angra dos Reis, mais especificamente no morro da caixa d’água.

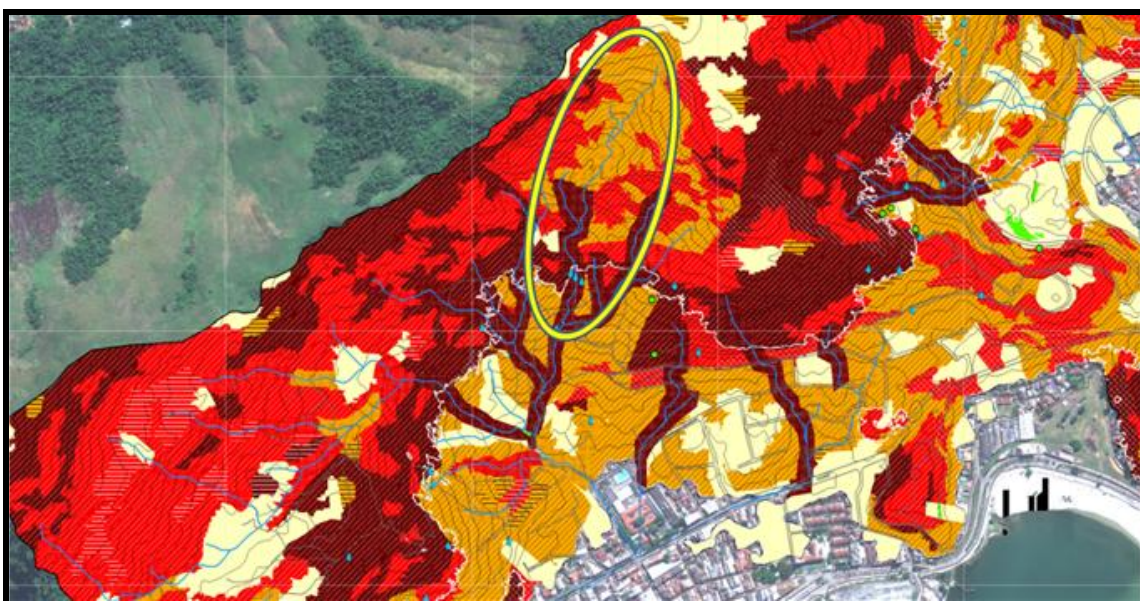


**Figura 5. 1: Área de estudo (imagem de satélite, 2013)**



**Figura 5. 2: Área de estudo com demarcação do canal de drenagem (COPPE-UFRJ, 2010)**

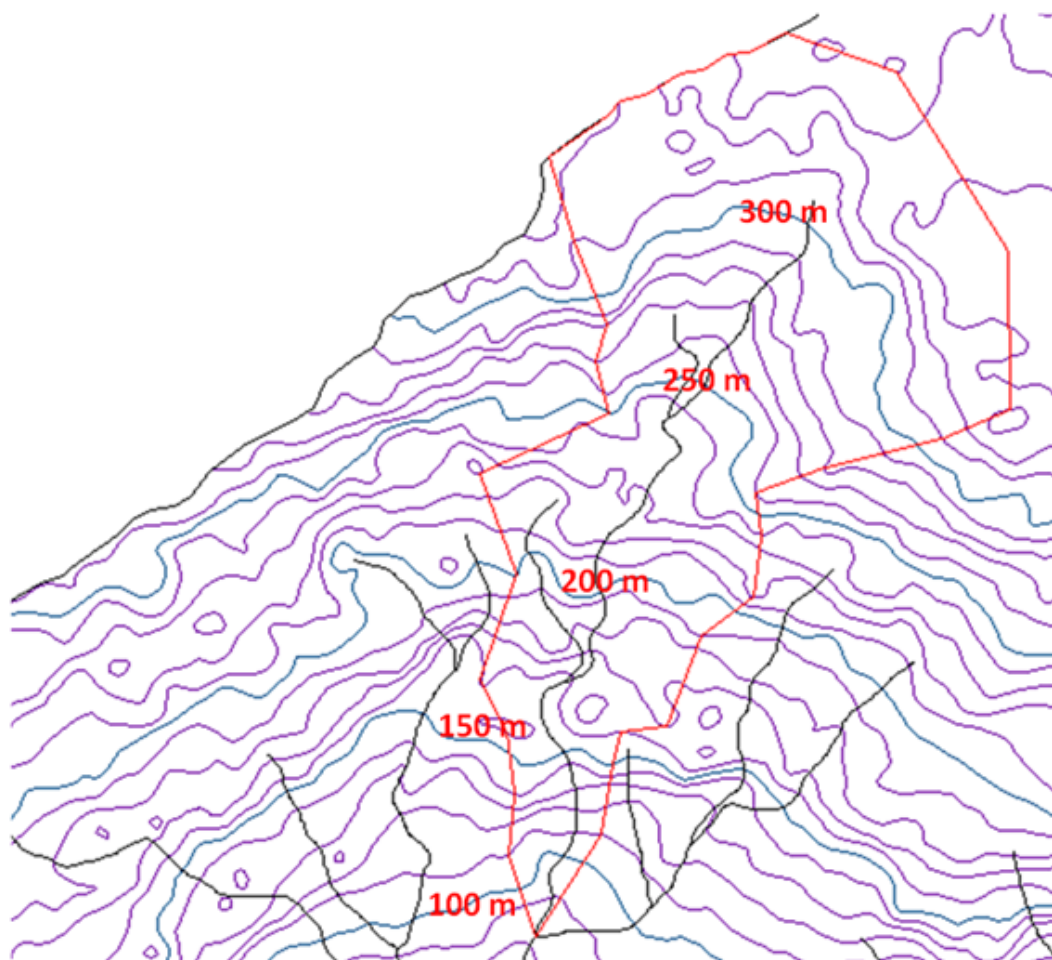
A região do Morro da Caixa D'Água é uma área de alta suscetibilidade a ocorrência de fluxo de detritos, conforme pode ser visto no mapa de suscetibilidade da Figura 5. 3 (COPPE – UFRJ, 2010). Na legenda do mapa, a cor vermelha escura que se encontra ao redor da maior parte da extensão do canal de drenagem da área em estudo significa suscetibilidade a fluxo de detritos muito alta. O amarelo que ocupa o restante da extensão do canal representa suscetibilidade média.



**Figura 5. 3: Mapa de Suscetibilidade de Angra dos Reis (COPPE-UFRJ, 2010)**

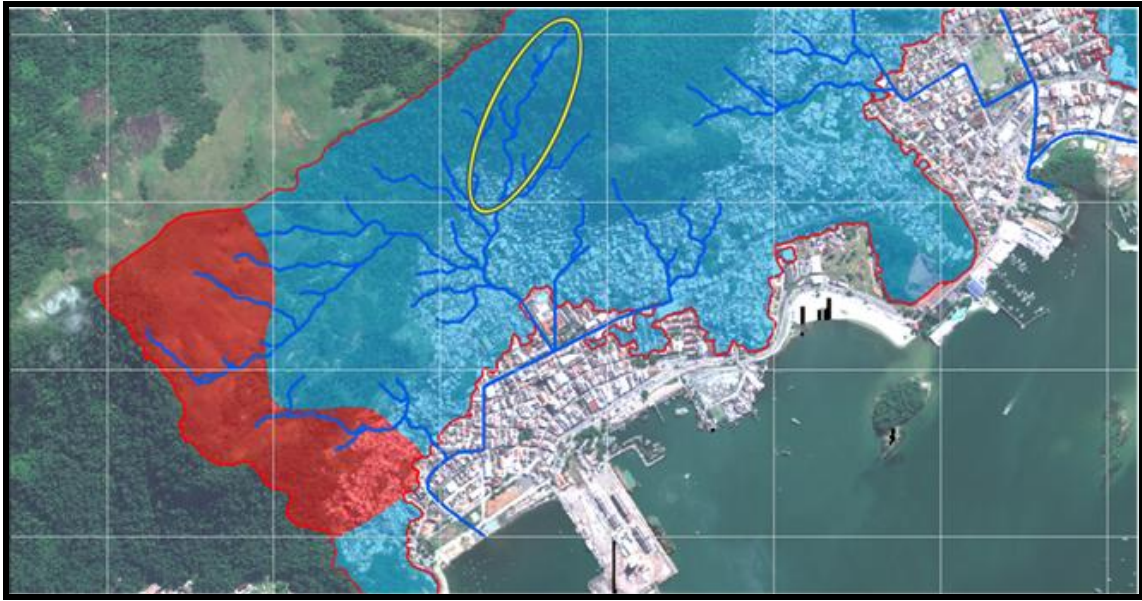


A Figura 5. 4 apresenta a topografia da área estudada e a delimitação (vermelho) da bacia determinada.



**Figura 5. 4: Topografia da área de estudo (COPPE-UFRJ, 2010)**

A partir do mapa geológico da região (Figura 5. 5), COPPE-UFRJ (2010), se visualiza que a região em estudo apresenta a sua litologia composta pelo ortognaisse (cor azul). O Ortognaisse se trata de uma rocha metamórfica.



**Figura 5. 5: Mapa geológico da região (COPPE-UFRJ, 2010)**

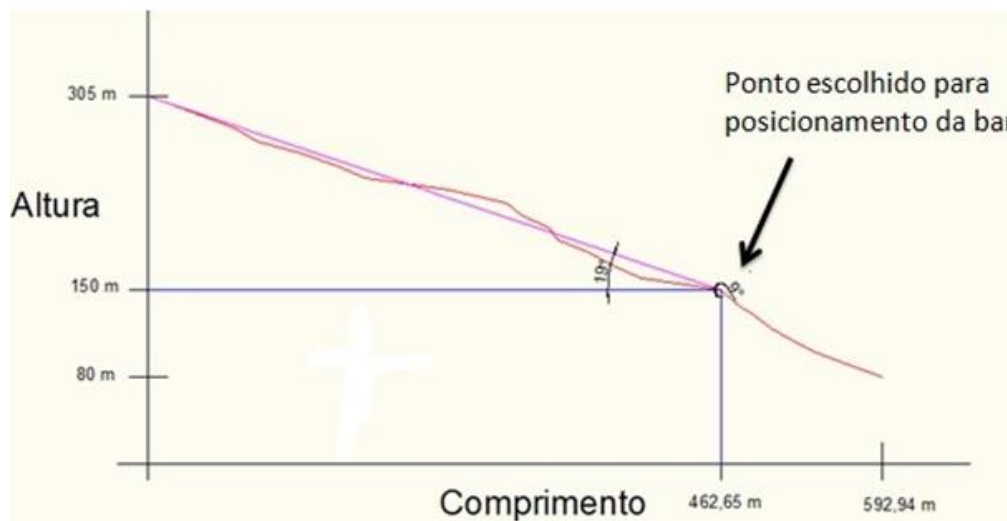
## 6. Dimensionamento de barreira flexível para controle de fluxo de detritos

### 6.1 Dados de entrada

Para estimar os parâmetros de um possível fluxo de detritos que ocorra na área estudada (item 4.2), deve-se primeiramente estabelecer os valores dos dados de entrada.

Para tal o primeiro passo é definir a localização da barreira dentro da bacia escolhida. Foi utilizada a topografia disponível para se definir o perfil topográfico do canal de drenagem principal onde será posicionada a barreira (Figura 6.1). A partir do perfil se escolheu o ponto indicado na Figura 6.1, de forma a atender as duas premissas básicas, ou seja, região a montante das edificações existentes e de baixa declividade.

A declividade média do canal de drenagem é de  $19^\circ$  (ou 34%) e na região imediatamente a montante da barreira é de  $9^\circ$  (ou 16%).



**Figura 6.1: Perfil topográfico do canal de drenagem**

A seguir são definidos valores para os demais dados de entrada que serão utilizados no presente trabalho.

