

## **CAPÍTULO 2**

---

# **CARACTERIZAÇÃO DAS CORRIDAS DE DETRITOS**

### **2.1.**

#### **Classificação dos Movimentos de Massas**

Os movimentos de massas são aqueles processos da geodinâmica superficial onde um movimento ou queda apreciável de material ocorre na presença da força gravitacional sobre uma superfície com determinado gradiente permitindo o acúmulo do material. Mas esta definição envolve muitos processos que podem ser diferenciáveis segundo a natureza do material da encosta (consolidado ou não consolidado), além da velocidade e natureza do movimento que caracterizam o evento<sup>[7]</sup>. Estes aspectos são bases para classificar os movimentos de massas em dois grandes grupos: deslizamentos de terra (landslides) e fluxos de sedimentos (sediment flows). Esta classificação está referida às pesquisas que sobre o tema a escola italiana tem desenvolvido nos últimos anos e foi adotada neste trabalho, pois eles também trabalham com alguns tipos de rochas e solos residuais semelhantes aos achados no Brasil, assim como solos do quaternário e de origem vulcânica achados em outras partes de América Latina.

#### **2.1.1.**

##### ***Deslizamentos do Terreno (Landslides)***

Este grupo se caracteriza pela presença de uma superfície ou área de ruptura onde agem forças de cisalhamento na resistência máxima ou residual do solo ou rocha, caracterizadas pelas propriedades e leis constitutivas próprias de materiais porosos. Em outros casos só as forças gravitacionais agem.

Os principais mecanismos de ruptura destes fenômenos são: rotação (rolling), escorregamento (sliding), queda (falling) e colapso (land collapsing). Daqui em diante, serão apresentados os termos em inglês para uniformizar os conceitos, pois em alguns casos a tradução ao português é similar.

Mecanismo	Características	Modelo
<b>Deslizamento com rastejo (Slump)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimento repentino do material rodando (mm/ano, m/s) a jusante sobre uma superfície côncava de ruptura. Forças de cisalhamento responsáveis pela falha.</li> <li>- O topo dos blocos deslizantes permanece não-deformado.</li> <li>- Ativados por eliminação de material ao pé dos blocos por atividades humanas ou erosivas, chuvas intensas ou sismos.</li> </ul>	
<b>Escorregamento (Slide)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimento sobre superfícies de ruptura ou juntas pré-existentes. Forças de cisalhamento responsáveis pela falha.</li> <li>- Não apresenta rotação do material em movimento.</li> <li>- Movimento do material sob certo comportamento plástico com infiltração de água.</li> </ul>	
<b>Queda (Fall)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Queda livre do material sobre gradientes altos ou queda com algumas colisões com outros blocos.</li> <li>-Forças gravitacionais responsáveis da instabilidade.</li> <li>- São eventos extremamente rápidos (m/min, m/s) que resultam na acumulação do material (tálus) na base da encosta.</li> </ul>	

Tabela 2.1- Descrição dos mecanismos de ruptura (ou colapso) dos movimentos de massas.

Estes mecanismos se apresentam em três tipos de movimentos conhecidos com características bem diferenciáveis como se mostra na Tabela 2.1.

### 2.1.2. **Corridas de sedimentos (Sediment Flows)**

As corridas ou fluxos são eventos onde a natureza dos elementos líquidos e gasosos interferem nas propriedades dinâmicas dos sedimentos em transporte cujas leis físicas envolvidas e comportamento reológico costumam ser simplificados a problemas de transporte de sedimentos num fluido. A energia interna de alguns é muito grande em comparação a qualquer outro evento de forma que são considerados os fenômenos de maior poder destrutivo dentro de seu gênero.

Este grupo é dividido segundo o conteúdo de água, pois é este fator que determina se o fluxo se comporta mais como um fluido ou como uma massa mais densa (ver Tabela 2.2).

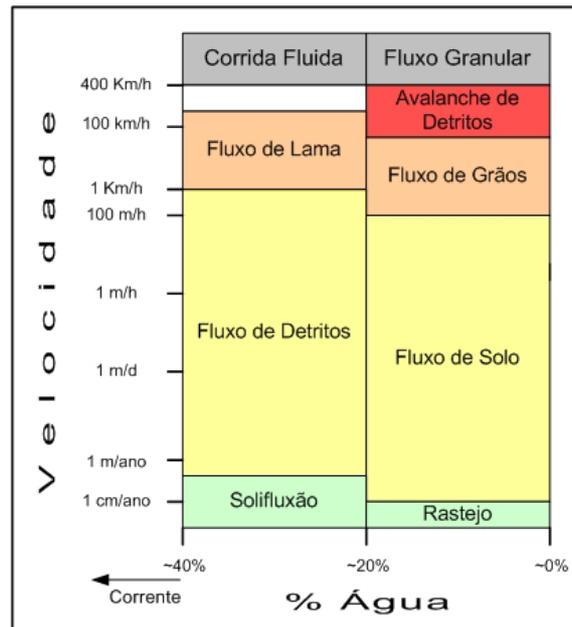


Tabela 2.2- Classificação dos fluxos de sedimentos segundo a velocidade e conteúdo de água<sup>[7]</sup>.

### 1. *Corridas Fluidas (Slurry Flows)*

São fluxos rápidos de material desagregado ou material que virou desagregado por saturação. Estes fluxos se caracterizam por um alto teor de saturação, apresentam de 20% a 40% de volume de água. Além destes limites o evento é chamado de corrente fluida (stream). Entre eles temos:

**a. Solifluxão:** Movimento lento (cm/ano) e contínuo de solo saturado formando lóbulos sobre a encosta. Típico de zonas nórdicas que ano a ano são afetadas pelos ciclos de congelamento e degelo.

**b. Fluxos de Detritos:** São misturas saturadas de ar ou água, que descem a altas velocidades (1m/ano a 100 m/h), sob o efeito da gravidade. Caracterizam-se pela variedade de tamanhos dos sedimentos transportados. Estes costumam se apresentar depois de chuvas fortes quando o material se satura. Também, se apresentam num deslizamento (“slump” ou “landslide”) quando a massa se desagrega e mistura com ar e água. Durante o movimento estes tendem a incrementar seu volume (dilatação) e a deposição se dá em forma de lóbulos tipo “dedos” com superfície irregular. Espalham-se sobre grandes áreas quando o gradiente é constante na encosta.

**c. Fluxos de Lama:** Estes contêm um alto teor de umidade assim como conteúdo de sedimentos finos e coesivos (aprox. 50% de areia, silte e argila), diminuindo a viscosidade do fluxo (~1 km/h) pelo que afetam grandes áreas, sendo dentro de vales altamente destrutivos. São de composição mais uniforme do que os fluxos de detritos.

## 2. Corridas de material granular (Granular Flows)

Apresentam um baixo conteúdo de água (de 0% a 20%). Seu comportamento semifluido deriva da mistura dos sólidos com ar. Alguns são iniciados por altas vibrações ou sobre carregamento.

**a. Rastejo (Creep):** Movimento extremamente lento (cm/ano a mm/ano). De grandes volumes de deposição e sensível às mudanças estacionais anuais.

**b. Avalanches de Detritos:** São um fenômeno extremo aos fluxos de detritos, pois desenvolvem altas velocidades (~300 km/h), carregando grandes volumes de material devido ao colapso total das laterais da encosta. São comparadas com as avalanches de neve e se depositam em forma de língua cumprida por toda a encosta.

**c. Fluxos de Solo:** São eventos de comportamento cinético similar aos fluxos de detritos, a diferença está no baixo conteúdo de água. Sua distribuição granulométrica é variada.

**d. Fluxos de Grãos:** Eventos de granulometria grossa e uniforme, porem rápidos.

Desta forma podemos agora localizar os fluxos de detritos (debris flows) ou corridas de detritos, como comumente são chamados no Brasil, dentro do amplo grupo das corridas de massa (ver Tabela 2.3).

Lastimosamente, estes não são os únicos critérios usados para classificar os fluxos de detritos ou corridas de massa. Observando outros critérios, alguns eventos anteriores caem dentro da definição de outro. Atualmente existe uma falta de acordo na comunidade internacional sobre a nomenclatura a usar nas pesquisas

principalmente por a falta de semiótica na hora de traduzir os termos de uma língua a outra.

MATERIAL		Velocidade		
		BAIXA	MODERADA	ALTA
CONSOLIDADO	FLUXO			Avalanche de rochas
	DESlizAMENTO		Deslizamiento de rochas	Queda de rochas
NÃO-CONSOLIDADO	FLUXO	Rastejo	Fluxo de solo Fluxo de lama	Avalanche de detritos
		Solifluxão	Fluxo de detritos	
NÃO-CONSOLIDADO	DESlizAMENTO	Deslizamiento com rastejo	Deslizamiento de detritos	

Tabela 2.3- Síntese dos tipos de corridas de massa agrupados segundo características do material, tipo de movimento e velocidade [7].

Muitos trabalhos são feitos sob o lema de “fluxos gravitacionais”, “lahares”, “fluxos granulares não-saturados”, etc.; e dentro do corpo do trabalho surge o conceito de “debris flow” como sinônimo dos anteriores.

