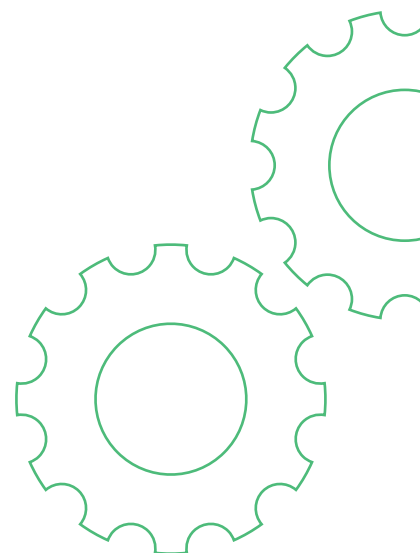




COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE ENCOSTAS

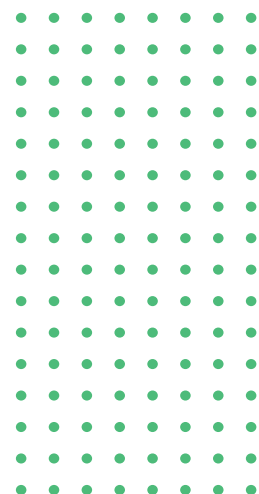
Eixo 4

Desenvolvimento Rural



SÉRIE DE CADERNOS TÉCNICOS

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE ENCOSTAS



AUTOR

Eng. Civ. Rodrigo Moraes da Silveira

EXPEDIENTE

Conselho Regional de Engenharia e
Agronomia do Paraná – Crea-PR

Gestão 2024 - 2026

Presidente

Engenheiro Agrônomo Clodomir Luiz Ascari

Diretoria:

Vice-Presidente

Eng. Civ. Margolaine Giacchini

1º Diretor Administrativo

Eng. Civ. Decarlos Manfrin

2º Diretor Administrativo

Eng. Agr. Orley Jayr Lopes

1º Diretor Secretário

Eng. Eletric. Ricardo Bertoncello

2º Diretor Secretário

Eng. Civ. Rafael Erico Kalluf Pussoli

3º Diretor Secretário

Eng. Mec. Carlos Alberto Bueno Rego

1º Diretor Financeiro

Eng. Eletric. Fernando Felice

2º Diretor Financeiro

Eng. Seg. Trab. Vergínio Luiz Stangherlin

Coordenador dos Cadernos Técnicos:

Adm. Claudemir Marcos Prattes – Gerente do
Departamento de Relações Institucionais

Revisores Técnicos:

Geóg. Aline Fonseca Shtorache – Agente
Administrativa

Geóg. Omar Henrique Refondini Correia –
Agente Administrativo

Equipe Organizadora:

Eng. Agr. Ana Paula Afinovicz – Gerente
Regional Ponta Grossa

Eng. Civ. Diogo Artur Tocacelli Colella –
Gerente Regional Pato Branco

Eng. Eletric. Edgar Matsuo Tsuzuki – Gerente
Regional Londrina

Eng. Agr. Eduardo Ramires – Gerente
Regional Curitiba

Eng. Civ. Geraldo Canci – Gerente Regional
Cascavel

Eng. Civ. Hélio Xavier da Silva Filho – Gerente
Regional Maringá

Eng. Civ. Jeferson Antonio Ubiali – Gerente
Regional Apucarana

Eng. Eletric. Thyago Giroldo Nalim – Gerente
Regional Guarapuava

Assessoria de Comunicação:

Jornalista Responsável: Mariza Fernanda
Medeiros Vieira da Cunha

Contato

Departamento de Relações Institucionais
dri@crea-pr.org.br

APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresento os Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar do Crea-PR, uma iniciativa inovadora e essencial para fortalecer a gestão pública no nosso estado. Como Presidente do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná, tenho a honra de compartilhar com vocês estes documentos que são frutos de um trabalho dedicado e colaborativo de nossos profissionais das Engenharias, Agronomia e Geociências.

Os Cadernos Técnicos foram concebidos com o propósito de fornecer informações técnicas, orientações práticas e recomendações fundamentadas, que visam apoiar os gestores públicos na formulação e implementação de políticas públicas eficazes e inovadoras. Estes documentos oferecem uma visão abrangente e detalhada sobre diversos temas cruciais para o desenvolvimento sustentável e a melhoria dos serviços públicos em nossos municípios e estado.

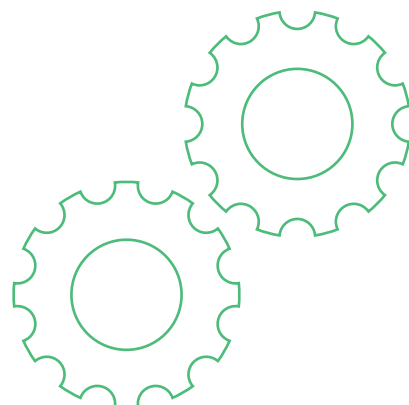
A importância dos Cadernos Técnicos reside em sua capacidade de transformar conhecimento especializado em ações concretas e eficientes. Eles são ferramentas estratégicas que permitem aos gestores públicos tomar decisões fundamentadas, baseadas em diagnósticos precisos e melhores práticas. Ao incorporar essas orientações nas plataformas de governo e planos plurianuais de gestão, os gestores têm à sua disposição um guia robusto para enfrentar os desafios diários e promover o desenvolvimento regional de maneira integrada e sustentável.

Nosso compromisso, enquanto Conselho, é contribuir de forma contínua e efetiva para a capacitação e valorização dos servidores públicos, bem como para o aprimoramento das políticas públicas. Por meio dos Cadernos Técnicos, oferecemos suporte técnico de alta qualidade, refletindo nosso empenho em colaborar com a gestão pública na busca por soluções inovadoras e sustentáveis.

Agradeço a todos os profissionais que se dedicaram à elaboração destes documentos e reafirmo nosso compromisso com a excelência e a inovação. Que os Cadernos Técnicos sirvam como uma fonte de conhecimento e inspiração, auxiliando gestores públicos em sua missão de promover o bem-estar e o progresso de nossas comunidades.

Cordialmente,

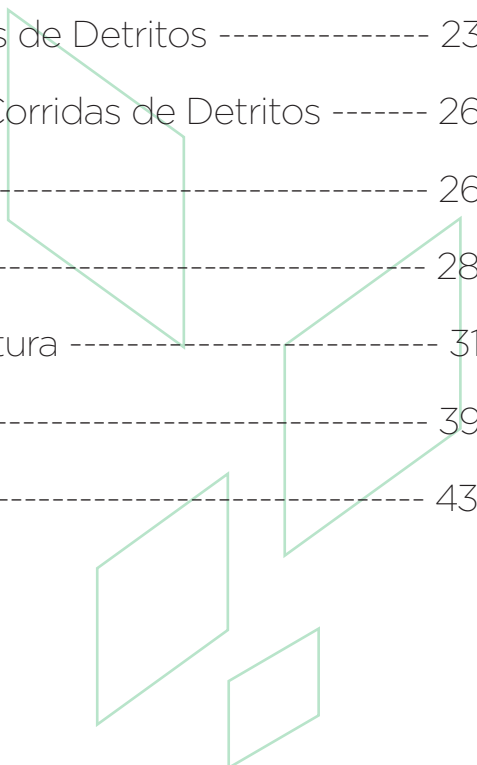
Engenheiro Agrônomo Clodomir Luiz Ascari
Presidente do Crea-PR





SUMÁRIO

1.	MOVIMENTO DE MASSA EM ENCOSTAS NATURAIS -----	5
	1.1. Classificações Internacionais dos Movimentos de Massa em Encostas Naturais -----	6
	1.2. Classificações Nacionais dos Movimentos de Massa -----	10
2.	CORRIDAS DE DETRITOS -----	13
	2.1. Aspectos Gerais sobre as Corridas de Detritos -----	13
	2.2. Características, Definição e Descrição das Corridas de Detritos --	13
	2.3. Principais Condicionantes de Ocorrência de Corridas de Detritos -----	17
	2.3.1. Geologia e Geomorfologia -----	19
	2.3.2. Precipitações Pluviométricas -----	21
	2.3.3. Parâmetros Associados às Corridas de Detritos -----	23
	2.4. Casos Históricos de Ocorrência de Corridas de Detritos -----	26
	2.4.1. Serra do Mar -----	26
	2.4.2. Serra Geral -----	28
	2.5. Discussão Sobre Condições de Ruptura -----	31
3.	REFERÊNCIAS -----	39
4.	AUTOR -----	43



1. MOVIMENTO DE MASSA EM ENCOSTAS NATURAIS

Eventos catastróficos envolvendo movimentos de massa (instabilidade de encostas) definitivamente tornaram-se pauta de discussões na sociedade brasileira. Estas ocorrências, rotineiras em estações chuvosas, fazem parte da dinâmica natural de transformação da crosta terrestre e estão diretamente relacionadas a fenômenos naturais (pluviosidade, geologia, topografia) ou antrópicos (desmatamento, escavações, ocupações, etc.). Na maioria dos acidentes geotécnicos de grandes proporções são mais relevantes os fatores naturais do que os fatores antrópicos. Neste sentido, evitar estes acidentes é difícil, mas é possível evitar que causem perdas materiais e humanas.

De uma maneira geral, os estudos sobre movimentos de massa podem ser realizados visando dois objetivos principais: o corretivo e o preventivo. No corretivo, as investigações devem apresentar soluções para eliminar ou minimizar os efeitos de um processo de instabilidade em deflagração, ou já ocorrido.

Na remediação de instabilidades de encostas, inúmeras soluções de engenharia estão disponíveis ao meio técnico. No entanto, o passo mais importante na estabilização de encostas é anterior à escolha ou detalhamento da solução: está no diagnóstico do fenômeno de instabilidade.

Muitos dos escorregamentos ou rupturas potenciais podem ser previstos se investigações apropriadas forem realizadas em tempo. O objetivo da investigação geotécnica em áreas com risco potencial de instabilidade de encostas é acumular informações suficientes das condições locais para analisar o problema, avaliar o risco de instabilidade e, caso necessário, propor medidas remediadoras para reduzir o risco a níveis aceitáveis.