$\gamma_0 = 15,7 \text{ kN/m}^3$  - foi adotado este valor por ser o valor aceito pelo software DEBFLOW que mais se aproxima do trabalho de Massad *et al* (1997) para o caso da Serra do Mar em Cubatão. Ressalta-se, entretanto, que o peso específico da lama do

fluxo de detritos para o caso de Cubatão ( $Y_0 = 12,0 \text{ kN/m}^3$ ) é ainda significativamente menor que o adotado.

$$\varphi = 30^\circ$$

$C = 0,42$ , valor médio entre 0,3 e 0,54, conforme orientação de Takahashi (2007)

H (elevação da bacia) = 225 metros, conforme topografia da região

L (comprimento do rio) = 634,20 metros, conforme topografia da região

b (largura do canal) = 4,00 m, conforme topografia da região

$d_{50} = 10 \text{ mm}$ , conforme trabalho de Massad *et al* (1997) para Serra do Mar, Cubatão

Foi considerado o coeficiente de runoff para o grupo de floresta com declividade maior do que 10%, que segundo a Rio águas (2010) deve estar entre 0,45 a 0,5. Será adotado  $f = 0,48$ .

No caso do  $I_1$  será adotada a fórmula 6.1, proposta por Festi (2007) para o  $i$  Max do município de Angra dos reis:

$$I_1 = i_{m\acute{a}x} = \frac{721,802 T_r^{0,211}}{(t+10,566)^{0,720}} \quad (6.1)$$

Onde:

$T_r$  = tempo de recorrência. Adotou-se um tempo de 100 anos.

$t$  = tempo de duração da chuva. Adotou-se um tempo de uma hora.

Assim será adotado o valor de  $I_1$  igual a:

$$I_1 = 89,00 \text{ mm/h}$$

Para determinação do  $Q_0$  (vazão de projeto da bacia para o tempo de recorrência de 100 anos) será utilizada a seguinte fórmula:

$$Q_0 = I_1 A_b f \quad (6.2)$$

A bacia de contribuição indicada na Figura 5. 4 apresenta uma área total de  $A_b = 111.997 \text{ m}^2$ .

Pela Eq. 6.2, tem-se:

$$Q_0 = 1,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para o cálculo de  $Q_{200}$  (vazão de projeto da bacia para o tempo de recorrência de 200 anos) foi considerado o  $I_1$  para o tempo de recorrência de 200 anos, obtendo-se:

$$Q_{200} = 1,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

## **6.2 Parâmetros para dimensionamento a partir de recomendações propostas pela literatura**

No presente item serão utilizados os procedimentos de cálculo apresentados no item 4.2 e os dados de entrada expostos no item 6.1.

### **6.2.1 Parâmetros para caracterização do fluxo de detritos**

#### **A) Volume total de detritos (M)**

O volume total de detritos foi determinado segundo VanDine (1996), a experiência japonesa e Massad *et al* (1997), conforme exposto abaixo:

- VanDine (1996):

Aplicando-se a Eq. 4.1, sabendo que a área da bacia é de  $0,112 \text{ km}^2$ , tem-se:

$$M = 1.120 \text{ m}^3$$

- Experiência japonesa:

Aplicando-se a Eq. 4.7, proposta a partir da experiência japonesa e para uma área da bacia de  $0,112 \text{ km}^2$ , tem-se:

$$M_s = 0,112 (30.000 \text{ a } 85.000)m^3$$

$$M_s = 3.360 \text{ a } 9.520 m^3$$

Considerando a concentração de sólidos igual a 0,42, conforme proposto por Takahashi (2007), aplica-se a Eq. 4.2, resultando em:

$$M = 0,42 (3.360 \text{ a } 9.520)$$

$$M = 1.411 \text{ a } 3.998 m^3$$

Será adotado um valor intermediário entre 1.411,20 m<sup>3</sup> e 3.998,40 m<sup>3</sup> igual a:

$$M = 2.704 m^3$$

Segundo a experiência japonesa o volume total de detritos pode ser também estimado a partir do volume de água escoada superficialmente em 24 h ( $M_a$ ) e da concentração de sólidos ( $C$ ), a partir das Eq. 4.3 e 4.6, conforme abaixo.

O  $M_a$  é definido segundo a Eq. 4.6. Deve-se conhecer o  $I_{24}$  (índice pluviométrico acumulado nas 24 horas anteriores ao fluxo de detritos). Não foi possível neste trabalho obter dados para estimar o  $I_{24}$  para Angra dos Reis. Adotou-se o  $I_{24}$  registrado para o caso do fluxo de detritos em Cubatão igual a 250 mm (Massad *et al.*, 1997).

$$M_a = 0,112 \cdot 0,25 \cdot 0,48$$

$$M_a = 13.439,64 m^3$$

Aplicando-se agora a Eq. 4.3 tem-se:

$$M = \frac{13.439,64}{(1 - 0,42)}$$

$$M = 23.171,79 m^3$$

- Massad *et al.* (1997):

Segundo Massad *et al.* (1997) pode-se determinar o volume total do fluxo de detritos aplicando as Eq. 4.3 e 4.9 para uma área da bacia de 0,112 Km<sup>2</sup>. Dessa forma se determina o volume de água (Eq. 4.9):

$$M_a = 111.997,0089$$

$$M_a = 9.967,73 \text{ m}^3$$

A partir do volume de água se determina o volume total de detritos (Eq. 4.3):

$$M = \frac{9.967,73}{(1 - 0,42)}$$

$$M = 17.185,74 \text{ m}^3$$

Resumindo, a Tabela 6.1 apresenta os resultados do volume de detritos em estudo segundo os métodos citados acima.

**Tabela 6.1: Valores estimados de volume**

Método	Volume (m <sup>3</sup> )	Referência
Relação empírica dependente da área da bacia	1.120,00	VanDine, 1996
Relação empírica dependente da área da bacia e concentração de sólidos	2.704,80	Experiência japonesa
Relação dependente do volume de água escoada superficialmente em 24 h e concentração de sólidos	23.171,79	Experiência japonesa
Relação dependente do volume de água escoada superficialmente na hora que antecede o evento e concentração de sólidos	17.185,74	Massad <i>et al.</i> (1997)

### B) Vazão de pico fluxo de detritos (Q<sub>p</sub>)

A Tabela 6.2 apresenta valores estimados para vazão de pico do fluxo de detritos em estudo a partir de relações empíricas (item 4.2.2) que relacionam vazão de pico e volume.

Tabela 6.2: Valores estimados para vazão de pico do fluxo de detritos

Referência	Nº Equação	Volume (m³)	Vazão de pico ( m³/s)
Rickenmann, 1999	Eq. 4.11	1.120,00	34,67
		2.704,80	72,27
		23.171,79	432,53
		17.185,74	337,21
Mizuyama <i>et al.</i> (1992)	Eq. 4.14	1.120,00	32,26
		2.704,80	64,18
		23.171,79	342,77
		17.185,74	271,50
Vandine, 1996	Fig. 4.16	1.120,00	200,00
		2.704,80	203,00
		23.171,79	380,00
		17.185,74	360,00

Pode-se também utilizar relações empíricas para estimar a vazão de pico que não dependem do volume do fluxo de detritos, conforme Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Valores estimados para vazão de pico do fluxo de detritos

Referência	Nº Equação	Vazão de pico (m³/s)
VanDine, 1996	Eq. 4.20	80,66
Araya moya, 1994	Eq. 4.21	23,51
Takahashi, 2007	Eq. 4.22	46,34

### C ) Velocidade média do fluxo

Será utilizada apenas a relação empírica proposta por Rickenmann (1999) (Eq.4.23), por ser a relação que apresenta os melhores resultados em retroanálises, segundo Massad *et al.* (1997).

Assim, a partir da Eq. 4.23 e considerando:

$$\theta = 19^\circ$$

$$q_0 = \frac{Q_0}{b} = \frac{1,33}{4,0} = 0,3325$$



$$d_{50} = 10 \text{ mm}$$

O valor estimado para a velocidade média do fluxo de detritos é de 5,29 m/s.

#### **D ) Distância percorrida pelo fluxo de detritos**

Foi utilizada a relação empírica expressa pela Eq. 4.24, proposta por Rickenmann (1999) para estimar a distância total percorrida de acordo com os volumes estimados anteriormente. Os resultados estão apresentados na tabela 6.4.

**Tabela 6.4: Valores estimado da distância total percorrida pelo fluxo de detritos**

<b>Referência</b>	<b>Nº Equação</b>	<b>Volume (m³)</b>	<b>Distância total percorrida (m)</b>
Rickenmann, 1999	Eq. 4.24	1.120,00	700,22
		2.704,80	872,90
		23.171,79	1.493,39
		17.185,74	1.385,88

Verificou-se que as edificações situadas nas cotas mais elevadas do canal de drenagem localizam-se a 469 metros do divisor de águas. Por tanto, as edificações seriam atingidas segundo todas as estimativas.

#### **E ) Altura do fluxo de detritos**

A altura do fluxo de detritos pode ser estimada a partir de uma relação física entre a vazão de pico, velocidade do fluxo e largura do canal, conforme Eq. 4.36. A Tabela 6.5 resume todos os valores possíveis para altura do fluxo de detritos a partir dos valores encontrados de vazão de pico e  $b = 4,00$  metros.

**Tabela 6.5: Valores estimados de altura do fluxo de detritos**

Referência	Nº Equação	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Altura do fluxo (m)
Relação física	Eq. 4.36	34,67	1,64
		72,27	3,42
		432,53	20,44
		337,21	15,94
		32,26	1,52
		64,18	3,03
		342,77	16,20
		271,50	12,83
		200,00	9,45
		203,00	9,59
		380,00	17,96
		360,00	17,01
		80,66	3,81
		23,51	1,11
		46,34	2,19

Pode-se também estimar a altura do fluxo de detritos pela Eq. 4.35, segundo Iverson (1997). Porém para tal deve-se conhecer o valor do comprimento da onda do fluxo de detritos,  $l$ . Takahashi (2007) sugere que  $l$  varia de 3 a 5 m, logo será adotado um valor intermediário igual a 4 m. Dessa forma pode-se estimar o valor da altura do fluxo de detritos igual a 1,68 m.

#### **F) Força de impacto**

Inicialmente será estimada a força de impacto em estruturas rígidas de controle de fluxo de detritos, sendo que a mesma se divide em força de impacto devido ao choque da massa do fluxo de detritos e força de impacto pontual devido ao choque dos blocos maiores contra a estrutura de controle.

Para se estimar a força de impacto devido o choque da massa será utilizada a Eq. 4.25 proposta por VanDine (1996). Nesta equação deve-se conhecer o valor do ângulo ( $\beta$ ) entre a superfície da massa de lama e a superfície vertical da estrutura de controle. Considera-se que a superfície da massa de lama do fluxo de detritos se desloca paralela

ao fundo do canal. Logo na região onde se situa a estrutura de controle a inclinação da superfície da lama é de  $9^\circ$ . Assim o valor de  $\beta$  será  $81^\circ$ .

A partir das afirmações anteriores pode-se estimar os diversos valores possíveis para força de impacto devido o choque da massa para cada área do fluxo de detritos, conforme Tabela 6.6.

**Tabela 6.6: valores estimados para força de impacto devido choque da massa do fluxo de detritos**

Referência	Nº Equação	Área do fluxo (m <sup>2</sup> )	Força de impacto (kN)
VanDine, 1996	4.25	6,55	289,94
		13,66	604,33
		81,76	3.616,73
		63,74	2.819,68
		6,10	269,79
		12,13	536,67
		64,80	2.866,21
		51,32	2.270,23
		37,81	1.672,38
		38,37	1.697,47
		71,83	3.177,52
		68,05	3.010,28
		15,25	674,47
		4,44	196,59
		8,76	387,49
6,72	297,26		

Para o cálculo da força de impacto pontual devido o choque de blocos maiores contra a estrutura de controle será utilizado o gráfico proposto por VanDine, 1996, Fig. 4.19, onde são considerados blocos de 1,00 m de diâmetro de chocando contra a estrutura. A partir destas considerações encontra-se o valor de 900 kN.