## 2.2. Classificação e definição de corrida de detritos

Nos últimos anos tem-se apreciado que se pode ter um melhor entendimento dos fluxos de detritos se estes são estudados sob o ponto de vista reológico e as leis constitutivas que caracterizam o fenômeno pois a hidrodinâmica não-linear tem ganho importantes avanços teóricos nos últimos 50 anos em conjunto com a evolução da era espacial.

Fica clara a diferença entre fluxo de detritos (pois a iteração sólido-fluido determina o comportamento do fluxo) e outros fenômenos onde só uma fase domina o comportamento do material como os deslizamentos (parte sólida) ou correntes de enchentes (fluido). Mas isto não é suficiente, pois existem outros fenômenos similares como os fluxos de lama, solo, rocha, etc. Assim surge o conceito de **mistura de sedimentos hiperconcentrada** ou **fluxo hiperconcentrado** para descrever aqueles

fenômenos regidos por uma reologia determinada pela interação de partes sólidas e líquidas em movimento.

Um fluxo hiperconcentrado é um fluido em movimento que transporta uma alta porcentagem de material sólido. Dita mistura é chamada de fluxo bifásico. Mas o problema é que nem sempre pode-se considerar as mistura como em bi-fase ou fases separadas.

Um dos parâmetros básicas no estudo destes fluxos é concentração média de sólidos  $C_v$ . Este é um parâmetro para a grande maioria dos critérios de classificação de corridas de massa e líquidos. Este parâmetro é determinado para uma mistura em condições estáticas como:

$$C_v = \frac{V_{sol}}{V_{sol} + V_{liquid}} \quad (2.1)$$

Uma caracterização geral dos fluxos hiperconcentrados sob esta perspectiva é dada por Dasgupta (2002) [8] na Tabela 2.4.

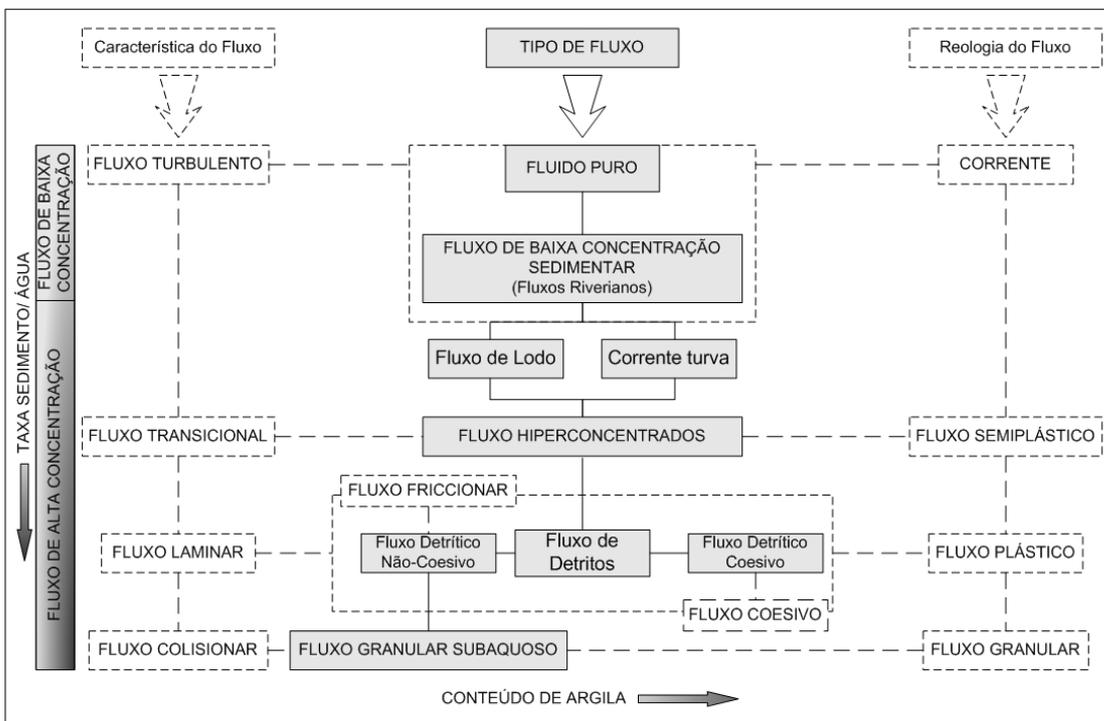


Tabela 2.4- Caracterização dos fluxos hiperconcentrados [8].

### 2.2.1. Alguns critérios de classificação

No início, a classificação das misturas de água-sedimento foi feita pela observação direta do fenômeno, avaliações experimentais, análises morfológicas dos depósitos, ou com modelos físicos ou teóricos simples. Estes últimos têm evoluído bastante com a aparição de modelos reológicos mais complexos. Um breve resumo dos critérios mais utilizados nas análises internacionais é apresentado na Tabela 2.5.a e Tabela 2.5.b <sup>[9], [10], [11], [12]</sup>.

<b>Autor</b>	<b>Crítérios</b>	<b>Classificação</b>
<b>Sharpe (1938)</b>	Velocidade relativa.	Avalanche de detritos Fluxo de lama Fluxo de solo
	Concentração relativa de sedimentos.	Solifluxão Rastejo Correntes
<b>Varnes (1958)</b>	Tipo de material.	Corrente de blocos Avalanche de detritos Fluxo de detritos/ lama Fluxo de solo
	Tipo de movimento.	Solifluxão Rastejo
<b>Lowe (1979)</b>	Tipo de movimento.	Corrente turva Fluxo fluidizado Fluxo liquidificado
	Comportamento reológico das partes sólidas y líquidas.	Fluxo detrítico granular Fluxo detrítico coesivo
<b>Beverage e Culbertson (1979)</b>	Concentração de sólidos	Corrente Corrente densa Fluxo de corrente hiperconcentrado
	Porcentagem de água	Fluxo de lama
<b>Takahashi (1981)</b>	Mecanismos de transporte de grãos.	Fluxo de detritos Fluxo piroclástico "Sturzstorm" Queda
<b>Savage (1984)</b>	Reologia dos fluxos granulares	Fluxo em regime macroviscoso Fluxo em regime quase-estático Fluxo em regime inercial granular
<b>O'Brien e Julien (1985)</b>	Concentração de sedimentos.	Enchente de lama Fluxo de lama
	Propriedades do fluido.	Fluxo de detritos Correntes
<b>Pierson e Costa (1987)</b>	Velocidade.	Fluxos hiperconcentrados Fluxo fluido com atrito
	Concentração de sedimentos.	Fluxo fluido viscoso Fluxo granular fluidificado
	Propriedades reológicas	Fluxo granular com atrito Fluxo granular viscoso

Tabela 2.5.a- Principais classificações dos fluxos hiperconcentrados usadas nas pesquisas.

Poucas destas classificações estabelecem os limites entre uma categoria e outra. Entre as primeiras classificações, a de Varnes (1958) virou ponto de referência para a terminologia internacional no estudo destes processos, pois esta permitiu comparar as observações no campo com as experiências de laboratório destes fenômenos. Além disso, este mesmo autor propôs em 1978 a classificação geral mais aceita dos movimentos de massa (ver ANEXO I). Este autor definiu o fluxo de detritos como aquela mistura cuja concentração de material grosso é maior do que 50%. Uma das classificações incipientes em considerar aspectos mais reológicos da interação entre a fase sólida e líquida foi proposta por Lowe em 1979. Este autor classificou os fluxos de detritos segundo o mecanismo de suspensão das partículas sólidas e o comportamento plástico do fluxo segundo o modelo reológico de Bingham que será explicado nas próximas seções.

<b>Autor</b>	<b>Crítérios</b>	<b>Classificação</b>
<b>Davies (1988)</b>	Característica do movimento do fluido.	Corrente com carga de fundo/ carga suspensa. Fluxo fluidizado.
	Granulometria dos sedimentos	Fluxo de lama Fluxo hiperconcentrado Fluxo de detritos
<b>Chou (1991)</b>	Granulometria dos sedimentos	Fluxo detrítico rochosos. Fluxo de lama Fluxo de detritos
	Natureza da força de arraste	Fluxo detrítico potenciado por sólidos. Fluxo detrítico potenciado por fluidos.
<b>Coussot (1992)</b>	Concentração relativa da fração fina	Fluxo detrítico de finos Fluxo detrítico granular
<b>Chen (1999)</b>	Fator de iniciação	Por deslizamentos Por falha de barragens Por erosão Por acréscimo de poro-pressão
<b>Hungr (2001)</b>	Granulometria.	Avalanche de detritos Fluxo de detritos
	Velocidade.	Deslizamento por fluxos de areia. Deslizamento por fluxo de argilas.

Tabela 2.5.b- Principais classificações dos fluxos hiperconcentrados usadas nas pesquisas.

Por outro lado, as experiências chinesas introduziram novas terminologias, considerando fluxo hiperconcentrado como aquele fluxo com cisalhamento medível.