Ao se investigar os potenciais movimentos de massa em encostas, a identificação do tipo e das causas dos movimentos são importantes para se proceder às ações preventivas e corretivas. Além disso, compreender principalmente as características mecânicas e hidráulicas dos materiais envolvidos é fundamental. Sem estas informações, qualquer solução para se evitar a ocorrência de movimentos de massa tende ao fracasso ou a ser muito mais onerosa que o necessário. Neste sentido, a presente publicação objetiva apresentar à sociedade e às entidades de classe paranaenses informações básicas relacionadas aos tipos e causas das ocorrências envolvendo movimentos de massa.

Movimentos de massa correspondem aos mecanismos de transporte de sedimentos, solos ou rochas, induzidos pela força gravitacional e pela ação conjunta ou isolada de fatores como a presença de águas superficiais e subterrâneas ou ações antrópicas como desmatamentos, cortes e aterros, entre outras. De acordo com estes mecanismos dominantes, os pesquisadores do assunto agrupam e categorizam os diferentes tipos de movimentos.

Na bibliografia internacional, o autor identificou que os movimentos de solo e rocha são conhecidos e classificados como landslides, pelos autores americanos, landslips, pelos ingleses, mass movements, por alguns engenheiros geotécnicos e geomorfólogos, slope movements, pela maioria dos engenheiros geotécnicos e mass wasting, pela maioria dos geomorfólogos. De maneira geral, pode-se definir landslide como um termo utilizado para denominar diversos tipos de movimentos de massa, quedas, tombamentos, deslizamentos,

fluxos e/ou afundamentos ao longo de placas.

As corridas de massa recebem na bibliografia internacional diferentes denominações, conforme o tipo de material mobilizado: corrida de lama (mud flow), consistindo em solo argiloso com alto teor de água; corrida de terra (earth flow), consistindo em solo (material predominante) com teor de água inferior à categoria anterior; e corrida de detritos (debris flow), consistindo predominantemente em material grosseiro, envolvendo solo e blocos de rocha de variados tamanhos.

Analisando a bibliografia especializada no assunto pode-se dizer que alguns dos principais atributos usados como critérios para identificação e classificação dos movimentos de massa são: (a) o tipo de movimento; (b) a geometria da área e da massa mobilizada; (c) a natureza do material envolvido, (textura, estrutura e teor de umidade); (d) a velocidade de deformação do movimento; (e) o ambiente geomorfológico, climático e hidrológico; e (f) as características físico-mecânicas. Estas características, em conjunto com o entendimento dos fatores.

1.1. Classificações Internacionais dos Movimentos de Massa em Encostas Naturais

A classificação dos movimentos de massa em encostas naturais não é simples, pois as combinações de materiais, formas e agentes responsáveis pelos movimentos produzem condições para diversos tipos de movimentos.

Na bibliografia especializada existem numerosas publicações que identificam as mais variadas classificações, seguindo critérios diferenciados de acordo com cada autor. Muitas vezes, estas classificações encontram-se correlacionadas entre si, o que reflete a diversidade e a complexidade destas ocorrências.

Entre as classificações para os escorregamentos ou movimentos de massa, pode-se citar as apresentadas por Varnes (1978), Skempton & Hutchinson (1969), Bromhead (1986), Hutchinson (1988), Sassa (1985a, 1985b e 1989) e Cruden & Varnes (1996), entre outros. Os movimentos de massa podem ser classificados e descritos por dois descritores, de acordo com Cruden & Varnes (1996) e Varnes (1958 e revisto em 1978): o primeiro descreve o material e o segundo, o tipo de movimento. Em relação aos materiais, estes são divididos em rochas, detritos (20% a 80% das partículas são maiores do que 2 mm) e solo (80% ou mais das partículas são menores do que 2 mm). Os tipos de movimentos dividem-se em quedas, tombamentos, deslizamentos (rotacionais e translacionais), expansões laterais, fluxos (solo, detritos e rocha) e complexos (combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos). Stiny (1910) publicou em seu livro intitulado *Die Muren* umas das primeiras classificações especificando os tipos de landslides. A sua definição para debris flow iniciou-se com a descrição de uma precipitação intensa em cotas elevadas de encostas, seguida de um carregamento originando uma ruptura circular e posterior transporte do material rompido.

Nos Estados Unidos, Sharpe (1938) realizou uma das classificações de ampla aceitação no meio científico, embora bastante similar à classificação realizada por Stiny em 1910. Esta classificação serviu de base para muitos trabalhos posteriores, com suas respectivas

adaptações; sintetizava os diversos movimentos de massa, relacionando o tipo de movimento, a velocidade atingida por este, a natureza do material mobilizado e a concentração relativa de sedimentos. Wolle (1980) comenta que esta foi a primeira classificação a ter um caráter mais geral, pretendendo englobar todos os tipos de movimentos que ocorrem em encostas naturais. Na classificação proposta por Sharpe (1938), o autor não classifica o termo debris flow.

Terzaghi (1950) propôs um sistema de classificação de grande interesse, em que foram listadas as causas e os agentes causadores das estabilizações, de grande utilidade no estudo de taludes naturais. Este sistema buscava classificar os mecanismos de ruptura que ocasionam os escorregamentos. O autor utilizou em sua classificação dois termos gerais: escorregamentos e rastejos. Conforme a classificação de Terzaghi (1950), as corridas de lama e detritos foram classificadas como escorregamentos, com características específicas, baseadas em termos de velocidade de movimentação dos materiais mobilizados.

Varnes (1954, 1958 e revisto em 1978) propôs uma importante classificação para movimentos de massa, baseado nos trabalhos de Stiny (1910) e Sharpe (1938), sendo adotada pelo U. S. Transportation Research Board e tornando-se a mais utilizada nos Estados Unidos e, posteriormente, em todo o mundo (Quadro 1).

Tipo de movimento	Tipo de material		
	Rocha	Solo em engenharia	
		Predominantemente grosseiro	Predominantemente fino
Quedas (<i>fall</i>)	de rocha	de detritos	de solo
Tombamentos (<i>topples</i>)	de rocha	de detritos	de solo
Escoamento	de rocha	de detritos	de solo
Espalhamento	de rocha	de detritos	de solo
Corridas (<i>flows</i>) (*)	de rocha	de detritos	de solo
	(rastejo profundo)	rastejo de solo	
Complexos: combinação de dois ou mais tipos de movimentos, ação de vários agentes (simultâneos ou suces-sivos)			
(*) o autor subdivide os diferentes tipos de corridas de acordo com a velocidade e conteúdo de água dos materiais			

Uma das razões para o grande uso da classificação proposta por Varnes (1978) é a apresentação de bloco-diagramas tridimensionais dos movimentos, como apresentado na Figura 1. Esta referência definiu terminologias que abrangem diversos tipos de movimento. O autor utilizou a forma de movimento de massa e o tipo de material transportado (solo e/ ou rocha) como base para a classificação, independentemente da velocidade adquirida no processo.

Na Inglaterra, Hutchinson (1980) utilizou o termo debris flow em sua classificação. No ano seguinte, Skempton & Hutchinson (1969) apresentaram um sistema de classificação de escorregamentos em taludes argilosos propondo o reconhecimento de cinco tipos básicos e seis formas complexas de movimentos de massa. Os tipos básicos de movimentos de massa

foram classificados em quedas, escorregamentos rotacionais, escorregamentos compostos, escorregamentos translacionais e corridas. Os movimentos complexos foram classificados em escorregamentos sucessivos, escorregamentos retrogressivos múltiplos, fluxo de solo, escorregamentos em colúvios, expansão lateral e escorregamento.

Hutchinson (1988) apresentou um sistema de classificação abrangendo todos os tipos de movimentos de solo e rocha. Esta classificação é considerada como uma das mais completas e complexas que se tem conhecimento até o momento, pois este sistema baseia-se em aspectos relacionados à morfologia da massa em movimento e em critérios associados ao tipo de material, ao mecanismo de ruptura, à velocidade do movimento, às condições hidrogeológicas e às características da estrutura do solo, semelhante à classificação de Varnes (1978). Devido a sua complexidade, esta classificação requer um volume grande de informações sobre os processos, o que muitas vezes dificulta sua utilização no campo. Os tipos principais de movimentos de massa foram classificados pelo autor em seis classes, identificando: alívio de tensões (rebound), rastejo (creep), deformações significativas em cristas de montanha e taludes (sagging), escorregamentos, movimento de detritos na forma de fluxos, tombamentos, quedas e movimentos complexos.

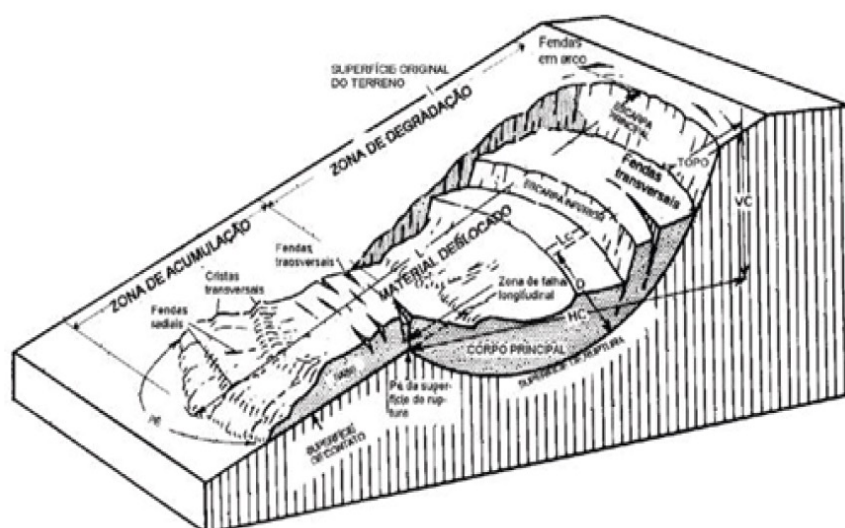


Figura 1: Bloco diagrama de um deslizamento/fluxo complexo de material fino (VARNES, 1978)

Cruden & Varnes (1996) revisaram e adicionaram novos termos à classificação de Varnes (1978), internacionalmente adotada. O esquema de classificação baseou-se no tipo de material transportado e no tipo de movimento, os quais não sofreram alterações em relação à classificação proposta por Varnes (1978). Os tipos de materiais transportados considerados pelos autores foram rochas, detritos e solos. Os movimentos foram divididos em cinco tipos: quedas, tombamentos, escorregamentos, espalhamentos e corridas. Os escorregamentos complexos, propostos por Varnes (1978), foram retirados da classificação formal, embora o termo complexo tenha sido mantido para descrever o estilo de atividade de um escorregamento.