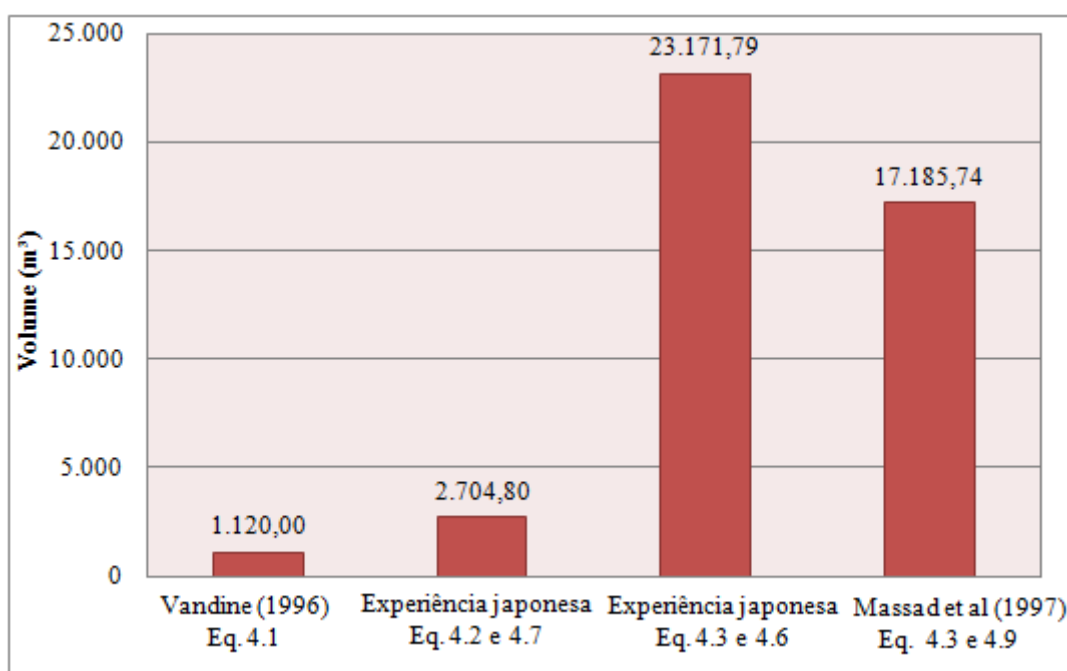
### 6.2.2 Discussão dos parâmetros estimados

Após estimativa dos principais parâmetros de projeto para caracterização do fluxo de detritos percebe-se que há uma grande variação entre os resultados encontrados. Este fato decorre da utilização de relações empíricas elaboradas para

fluxos de detritos por diferentes autores, baseando-se em registros observados em diferentes regiões no mundo.

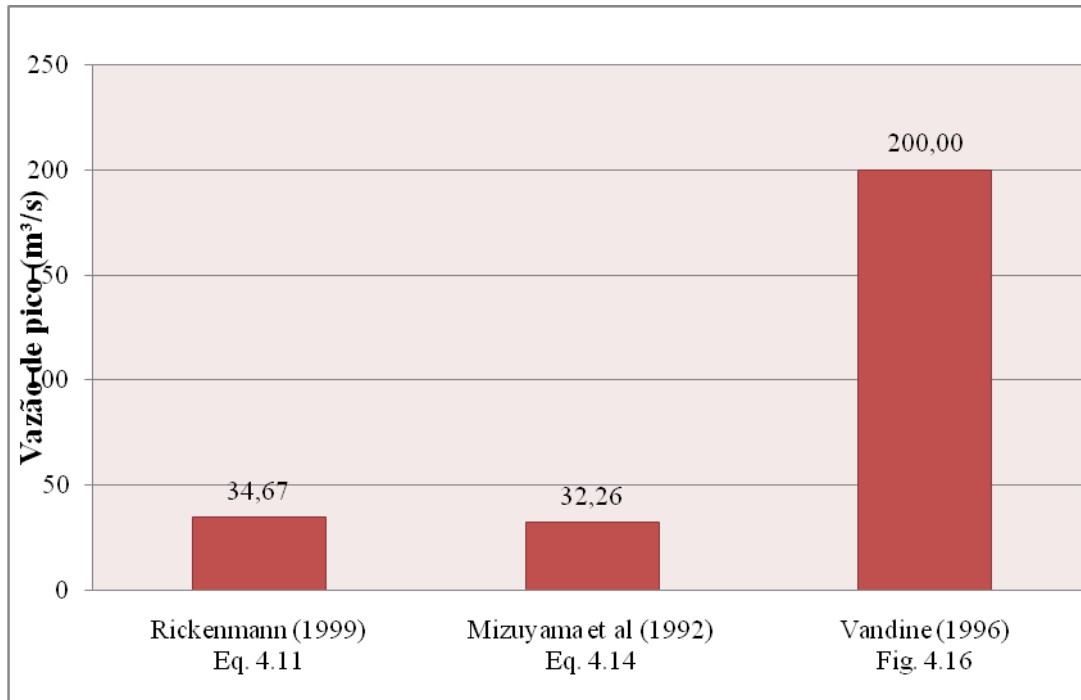
Para uma melhor apreciação das grandes variações constatadas nas estimativas dos parâmetros do fluxo de detritos, os resultados encontrados são mostrados na forma de histograma.

A Figura 6. 2 apresenta o histograma para as estimativas de volume total do fluxo de detritos encontrados no item 6.2. Observa-se uma grande variação entre as estimativas do volume total do fluxo de detritos, sendo o maior valor igual a 20,7 vezes a menor estimativa.

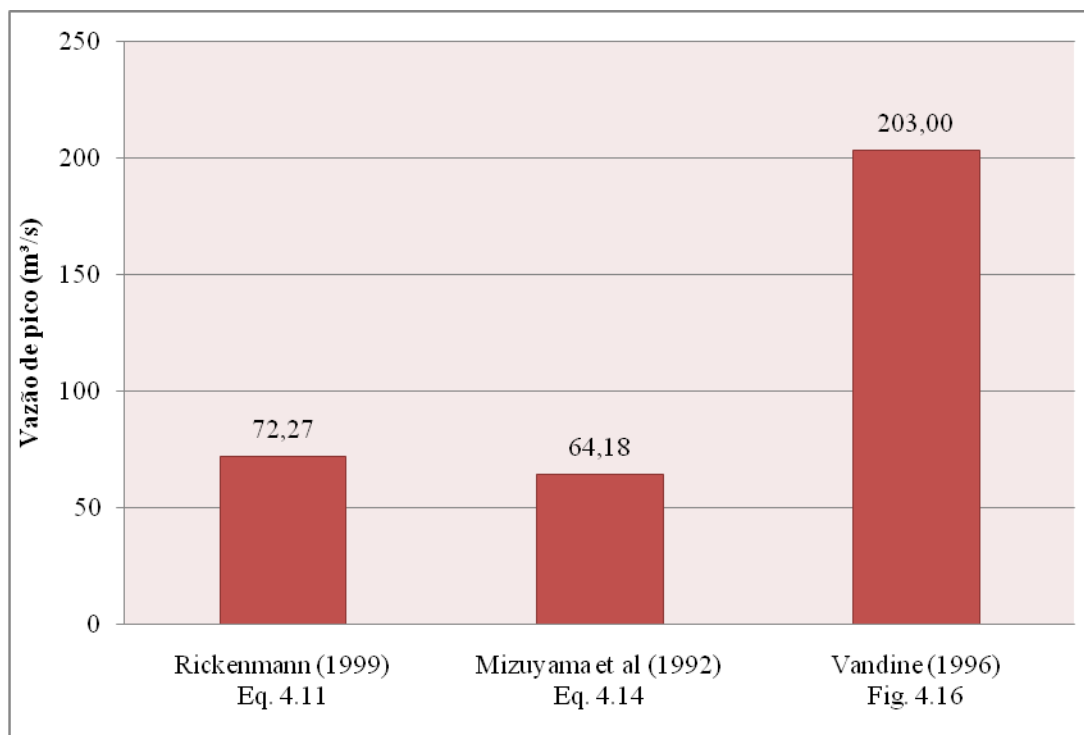


**Figura 6. 2: Variação da estimativa de volume total de detritos**

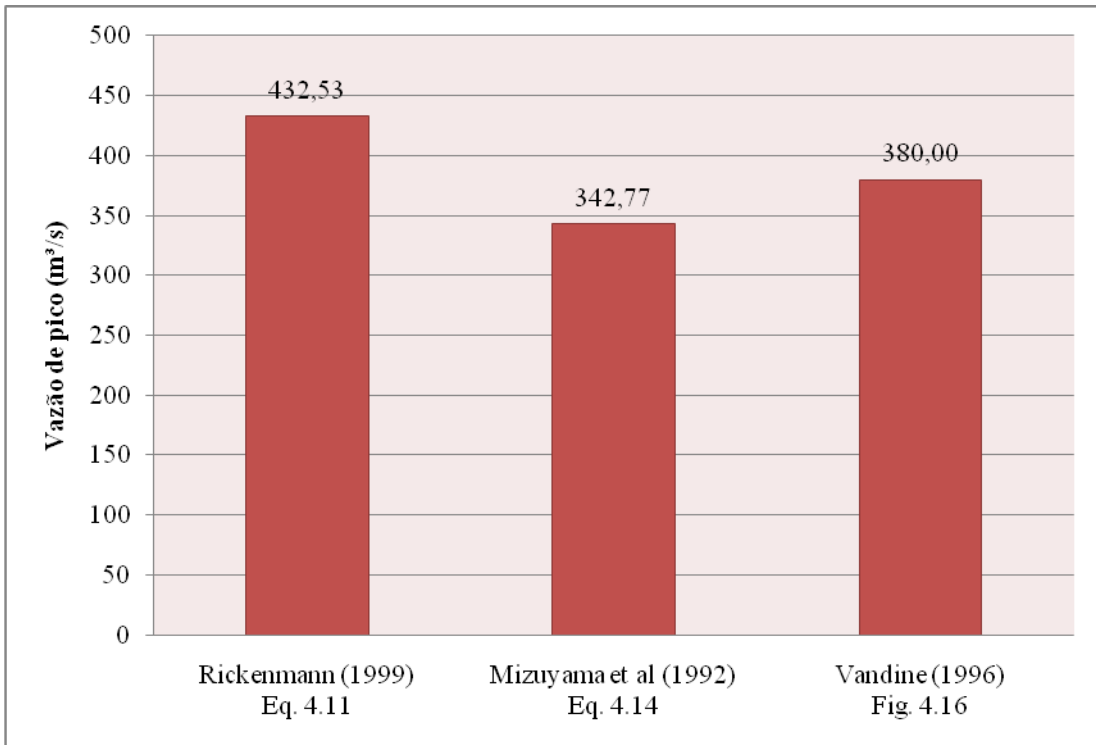
Para a vazão de pico são apresentados cinco histogramas possíveis, sendo o primeiro para vazões de pico encontradas a partir do volume de 1.120 m<sup>3</sup> (Figura 6. 3), o segundo para o volume de 2.704,80 m<sup>3</sup> (Figura 6. 4), o terceiro para o volume de 23.171,79 m<sup>3</sup> (Figura 6. 5), o quarto para o volume de 17.185,74 m<sup>3</sup> (Figura 6. 6) e o quinto histograma apresenta os valores de vazão de pico que não dependem do volume total de detritos encontrado (Figura 6. 7).