Assim, Takahashi propõe uma classificação onde se considera um maior conhecimento das interações sólido-fluido do fluxo onde pressões dispersivas e forças

viscosas agem segundo a predominância de uma fase sobre a outra. Sob esta perspectiva, o fluxo de detritos é uma mistura de material granular disperso num fluido intersticial de água e argilas ou material mais fino. Então, este fluxo pode ter diferentes mecanismos de dissipar energia segundo a predominância do efeito das colisões entre partículas grossas, densidade e viscosidade do fluido.

O'Brien e Julien desenvolveram experiências de laboratório onde determinavam as concentrações assim como as tensões de escoamento, tensões das forças viscosas, tensões devidas à turbulência e tensões dispersivas devidas às colisões internas das partículas sólidas.

Estes autores determinaram que os fluxos de detritos fossem misturas com grandes concentrações de material clástico grosso, onde as colisões entre estas partículas e as tensões dispersivas são os principais mecanismos de dissipação de energia. Então, definiu-se que os fluxos detríticos granulares sem coesão são subcategorias dos fluxos de detritos onde o atrito e colisões internas são os mecanismos que predominam no fluxo.

Pierson e Costa propuseram uma classificação a mais didática até agora desenvolvida em forma de gráficos bidimensionais como se mostra na FIGURA 2.1.

Nesta proposta os limites A, B e C são dados segundo as propriedades das partículas sólidas numa mistura padrão sem coesão, de granulometria grossa uniforme. O ponto A é o ponto quando aparece a máxima tensão de iniciação de arraste de material, o ponto B é onde se alcança a suspensão estática das partículas sólidas e o início da fluidificação, e o ponto C marca o fim da fluidificação.

Por outra parte, as correntes se comportam como o típico fluido newtoniano a não-newtoniano segundo o aumento das partículas sólidas. Neste caso, os fluxos de correntes hiperconcentradas apresentam concentrações volumétricas de sedimentos entre 20 e 60%, mas apresentam uma baixa tensão de escoamento pelo que são diferenciados de fluxos hiperconcentrados. Maiores detalhes sobre esta classificação serão dados na seguinte seção.

Finalmente, os critérios usados por Coussot (1996) [11] subdividem os fluxos de detritos em dois grandes grupos: *granulares* cuja porção fina ( $\phi < 40 \mu\text{m}$ ) é menor do que 10% da fração total sólida e *de finos* cuja fração fina supera os 10%. Maiores detalhes sobre algumas destas classificações são dados no ANEXO II.

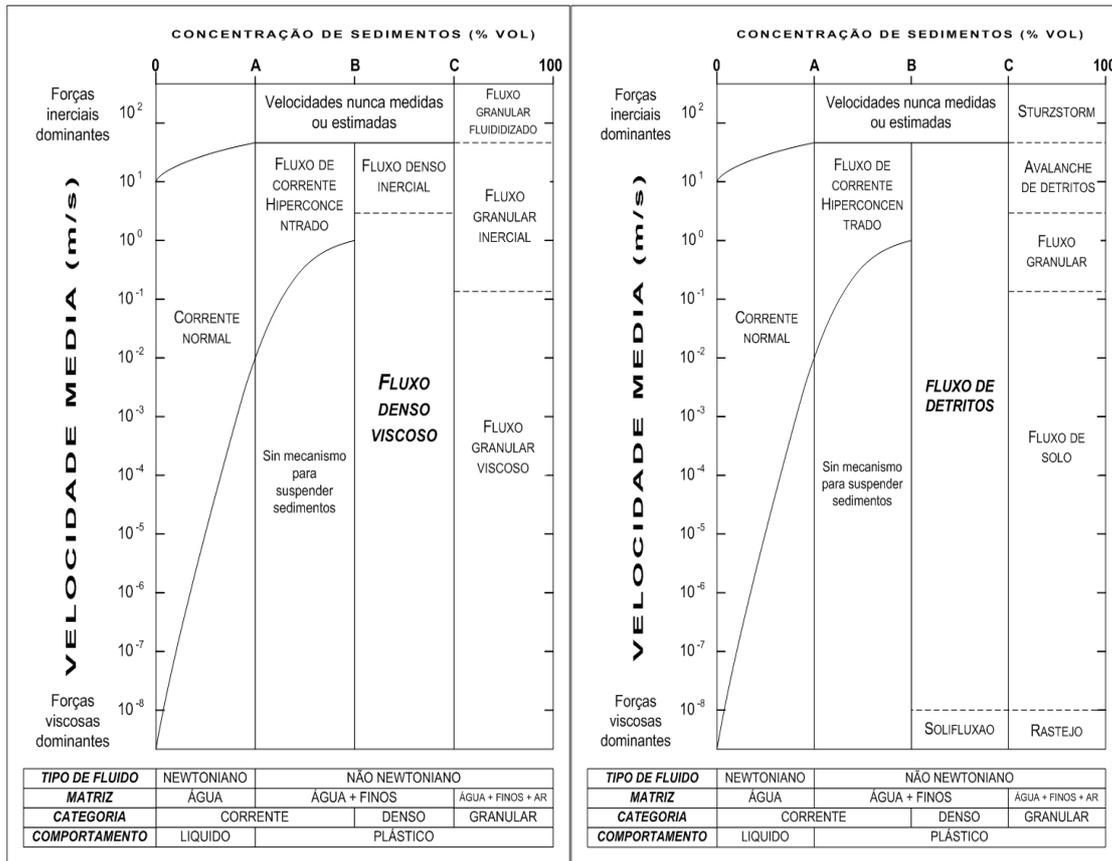


FIGURA 2.1- Classificação reológica de Pierson e Costa (1987) para misturas água-sedimento e sua correlação com terminologias típicas [10].

Tendo conhecimento destes conceitos básicos, destacados pesquisadores têm dado uma definição deste complexo fenômeno, entre os mais aceitos na literatura científica estão:

“O fluxo de detritos é um fluxo gravitacional de solo, rocha e/ou água, iniciado por um deslizamento. Este processo se caracteriza por ter um início, transporte e deposição de todos estes materiais, cujas conseqüências não só são causadas pelo volume e velocidade dos materiais transportados, senão por sua inesperada ocorrência”

H. Chen, 1999

“Os fluxos de detritos são fluxos que variam suas propriedades cinemáticas de muito rápidos a extremamente rápidos de detritos não-plásticos sobre uma encosta inclinada”

Hungr, 2001

“Os fluxos de detritos são massas formadas por misturas de água, sedimentos finos, rocha e detritos originados nas encostas que correm a jusante em canais naturais para se depositarem em vales ou zonas abertas de baixo gradiente. As fortes interações entre a fase sólida e líquida influenciam o comportamento destes fluxos e diferenciam este evento de outros similares como avalanches de rochas e enchentes”

Iverson, 2001

### 2.2.2.

#### **Condições de ocorrência das corridas de massa**

As corridas de massas iniciam sobre encostas inclinadas até se depositarem em bacias abertas durante os períodos posteriores a grandes precipitações. O fluxo se inicia com a movimentação a jusante da encosta de uma frente de grandes blocos seguido pelo corpo e parte final da corrida. A deposição se dará quando a corrida encontre gradientes baixos ou perda de confinamento lateral (espaços amplos) ainda que o fluido continue a jusante em gradientes muito baixos. Os elementos mais importantes da corrida são sua velocidade e espessura, pois estes parâmetros determinam a extensão e severidade dos danos. Tem-se reportado <sup>[9]</sup> fluxos de mais de 5.0 m de espessura a 13.0 m/s, com uma peso específica de 2.5 t/m<sup>3</sup>.

Existe uma combinação crítica de fatores naturais e antropogênicos a qual dá origem ao processo das corridas de massa. Alguns deles não são considerados nas modelagens bidimensionais por limitação dimensional. Alguns como a curvatura da encosta, área de contribuição e estrangulamento do canal de corrida só são significativos e possíveis de considerar nos modelos numéricos e simulações tridimensionais. Os fatores mais reconhecidos e considerados pelos pesquisadores para simulações bidimensionais são:

#### **1. Gradiente ou inclinação da encosta:**

Sabendo que a gravidade é a maior força de arraste na iniciação das corridas de massa, então se identifica que a maior gradiente da encosta maior potencial gravitacional de arraste ou iniciação. Sob este conceito, numa encosta podem se identificar três zonas importantes segundo a estabilidade do material: *zona de ocorrência*, *zona de transporte* e *zona de deposição* (Ver FIGURA 2.2). A zona de ocorrência costuma ter gradientes maiores do que 25°, mas tem-se reportado até gradientes de 15°. Por outro lado, a gradientes maiores o material não se acumula de forma que não existe o fluxo.

As outras zonas se apresentam em gradientes maiores do que 10°. Durante o transporte deve ter confinamento suficiente para manter a velocidade caso contrário não existe fluxo de detritos.

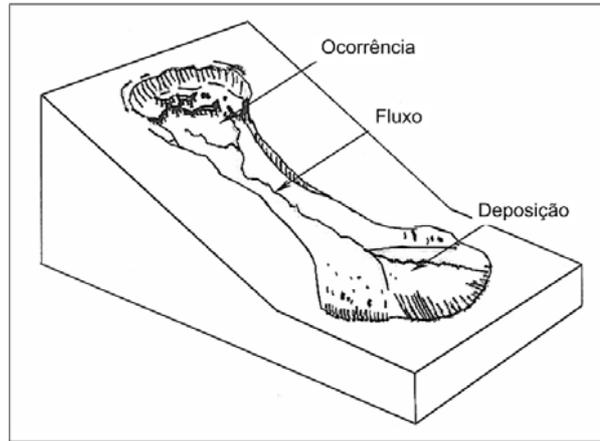


FIGURA 2.2- Partes de uma corrida de massa e sua relação com o gradiente <sup>[9]</sup>.