Segundo Cruden & Varnes (1996), as corridas de rocha, detritos e solo são classificadas como movimentos de massa rápidos, muito rápidos e extra rápidos, como indicado no Quadro 2 (CRUDEN & VARNES, 1996).

Conforme apresentado, a classificação elaborada por Cruden & Varnes (1996) não

leva em conta parâmetros geotécnicos bem definidos, tais como tensões, deformações, poro-pressões, etc. Vários autores decidiram buscar um refinamento para a classificação de movimentos de massa. Entre estes se encontra Sassa (1989). O autor desenvolveu uma classificação que se baseia na definição das trajetórias de tensão observadas em gráficos de tensão cisalhante versus tensão normal, que se desenvolvem especificamente no interior de massas de solo sujeitas a diferentes tipos de movimentos de massa.

Classe de velocidade	Descrição do movimento	Velocidade típica (m/s)
7	extra rápido	5
6	muito rápido	5×10^{-2}
5	rápido	5×10^{-4}

Sassa (1989) desenvolveu uma classificação essencialmente geotécnica conforme ressaltado pelo autor. Essa classificação é aplicada a partir de resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento. A mesma leva em consideração os processos hidráulicos e mecânicos relacionados a diferentes tipos de cisalhamento, dando pouca ênfase à granulometria do solo. O autor assumiu como princípio que os movimentos de massa são fenômenos cisalhantes das encostas naturais ou construídas pelo homem.

Esta classificação objetiva caracterizar, num primeiro estágio, a iniciação do mecanismo que gerou o movimento de massa e, num segundo, o desenvolvimento do movimento ao longo da encosta. Assim sendo, sua iniciação leva em conta três tipos de cisalhamento: deslizamentos (slides), liquefação (liquefaction) e fluência ou rastejo (creep). O movimento posterior, por sua vez, também é classificado em três tipos: quedas (falls), deslizamentos (slides) e fluência (creep).

Os três tipos de cisalhamento são diferenciados conforme as características das trajetórias de tensões nos gráficos de tensão cisalhante versus tensão normal (plano $p \times q$), como mostra a Figura 2. Na sequência estão descritos os tipos de movimentos de massa com base nas trajetórias de tensões apresentadas naquela figura.

Os deslizamentos (slides), apresentados no item I da Figura 2, ocorrem quando o estado de tensões no interior do talude atinge a envoltória de ruptura de pico (peak failure line – P.F.L.), originando uma movimentação ao longo de uma superfície de escorregamento (slip surface).

A trajetória de tensões que representa este tipo de movimento pode ser explicada da seguinte forma: a partir do estado de tensões inicial no interior do talude, representado pelo ponto PO da Figura 2 – I-1, há um ligeiro aumento de tensão cisalhante e aumento de poro-pressão (u). Deste modo, a trajetória de tensões atingirá a envoltória de ruptura no ponto PP, iniciando o deslizamento. A partir do deslocamento iniciado, a resistência ao cisalhamento na superfície de cisalhamento diminui rapidamente até alcançar o valor da resistência residual (residual failure line – R.F.L.) no ponto PR. Este processo causa uma força (F) que acelera a massa e produz um deslizamento rápido (peak strength slide). Por outro lado, quando a superfície de cisalhamento já está em sua resistência ao cisalhamento residual, a trajetória de tensões segue diretamente do ponto PO até a envoltória de resistência ao cisalhamento residual, ponto P R (Figura 2 – I-2), não havendo redução de resistência ao cisalhamento após

o início do deslizamento. Neste caso, tanto as tensões cisalhantes, quanto as resistências cisalhantes mantêm-se quase iguais, ocorrendo o chamado deslizamento lento na resistência ao cisalhamento residual (residual strength slide).

A liquefação (liquefaction) tem início quando uma massa de solo arenoso com elevado índice de vazios (fofo) na encosta fica sujeita a um carregamento não-drenado, causando o colapso da sua estrutura e fazendo com que os vazios do solo diminuam suas resistências ao cisalhamento, ganhando um comportamento fluido (Figura 2 – II-1). Este comportamento também pode ocorrer quando uma massa de solo arenoso fofo apresentar uma superfície de liquefação (Figura 2 – II-2). A trajetória de tensões que representa este tipo de movimento pode ser explicada Figura 2 – II-1 da seguinte forma: o estado de tensões inicial começa em PO e se encaminha para a envoltória de resistência ao cisalhamento residual, ponto PL, provocado pelo aumento acentuado de poro-pressão (u), sendo acompanhado de uma intensa queda de resistência ao cisalhamento. Neste caso também há a geração de uma força (F), que acelera a massa fluida encosta abaixo. Segundo Sassa (1989), tal situação também ocorre nas argilas sensíveis (quick clays ou sensitive clays), a partir de um súbito aumento de poro-pressão devido à baixa condutividade hidráulica, principalmente durante terremotos.

O rastejo (fluência ou creep) é considerado como a deformação que se processa sem observação de variações no estado de tensões totais. Na Figura 2 – III está apresentada a trajetória de tensões que representa este tipo de movimento.

Nota-se que o desenvolvimento da fluência é caracterizado pela mudança do estado de tensão efetiva inicial do ponto PO encaminhando-se horizontalmente para a esquerda (aumento da poropressão por elevação do nível d'água), sem que seja atingida a envoltória de resistência ao cisalhamento residual, mas leva a uma velocidade de deformação relativamente constante na massa de solo. Sassa (1989) comparou sua classificação com a de Varnes (1978) e concluiu que não faz sentido incluir os tombamentos em sua abordagem, uma vez que neste mecanismo não ocorre cisalhamento. O autor relata que o afastamento lateral é um mecanismo que envolve deslizamento ou fluência em argilas situadas na base de corpos rígidos, ao longo de uma superfície de cisalhamento muito suave. Caracteriza as quedas como um movimento, mas não um mecanismo específico, pois não se trata mecanicamente de uma ruptura por cisalhamento.

As classificações descritas anteriormente diferem na forma de avaliar os movimentos de massa e na maneira de classificar um determinado evento, além de tenderem a se assemelhar à classificação de Varnes (1978).

1.2. Classificações Nacionais dos Movimentos de Massa

A bibliografia nacional apresenta classificações que foram sendo aprimoradas ao passar dos anos, conforme a experiência adquirida pelos pesquisadores, a partir da década de 60. Estas se tornaram cada vez mais completas, passando de classificações específicas, para um conjunto mais geral de classes de fenômenos de movimentações de massa que ocorrem no Brasil, especialmente nas regiões sul e sudeste do país.

Os principais trabalhos nacionais relacionados com a classificação de movimentos de massa foram os de Freire (1965), Guidicini & Nieble (1984) e a proposta apresentada pelo

IPT (1991), conforme ressaltado por Fernandes & Amaral (1998). O Quadro 3 apresenta um sumário destas classificações.

Freire (1965)	Guidicini & Nieble (1984)	IPT (1991)
Escoamento: Rastejos e corridas	Escoamento: Rastejos e corridas	Rastejos Corridas de massa
Escorregamentos: Rotacionais e translacionais	Escorregamentos: Rotacionais, translacionais, queda de blocos e queda de detritos	Escorregamentos
Subsidências e desabamentos	Subsidências: Subsidências, recalques e desabamentos	Quedas e tombamentos
	Formas de transição Movimentos complexos	

Freire (1965) foi um dos primeiros autores nacionais a sintetizar e reunir dados para a classificação dos movimentos de massa no território nacional, baseando-se numa série de autores estrangeiros. Em sua classificação, são levados em consideração os seguintes itens: (a) dados físicos dos locais como inclinação de taludes, (b) superfície de escorregamento e materiais envolvidos; (c) dados mecânicos associados ao desenvolvimento dos movimentos e (d) tempo de duração dos fluxos e suas causas.

Os tipos de processos de movimento de massa descritos por Freire (1965), semelhantes aos de Sharpe (1938), estão apresentados no Quadro 3. Na classificação proposta por Freire (1965), não consta o termo referente ao processo corrida de detritos, a qual pode ser classificada como escoamento líquido, com velocidades muito altas, que ocorre em taludes com inclinações variáveis. Guidicini & Nieble (1984) apresentaram com destaque a proposta apresentada por Freire (1965).

Augusto Filho (1992) reuniu, de forma sucinta, os principais tipos de movimentos de massa que ocorrem com mais frequência na dinâmica ambiental brasileira (ambientes tropicais e subtropicais), baseando-se na classificação de Varnes (1978). O Quadro 4 apresenta as características de um conjunto de diferentes tipos de movimentos gravitacionais de massa, diretamente relacionados à dinâmica das encostas brasileiras.

Escorregamentos (slides)	- Poucos planos de deslocamento (externo); - Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); - Pequenos a grandes volumes de material; - Geometria e materiais variáveis: - Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; - Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; - Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza.
Quedas (falls)	- Sem plano de deslocamento; - Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; - Velocidades muito altas (vários m/s); - Material rochoso; - Pequenos a médios volumes; - Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; - Rolamento de matacão, tombamento.
Corridas (flows)	- Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); - Movimento semelhante a um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo de drenagens; - Velocidades médias a altas; - Mobilização de solo, rocha, detritos e água; - Grandes volumes de material; - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

As corridas de detritos e lama, como pode ser visualizado no Quadro 4, aparecem como a quarta classe de movimento, apresentando características muito típicas do processo. O objetivo principal do trabalho realizado pelo autor foi definir áreas de risco atribuindo diferentes graus de suscetibilidade à formação de corridas. O autor considerou que as corridas são movimentos gravitacionais de massa de grandes dimensões, que se movimentam na forma de escoamento.