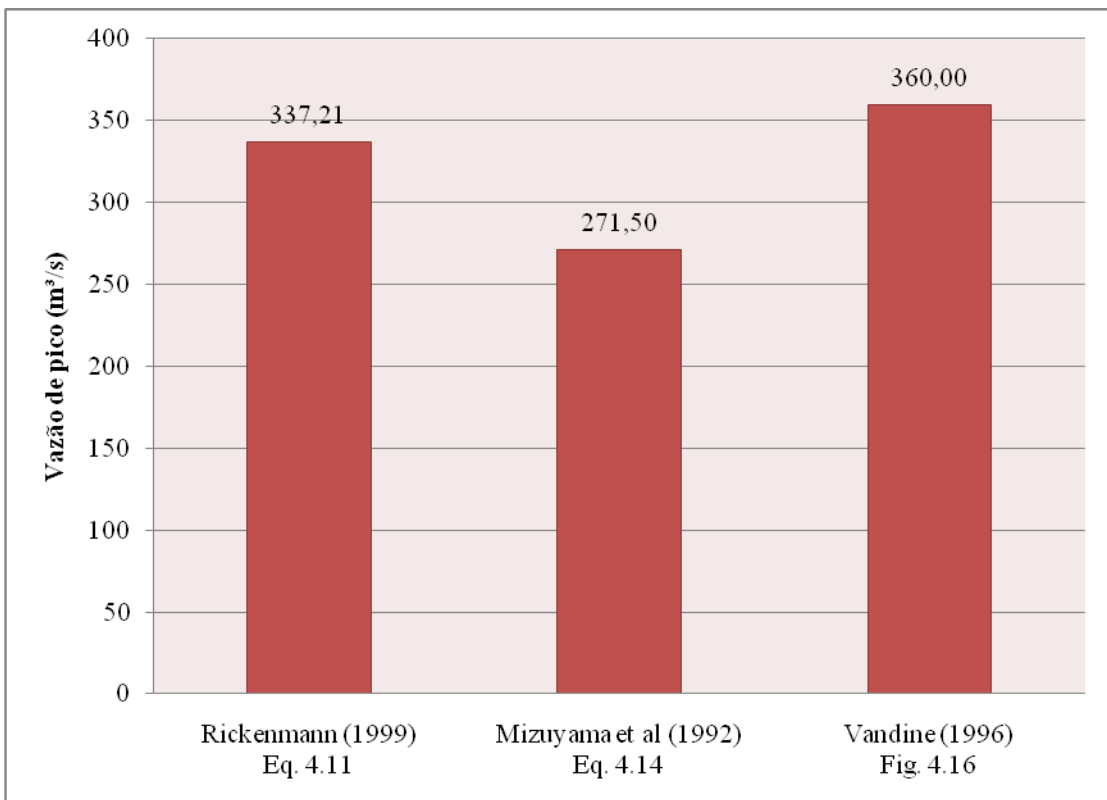
**Figura 6. 3: Variação da estimativa da vazão de pico de fluxo de detritos para o volume estimado de 1.120 m³**



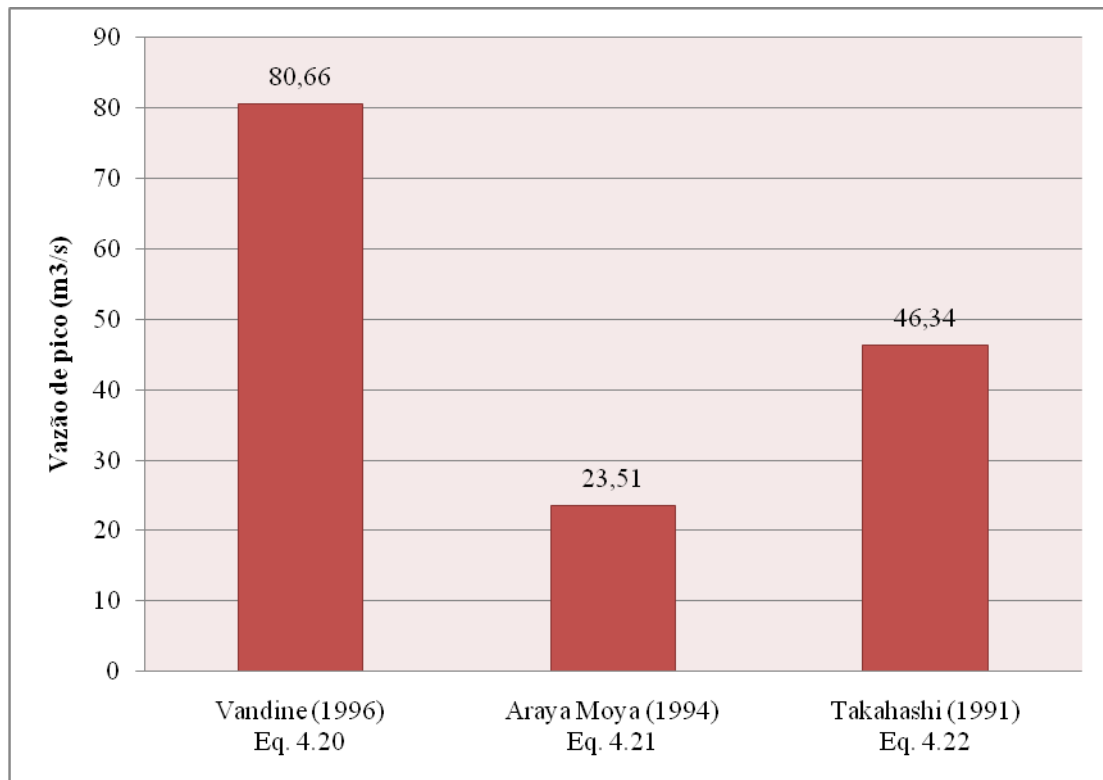
**Figura 6. 4: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 2.704,80 m³**



**Figura 6. 5: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 23.171,79 m³**

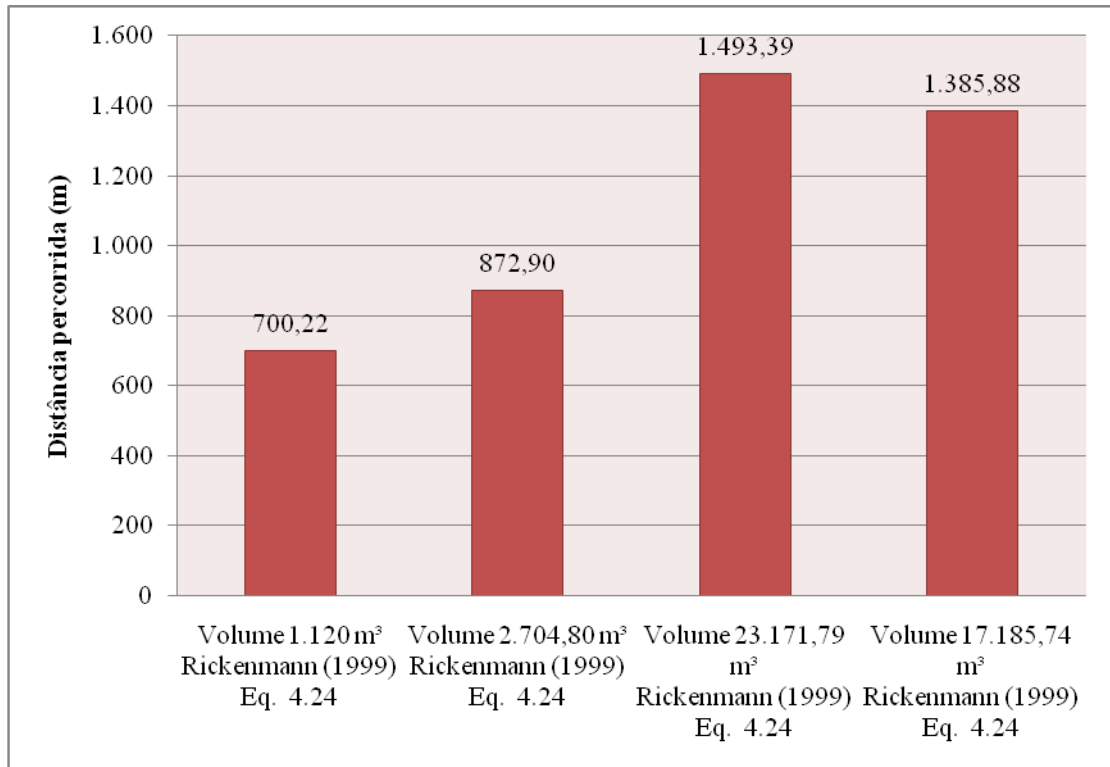


**Figura 6. 6: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para volume estimado de 17.185,74 m³**



**Figura 6. 7: Variação da estimativa da vazão de pico do fluxo de detritos para relações empíricas que não dependem do volume total de detritos**

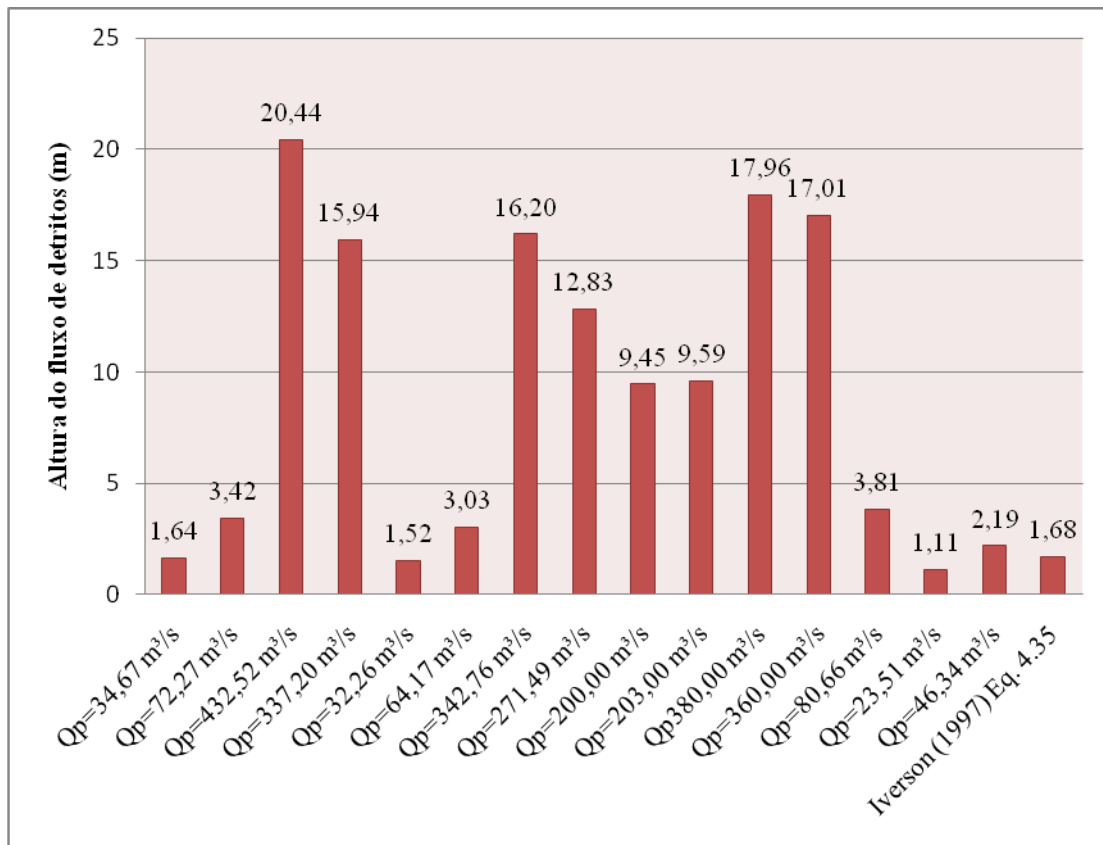
No caso da distância total percorrida pelo fluxo de detritos são apresentados na Figura 6. 8 os valores encontrados para este parâmetro a partir dos volumes totais de detritos.