Ainda que aos 15° começa o depósito das bordas externas da massa e as línguas do material de deposição aparecem após dos 10° quando o gradiente e confinamento são quase nulos. (ver Tabela 2.6 e FIGURA 2.3).

Ângulo	Características do movimento
$20^\circ < \theta$	Ocorrência
$15^\circ < \theta < 20^\circ$	Início do fluxo
$10^\circ < \theta < 15^\circ$	Início de decréscimo da velocidade e continuação do fluxo.
$3^\circ < \theta < 10^\circ$	Diminuição de velocidades e parte frontal pára.
$0^\circ < \theta < 3^\circ$	Deposição

Tabela 2.6- Relação entre o gradiente e características do movimento uma corrida de massa <sup>[12]</sup>.

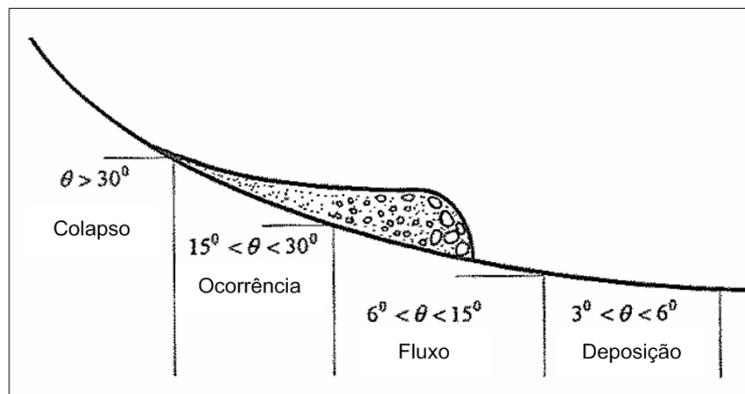


FIGURA 2.3- Caracterização do gradiente e o movimento de uma corrida <sup>[9]</sup>.

### 2. Conteúdo de Água:

Este é o mais importante fator na ocorrência das corridas. Existem três mecanismos de ação mediante os quais a água poderia iniciar uma corrida: precipitação, degelo da neve ou rompimento de uma barragem. O primeiro mecanismo é o principal detonante das corridas, pois o fluxo de água em materiais porosos reduz sua resistência (aumento da poro-pressão), além de servir de meio de transporte ou lubrificador uma vez iniciado o movimento.

### 3. Materiais geológicos:

Para a ocorrência de corridas de massa é importante ter grandes quantidades de material geológico não-consolidado desacomodado. Formações geológicas complexas, falhas e dobras intemperizadas e sujeitas à atividade sísmica, camadas não-consolidadas e encostas instáveis são as fontes primárias para a ocorrência de corridas de massa.

No Brasil, se apresentam freqüentemente em solos residuais ou maciços rochosos altamente fraturados durante vários dias de chuvas contínuas.

Na Costa Rica, por exemplo, as condições mudam drasticamente em relação ao Brasil, pois há predomínio de formações do Quaternário de origem vulcânica recente, alta atividade sísmica com um alto regime de precipitações durante pelo menos nove meses por ano, adicionando a temporada de furacões do Caribe nos meses de setembro até novembro.

Apesar da importância destes fatores, são necessárias três condições para a ocorrência de uma corrida que devem se apresentar simultaneamente <sup>[14], [15], [16], [17]</sup>:

- Colapso do material geológico.
- Saturação do material.
- Potencial para converter energia gravitacional em energia cinética interna para passar da simples ruptura por cisalhamento do material a um estado de deformação mais difusa reconhecida como *fluxo*.

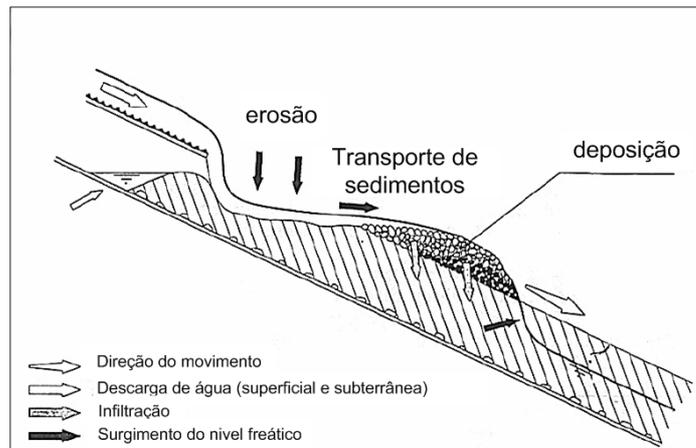


FIGURA 2.4- Processos envolvidos na ocorrência de corridas <sup>[9]</sup>.

Por isso nem todo evento de altas precipitações são indício de ocorrência de corridas de massa. Também, os sismos sob as anteriores condições são eventos de ocorrência.

### 2.2.3.

#### ***Principais feições físicas das corridas de massa***

Uma corrida de massa típica consiste numa série de ondas de material com altas porcentagens de sólidos (argila, silte, areia, areia grossa e blocos) misturadas com uma porcentagem pequena de água. Alguns estudos <sup>[9], [12], [14]</sup> caracterizam estes fluxos com uma densidade entre 1.45 a 2.24 t/m<sup>3</sup>, com uma concentração volumétrica de sedimentos de 0.27 a 0.75, com velocidades entre os 2 a 10 m/s.

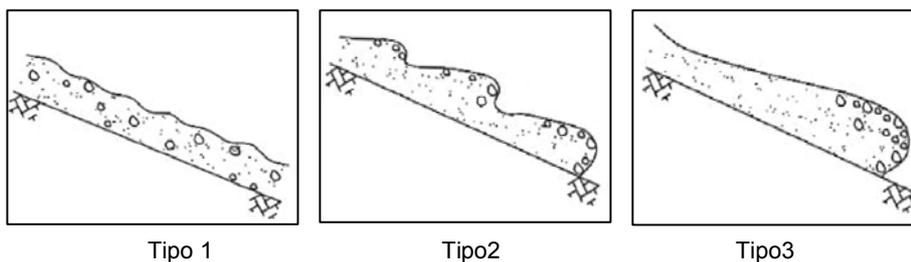
Ante esta variedade, Takahashi (1991) caracteriza três tipos de feições que poderiam ocorrer quando se inicia o movimento destes fluxos:

**Tipo 1** : Baixa densidade, fluxo contínuo.

**Tipo 2**: Alta densidade, fluxo pulsante.

**Tipo 3**: Alta densidade, fluxo de uma só pulsação.

TIPO	1	2	3
<b>Característica do fluxo</b>	Permanente	Pulsante	Um pulso
<b>Tipo de Fluxo</b>	Turbulento	Laminar	Laminar
<b>Granulometria sobre a camada do fundo</b>	Finos	Finos + Grossos	Grossos + Finos
<b>Carga Grossa</b>	No fundo	No corpo	No corpo
<b>Densidade</b>	$\leq 1.6 \text{ t/m}^3$	$\geq 1.8 \text{ t/m}^3$	$\geq 1.8 \text{ t/m}^3$
<b>Viscosidade</b>	$\approx 10\text{-}100 \times \text{água}$	$\geq 1000 \times \text{água}$	$\geq 1000 \times \text{água}$
<b>Velocidade</b>	Baixa: $\approx 2 \text{ m/s}$	Alta: $\approx 3\text{-}5 \text{ m/s}$	Alta
<b>Efeito no fundo</b>	Deposição	Muito Erosivo	Muito Erosivo

Tabela 2.7- Principais características dos diversos tipos de fluxos <sup>[9]</sup>.FIGURA 2.5- Possíveis feições de uma corrida durante sua ocorrência <sup>[12]</sup>.

O fluxo em qualquer destes tipos pode ser dividido taxonomicamente em três partes:

- A **cabeça** composta principalmente por blocos. Apresenta uma protuberância inversa à direção do movimento devido ao fenômeno de gradação inversa que consiste na acumulação de grandes blocos onde existe uma forte tendência a desacelerar pelo qual esta parte aumenta seu volume. Também pode dever-se à inclusão de objetos durante o movimento (pontes, árvores, carros, etc.). Nesta seção, há um decréscimo da pressão intragranular chegando a ser nula no fundo da parte frontal e máxima na parte traseira, pois existe uma perda de conteúdo de água.
- O **corpo** composto de grande variedade de detritos numa matriz mais ou menos viscosa.
- O **final** ou **rabo** cuja influência é desprezível nos parâmetros característicos da corrida.