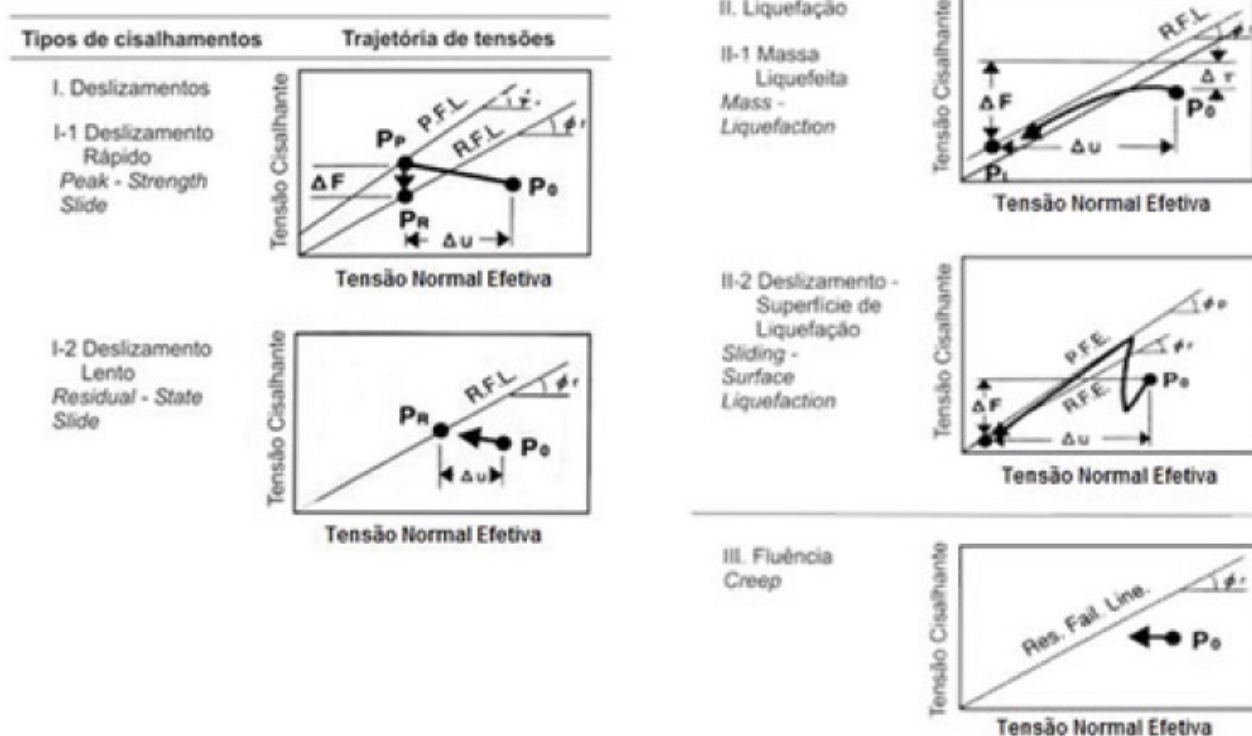


Figura 2: Trajetória de tensões para a classificação dos movimentos de massa proposta por Sassa (1989): I - deslizamentos; II - liquefação e III - Creep / R.F.E. – Residual Failure Line (envoltória de ruptura residual); P.F.E. – Peak Failure Line (envoltória de ruptura de pico).

Fernandes & Amaral (1998) e Terzaghi (1950) enfatizaram em seus trabalhos que o número excessivo de critérios e nomenclaturas disponíveis para as classificações dos movimentos de massa favorecem as várias denominações encontradas na bibliografia e muitos conflitos em relação à terminologia.

Analisando as classificações internacionais e nacionais apresentadas, conclui-se que, por se tratar de um assunto bastante explorado na bibliografia especializada e considerando que as classificações aqui apresentadas são bastante completas, os pesquisadores que estudam o assunto utilizam as classificações de maior aceitação no meio científico e obviamente, a que mais se ajusta aos movimentos identificados em seus estudos.

2. CORRIDAS DE DETRITOS

No presente item encontram-se abordadas questões relacionadas a corridas de detritos, além da apresentação de alguns casos históricos da ocorrência deste tipo de movimento de massa já registrada no estado do Paraná.

2.1. Aspectos Gerais Sobre as Corridas de Detritos

Corridas de detritos ocorrem em diversas partes do mundo, interferindo diretamente no desenvolvimento social e econômico de muitas áreas com potencial de desencadeamento. O processo ocorre de maneira natural em regiões serranas e, em cerca de 50 países, é observado muito frequentemente (MIDRIAK, 1985; TAKAHASHI, 1994 apud GRAMANI, 2001). As corridas de detritos caracterizam-se pelo seu alto poder destrutivo e pelos danos que podem provocar.

No Brasil, a ocorrência de corridas de detritos é muito comum nas porções mais elevadas das encostas da Serra do Mar e da Serra Geral.

No caso de interesse, as altas declividades da encosta da Serra Geral, com altitudes que oscilam de 300 m a 1000 m, apresentam a formação de camadas de solos residuais e de espessos depósitos de solos coluvionares.

A Serra Geral apresenta vales fechados e anfiteatros de pequenas dimensões formando pequenas sub-bacias, com a rocha aflorando geralmente em escarpas, cortes de estrada e leitos de arroios. As características geológicas e geomorfológicas descritas, aliadas ao clima subtropical de altitudes, caracterizado por duas épocas bastante chuvosas, favorecem a formação e o desenvolvimento de corridas de detritos por seus canais de drenagem.

As corridas de detritos representam uma das formas mais catastróficas de movimentos de massa, pois geralmente envolvem massas constituídas por misturas de solo e de rocha provenientes da acumulação de corpos de tálus ou provenientes da mobilização de solo residual subjacente a colúvios. Gramani (2001) considera este tipo de movimento de massa como um dos mais espetaculares e expressivos processos geológicos, dentre os demais movimentos de massa associados à dinâmica externa, atuantes na superfície do planeta. As corridas de detritos estão intimamente associadas aos escorregamentos translacionais, mas não são os mesmos fenômenos. De acordo com Pinheiro (2000), os escorregamentos translacionais ocorrem rotineiramente nas encostas, em regimes normais de chuvas, pois são processos comuns e bastante importantes na evolução das encostas.

Como na maioria dos processos de movimentos de massa, também nas corridas de detritos atuam, concomitantemente, mais de um fator condicionante. Segundo Takahashi et al. (1997), as corridas de detritos caracterizam-se por apresentar uma dinâmica regida pela mecânica dos solos e pela mecânica dos fluidos. De acordo com Gramani (2001), o principal cuidado na definição das ocorrências de corridas de detritos é excluí-las das categorias de escorregamentos ou movimentos em bloco (domínio geotécnico) e de transporte de sedimentos por arraste e/ou em suspensão (domínio hidráulico).

Gramani (2001) afirma em seu trabalho que vários autores apresentam definições de corridas de detritos, as quais são repetitivas e sobrepõem-se entre si. É importante salientar que, embora existam muitas definições correlacionadas, os autores de todo o mundo estudam esse tipo de movimento de massa nas mais variadas condições ambientais. Assim, as definições que se encontram na bibliografia mostram a tendência de um exame das corridas de detritos do ponto de vista hidráulico, geotécnico e/ou geológico.

2.2. Características, Definição e Descrição das Corridas de Detritos

Gramani (2001) e Znamensky (2001) definem corridas de detritos do ponto de vista geotécnico da seguinte forma: são movimentos de sólidos e fluidos, com uma alta concentração de sólidos de todos os tamanhos e uma grande mobilidade, conjugada com comportamento característico de líquido, atuando sob a ação da gravidade.

Bressani et al (1995) descrevem as corridas de detritos como um tipo de instabilização espacialmente contínua, onde as superfícies de cisalhamento são pouco espaçadas e não são preservadas, lembrando o movimento de um fluido viscoso durante o fluxo. Conforme os autores, escorregamentos rasos podem se tornar corridas de detritos, dependendo de alguns fatores: (a) perda de resistência do material; (b) alta absorção de água pelo solo; e (c) possibilidades de materiais mobilizados encontrarem taludes íngremes.

A geometria mais típica na região desse tipo de movimento de massa apresenta de 1 a 3 m de espessura, largura de 5 a 20 m e comprimento ao longo da encosta de 40 a 200 m. Segundo Pinheiro (2000) e Azambuja et al. (2001b), a extensão lateral pode crescer até 200 m de largura em encostas convexas, como o caso ocorrido em São Vendelino-RS em dezembro de 2000.

Segundo Bressani (2005), a grande importância desses movimentos deve-se à dificuldade de previsão de sua ocorrência (o movimento ocorre praticamente sem sinais prévios), rapidez de desenvolvimento (velocidades de deslocamento na faixa de m/min a m/s) e alta energia cinética.

O mecanismo de ruptura desses movimentos está intimamente associado ao comportamento mecânico dos solos que compõem as encostas e ao fluxo de água sub-superficial que se estabelece nas mesmas. Segundo o autor, quando as chuvas ultrapassam níveis associados a tempos de recorrência de 20 anos ou mais, o número de rupturas observado aumenta dramaticamente. Isto ocorre porque o meio ambiente evoluiu sob condições médias de precipitação, onde rupturas isoladas são rotineiras e fazem parte do processo de evolução

(como citado por Pinheiro, 2000); porém, um evento pluviométrico de maior intensidade causa um número muito maior de rupturas simultâneas. Isto pode ser observado de forma indireta em gráficos de chuva acumulada versus tempo e o número de rupturas de taludes, como, por exemplo, no gráfico apresentado por Kanji et al. (1997) – Figura 2.6.

Conforme Gramani (2001), os acidentes catastróficos associados às corridas de detritos ocorrem durante eventos pluviométricos atípicos, que provocam a ruptura simultânea de centenas de taludes íngremes (rupturas translacionais). Eventos pluviométricos atípicos, além de provocarem a ruptura de muitos taludes, ainda provocam um aumento dramático da vazão de todas as drenagens da região. A capacidade de absorção de água pela encosta fica muito superada e diversos processos de percolação ficam profundamente alterados.