**Figura 6. 8: Variação da estimativa da distância total percorrida de acordo com volume total de detritos**

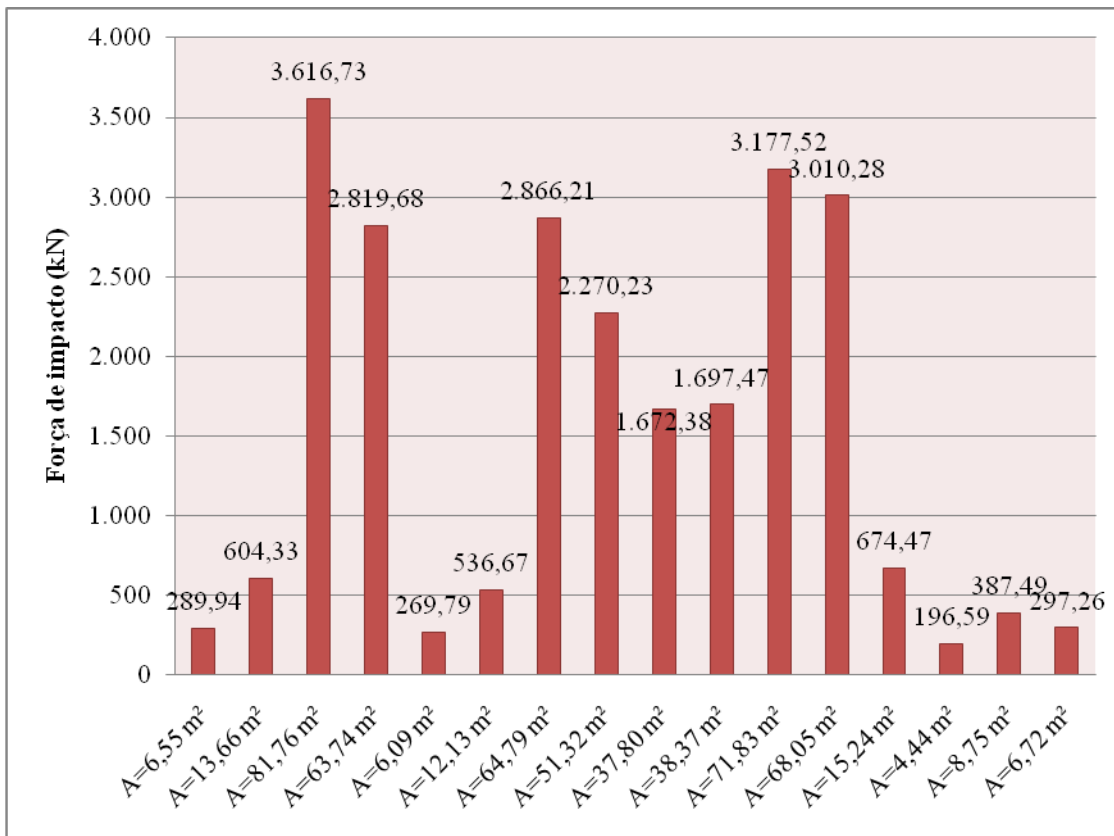
A Figura 6. 9 apresenta a variação dos resultados da altura do fluxo de detritos a partir da Eq. 4.36 (relação física entre vazão, velocidade e área da seção transversal) e da Eq. 4.35 (Iverson, 1997).





**Figura 6. 9: Variação da estimativa da altura do fluxo de detritos**

A Figura 6. 10 apresenta a variação da força de impacto do fluxo de detritos contra a barreira flexível de acordo com a área da seção transversal do fluxo de detritos (Eq. 4.25).



**Figura 6. 10: Variação da estimativa da força de impacto**

No presente trabalho, propõe-se estimar o volume total de detritos - a partir do qual são calculados os demais parâmetros – por uma alteração nas formulações baseadas no volume de chuva que precipita na área da bacia considerada. A experiência japonesa (Eq. 4.3 e Eq. 4.6) propõe considerar o índice pluviométrico acumulado em 24 horas ( $I_{24}$ ) e o coeficiente de run-off de acordo com as características da superfície da área. Massad *et al* (1997) (Eq. 4.3 e Eq. 4.9) considera o índice pluviométrico máximo acumulado em 1 hora ( $I_1$ ) nas 24 horas que antecedem o evento e o coeficiente de run-off igual a 1. A alteração proposta neste trabalho é considerar  $I_1$  e o coeficiente de run-off definido de acordo com as características da superfície do terreno. Desta forma tem-se:

$$M_a = A_b I_1 f \quad (6.3)$$

$$M = \frac{M_a}{(1-c)} \quad (6.4)$$

Para o caso estudado tem-se:

$$M_a = 4.784,51 \text{ m}^3$$

$$M = 8.249,16 \text{ m}^3$$

A partir do volume total de detritos encontrado estimam-se os demais parâmetros, resumidos nas tabelas Tabela 6.7 a Tabela 6.10.

**Tabela 6.7: Valores de vazão de pico**

Referência	Nº Equação	Volume (m <sup>3</sup> )	Vazão de pico ( m <sup>3</sup> /s)
Rickenmann, 1999	Eq. 4.11	8.249,16	182,97
Mizuyama <i>et al.</i> , 1992	Eq. 4.14	8.249,16	153,16
VanDine,1996	Fig. 4.16	8.249,16	280,00

**Tabela 6.8: Valores de distância total percorrida**

Referência	Nº Equação	Volume (m <sup>3</sup> )	Distância total percorrida (m)
Rickenmann, 1999	Eq. 4.24	8.249,16	1.153,55

**Tabela 6.9: Altura do fluxo**

Referência	Nº Equação	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Altura do fluxo (m)
Relação física	Eq. 4.36	182,97	8,65
		153,16	7,24
		280,00	13,23

**Tabela 6.10: Força de impacto**

Referência	Nº Equação	Área do fluxo (m)	Força de impacto (kN)
VanDine,1996	Eq. 4.25	34,59	1.529,94
		28,95	1.280,67
		52,93	2.341,33

### **6.3 Dimensionamento da barreira flexível através do DEBFLOW**

Para realizar a análise numérica do caso em questão foi utilizado o programa DEBFLOW, desenvolvido pela empresa GEOBRUGG. O programa utiliza relações empíricas para determinar as propriedades do fluxo de detritos, como: velocidade, vazão de pico, força de impacto, etc. Após a determinação das propriedades do fluxo o DEBFLOW utiliza uma ferramenta de simulações chamada FARO para realizar o dimensionamento estrutural da barreira de impacto, determinando os esforços internos na barreira, como: carga nos cabos, carga na malha, altura, etc.

O programa FARO foi desenvolvido pelo DR. Axel Volkweinn no Instituto Federal Suíço de Pesquisa de Floresta, Neve e Deslizamento e o modelo de elementos finitos foi calibrado através de testes de campo realizados em Illgraben, Suíça. Inicialmente este software foi utilizado para simulações de queda de blocos, assim para ser útil nos eventos de fluxo de detritos a ferramenta teve que ser adaptada para considerar a área de carregamento do impacto produzido pelo fluxo de detritos. Segundo Wendeler (2006) atualmente existem duas abordagens sendo realizadas.

A primeira abordagem modela o impacto utilizando um carregamento inercial. A massa que impacta é distribuída apenas pelos nós dos anéis, sendo que a cada ponto é atribuído uma velocidade inicial. Assim a barreira deve resistir a este carregamento inercial. O ponto negativo desta abordagem é devido a um possível colapso da barreira após os detritos terem sido parados e os pontos de massa seguem com seus carregamentos gravitacionais.

Na segunda abordagem a área de carregamento é distribuída pelos nós dos anéis apenas como simples forças. Após o fim do processo a barreira permanece na condição deformada. Assim esta segunda abordagem é dita como mais realista do que a primeira.

O DEBFLOW apenas conseguirá determinar as propriedades do fluxo de detritos e dimensionar uma barreira flexível adequada em cada caso após inserir os parâmetros geomorfológicos da região estudada, os dados de entrada da barreira e o tipo de sistema flexível.

Os dados de entrada são divididos em grupos, sendo eles:

- ✓ Escolha de três diferentes casos de carga possíveis
- ✓ Tipo e densidade do fluxo de detritos esperado
- ✓ Total volume
- ✓ Número de ondas esperado
- ✓ Vazão de pico esperada ou vazão de pico calculada através de relações empíricas
- ✓ Fator global de segurança

No caso da escolha dos três diferentes casos de carga possíveis, o DEBFLOW permite que opte por fluxo de detritos tipo granular, fluxo de detritos tipo lamacento ou sem carregamento. Para cada tipo o programa possui dados de entrada padrões, conforme é apresentado na Tabela 6.11.

**Tabela 6.11 Parâmetros Padrões do DEBFLOW**

Parameters	Short sign [ ]	Default value	Minimum value	Maximum Value
Density granular flow	$\rho_{\text{granular}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2200	1900	2300
Density muddy flow	$P_{\text{mudflow}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	1600	2000
Debris flow volume	$V_{\text{total}}$ [m <sup>3</sup> ]	1000	100	10000
Number of surges	N [-]	3	1	10
Volume of first surge	$V_{N,1}$ [m <sup>3</sup> ]	3000	10	10000
Peak discharge	$Q_P$ [m <sup>3</sup> /s]	50	1	100

Os dados de entrada da barreira são divididos em geometria da barreira, geometria da calha e parâmetros do fluxo.

Para definirmos a geometria da barreira os seguintes dados de entrada devem ser informados:

- ✓ Altura da barreira
- ✓ Largura do vão dos cabos de suporte superiores
- ✓ Largura do vão dos cabos de suporte inferiores
- ✓ Distância em relação à barreira anterior (no caso de barreiras múltiplas)

No caso da geometria da calha os dados de entrada são:

- ✓ Inclinação do leito do rio
- ✓ Inclinação do ângulo de deposição (para calcular o volume retido)

Na última parte são informados alguns dados pertinentes ao fluxo, são eles:

- ✓ Velocidade da frente esperada ou calculada
- ✓ Cálculo da altura do fluxo
- ✓ Altura a abertura máxima recomendada na base da barreira

Para definição do tipo de sistema de barreira flexível a ser utilizado o DEBFLOW fornece os seguintes tipos de sistema: VX080-H4; VX140-H4; VX100-H6; VX160-H6; UX100-H4; UX160-H4; UX120-H6; UX180-H6. Para cada tipo de sistema escolhido o DEBFLOW apresenta três informações referentes à cada um, sendo: máxima altura do sistema, máxima largura na parte superior e máxima largura na parte inferior.

Após concluir a inserção de todos os dados de entrada o programa fornece os seguintes resultados: vazão de pico, capacidade de retenção do volume de detritos, altura do sistema quando a barreira está cheia, inclinação do depósito formado pelos detritos retidos na barreira, ângulo entre a malha de anéis e o leito da calha, comprimento do depósito de material atrás da barreira, velocidade da frente de onda, altura do fluxo, altura máxima da abertura na base da barreira, fator de largura, carga dinâmica, resistência contra a carga dinâmica, fator de segurança para carga dinâmica, fator de redução da pressão hidrostática, carga estática, resistência contra carga estática, fator de segurança para carga estática.

Após a inserção dos dados de entrada e de posse dos resultados devemos avaliar se a barreira especificada atende aos requisitos exigidos. Caso contrário deve-se realizar novas interações alterando as propriedades da barreira a cada novo ciclo, de forma que os resultados venham a convergir para valores que sejam capazes de reter o fluxo de detritos.

### A ) Vazão de pico

O DEBFLOW determina a vazão de pico através da fórmula apresentada por Mizuyama (1992):

$$Q_p = 0,135M^{0,78}$$

Sendo:

$M$  - volume da primeira onda do fluxo de detritos

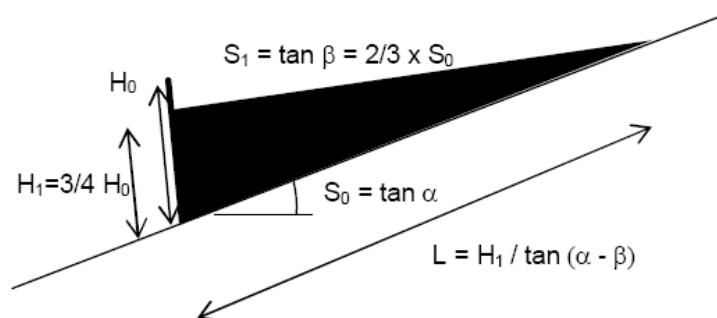
A Eq. 4.14 é descrita por Mizuyama (1992) para fluxo de detrito granulares, caso o fluxo estudado seja um fluxo de detritos lamacento devemos utilizar a seguinte equação.

$$Q_p = 0,0188M^{0,79}$$

### B ) Capacidade de retenção do volume de detritos

O volume máximo retido pela barreira depende situação da topografia local, largura do canal e altura da barreira.