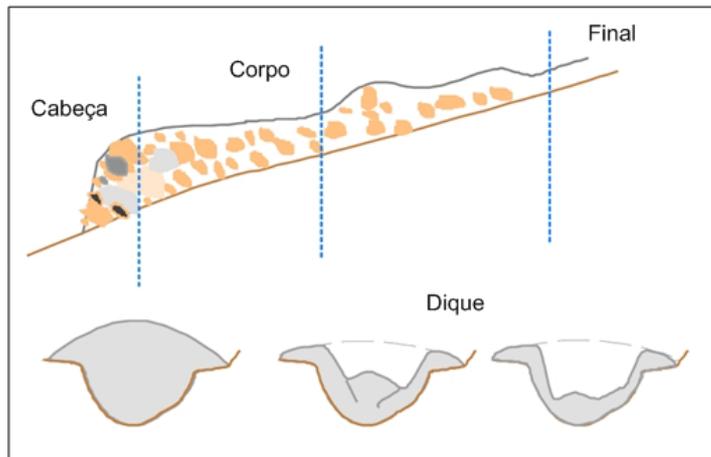


FIGURA 2.6- Taxonomia de uma corrida de massa [19].

A influência da cabeça vai decrescendo significativamente conforme se desenvolve o movimento pelo que é considerado desprezível. Assim, o comportamento do fluxo é tipificado principalmente pelas características do corpo. Vale remarcar que estas duas partes se comportam como corpos plásticos enquanto o final se comporta como um líquido [11].

**2.2.4. Características das corridas de massa**

Segundo observações feitas no campo tanto quanto no laboratório, as principais características de uma corrida de massa que a diferenciam dos outros fenômenos são:

PROPRIEDADE	SIMBOLOGIA	VALORES TÍPICOS
<b>PARTÍCULAS SÓLIDAS</b>		
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$	2500 - 3000
Diâmetro meio (m)	$\delta$	10 <sup>-5</sup> - 10
Ângulo de Atrito (°)	$\phi_s$	25 - 45
Coef. de restituição	e	0.1 - 0.5
<b>FLUIDO INTERSTICIAL</b>		
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$	1000 - 1200
Viscosidade (Pa.s)	$\mu$	0.001 - 0.1
<b>MISTURA</b>		
Volume fração sólida	$V_s$	0.4 - 0.8
Volume fração líquida	$V_f$	0.2 - 0.6
Permeabilidade (m/s)	K	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-2</sup>
Permeabilidade intríns. (m <sup>2</sup> )	$\kappa$	10 <sup>-13</sup> - 10 <sup>-9</sup>
Módulo Elástico (Pa)	E	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>
Ângulo de Atrito (°)	$\phi$	25 - 45

Tabela 2.8- Valores típicos das propriedades básicas das corridas de massa [14].

**2.2.4.1. Tamanho das partículas sólidas**

A fase sólida varia desde silte até grandes blocos. Assim, quando silte e argila são misturados com água se forma um fluxo viscoplástico chamado às vezes de fluxo fluido (slurry). Se for adicionado areia, então se fala de fluxo de lama (muddy) ou se forem fragmentos de rocha (debris). Nestes casos o comportamento do fluxo pode apresentar um comportamento de fluxo dispersivo ou dilatante como se explica mais na frente. Durante sua trajetória, este tipo de fluxo age com seu ambiente continuamente, seja pela erosão (adição de material) ou por processos de deposição (perda de material) de forma que a análise granulométrica não é simples e às vezes nem representativa. Uma outra dificuldade é que ao variar a concentração volumétrica de sólidos, varia o comportamento reológico do fluxo durante o movimento.

Um outro aspecto relacionado ao movimento destes fluxos e sua granulometria é o fato de que devido às colisões entre partículas e atrito interno, as mesmas partículas tendem a diminuir de tamanho de forma exponencial durante o movimento [7]. Baseados no estudo detalhado de grande variedade de corridas dois pesquisadores, Znamensky e Gramani (2000), propuseram a seguinte classificação:

CLASSE	INTERVALO			
	de		até	
	d (mm)	Descrição	d (mm)	Descrição
<b>Micro (µm)</b>	0.00024	Argila muito fina	0.062	Areia muito fina
<b>Meso (mm)</b>	0.0062	Areia muito fina	16	Pedregulhos
<b>Macro (m)</b>	16	Pedregulhos	4000	Matacões

Tabela 2.9- Classificação da fração sólida das corridas de massa proposta por Znamensky e Gramani [7].

Alguns estudos na Itália [18] têm caracterizado as partes do fluxo por sua granulometria.

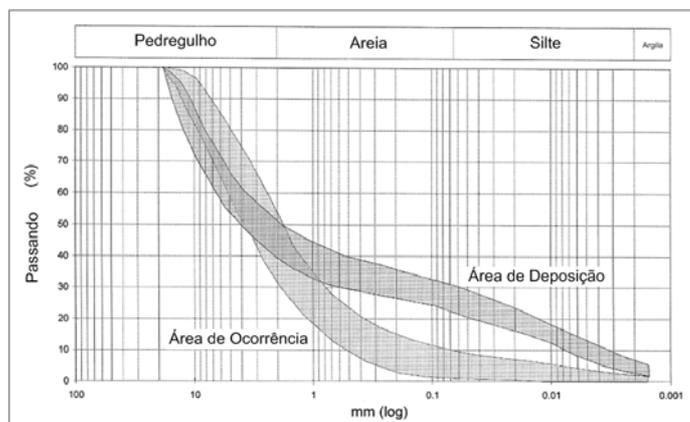


FIGURA 2.7- Granulometria típica de uma corrida de detritos [18].

#### 2.2.4.2. Movimento interno de partículas

Mediante observações de laboratório, uso de traçadores, e comprovações numéricas os pesquisadores têm determinado que o movimento interno das partículas dentro da massa de uma corrida se caracteriza por um movimento caótico no final do fluxo. Caso contrário ao das partículas do corpo que mostram só pequenas ou nenhuma perturbação. A maioria das partículas apresenta um movimento à jusante da encosta, só alguns grãos da camada em contacto com a superfície apresentam certos desvios a montante.

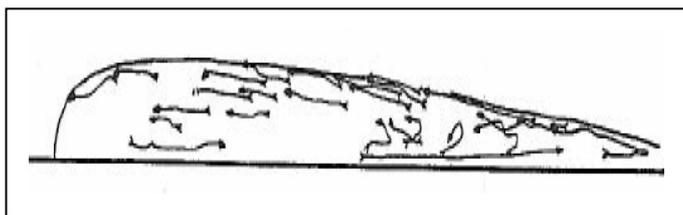


FIGURA 2.8- Movimentos internos das partículas dentro do corpo de uma corrida <sup>[9]</sup>.

#### 2.2.4.3. Perfil de velocidades e espessuras

Velocidades típicas vão desde 0.5 m/s até 20 m/s devido à variação do tamanho das partículas sólidas <sup>[16]</sup>, da concentração de sedimentos, do gradiente, estreitamento e curvatura da trajetória do fluxo.

De forma geral, diz-se que a velocidade no final é maior do que na região do corpo do fluxo e que a velocidade é maior na superfície do fluxo do que no contato com a superfície da trajetória. O máximo gradiente está presente no fundo enquanto que os gradientes são quase uniformes perto da superfície.

A espessura é variável no fluxo, mas a tendência é de diminuir da cabeça ao final. A espessura média característica do fluxo determina-se na parte central do corpo quando o fluxo tem-se depositado (desconsideram-se os grandes blocos isolados). Têm-se reportado espessuras acima dos cinco metros. A espessura durante a corrida pode ser determinada aproximadamente no campo por observação direta das bordas da trajetória sendo muito especulativo quanto maior tenha sido a porcentagem de finos carregados.

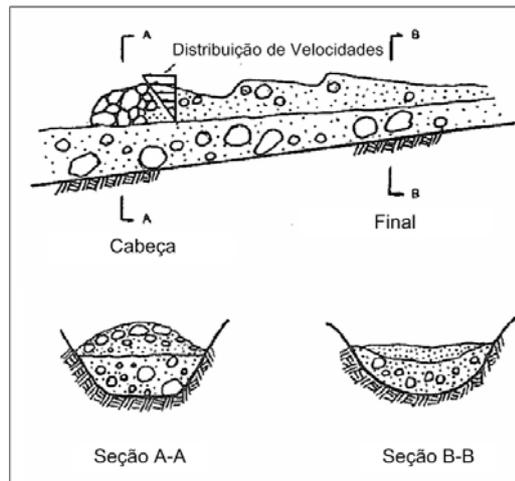


FIGURA 2.9- Caracterização do perfil de velocidade e espessura de um fluxo <sup>[9]</sup>.

**2.2.4.4. Distribuição da concentração de sedimentos**

De forma geral, dentro do corpo do fluxo pode-se identificar uma baixa concentração de sedimentos no fundo e na superfície. O coração do corpo apresenta uma maior concentração de sedimentos com um decréscimo a meia espessura da cabeça ao final do fluxo. Fica clara a complexidade espacial e temporal deste parâmetro na caracterização do movimento do fluxo de forma que seu estudo deve ser mais detalhado para se conseguir modelagens mais realistas.