Analisando os trabalhos de diversos autores, pode-se concluir que as corridas de detritos ocorrem após períodos de chuvas intensas e contínuas (MASSAD, 1998; WOLLE & CARVALHO, 1989; WOLLE & HACHICH, 1989; LACERDA et al., 1997; KANJI et al., 1997; KANJI & GRAMANI, 2001 entre outros). Em São Vendelino-RS, foi registrado uma precipitação de 148 mm em 2 horas, que provocou a queda de taludes de solo com rupturas do tipo translacionais sobre rocha e diversas rupturas simultâneas do tipo corrida de detritos ao longo de todo o vale (AZAMBUJA et al., 2001b).

As corridas de detritos tendem a acelerar quando a infiltração da água das chuvas no interior desses taludes causa aumentos significativos de poro-pressão e redução de sucção. Segundo Leroueil (2004), a infiltração de água e o consequente aumento de poro-pressão são as mais comuns causas de movimentos de massa (iniciação de corridas de detritos). Em geral, pode ser dito que o aumento da poropressão resulta no decréscimo da tensão efetiva e da resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, na redução do fator de segurança das encostas.

De acordo com Wolle et al. (2001), em períodos de chuvas intensas, pode ocorrer um evento curto com pluviosidade extraordinária. Esse intervalo de tempo é menor do que 1 ou 2 horas de duração, podendo ser de alguns minutos. Sob tais condições, os escorregamentos descritos podem ocorrer aos milhares, simultaneamente, e as massas escorregadas produzem corridas de detritos em encostas com gargantas estreitas, arrastando tudo o que se encontra em seu caminho, às vezes por vários quilômetros.

Segundo Massad et al. (1997), as corridas de detritos apresentam outra particularidade bastante importante e peculiar: os fragmentos e os blocos de rocha são conduzidos em suspensão no topo da camada de lama, de maior velocidade, até o talude tornar-se suave ou o fluxo espalhar-se em uma grande área. Nesse local, a espessura da camada de lama reduz e os detritos tendem a se depositar e a bloquear a continuidade do fluxo. A acumulação de resíduos atrás dessa “barragem temporária” pode causar a sua própria destruição e iniciar uma nova corrida de detrito. Essa particularidade pode dar às corridas de detritos uma característica de ondas em pulsos.

Em canais de drenagem, parte do leito (areia, pedregulho e blocos de rocha) é incorporado ao fluxo das corridas de detritos, aumentando a massa de sólidos e provocando erosão das margens, o que tende a alargar o leito do canal. Diversos autores relatam que a mobilidade de uma corrida de detritos depende da quantidade de argila presente na matriz

da corrida. Esse tipo de solo provoca a redução da condutividade hidráulica, provocando ainda o aumento da pressão de água e fornecendo maior mobilidade à massa. Conforme Kanji & Gramani (2001), a água misturada com as frações argila e silte forma uma lama que começa a fluir encosta abaixo, transportando areia, pedregulho, blocos de rocha e árvores; eles podem alcançar longas distâncias, até mesmo em taludes suaves (com inclinação de 4° a 8°).

Segundo IPT (1972, apud Wolle 1980), é precário correlacionar a incidência de movimentos com a declividade (inclinações) das encostas, pois esta relação depende de vários outros fatores. Trabalho pioneiro nesse sentido foi o desenvolvido pelo IPT (1972) apud Wolle (1980) na cartografia geotécnica dos morros de Santos e São Vicente, no Estado de São Paulo e, posteriormente, extrapolada para toda a região da Serra do Mar. Neste trabalho foi estabelecida uma compartimentação morfológica da área conforme a subdivisão clássica em perfis convexo, retilíneo e côncavo.

Gramani (2001) salienta a importância da determinação da distância possível de ser percorrida por uma corrida de detritos. A mobilidade é um fator importante para a ocupação segura de áreas de risco e prevenção de acidentes envolvendo este tipo de movimento de massa. Conforme Cruz et al. (2000) e Kanji & Gramani (2001), as corridas de detritos podem atingir velocidades tão altas quanto 70 km/h, maiores até do que o fluxo de água em condições similares.

Segundo Gramani (2001), como resultado de uma corrida de detrito, os materiais rompidos após chuvas atípicas e intensas, totalmente saturados, invadem as drenagens, bloqueando temporariamente os grandes fluxos de água existentes. Quando esses bloqueios são rompidos, formam-se ondas de material fluido composto de lama, blocos de rocha de diversos tamanhos e vegetação (incluindo árvores de diversos diâmetros). Esse material desce nas drenagens com velocidades bastante altas e com grande poder erosivo, agregando material das margens e provocando rupturas das margens. O processo é recorrente e ocorre em pulsos, que dependem dos bloqueios e rupturas que vão ocorrendo. O efeito é devastador tanto nas encostas, quanto ao longo das drenagens e nas áreas de deposição (baixadas), onde a onda de enchente destrói casas, pontes e lavouras.

O resultado observado algumas horas após chuvas intensas é uma denudação importante das encostas e mudanças importantes dos leitos dos rios, que causam grandes erosões em certos locais e depositam grandes volumes de material em outros. Geralmente, as áreas mais planas são cobertas por uma camada de material de granulometria variável de cascalho a areias (GRAMANI, 2001).

Azambuja et al. (2001a, 2001b) apresentam as características das corridas de detritos em um perfil geológico típico dos canais onde estas foram deflagradas, em São Vendelino-RS. Este perfil apresenta três diferentes segmentos na geometria, que são: (a) área de origem ou tramo de catálise; (b) área de fluxo ou tramo de crescimento; e (c) área de deposição ou tramo de dissipação.

A área de origem apresenta geralmente alta declividade, funciona como provedora dos detritos e pode estar relacionada inicialmente a um fenômeno de escorregamento. Segundo Azambuja et al. (2001a, 2001b), a vertente das corridas de detritos estava associada à principal quebra de relevo da região, sendo as bordas das unidades vulcânicas ácidas. Nessa quebra

de relevo, o fluxo hidráulico nos canais adquiriu grande energia e velocidade, características importantes para conduzir os detritos à jusante. A partir dessa quebra de relevo, a corrida de detritos percorreu a área de fluxo onde o canal assenta-se sobre uma sucessão de derrames basálticos.

A área de fluxo é formada pela encosta onde o material proveniente da área de origem, associado ao material remobilizado no caminho da corrida, percorre até a área de deposição. Esta área apresenta declividades que variam de 60% a 10%. As margens dos canais nessa área são íngremes e constituídas por colúvios rasos que, durante precipitações intensas e prolongadas, tendem a se instabilizar. Ao longo da área de fluxo, é possível identificar barragens temporárias de detritos depositados, espaçadas da ordem de 100 m umas das outras. Essas barragens são coincidentes com os degraus dos derrames e dão às corridas de detritos um movimento em forma de “ondas”.

A área de deposição é a porção da topografia que apresenta um relevo suave, onde o material da corrida de detritos se deposita (blocos, cascalhos, árvores e lama, sendo que apenas a lama é transportada até os corpos hídricos receptores). Nesta área, o canal percorre depósitos de pé de encosta ou leques aluviais e as declividades variam de 10% a 4%. A Figura 3 mostra os três segmentos citados em uma seção típica de encostas de São Vendelino-RS.

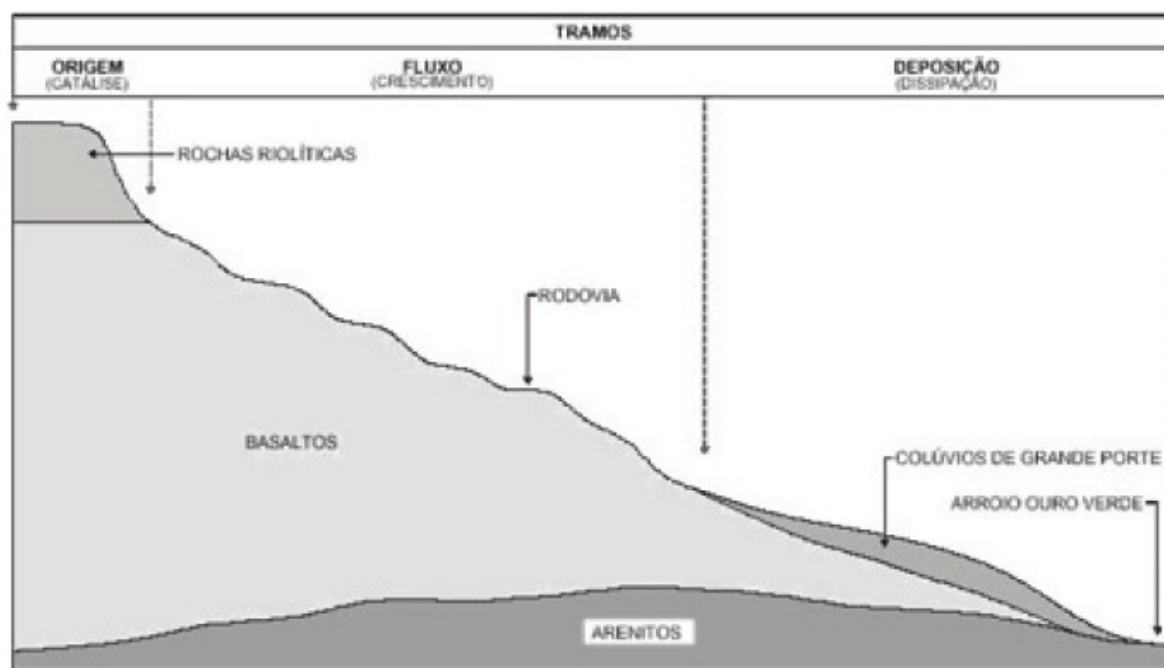


Figura 3: Perfil geológico típico dos canais onde foram deflagradas as corridas de detritos (AZAM-BUJA et al. 2001a, 2001b)

2.3 Principais Condicionantes de Ocorrência de Corridas de Detritos

Os movimentos de massa são controlados por uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico, que tem origem com a formação da própria rocha e toda a sua história geológica e geomorfológica subsequente, como movimentos tectônicos, intemperismo, erosão, ação antrópica, etc. (AUGUSTO FILHO & VIRGILI, 1998). Na maioria dos processos de instabilização de taludes, atuam, concomitantemente, mais de um fator condicionante. Apesar

desta complexidade de eventos, é possível tentar estabelecer um conjunto de condicionantes que atuam de forma direta e imediata na deflagração destes processos de instabilização. Vários autores discutem estas relações, dentre os quais, destacam-se os trabalhos de Terzaghi (1950), Varnes (1978), Cruden & Varnes (1996) e Augusto Filho & Virgili (1998).