A Figura 6. 11 apresenta um esquema do depósito de material retido pela barreira flexível. Combinando este esquema com a geometria da barreira pode-se obter o volume retido pela barreira.



**Figura 6. 11: Esquema depósito material retido pela barreira flexível (Wenderler, 2006)**

Sendo:

$S_1$  - declividade da superfície do depósito de detritos retidos pela barreira flexível

$S_0$  - declividade do leito do canal de drenagem da bacia

$H_0$  - Altura inicial da barreira flexível, antes do choque do fluxo de detritos

$H_1$  - Altura da barreira flexível após formação do depósito de detritos retidos, após o choque do fluxo de detritos

$\alpha$  - inclinação da encosta

$\beta$  = ângulo formado entre a estrutura de controle e a superfície da lama

$L$  - comprimento do depósito dos detritos retidos

Conforme pode ser observado na Figura 6. 11 a altura da barreira após a mesma reter detritos ( $H_1$ ) é dada por  $\frac{3}{4}$  da altura inicial da mesma.

Segundo Rickenmann (1999)  $S_1$  é dado por  $\frac{2}{3} S_0$ , como pode ser observado na Figura 6. 11.

O comprimento do depósito ( $L$ ) é dado por, conforme geometria apresentada na Figura 6. 11:

$$L = \frac{H_1}{\text{tang}(\alpha-\beta)} \quad (6.6)$$

### **C) Velocidade da frente de onda**

A partir do cálculo da vazão de pico pode-se estimar a velocidade de frente de onda. Rickenmann (1999) apresentou a seguinte equação para calcular a velocidade de frente de onda



$$v = 2,1Q_p^{0,33} S_0^{0,33} \quad (6.7)$$

O programa DEBFLOW possui uma alternativa a fórmula apresentada por Rickenmann (1999), a mesma foi estabelecida no Japão por Strickler (1988).

$$v = \frac{1}{n_d} h^{0,67} S^{0,5} \quad (6.8)$$

Sendo:

$h$  - altura do fluxo

Na fórmula apresentada por Strickler (1988)  $n_d$  é chamado de pseudo coeficiente de manning e varia entre  $0,05\text{s/m}^{1/3}$  e  $0,18\text{s/m}^{1/3}$ .

#### **D) Altura do fluxo**

A altura do fluxo pode ser calculada com base na largura da seção transversal e a vazão de pico

$$h = \frac{Q_p}{vb} \quad (6.9)$$

#### **E) Cargas estáticas e dinâmicas**

A carga estática é calculada através da pressão hidrostática presente no depósito retido pela barreira de fluxo de detritos. Já a carga dinâmica atuante na barreira flexível é devido ao choque de uma massa de detritos que irá ser retida. Para quantificar tais solicitações deve-se utilizar o método de cálculo apresentado no item 4.2.5, através das Eq. 4.27 e 4.28.

#### **F) Resistência estática e dinâmica**

As resistências estática e dinâmica das barreiras flexíveis determinadas pelo DEBFLOW utilizam a ferramenta FARO para tal objetivo. A descrição da modelagem numérica utilizada faz parte de uma publicação interna da GEOBRUGG e do WSL, por isso não pode ser detalhado no presente trabalho.

## 6.4 Resultados obtidos com DEBFLOW

O principal dado de entrada para o software é o volume total de detritos. No item 6.2.1 foram apresentados cinco resultados. Entre esses resultados julgou-se neste presente trabalho que os dois maiores valores devem estar superestimados por estarem associados a intensidade pluviométrica de longo período (24 horas) ou ao coeficiente de run-off muito elevado ( $f=1$ ). Portanto, considerando os 3 menores valores, adotou-se o maior entre eles,  $M = 8.300,00 \text{ m}^3$ . Os outros dados que são necessários para os cálculos a serem efetivados pelo programa são (Figura 6. 12, Figura 6. 13):

- Peso específico ( $\gamma_0$ ) =  $15,7 \text{ kN/m}^3$
- Número de ondas = 2. Para o caso estudado o software não permite o fluxo somente em uma onda, pois o valor máximo do volume da primeira onda é limitado em  $5.000 \text{ m}^3$ . Portanto considerou-se o fluxo em duas ondas.
- Volume da primeira onda =  $5.000 \text{ m}^3$ . Valor máximo permitido pelo software.
- Vazão de pico =  $104 \text{ m}^3/\text{s}$ . O software calcula esta vazão através da Eq. 4.14, proposta por Mizuyama *et al.* (1992).

Type and density of the debris flow					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Type of debris flow (granular or mud flow)	Type	mud flow	no load case	no load case	
Density of the debris flow material	$\rho =$	1600	1000	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
Specific weight of the debris flow material	$\gamma =$	15.7			[kN/m <sup>3</sup> ]
Water content	$w =$	0.64			-
Debris flow volume and number of surges					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Total debris flow volume (incl. water)	$V_{tot} =$	8300	1000	1000	[m <sup>3</sup> ]
Number of surges	$N =$	2	3	3	-
Volume per surge (average)	$V_N =$	4150			[m <sup>3</sup> ]
Volume of first surge (recommended)	$V_{N1,rec} =$	6225			[m <sup>3</sup> ]
Volume of first surge (chosen)	$V_{N1} =$	5000	3000	3000	[m <sup>3</sup> ]
Peak discharge					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Peak discharge (acc. to Rickenmann)	$Q_{p,rec} =$	103.6			[m <sup>3</sup> /s]
Peak discharge (chosen)	$Q_p =$	104	50	50	[m <sup>3</sup> /s]

**Figura 6. 12: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada peso específico, número de ondas, volume da primeira onda e vazão de pico**

- Declividade do terreno imediatamente a montante da barreira = 15%, obtido da topografia (Figura 6.1).

- Declividade da superfície do depósito formado pelo material retido = 14,9%, valor máximo permitido para inclinação do leito do canal ( $\Theta$ ) igual a 15%, já que o software permite uma declividade máxima de  $\Theta=0,1\%$ .

- Velocidade de impacto do fluxo de detritos = 7,0 m/s. O software sugere os valores estimados por Rickenmann (1999) e por Strickler. Adotou-se o valor encontrado por Rickenmann (1999 – item 4.2.3), devido ser considerada a relação empírica com melhores resultados em retroanálises, segundo Cruz *et al.* (1997).

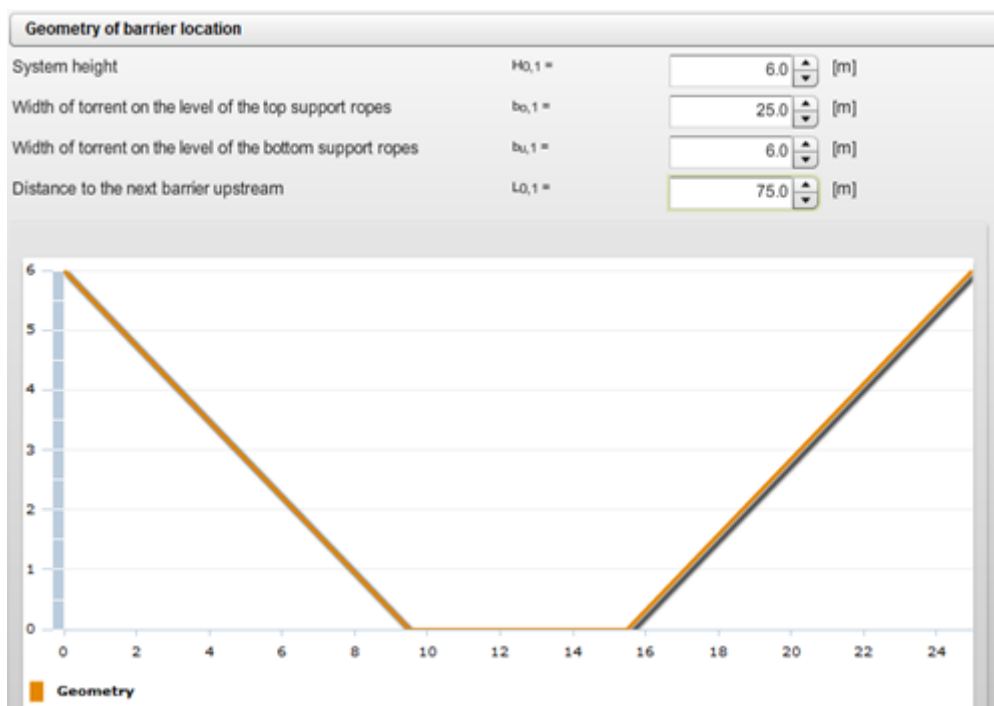
Torrent inclination and retention volume			
System height of the filled barrier	H <sub>1,1</sub> =	4.5	[m]
Average torrent inclination upstream of the barrier	l <sub>a,1</sub> =	15	[%]
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	l' <sub>s,1,rec</sub> =	10.0	[%]
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	l' <sub>s,1</sub> =	14.9	[%]
Angle between ring net and river bed	ξ =	86.5	[°]
Length of deposited material behind barrier	L <sub>1</sub> =	75.0	[m]
Retention volume	V <sub>r,1</sub> =	5169	[m <sup>3</sup> ]

Front velocity and flow height					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	v <sub>1,base</sub> =	7.0			[m/s]
Front velocity according to Strickler (v <sub>1</sub> >v <sub>str</sub> )	v <sub>str</sub> =	7.5			[m/s]
Impact velocity at barrier location (chosen,max. v-value)	v <sub>1</sub> =	7.0	3.0	3.0	[m/s]
Flow height	h <sub>l,1</sub> =	2.5			[m]
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	h <sub>d,1,5%</sub> =	1.7			[m]

**Figura 6. 13: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada inclinação do canal, inclinação da superfície do depósito e velocidade de impacto**

- Geometria da localização da barreira: largura inferior = 6,0 m de acordo com a topografia; largura superior = 25,0 m; altura = 6,0 m. Os valores 25 m e 6 m são os máximos permitidos pelo software e se encaixam no local escolhido para implantação da barreira. O comprimento disponível para a deposição dos detritos, conforme topografia (Figura 6.1) é de 75 metros (Figura 6. 14).



**Figura 6. 14: Tela do DEBFLOW com os dados geométricos da barreira flexível**

Com esses dados, a altura da barreira flexível após enchimento é de 3,3 m (3/4 da altura inicial da barreira, Figura 6. 11). O ângulo entre a malha e o leito do canal é de 89,5 ° (Figura 6. 15).