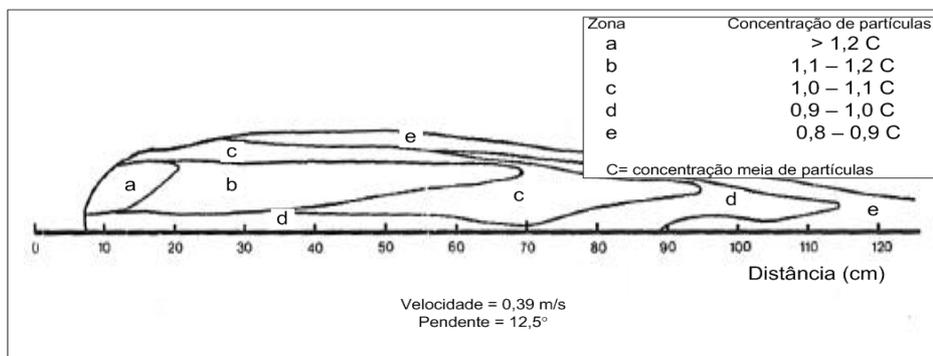


FIGURA 2.10- Distribuição da concentração de sólidos no corpo do fluxo <sup>[9]</sup>.

**2.2.4.5. Zonas de tensões cisalhantes**

Existem três zonas diferenciáveis dentro do fluxo: cabeça, corpo e final. A parte superior da cabeça e do corpo apresentam uma velocidade próxima à velocidade média e os grãos cisalham-se um sobre o outro lentamente. Na parte inferior destas zonas se desenvolve uma força de cisalhamento muito grande. Enquanto ao final esta é uma zona de comportamento similar a um líquido, onde os grãos são cisalhados rapidamente apresentando gradientes de velocidades muito altos.

Na etapa inicial do movimento a densidade é similar à de um líquido. Conforme o movimento se desenvolve as interações das partículas sólidas mudam este comportamento totalmente até desacelerar. Quando se produz a deposição, a água se filtra do esqueleto do material transportado.

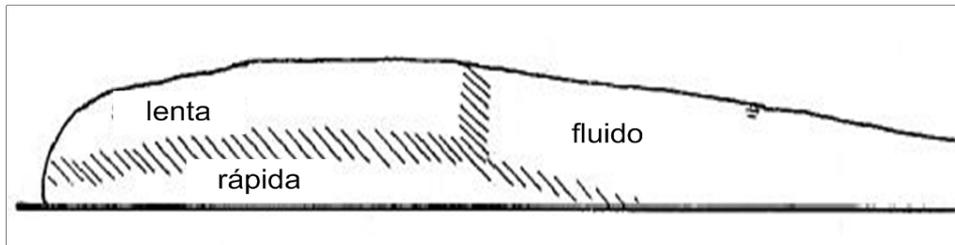


FIGURA 2.11- Caracterização da taxa de cisalhamento dentro do corpo do fluxo <sup>[9]</sup>.

#### 2.2.4.6. Forças internas

As corridas de massa são misturas de areia grossa e água, cujas partículas sólidas colidem, roçam, rodam e até vibram dentro da matriz líquida durante o movimento. Dito comportamento faz com que estes processos tenham um comportamento não-newtoniano.

Assim, as forças que agem são tanto externas como internas. Entre as externas temos a pressão estática, gravidade, força de Arquimedes e a força de cisalhamento na base. Por outro lado, as forças internas são as forças de arraste produto das colisões e atrito entre partículas, viscosidade e turbulência. Como se pode notar, as características dinâmicas das corridas são complexas e envolvem tanto a parte sólida como líquida e suas interações. Esta qualidade faz com que a mecânica convencional fique longe de uma análise realista. É por isso que modelar matematicamente o comportamento completo de uma corrida é difícil. Os modelos existentes resolvem o problema descartando as interações menos dominantes do comportamento e considerando somente aquelas dominantes como se mostra nos modelos das próximas seções.

#### 2.2.4.7. Outros fatores de consideração

Para realizar modelagens das corridas existem outras propriedades que deveriam ser consideradas na análise:

- *Dilatação*: O movimento cisalhante entre grãos sob uma tensão normal faz a massa aumentar de volume.

- **Fluidificação:** A camada inferior em contato com a superfície está estática, mas conforme evolui o fluxo esta capa se satura adquirindo um comportamento semifluido reduzindo o atrito e coesão interna, isto é, as forças por gradiente de pressão anulam as forças gravitacionais. Este comportamento também depende da velocidade da corrente fluida que satura dita camada.
- **Segregação:** O fluxo por sua maior influência das forças gravitacionais apresenta uma gradação de partículas grossas no fundo a partículas menores no topo (gradação direta). O processo inverso também se apresenta (gradação inversa) principalmente na cabeça do fluxo. (ver FIGURA 2.13). Este fenômeno não tem sido estudado com detalhe, principalmente as causas fundamentais que o ocasionam.

Antes de entrar na descrição dos principais modelos reológicos usados na modelagem das corridas, explicam-se alguns conceitos básicos sobre eficiência energética das corridas, pois sem este mecanismo seria pouco provável o movimento do fluxo, além de que os mecanismos de transferência diferem dos encontrados em líquidos puros.

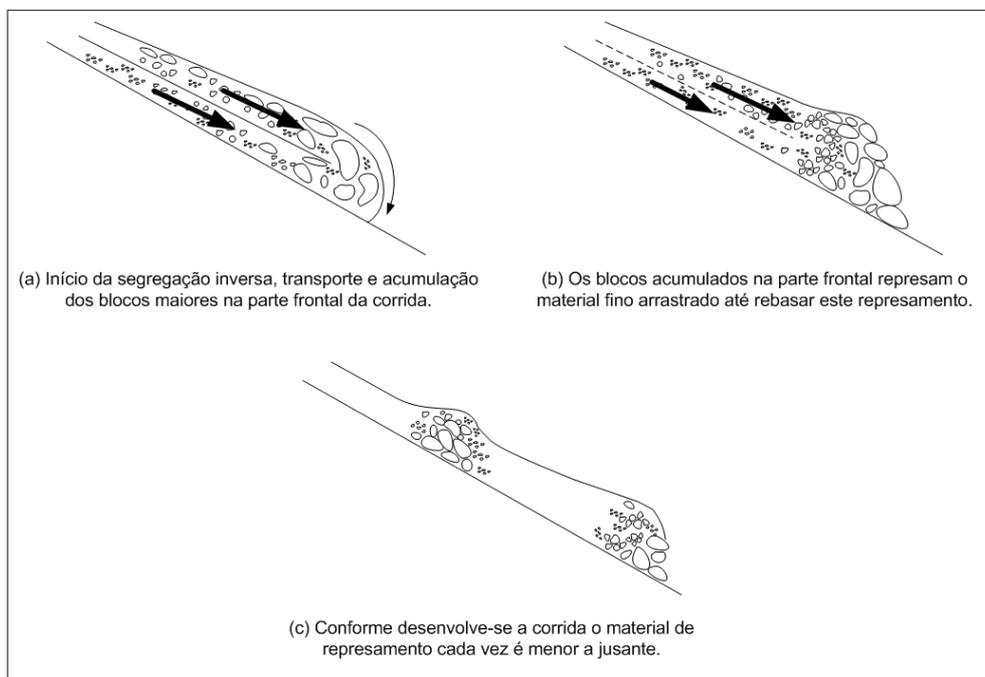


FIGURA 2.12- Efeitos da gradação direta e inversa no desenvolvimento do movimento fluxo de detritos <sup>[9]</sup>.

## 2.2.5.

### **Modelos reológicos das corridas de massa**

#### 2.2.5.1. Eficiência energética nas corridas de massa

Sabe-se que num fluxo com partículas elásticas e de superfície lisa numa matriz líquida as forças viscosas são as responsáveis por diminuir a energia cinética e consequentemente o deslocamento total da massa. Pelo contrário, nas corridas de massa (com partículas irregulares e inelásticas) ainda que as forças viscosas dissipem energia, se incrementa o deslocamento total da massa. Para isto, Iverson (1997) <sup>[14]</sup> estudou as transferências energéticas no movimento de uma corrida de massa.

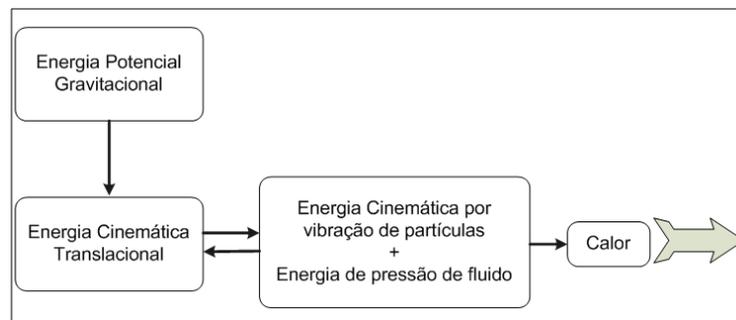


FIGURA 2.13- Transferência de energia de uma corrida de massa <sup>[14]</sup> .