Segundo Terzaghi (1950), as causas dos movimentos de massa podem ser subdivididas em duas categorias relacionadas aos taludes: causas internas e causas externas. Segundo o autor, as causas internas são aquelas que contribuem na diminuição de resistência ao cisalhamento disponível no solo – aumento da poropressão, diminuição do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno, etc. As causas externas são consideradas aquelas que provocam um aumento das tensões de cisalhamento por modificações da geometria do talude entre outras.

Sassa (1985, 1989), Ellen & Fleming (1987) e Takahashi (2000) dentre outros autores, citam três diferentes fatores condicionantes para a iniciação das corridas de detritos: (a) erosão fluvial em canais de drenagem; (b) ocorrência de deslizamentos geradores de liquefação; (c) aumento de poro-pressão originado por mecanismos de infiltração. Além dos fatores citados, também é possível a formação de corridas de detritos devido ao aumento de poropressão provocado por carregamento muito rápido. Este tipo de carregamento ocorre a partir do impacto causado sobre depósitos devido à chegada de movimentos de massa originados nas encostas a montante dos mesmos ou ainda devido a quedas de blocos de rocha em depósitos de cotas elevadas de encostas suscetíveis a instabilidade, conforme mencionado por Sassa (1985). Avelar (2003) apresenta em seu trabalho uma revisão bibliográfica detalhada a respeito dos aspectos reológicos e geotécnicos associados aos fatores condicionantes citados para a geração de corridas de detritos.

Para Varnes (1978), os principais fatores que contribuem para a redução da resistência ao cisalhamento e consequente instabilidade de talude são o estado inicial do material (composição, textura, estrutura e geometria do talude), mudanças devidas ao intemperismo e outras reações químicas, mudanças nas forças intergranulares devidas ao teor de água e à pressão nos poros e fraturas, mudanças na estrutura e outras causas. Estes fatores estão relacionados aos fenômenos naturais.

Cruden & Varnes (1996) resumiram os processos e as características que contribuem para os movimentos de massa. No Quadro 5 estão listadas as causas destes movimentos, divididas em 4 grupos práticos, conforme as ferramentas e os procedimentos necessários para iniciar-se uma investigação.

Augusto Filho & Virgili (1998) resumem os principais fatores condicionantes dos processos de instabilização de encostas na dinâmica ambiental brasileira da seguinte forma: (a) características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico; (b) características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas e taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas, etc.); (c) características geomorfológicas, com destaque para a inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas (retilíneo, convexo e côncavo); (d) regime das águas superficiais e sub-superficiais; e (e) características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e

servida, etc.

Causas geológicas	Causas morfológicas	Causas físicas	Causas humanas
materiais fracos	levantamento tectônico ou vulcânico	chuvas intensas	escavações de taludes
materiais sensíveis	alívio por degelo	derretimento rápido de neve	sobrecarga no talude ou na crista
materiais intemperizados	erosão fluvial no pé do talude	precipitações excepcionalmente prolongadas	rebaixamento (reservatórios)
materiais fissurados ou fraturados	erosão glacial no pé do talude	terremotos	irrigação
orientação desfavorável de descontinuidades (acamamento, xistosidade, etc.)	erosão nas margens laterais	erupções vulcânicas	mineração
orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades, etc.)	erosão subterrânea (solução e piping)	descongelamento	vibração artificial
contraste de permeabilidade	deposição de cargas no talude ou na crista	intemperismo por congelamento e descongelamento	vazamento de água
contraste de rigidez (materiais densos, rígidos sobre materiais plásticos)	remoção da vegetação (fogo, seca)	intemperismo por expansão e retração	

Quadro 5: Lista das causas de movimentos de massa (CRUDEN & VARNES, 1996)

No caso específico das corridas de detritos é necessário verificar conjuntamente aos condicionantes relacionados à geologia e geomorfologia, às precipitações pluviométricas e os condicionantes relacionados às ações antrópicas, para a ocorrência do processo. A atividade antrópica é um fator agravante que contribui com profundas modificações no meio ambiente. Essas ações normalmente interferem no equilíbrio das áreas, por vezes acelerando os processos da dinâmica superficial. Entre as causas antrópicas que induzem a ocorrência de movimentos de massa, o desmatamento tem exercido um papel de destaque. A seguir, nos subitens, os condicionantes relacionados à geologia e geomorfologia e às precipitações pluviométricas serão apresentados.

2.3.1. Geologia e Geomorfologia

De acordo com Gramani (2001), os fatores geológicos e geomorfológicos controlam as diferentes formas geométricas apresentadas pelas linhas de drenagem em uma determinada bacia. A geomorfologia condiciona o formato das drenagens com altas declividades, vales encaixados e estrangulamentos dos canais. As altas declividades proporcionam maiores instabilidades locais dos materiais e os estrangulamentos atuam como ponto de acumulação e formação de barramentos naturais contra o fluxo. A geologia contribui com a formação de corpos de colúvios e alúvios depositados ao longo das drenagens, modificando o perfil geral do canal, contribuindo com abundância de material rochoso e blocos de maiores diâmetros.

Segundo Hack & Goodlett (1960) apud Turner (1996), os colúvios podem ser divididos geomorficamente em concavidades, convexidades e taludes retos. A importância das concavidades na iniciação de um escorregamento varia, sendo dependente das complexas interações e pequenas variações de geologia, topografia e fatores climáticos. Conforme Azambuja et al. (2001a), as manifestações de instabilidade estão estreitamente relacionadas com a morfologia das encostas, mais especificamente ao padrão de escoamento sub-superficial. Segundo os autores, em geral, as encostas apresentam duas formas de vertentes: côncavas e convexas. A forma convexa é aquela em que parte do perfil da encosta apresenta curvatura positiva, com ângulos de inclinação aumentando encosta abaixo. A forma côncava é aquela que parte do perfil da encosta apresenta curvatura negativa, com ângulos de inclinação diminuindo encosta abaixo. Nas encostas com formato convexo, o fluxo sub-superficial se dá por canais que se dispersam e fazem com que as linhas equipotenciais sejam progressivamente mais afastadas umas das outras; isso implica em gradientes hidráulicos progressivamente menores na direção do pé da encosta. Nas encostas côncavas, por outro lado, os fluxos são convergentes e há um progressivo aumento dos gradientes hidráulicos na direção dos vértices da encosta; essa concentração é responsável por forças de percolação elevadas, que são fatores importantes na deflagração de corridas de detritos. Segundo Turner (1996), concavidades (encostas côncavas) são frequentes fontes de formação de debris flow.

Segundo Kanji & Gramani (2001), a ocorrência de corridas de detritos se dá em relevos acidentados ou montanhosos de diversos ambientes geológicos. Os autores afirmam que depósitos geológicos que apresentam feições típicas de corridas de detritos indicam a recorrência do fenômeno em muitas áreas. De maneira geral, há uma maior frequência de corridas de detritos em ambientes que apresentam solos residuais espessos, depósitos coluvionares, depósitos de talus, aluviões e terraços aluvionares e depósitos vulcanoclásticos. Segundo Pinheiro et al. (1997), as regiões sul e sudeste do Brasil, por suas condições climáticas e pelas grandes extensões de maciços montanhosos (Serra Geral e Serra do Mar), estão sujeitas a desastres associados aos movimentos de massa nas encostas.

Conforme Gramani (2001), alguns fatores promovem um aumento na probabilidade de ocorrência de escorregamentos (rastejos, quedas de blocos, erosões aceleradas, etc.), tais como: (a) ausência de vegetação, expondo diretamente o solo às condições climáticas, intensificando-se os processos erosivos; (b) estruturas primárias condicionando a instabilização dos materiais (falhas, fraturas, juntas); (c) contatos entre solos de diferentes condutividades hidráulicas, provocando o aparecimento de fluxos de água, elevação de pressões no solo ou na rocha ou entre eles; e (d) solos com baixa resistência ao cisalhamento. Esses fatores contribuem, isolada ou conjuntamente, para aumentar a probabilidade de ocorrência de escorregamentos.

As encostas que apresentam declividades elevadas e com disponibilidade de material passível de mobilização são as mais suscetíveis à ocorrência de corridas de detritos. Valores de aproximadamente 30° a 45° de declividade são considerados como valores críticos para estas ocorrências, embora isto seja variável para cada material (GRAMANI, 2001). Segundo o autor, valores mínimos de inclinação das encostas para a ocorrência de corridas de detritos variam de 20° a 25°. Casos excepcionais de ocorrência de corridas de detritos, na China e no

Japão, em encostas com inclinações de 10° a 15° são relatados na bibliografia.

No caso relatado por Azambuja et al. (2001a), em São Vendelino (RS), as corridas de detritos foram geralmente deflagradas em bacias restritas, de altas declividades e de pequena dimensão. Os autores citam que inúmeras corridas de detritos ocorreram em bacias menores do que 5 km² da região de São Vendelino. De acordo com Kanji & Gramani (2001), o volume de material sólido gerado em uma corrida de detritos está relacionado com a dimensão da bacia hidrográfica, com as espessuras e os tipos de solos presentes e com a intensidade pluviométrica que atinge a bacia.