Torrent inclination and retention volume			
System height of the filled barrier	H <sub>1,1</sub> =	4.5	[m]
Average torrent inclination upstream of the barrier	i <sub>s,1</sub> =	15	[%]
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	i <sub>s,1,rec</sub> =	10.0	[%]
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	i <sub>s,1</sub> =	14.9	[%]
Angle between ring net and river bed	ξ =	86.5	[°]
Length of deposited material behind barrier	L <sub>1</sub> =	75.0	[m]
Retention volume	V <sub>r,1</sub> =	5169	[m <sup>3</sup> ]

**Figura 6. 15: Tela do DEBFLOW com os dados de entrada altura da barreira após enchimento e ângulo entre malha e leito do canal de drenagem**

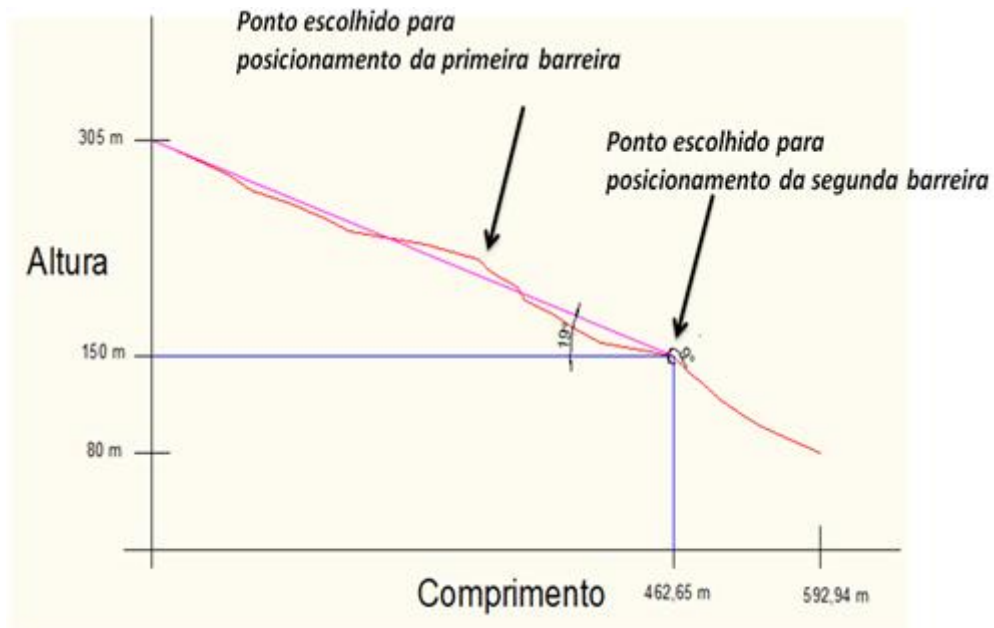
Com a definição da geometria da calha de drenagem e da geometria da barreira flexível é possível calcular a capacidade volumétrica de retenção de detritos (Figura 6.11):

- Capacidade de retenção de detritos: 5.169 m<sup>3</sup> (Figura 6. 16).

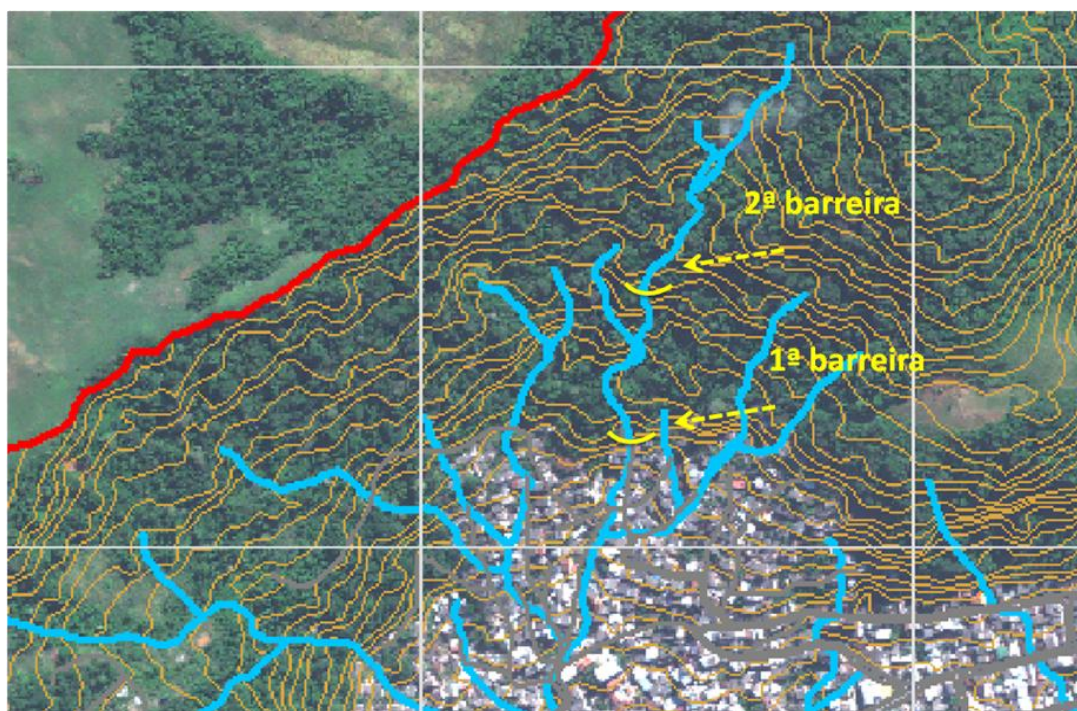
Retention volume			
Total retention volume	V <sub>r,tot</sub> =	5169	[m <sup>3</sup> ]
Required retention volume	V <sub>tot,max</sub> =	8300	[m <sup>3</sup> ]
Reserve	V <sub>r,reserve</sub> =	-3131	[m <sup>3</sup> ]
Proof of retention volume	not fulfilled !		
Proof of overall system	not fulfilled !		

**Figura 6. 16: Tela do DEBFLOW com a capacidade de retenção de detritos da barreira**

Verifica-se então que a capacidade de retenção é insatisfatória. Portanto, decidiu-se por executar uma segunda barreira em uma cota superior (Figura 6. 17 e Figura 6. 18).



**Figura 6. 17: Localização das duas barreiras implantadas em relação ao perfil topográfico do canal de drenagem**



**Figura 6. 18: Localização em planta das barreiras flexíveis**

Com a implantação da segunda barreira propôs-se as seguintes geometrias para as duas barreiras:

- Barreira 1 (superior):

Largura inferior: 6,0 m

Largura superior: 20,0 m

Altura: 4,5 m

Comprimento disponível para deposição dos detritos: 120 m

- Barreira 2 (inferior):

Largura inferior: 6,0 m

Largura superior: 20,0 m

Altura: 4,5 m

Comprimento disponível para deposição dos detritos: 75 m

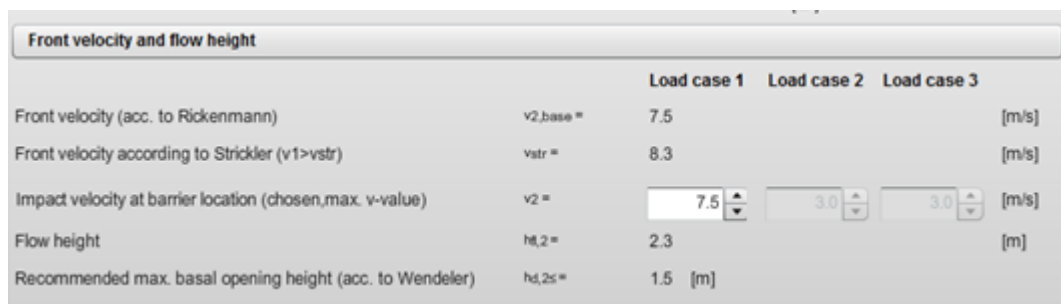
Com essa configuração obteve-se um volume de retenção total igual a 8.374 m<sup>3</sup>, portanto, superior ao necessário.

Em seguida é calculada a altura do fluxo, segundo Iverson (1997, vide item 4.2.6) e selecionada a velocidade de impacto.

- Barreira 1 (Figura 6. 19):

Altura do fluxo: 2,3 m

Velocidade de impacto: 7,5 m/s



Front velocity and flow height		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	v2,base =	7.5			[m/s]
Front velocity according to Strickler (v1>vstr)	vstr =	8.3			[m/s]
Impact velocity at barrier location (chosen,max. v-value)	v2 =	7.5	3.0	3.0	[m/s]
Flow height	ht,2 =	2.3			[m]
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	ht,2s =	1.5			[m]

**Figura 6. 19: Tela do DEBFLOW com altura e velocidade de impacto calculados para barreira 1**

- Barreira 2 (Figura 6. 20):

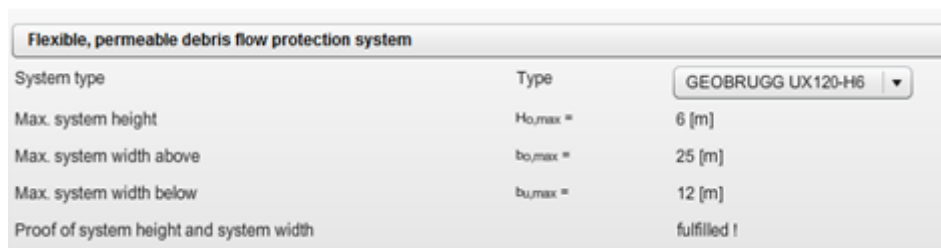
Altura do fluxo: 2,5 m

Velocidade de impacto: 7,0 m/s



**Figura 6. 20: Tela do DEBFLOW com altura e velocidade de impacto calculados para barreira 2**

- Especificação das barreiras 1 e 2 (Figura 6. 21): GEOBRUGG UX 120-H6



**Figura 6. 21: Tela do DEBFLOW com a especificação das barreiras 1 e 2**

A partir desses dados o DEBFLOW é capaz de calcular os esforços solicitantes estáticos e dinâmicos na barreira. Tendo sido definido o tipo de barreira flexível e suas resistências, são calculados os fatores de segurança. As Figura 6. 22 e Figura 6. 23 mostram esses passos do programa para cada barreira.

- Barreira 1 (Figura 6. 22):



Proof of max. dynamic loading (stopping)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Width factor (width at barrier location to standard width)	BF <sub>2</sub> =	0.72		-
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	MD <sub>dyn,2</sub> =	251		[kN/(m <sup>2</sup> h)]
Resistance against dynamic loading	RD <sub>dyn,2</sub> =	384		[kN/(m <sup>2</sup> h)]
Safety factor	SF <sub>dyn,2</sub> =	1.53		-
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !		
Proof of max. static loading (overflowing)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	HF =	1.0		-
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	MD <sub>stat,2</sub> =	83		[kN/m <sup>2</sup> ]
Resistance against static loading	RD <sub>stat,2</sub> =	166		[kN/m <sup>2</sup> ]
Safety factor	SF <sub>stat,2</sub> =	2		-
Proof of max. static loading		fulfilled !		
<b>Proof barrier</b>			<b>fulfilled !</b>	

**Figura 6. 22: Tela do DEBFLOW com os resultados de solicitação e resistência estática e dinâmica e os fatores de segurança para as condições estática e dinâmica para a barreira 1**

- Barreira 2 (Figura 6. 23):

Proof of max. dynamic loading (stopping)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Width factor (width at barrier location to standard width)	BF <sub>1</sub> =	0.72		-
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	MD <sub>dyn,1</sub> =	243		[kN/(m <sup>2</sup> h)]
Resistance against dynamic loading	RD <sub>dyn,1</sub> =	411		[kN/(m <sup>2</sup> h)]
Safety factor	SF <sub>dyn,1</sub> =	1.69		-
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !		
Proof of max. static loading (overflowing)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	HF =	1.0		-
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	MD <sub>stat,1</sub> =	86		[kN/m <sup>2</sup> ]
Resistance against static loading	RD <sub>stat,1</sub> =	166		[kN/m <sup>2</sup> ]
Safety factor	SF <sub>stat,1</sub> =	1.93		-
Proof of max. static loading		fulfilled !		
<b>Proof barrier</b>			<b>fulfilled !</b>	

**Figura 6. 23: Tela do DEBFLOW com os resultados de solicitação e resistência estática e dinâmica e os fatores de segurança para as condições estática e dinâmica para a barreira 2**

As tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os resumos dos esforços solicitantes e os respectivos fatores de segurança para as barreiras 1 e 2.

- Barreira 1 (Tabela 6.8):

**Tabela 6.8: Resumo dos esforços e fatores de resistência para a barreira 1**

Esforços	Solictação	Resistência	FS
Estático	83 kN/m <sup>2</sup>	166 kN/m <sup>2</sup>	2,00
Dinâmico	251 kN/m*h	384 kN/m*h	1,53

- Barreira 2 (Tabela 6.9):

**Tabela 6.9: Resumo dos esforços e fatores de resistência para a barreira 2**

Esforços	Solictação	Resistência	FS
Estático	86 kN/m <sup>2</sup>	166 kN/m <sup>2</sup>	1,93
Dinâmico	243 kN/m*h	411 kN/m*h	1,69

O fator de segurança de cada barreira é dado pelo menor valor entre fator de segurança para condição estática e para dinâmica. E o fator de segurança global do sistema de duas barreiras é dado pelo menor fator de segurança entre os fatores respectivos de cada barreira. A barreira 1 apresenta um fator de segurança igual a 1,53 e a barreira 2 igual a 1,69. Logo o fator de segurança global é de 1,53 (Figura 6. 24).