Integrando as equações básicas de conservação energia no centro de massa do fluxo antes e após do movimento, tem-se que a energia potencial inicial dada por  $MgH$  pode ser comparada com a energia dissipada na trajetória horizontal  $L$  do fluxo que é equivalente às forças resistivas dadas por  $MgR$ :

$$MgH = MgRL \quad (2.2)$$

Assim, da anterior relação podemos determinar que:

$$R = \frac{H}{L} = \tan \alpha \quad (2.3)$$

Medições de campo dos parâmetros  $H$  e  $L$  têm mostrado <sup>[14]</sup> as seguintes relações:

- Os valores de  $L/H$  são maiores para fluxos com maior conteúdo de água do que dos fluxos granulares ou similares.
- Corridas a grande escala são mais eficientes do que as de pequena escala.
- $L/H$  depende da geometria da trajetória e as condições de fronteira do leito (existência de erosão ou sedimentação).
- Para volumes maiores do que  $10^5 \text{ m}^3$ ,  $L/H$  aumenta mais ou menos proporcionalmente ao logaritmo do volume. Mas para volumes menores o valor fica entre 2 e 4.

Pela equação (2.3),  $L/H$  independe da massa, mas observações no campo e laboratório contradizem este fato. Maiores pesquisas devem ser feitas para determinar o tipo de relação entre  $R$  e a densidade específica do fluido.

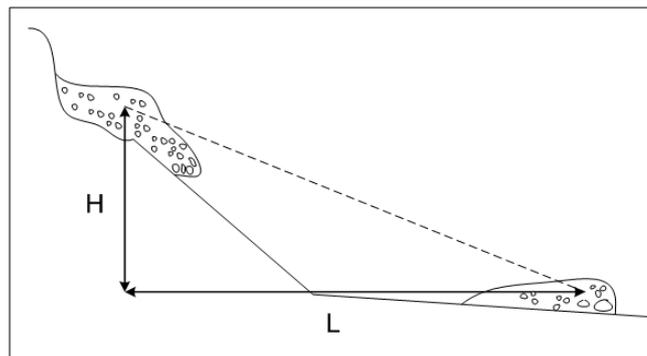


FIGURA 2.14. Diagrama de relação com início e deposição da corrida de massa na determinação da transferência de energia.

Para grandes eventos ( $\text{km}^3$ ),  $L/H$  mostrou ser igual ou menor do que 0,1 <sup>[20]</sup>. Estes tipos de eventos se têm registrado também no fundo marinho, na superfície da Lua e Marte.

Algumas medições deste parâmetro já foram feitas no Brasil <sup>[21]</sup> para eventos da Serra do Mar, entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro (ver FIGURA 2.15). Estes autores analisaram principalmente os fluxos de detritos em solos residuais, para os quais obtiveram a relação de  $L/H = 1.8 V^{0.15}$ . Este tipo de relações são uma tentativa qualitativa para caracterizar estes fenômenos devido ao complexo de sua dinâmica.

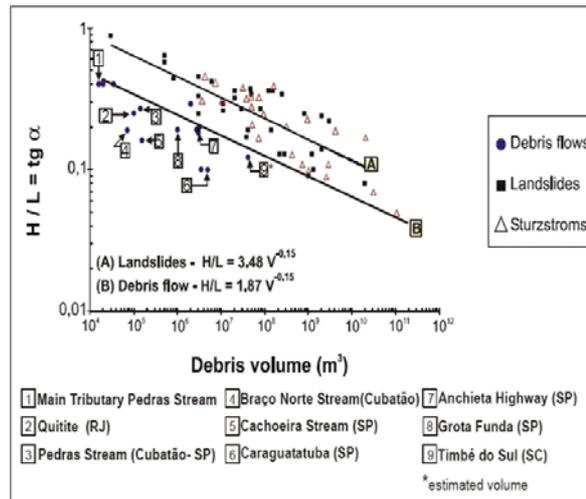


FIGURA 2.15. Relação H/L versus volume para corridas de massa ocorridas na Serra do Mar, SP-RJ, Brasil <sup>[21]</sup>.

2.2.5.2. Alguns modelos reológicos para corridas de massa

Uma equação reológica ou constitutiva na mecânica de fluidos é aquela que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação cisalhante. Para as corridas de massa existem muitos autores que já propuseram uma equação relativamente adequada, pois se sabe que a presença da grande variedade de tamanhos e formas das partículas sólidas dificulta a descrição do fluxo com uma só lei constitutiva. Além de disso, uma grande maioria dos modelos até hoje desenvolvidos são bidimensionais e cada modelo tem sua própria limitação teórica.

As principais feições a serem consideradas na determinação de uma relação reológica para as corridas de massa são: viscosidade do fluido intersticial, turbulência, atrito e colisões interpartículas. Assim vários autores têm tentado agrupar as diferentes categorias de regimes. Uma delas é mostrada na Tabela 2.10. Maiores detalhes destes modelos são apresentados no ANEXO III.

REGIME	FLUXO DETRÍTICO	EFEITOS
1. FRICCIÓNARIO 2. COLISIONAR 3. FRICCIÓNARIO-COLISIONAR	Granular	- Fluido intersticial desprezível. - Iterações granulares dominam
4. MACROVISCOSO 5. VISCOPLÁSTICO	Finos	- Fluido intersticial domina. - Iterações granulares desprezíveis
6. VISCOPLÁSTICO COLISIONAR	Blocos	- Dominam iterações fluido - partícula.

Tabela 2.10- Classificação qualitativa dos fluxos detríticos por Jan e Shen (1997) <sup>[7]</sup>.

De forma geral, estes modelos podem se agrupar em três grandes grupos descritos por Laigle e Coussot (1997):

1. **Modelo de fluxo granular** onde predomina a inércia dos grãos. O modelo de Bagnold tem sido a referência deste grupo.

2. **Modelos de fluxos viscoplásticos** onde os efeitos inerciais dos grãos perdem importância. O modelo de Bingham é o mais conhecido.

3. **Modelos dissipativos** onde são consideradas tensões devidas à viscosidade entre as partículas sólidas e o fluido, assim como as tensões dispersivas e produto da turbulência.

Assim, nos fluxos hiperconcentrados a tensão cisalhante  $\tau$  vem dada por:

$$\tau = \tau_{MC} + \tau_C + \tau_\mu + \tau_T + \tau_D \quad (2.4)$$

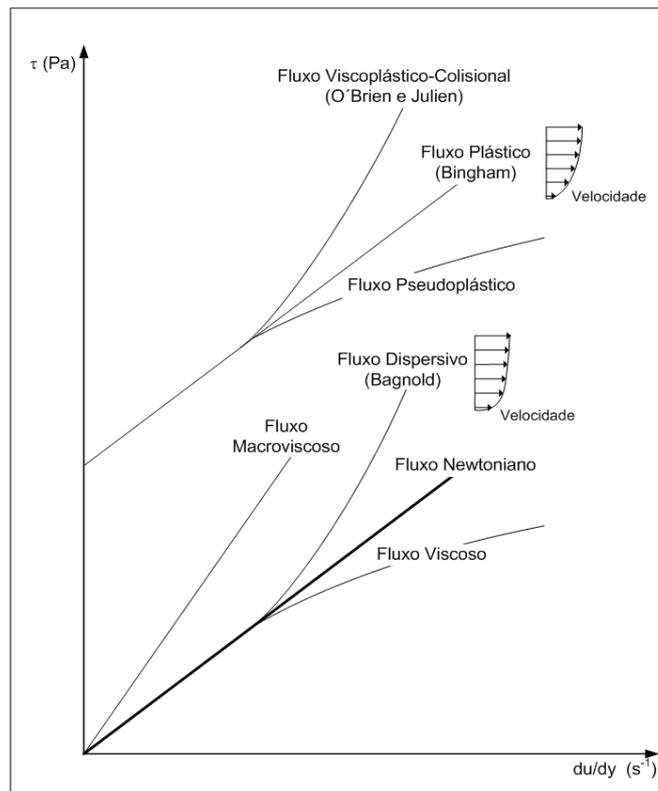


FIGURA 2.16. Reogramas característicos de alguns modelos reológicos para a modelagem de corridas de massa [7].

Da equação (2.4), de forma geral, derivam a maioria dos modelos reológicos. Talvez o modelo mais conhecido seja aquele que descreve o regime friccional, pois é de múltiplas aplicações em outras áreas relacionadas com resistência dos materiais.

### 1. Modelo Mohr–Coulomb

Este modelo é usado para prever distribuição de tensões e velocidades de certos experimentos de laboratório com material granular, mas para qualquer outra situação não é recomendado. É dado por:

$$\tau_y = c + \sigma \tan(\phi) \quad (2.5)$$

Onde os parâmetros  $c$  e  $\phi$  são os mesmos definidos na Mecânica de Solos, e  $\sigma$  é a tensão vertical aplicada sobre o ponto de estudo no fundo do corpo do fluxo.

### 2. Modelo Dispersivo ou Dilatante (Modelo de Bagnold)

Bagnold (1954) <sup>[22]</sup> pesquisou a relação entre a taxa de deformação e a tensão cisalhante de uma mistura de partículas em um fluido newtoniano dentro de um cilindro rotativo. Na sua formulação ele assume colisões elásticas de forma que não há dissipação de energia. Este fato não concorda com o que realmente acontece com uma corrida de massa. Ele determinou a existência de uma região de predomínio inercial e uma outra macro-viscosa. Para taxas altas de cisalhamento ele determinou que a tensão pudesse ser atribuída pelo atrito e colisões entre partículas. No domínio inercial, tanto a tensão normal como de cisalhamento dependem da taxa de deformação de segunda ordem.