As características físicas de uma bacia de captação são elementos fundamentais no comportamento hidrológico destas. Os elementos da bacia hidrográfica controlam a concentração de água das vertentes para a linha de drenagem. As principais características físicas de uma bacia correspondem a: área da bacia, formato da bacia, rede de drenagem e forma de relevo, que influenciam no tempo de concentração das águas e na magnitude da vazão. A forma da bacia depende diretamente da contribuição geológica do terreno e controla o tempo de concentração da água. Bacias hidrográficas que permitem rápida concentração e picos de vazão elevados são favoráveis para o desenvolvimento de corridas de detritos.

2.3.2. Precipitações Pluviométricas

É importante salientar que o termo “precipitações”, em hidrologia, é o termo geral dado a todas as formas de água depositada na superfície terrestre e oriunda do vapor d’água na atmosfera, tais como neblina, granizo, geada, neve, orvalho e chuva. Comumente, os termos precipitação e chuva se confundem. Os processos geológico-geotécnicos naturais que se desenvolvem em encostas com relevo acidentado são parcialmente controlados pela precipitação pluviométrica. Nos solos, o fluxo d’água, ocasionado principalmente por chuvas, provoca a saturação, com diminuição da coesão aparente (sucção), o surgimento de forças de percolação, elevação das poro-pressões e pode causar erosão interna (piping).

Na bibliografia há controvérsias na definição do tipo de chuva que favorece o desenvolvimento das corridas de detritos: longa duração e pequena intensidade ou curta duração e grande intensidade. A maioria das rupturas que deram origem a corridas de detritos, estudadas por Johnson e Sitar (1990), estavam tipicamente associadas a chuvas fortes e prolongadas. De acordo com Gramani (2001), a determinação e as tentativas de se estimar chuvas deflagradoras de corridas de detritos apresentam uma série de problemas e dificuldades. Dentre as dificuldades, o autor destaca duas: (a) a chuva registrada, em geral, não é na área de ocorrência das corridas de detritos (poucos pluviômetros e geograficamente distantes); e (b) para cada região do mundo têm-se características particulares que dificultam o estabelecimento de curvas de chuvas acumuladas versus tempo de igual traçado.

Kanji et al. (1997) destacaram que as formas distintas de apresentação de dados de chuvas são extremamente variáveis, especialmente em relação a chuvas acumuladas, geralmente apresentadas em vários dias (e às vezes sem apresentar os dias acumulados).

No estudo dos escorregamentos que dão origem às corridas de detritos, há necessidade de se levar em consideração as chuvas ocorridas anteriormente a um evento de maior magnitude. As chuvas, de menor intensidade, são responsáveis pelo aumento do

grau de saturação do solo, gerando processo de perda de sucção matricial e aumentando consequentemente a condutividade hidráulica do solo. Wolle & Carvalho (1989) mostram que a ação combinada de chuva precedente e chuva intensa de curta ou média duração são responsáveis pelos fenômenos estudados na Serra do Mar (SP). Wolle (1988) afirma que chuvas, de no mínimo 180 mm diários, podem deflagrar escorregamentos significativos na Serra do Mar, desde que anteriormente tenham ocorrido chuvas regulares. A partir de estudos dos mecanismos de escorregamentos na Serra do Mar, aquele autor relata que as chuvas provocam a elevação do nível freático e geração de forças de percolação, preenchimento temporário de fendas, trincas e demais estruturas em solos saprolíticos e rochas (fraturas, juntas) com geração de pressões hidrostáticas e formação de frentes de saturação sem a formação de nível da água (em solos não saturados), diminuindo a resistência dos materiais pela redução da sucção matricial.

Kanji et al. (1997) resumiram alguns dados da bibliografia no gráfico da Figura 24, que correlaciona chuvas acumuladas com diferentes períodos. Os escorregamentos grandes e catastróficos ocorreram mais frequentemente sob altos valores de precipitação acumulada e durações grandes (diversos dias a semanas) de chuva; corridas de detritos ocorreram significativamente sob chuvas de muito alta intensidade em períodos curtos de tempo (minutos a poucas horas).

Essa relação confirma-se para as encostas da Serra do Mar (região de Cubatão-SP), onde os escorregamentos costumam ocorrer quando os índices pluviométricos superam 100 mm em um dia; porém, eventos de maior porte ou escorregamentos generalizados sempre foram registrados quando a intensidade das chuvas foi superior a 180 mm para períodos de 24 horas (WOLLE, 1988). A relação também se confirma para a encosta de São Vendelino, onde a precipitação medida no posto pluviométrico junto à cidade (148 mm em um período de 2 horas) gerou diversas rupturas simultâneas do tipo corrida de detritos.

No gráfico da Figura 4 a superfície inferior para todos os casos registrados é a curva que representa a condição mínima de chuva a partir da qual ocorrem escorregamentos. Essa superfície inferior é dada pela equação 1:

$$\text{Equação 1: } P = 21,1 \cdot (t)^{0,48}$$

Onde: P é a precipitação (em mm) e t é o período de tempo (em horas, válido para um período de até 10 dias). Acima dessa curva, os movimentos de massa aumentam o grau de catástrofe; nesse caso, correspondem às chuvas de maior período de retorno.

Assim como Kanji et al. (1997), Kanji et al. (2000) e Kanji & Gramani (2001) relacionaram a chuva acumulada em função do tempo de alguns casos da bibliografia e apresentaram o gráfico da Figura 5. Para fins de comparação, o caso registrado na área de estudo encontra-se plotado no gráfico da figura citada. As curvas do gráfico definem um limite crítico acima do qual ocorrem escorregamentos e corridas de detritos. Este limite crítico é definido como sendo a curva limite inferior para todos os casos registrados, a qual apresenta a condição de deflagração mínima para os eventos. A curva pode ser expressa pela equação 2, onde P é a precipitação acumulada (em mm) e t é o tempo (em horas).

De forma geral, quanto mais acima desta curva, maior é a probabilidade de ocorrência de corridas de detritos e mais catastróficos serão os seus efeitos. As observações realizadas por

Kanji et al. (1997) e, posteriormente, Kanji et al. (2000) e Gramani & Kanji (2001), possibilitaram o zoneamento do gráfico para diferentes graus de consequência, nas seguintes situações: (a) Zona I: probabilidade de ocorrência de escorregamentos; (b) Zona II: grande probabilidade de ocorrerem escorregamentos generalizados com desenvolvimento de corridas de detritos e (c) Zona III: ocorrências altamente catastróficas, sempre associadas à geração de corridas de detritos.

Equação 2: $P = 22,4 \cdot (t)^{0,41}$

2.3.3. Parâmetros Associados às Corridas de Detritos

Como já mencionado, a ocorrência de corridas de detritos é favorecida por um conjunto de condicionantes do meio físico que permitem a sua formação e desenvolvimento. São reconhecidos aspectos relacionados às condições geológicas, geomorfológicas, hidráulicas, condições climáticas e questões do uso e ocupação de áreas de risco que contribuem simultaneamente para a deflagração do processo. Desta forma, as corridas de detritos caracterizam-se por apresentar uma dinâmica regida principalmente pela mecânica dos solos e pela mecânica dos fluidos, fazendo com que seja um tipo de movimento de massa bastante complexo.

Para o entendimento deste processo, vários trabalhos científicos e multidisciplinares têm sido desenvolvidos em todo o mundo, sendo muitos baseados em aproximações empíricas, ou seja, baseadas em observações diretas ou em experiências de laboratório. Os modelos matemáticos, introduzidos para explicar as características das corridas de detritos e determinar os seus parâmetros mais importantes, também são baseados em dados empíricos e dependem de alguns tipos de calibrações de campo ou de laboratório.

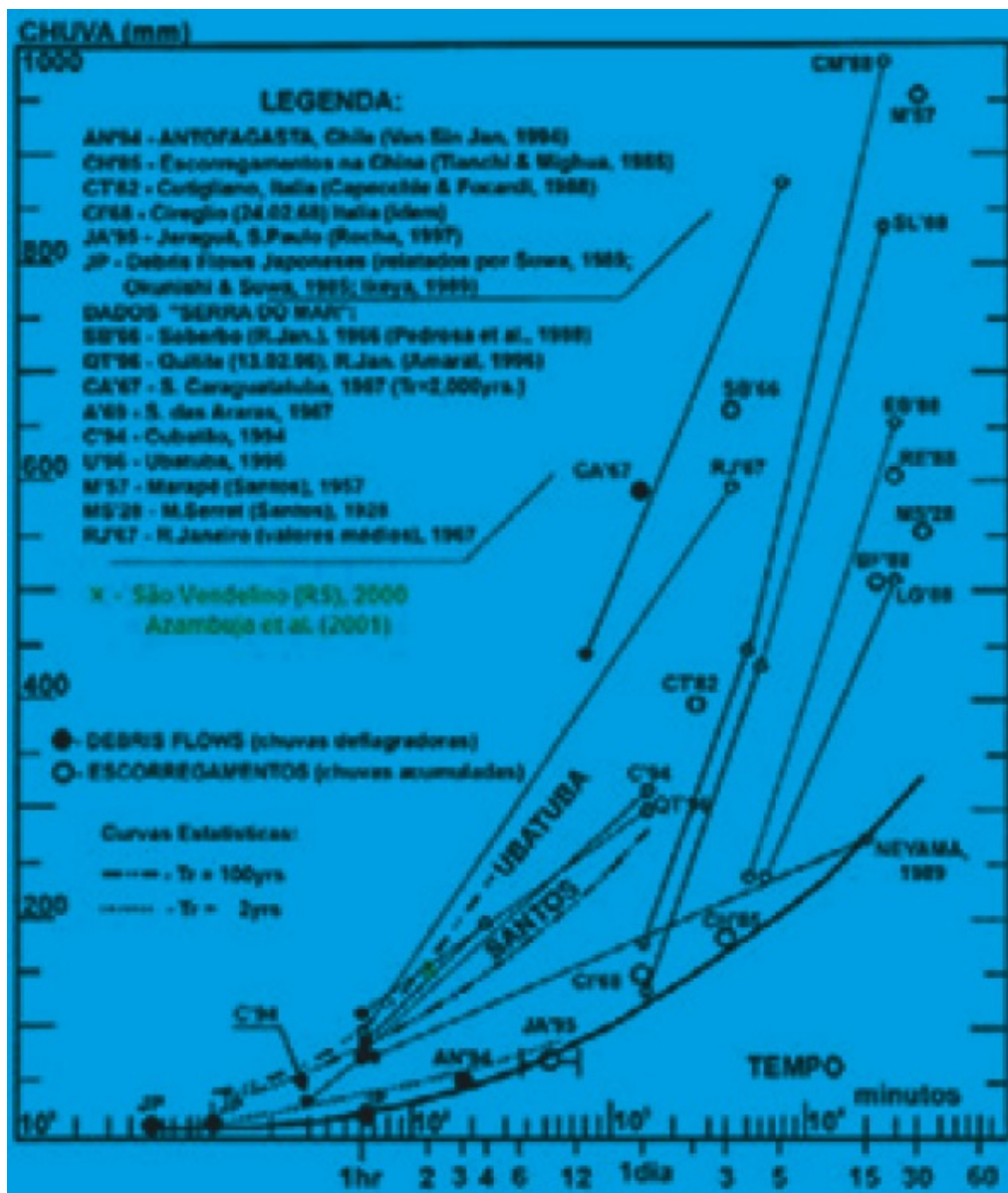


Figura 4: Gráfico de correlação de chuvas acumuladas versus tempo de duração correspondente e rupturas observadas (KANJI et al., 1997)