Summary of Results				
Multi-level debris flow protection system	No.	Safety Factor	Proof	Retention volume
GEOBRUGG UX120-H6	No. 1	1.69	fulfilled!	3244 [m <sup>3</sup> ]
GEOBRUGG UX120-H6	No. 2	1.53	fulfilled!	5129 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 3	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 4	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 5	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 6	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 7	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 8	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 9	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
No Barrier	No. 10	-	-	0 [m <sup>3</sup> ]
Minimal safety factor of the overall system	SF <sub>min</sub> =	1.53	fulfilled!	

**Figura 6. 24: Tela do DEBFLOW com fator de segurança de cada barreira e o fator de segurança global**

## 7. Conclusões

O fluxo de detritos é um tipo de movimento de massa que merece muita atenção, devido o seu poder catastrófico em função das elevadas energias envolvidas no movimento. Porém, mesmo possuindo alta capacidade de destruição trata-se de um movimento pouco estudado, se comparado com outros movimentos de massa. Isto se deve ao alto grau de complexidade do fenômeno e da dificuldade de se obter dados sobre tais eventos. No Brasil os estudos sobre fluxo de detritos ainda são bastante incipientes, os estudos mais aprofundados sobre o fenômeno se concentram na América do Norte, Europa e Ásia.

Neste âmbito, este trabalho fez um levantamento na literatura técnica acerca dos conceitos físicos envolvidos pelo fenômeno e dos métodos para estimativa de parâmetros que caracterizam o fluxo de detritos e que possibilitam a sua previsão e o dimensionamento das estruturas de controle do evento.

Os parâmetros mais importantes para caracterização do fluxo de detritos são volume, vazão de pico e velocidade, pois a partir deles pode-se estimar a área atingida e a energia do movimento, possibilitando delimitar a área de risco e especificar a estrutura de controle.

Para a estimativa do volume do fluxo de detritos as Eq. 4.6 e 4.9 propostas pela experiência japonesa (cálculo de M a partir do volume de água) e Massad *et al* retornaram um volume muito maior do que as outras duas soluções anteriores, propostas por VanDine (1996) e pela experiência japonesa (cálculo de M a partir do volume de sólidos). No presente trabalho foi proposta uma alteração da equação definida por Massad *et al* (1997), passando a considerar a intensidade pluviométrica de uma hora e coeficiente de run-off conforme as características do terreno.

Verifica-se, de uma forma geral, diversas propostas de métodos de cálculo de parâmetros de projeto que se baseiam em eventos observados em países com condições climáticas bastante diferentes do Brasil. E, mesmo assim, observam-se resultados bastantes dispares para o mesmo parâmetro em função do método de cálculo adotado. Tal constatação evidencia a falta de dados sobre eventos brasileiros, o que poderia indicar a adequação de determinados métodos para a realidade brasileira ou propor

alterações nos mesmos. Esta situação pode prejudicar significativamente a qualidade dos projetos de obras de controle de fluxo de detritos no Brasil.

Dentre os valores estimados para os parâmetros de projeto, alguns são pouco prováveis de serem observados na natureza, por exemplo: fluxo de detritos com alturas de 20,44 m, 17,96 m ou 15,94 m. Este fato ocorreu devido à utilização de métodos de cálculo não adequados a realidade do caso estudado, são relações empíricas elaboradas para condições bem diferentes do caso apresentado no presente trabalho.

Durante o processo de cálculo dos parâmetros de projeto percebeu-se que existem relações empíricas que não apresentam uma compatibilidade dimensional, as unidades não são adequadas aos resultados encontrados. Por exemplo, a relação proposta por Iverson (1997) – Eq. 4.35.

Após levantamento dos métodos de cálculo foi feito o estudo de caso para uma área de Angra dos Reis. Foram realizados cálculos a partir dos métodos apresentados e do software DEBFLOW desenvolvido pela empresa GEOBRUGG. Observou-se que a instalação de apenas uma barreira flexível para controle do volume de detritos que a bacia hidrográfica é capaz de gerar em uma ocorrência de fluxo de detritos é insatisfatório. Pois a capacidade volumétrica de retenção desta única barreira é inferior a demanda de detritos. Desta forma, optou-se por implantar duas barreiras flexíveis com a mesma especificação e geometria ao longo do canal de drenagem. Logo a soma da capacidade de retenção das duas barreiras é suficiente para reter todo o volume de detritos gerado na ocorrência de um fluxo de detritos para o caso estudado protegendo assim as edificações que se encontram em cotas inferiores a segunda barreira.

## Referências Bibliográficas

- AVELAR, A., 2003. *Iniciação e desenvolvimento de fluxos detríticos em encosta: Ensaio triaxiais de choque e em caixa experimental abordando o caso do soberbo (RJ)*, Tese\* de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BLOOM, A. L., 1991, *Geomorphology: A systematic analysis of late Cenozoic landforms*. London. Prentice Hall (UK), pp. 348.
- CAMPBELL, R.H, 1975, Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. US Geol. Surv., Prof. Pap. 851, pp. 51.
- COPPE-UFRJ, 2010, *Mapeamento de áreas de riscos, frente aos deslizamentos de encostas no município de Angra dos reis, Rj*, Governo do estado do Rio de Janeiro, Secretaria de estado do ambiente e Instituto estadual do ambiente.
- COUSSOT, P., 1995, “Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions”, *Phys. Rev. Lett.*, v. 74, pp.3971–3974.
- EVANS, S.G., 1982, “Landslides and surficial deposits in urban areas of British Columbia: a review”, *Can. Geotech. J.*, v.19, pp.269-288.
- FESTI, A., 2007, “ *Coletânea das equações de chuva no Brasil*”, XVII Simpósio brasileiro de recursos hídricos, São Paulo, 2009.
- GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M., 1983, *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. 2ed. São Paulo, Editora Blucher.
- HAMPTON, M. A., 1979, “Buoyancy in debris flows”, *J. Sediment. Petrol.*, v.49, pp.753–758.
- HIGHLAND, L. M., BOBROWSKY, P., 2008, *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*, Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325.

- HOLLINGSWORTH, R. AND G.S. KOVACS. 1981. "Soil slumps and debris flows: prediction and protection". *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, v.18, pp.17-28.
- HUNGR, O., G.C. MORGAN, AND R. KELLERHALS. 1984, "Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures". *Can. Geotech. J.*, v.21, pp.663-677.
- IKEYA, H., 1976, *Introduction to sabo works: the preservation of land against sediment disaster*. Toyko, The Japan Sabo Assoc.
- IKEYA, H., 1981, *A method of designation for area in danger of debris flow*. In *Erosion and sediment transport in Pacific Rim Steeplands*, Proc. of the Christchurch Symp., *Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, Publ. No. 132, pp.576-588.
- IVERSON, R. M, 1997, "The Physics of Debris Flow", *Reviews of Geophysics*, v. 35, 3, Agosto/97, pp. 245–296.
- JOHNSON, A.M. AND J.R. RODINE., 1984, "Debris flow. In Slope instability". In: D. Brunsten and D.B. Prior (eds), John Wiley and Sons Ltd., Chapter. 8, pp. 257-361.
- KANJI, M. A., CRUZ, P. T., MASSAD, F., 2008, "Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil", *Landslides*, v.5, pp. 71–82.
- LUNA, B. Q., REMAÎTRE, A., VAN ASCH, T.W.J, *et al.*, 2012, "Analysis of debris flow behavior with a one dimensional run-out model incorporating entrainment", *Engineering Geology*, v.128, pp.63–75.
- MASSAD, F., CRUZ, P.T., KANJI, M. A., ARAÚJO, H. A., "Comparison between estimated and measured Debris Flow discharges and volume of sediments", *Landslides 2 COBRAE*, Rio de Janeiro, 1997.
- MAJOR, J. J., 1996, *Experimental studies of deposition by debris flows: Process, characteristics of deposits and effects of pore-fluid pressure*, Ph.D. dissertation, Univ. of Wash., Seattle, USA.

- MAJOR, J. J., AND T. C. PIERSON, 1992, “Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries”, *Water Resour. Res.*, v.28, pp.841–857.
- MARCHI, L., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A. M., 2002, “Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps)”, *Geomorphology*, v.46, pp.1 –17.
- MCARDELL, B.W., WENDELER, C., ROTH, A., KALEJTA, J., ROREM, E., Field Observations of the interaction of debris flow with flexible barriers,, pp. 1-6
- MIZUYAMA, T. AND UEHARA, S., 1983, “Experimental study of the depositional process of debris flows”, *Trans. Jap. Geomorphol. Union*, v. 4, n. 1, pp. 49-64.
- NETTLETON, I.M., MARTIN, S., HENCHER, S., MOORE,R., 2005, ”Debris Flow types and mechanics”. Disponível em: <http://scotland.gov.uk/Resource/Doc/55971/0015327.pdf>. Acesso em: 21/03/2013 as 22:00 hs.
- O’BRIEN, J. S., AND JULIEN, P. Y., 1988, “Laboratory analysis of mudflow properties”, *J. Hydraul. Eng.*, v.114, pp. 877–887.
- PHILLIPS, C. J., AND T. R. H. DAVIES, 1991, “Determining rheological properties of debris flow material”, *Geomorphology*, v.4, pp.101–110.
- PIERSON, T. C., 1981, “Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility”, *Sedimentology*, v.28, pp.49–60.
- PIERSON, T. C., JANDA, R. J., THOURET, J. C., AND BORRERO, C. A., 1990, “Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v.41, pp. 17–66.
- POLANCO, L. S. E., 2010, *Correlações Empíricas para Fluxo de Detritos*. Tese\* de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- RICKENMANN, D., 1999, "Empirical Relationships for Debris Flow", *Natural Hazards*, v.19, p.47-77.
- RIO ÁGUAS, 2010, *Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana*, Prefeitura do Rio de Janeiro, Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas, RJ. Brasil.
- ROCHA, J. S. A., 2009, *Estudos Numéricos sobre Trajetórias de Queda de Blocos Rochosos*. Tese\* de D.Sc. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SUMMERFIELD, M.A., 1991, *Global geomorphology: an introduction to study of landforms*. 1<sup>st</sup> ed., London, Longman Scientific and Technical Press, 233 p.
- TAKAHASHI, T, 2007, *Debris Flow: Mechaniscs, Prediction and Countermeasures*, London, UK., Taylor & Francis
- TAKAHASHI, T., SAWADA, T., SUWA, H., MIZUYAMA, T., MIZUHARA, K., WU, J., TANG, B., KANG, Z., AND ZHOU, B, 1994, *Japan-China joint research on the prevention from debris flow hazards, Research Report, Japanese Ministry of Education, Science and Culture*, Int. Scientific Research Program No. 03044085.
- THURBER CONSULTANTS LTD., 1983, Debris torrent and flooding hazards, Highway 99, Howe Sound. Report to B.C. Min. Transportation and Highways, Victoria, B.C.
- TRIPP, D.B. e V.C. POULIN, 1986, *The effects of mass wasting on juvenile fish habitats in streams on the Queen Charlotte Islands*. B.C. Min. For., Victoria, B.C. Land Manage. Rep. No. 45. 48 p.
- VANDINE, D. F., 1996., *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering*, Res. Br., B.C. Min.For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08
- VARNES, D.J., 1978, "Slope movement types and processes", In *Landslides and Engineering Practice*, Washington, D.C.



WENDELER, C., 2008, DEBFLOW - The Dimensioning Tool for Flexible Ring net Barriers Against Debris Flows, Software Manual for DEBFLOW / October 2008, Switzerland

WENDELER, C., MCARDELL, B.W., RICKENMANN, D., VOLKWEIN, A., ROTH, A., DENK, M., “Field testing and numerical modeling of flexible debris flow barriers”, pp.1-6

WENDELER, C., VOLKWEIN, A., ROTH, A., DENK, M., WARTMANN, S, “Field measurements and numerical modeling of flexible debris flow barriers”, pp.1-6