Muitas relações têm sido propostas para este comportamento, mas a fórmula mais reconhecida é:

$$\sigma = P \tan \phi_D \quad (2.6)$$

$$\tau = M \cdot \cos \phi_D \cdot \lambda \cdot f(\lambda) \cdot \rho_s \cdot d_s^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 = f(C) \rho_s \cdot d_s^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (2.7)$$

Bagnold definiu  $N_{BAG}$  (Número de Bagnold) como um parâmetro de classificação do fluxo. Este número representa a taxa entre as forças inerciais e as viscosas.

$$N_{BAG} = \frac{\rho_s \lambda^2 d_s^2}{\mu} \left( \frac{du}{dy} \right) \quad (2.8)$$

Com:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{C_*}{C_V} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Bagnold determinou que se  $N_{BAG} < 40$  o fluxo estava no regime macroviscoso (dependência linear das tensões respeito ao gradiente de velocidade), e se  $N_{BAG} > 450$  então o fluxo tem predomínio das forças inerciais (regime friccional). Também identificou a zona intermediária e chamou de *zona de transição*. A equação (2.8) também já foi verificada para  $N_{BAG} \geq 450$  e  $0.14 \leq C_V \leq 0.60$  ou  $1.4 \leq \lambda \leq 14$ .

### 3. Modelo Viscoplastico (Modelo de Bingham)

Este modelo está dado pela equação:

$$\tau = \tau_y + \mu_B \left( \frac{du}{dy} \right) \quad \text{para } \tau > \tau_y \quad (2.10)$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \text{para } \tau < \tau_y$$

Sob gradientes baixos este modelo consegue descrever o comportamento de fluxo tipo “slurry” de silte e argilas com alguma porcentagem de areia. Este modelo tem sido popular por modelar o comportamento de fluxos de lama e fluxos detríticos de lama viscosos.

### 3. Modelo Viscoplastico-colisionar (Modelo de O’Brien e Julien)

Estes autores (1997) propuseram um modelo quadrático dado por:

$$\tau = \tau_y + \mu \left( \frac{du}{dy} \right) + \zeta \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (2.11)$$

Onde:

$$\tau_y = \tau_{MC} + \tau_c \quad (2.12)$$

$$\zeta = \mu_c + \mu_T = a \rho_s \lambda^2 d_s^2 + \rho_m l_m^2 \quad (2.13)$$

$$\rho_m = \rho_f (1 - C_V) + \rho_s C_V \quad (2.14)$$

Na equação (2.11), o termo  $\tau_y$  é assumido como uma propriedade do material que não depende da taxa de deformação. O segundo termo descreve as tensões viscosas que agem com as partículas sólidas. O último termo caracteriza as tensões dispersivas e turbulentas induzidas pelas colisões entre partículas. O propósito de juntar estes dois efeitos é ressaltar o fato de que a altas concentrações de partículas grossas as tensões dispersivas serão dominantes, enquanto que a grandes concentrações de finos as tensões viscosas superarão as tensões turbulentas. Para usar esta relação três requerimentos simultâneos são necessários:

- O fluxo tem alta concentração de sedimentos, tipicamente  $C_V > 0.5$ .
- Altos gradientes de velocidade, tipicamente excedem 10 1/s.
- Uma boa quantidade de sedimentos grossos, aproximadamente com dimensões maiores do que 5% da espessura do fluxo.

Por outro lado, Savage & Hutter (1989) <sup>[17]</sup> propuseram uma teoria para fluxos granulares gravitacionais mediante análise adimensional, com a qual foi proposto um parâmetro que caracteriza a relação entre o atrito e o peso das partículas (Usando a simbologia da Tabela 2.9):

$$N_{SAV} = \frac{\rho_s \dot{\gamma} d_s^2}{(\rho_s - \rho_f)gh} \quad (2.15)$$

Se  $N_{SAV} > 0.1/\tan\phi$  os efeitos das colisões têm maior influência e se  $N_{SAV} < 0.01/\tan\phi$  dominam os efeitos do atrito. Por outro lado, considerando o parâmetro descrito pela equação (2.8), se  $N_{BAG} < 40$  o fluxo está no regime macroviscoso (dependência linear das tensões respeito ao gradiente de velocidade), e se  $N_{BAG} > 450$  então o fluxo tem predomínio das forças inerciais (regime friccional).

Iverson e LaHusen (1993) <sup>[15]</sup> propuseram um outro parâmetro para avaliar as tensões por atrito das viscosas:

$$N_{FRIC} = \frac{N_{BAG}}{N_{SAV}} = \frac{V_s (\rho_s - \rho_f)gh \tan\phi}{(1 - V_s) \dot{\gamma} \mu} \quad (2.16)$$

Onde se  $N_{FRIC} > 1000$  tem predomínio das forças de atrito, caso contrário, as forças viscosas dominam.

Um outro parâmetro usado é aquele que mede a tendência da poro-pressão do fluido originada pelo movimento das partículas ao reduzir o contato entre elas:

$$N_{DAR} = \frac{\mu}{V_s \rho_s \gamma k} \quad (2.17)$$

Assim, um sistema de classificação de corridas de detritos surge em combinação com alguns destes parâmetros como se mostra na FIGURA 2.17.

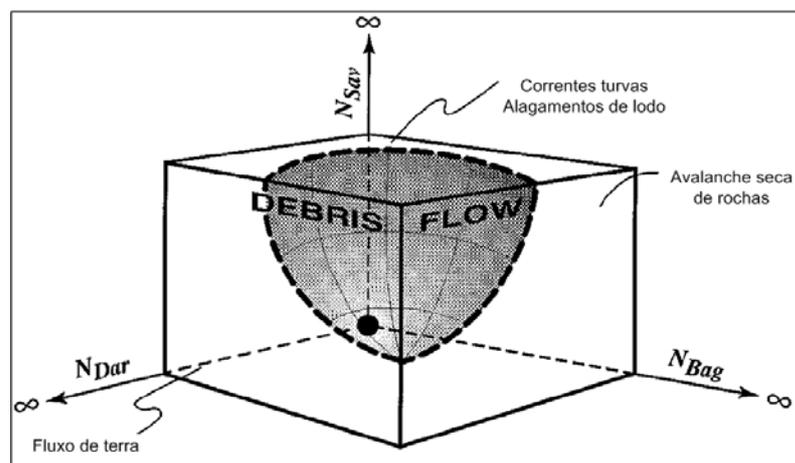


FIGURA 2.17. Reogramas característicos de alguns modelos reológicos para a modelagem de corridas de massa <sup>[14]</sup>.

Existem outros modelos mais complexos, mas não representam totalmente o fenômeno. Destaca-se o modelo multicamada de Takahashi (1997) <sup>[12]</sup> que analisa a corrida como se fosse composta por duas camadas de fluxo permanente obtendo-se perfis uniformes de velocidade para cada uma delas. Neste modelo, a camada inferior é dominada pelos efeitos das colisões entre partículas enquanto que a camada superior tem predomínio dos efeitos da turbulência.

Os modelos até agora disponíveis incluem parâmetros físicos que, às vezes, são de difícil determinação tanto no campo quanto no laboratório. Alguns pesquisadores procuram encontrar relações entre parâmetros mensuráveis entre estes modelos. Existem algumas correlações da mecânica e reologia dos fluxos (viscosidade,

gradiente de velocidades, etc.) e a cinemática (velocidade, rigidez, dissipador, etc.) e hidrodinâmica (vazão, longitude de dispersão, vazão, etc.) de partículas. Este ponto será discutido em maior detalhe no capítulo seguinte.

Lee (1994) <sup>[9]</sup> propôs relações para a tensão cisalhante basal ( $\tau_b$ ) e a velocidade média do fluxo ( $\bar{u}$ ), levando em conta a reologia do fluxo assim como o peso dos parâmetros reológicos na determinação da tensão. Os detalhes se mostram na Tabela 2.11 (ver ANEXO III).

Modelo Reológico	Tensão basal $\tau_b$
<b>Friccionário</b>	$\tau_b = c + \sigma \tan \phi$
<b>Colisionar</b>	$\tau_b = \frac{25}{4} \frac{\alpha}{h} \bar{u}^2$
<b>Friccionário-Colisionar</b>	$\tau_b = \tau_y + \frac{9}{4} \cdot \frac{\alpha}{h} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{2H}{5h}\right)^2} \bar{u}^2$
<b>Macroviscoso</b>	$\tau_b = 3 \frac{\mu_m}{h} \bar{u}$
<b>Viscoplástico</b>	$\tau_b = \tau_y + \frac{\mu}{H} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} - \frac{H}{6h}\right)^2} \bar{u}$
<b>Viscoplástico colisionar</b>	$\tau_b = c \cos \phi + p \sin \phi + \mu_1 \left( \frac{\left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\eta H}{2\eta + 1}\right) h\right) H} \right) \bar{u}^\eta$

H= espessura do fluxo sem considerar camada turbulenta.

Tabela 2.11- Relação cinemática com as propriedades reológicas do fluxo propostas por Lee (1994) <sup>[9]</sup>.