As corridas de detritos possuem características físicas e dinâmicas distintas de outros movimentos de massa. Diferem dos escorregamentos em maciços de solo pela maior velocidade de escoamento e por um comportamento mais fluido. Existem dois procedimentos para entender o comportamento mecânico das corridas de detritos (MACIAS et al., 1997): (a) relações empíricas, que estão baseadas em dados de observação e em medições de campo para vários eventos e (b) relações analíticas por retro análise, as quais estão baseadas nas características de geometria e de comportamento reológico das corridas de detritos. No primeiro procedimento, a ênfase é dada na vazão de pico dos canais, nas vazões para períodos de retorno de 100 ou 200 anos e nos valores de intensidade de chuva para a área analisada e, no segundo, a análise utiliza os parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade.

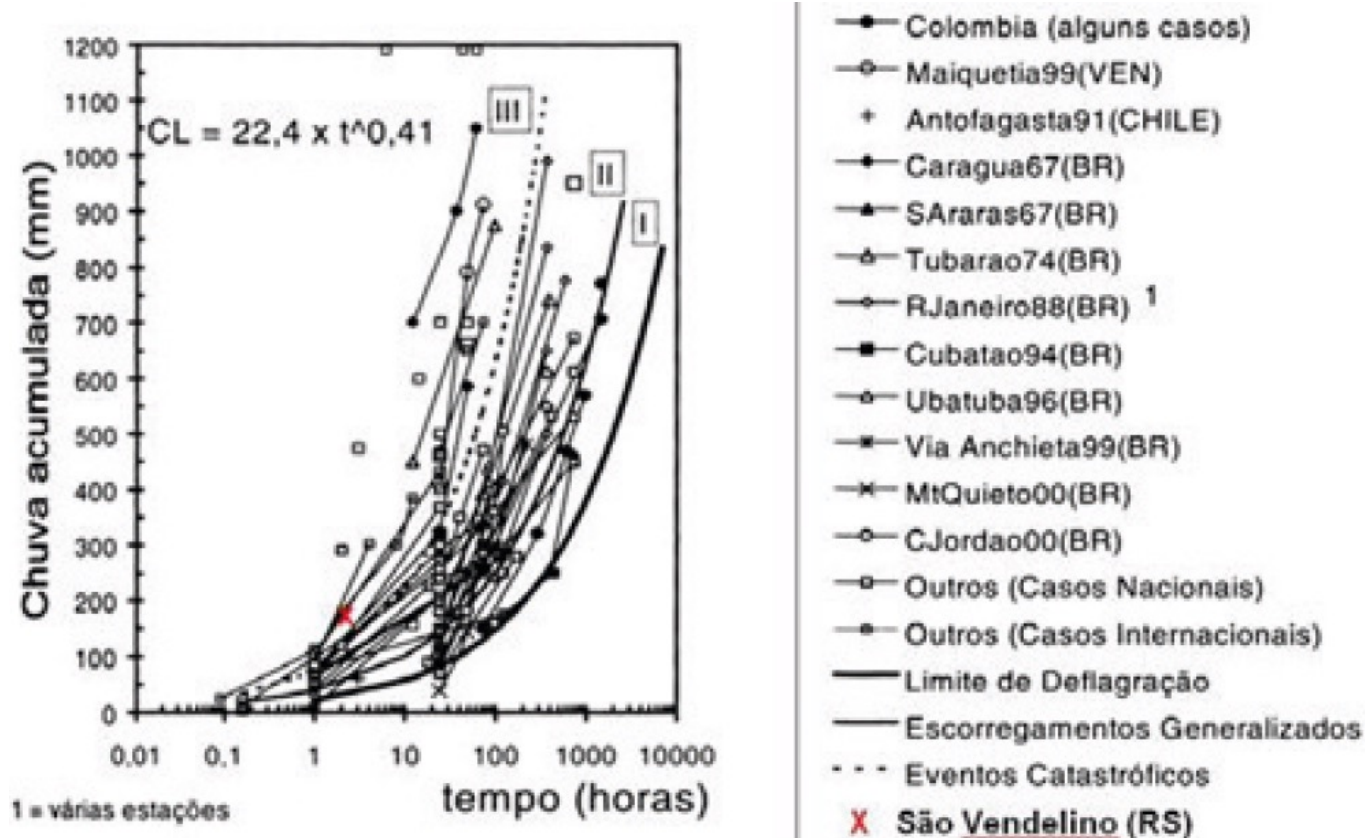


Figura 5: Gráfico chuva acumulada versus respectivo tempo de chuvas que deflagram corrida de detritos e grandes escorregamentos (KANJI et al., 2000 e GRAMANI & KANJI, 2001)

Znamensky (2001) apresenta em seu trabalho alguns dos vários Modelos Reológicos (MR) utilizados na tentativa de representar o comportamento dos fluxos. Alguns desses modelos podem ser relacionados como: (a) MR friccional de Coulomb/Mohr; (b) MR colisional de Bagnold; (c) MR friccional-colisional de McTigue; (d) MR macroviscoso de Bagnold-Einstein; (e) MR viscoplástico de Bingham; (f) MR viscoplástico de Bingham-Johnson; (g) MR viscoplástico inercial de O'Brien-Julien. A abundância de modelos utilizados para a descrição analítica das corridas de detritos indica tratar-se de um fenômeno bastante complexo; mas, também, revela certa precariedade do seu grau de conhecimento (ZNAMENSKY, 2001).

A partir das referências bibliográficas citadas nesta revisão e de acordo com Massad et al. (1997) as corridas de detritos apresentam: (a) velocidades de fluxo elevadas (5 a 20 m/s); (b) elevada capacidade de erosão e destruição, devido às elevadas pressões de impacto (30 a 1000 kN/m²); (c) grande capacidade de transporte de detritos (galhos e troncos de árvores, blocos de rocha, cascalho, areia e lama) a grandes distâncias, mesmo em baixas declividades (5° a 15°); (d) desenvolvem-se em períodos de tempo muito curtos (segundos a poucos minutos); (e) a vazão de pico de uma corrida de detritos pode alcançar um valor de 10 a 20 vezes superior à vazão de cheia hidráulica, para a mesma bacia e a mesma chuva; (f) a concentração de sólidos, em volume, pode variar em ampla faixa, de 30% a 70%. As corridas de detritos geralmente ocorrem em encostas com declividades acima de 25° e são mais comuns em inclinações com intervalo aproximado de 30° a 35°. Geralmente a declividade dos canais varia de 8° a 15° (GRAMANI & KANJI, 2001).

Znamensky (2001) apresenta uma extensa revisão dos principais parâmetros que interferem no comportamento e no desenvolvimento das corridas de detritos em bacias hidrográficas.

Os principais parâmetros destacados pelo autor correspondem a concentração dos fluxos (volumétricos e em peso), densidade das diferentes fases, velocidade, vazão e volume das corridas. O autor fez um estudo dos principais constituintes das corridas de detritos e o seu desenvolvimento nos canais, fazendo uma revisão dos principais modelos reológicos aplicados aos estudos das corridas de detritos.

Na bibliografia geotécnica especializada, os principais parâmetros usualmente estimados em corridas de detritos são: a velocidade de fluxo (v); a descarga de pico (qt); o volume de sólidos transportados (V_s); a concentração de sólidos (c) e as forças de impacto dos detritos (F). Esses parâmetros podem ser estimados em função da área e da forma da bacia, das características dos materiais envolvidos e das chuvas que antecedem o evento. Existem diversas correlações para a determinação desses parâmetros, quase todas fundamentadas em experiências regionais, associadas à geologia e à geomorfologia (AZAMBUJA et al., 2001).

2.4. Casos Históricos de Ocorrência de Corridas de Detritos

Na bibliografia podem ser encontrados relatos de ocorrência de corridas de detritos em diversos ambientes geológicos. No Brasil, geralmente há maior frequência de ocorrência de corridas de detritos em ambientes que apresentam solos residuais espessos, depósitos coluvionares, aluvionares e de talus. A geração das corridas de detritos descritas nacionalmente está geralmente associada a escorregamentos generalizados após chuvas de grande intensidade. Também se relata, em alguns casos, a formação de barramentos naturais durante a própria corrida, de modo a gerar pulsos posteriores.

Com a intenção de abordar alguns casos históricos, foram revisados eventos expressivos de corrida de detritos ocorridas na última década nos principais ambientes geológicos do Brasil.

Referências para este tópico podem ser obtidas em Gramani (2001) onde o autor descreve detalhadamente diversos casos ocorridos no Brasil e no exterior.

De forma geral, os diversos casos da bibliografia ocorreram com características peculiares e semelhantes entre os diversos ambientes geológicos. Também de forma geral pode-se dizer que estes casos foram deflagrados por chuvas intensas em regiões serranas, em encostas com alturas da ordem de 600 m a 1300 m, envolvendo bacias restritas, ou uma sequência de bacias. Os casos dos ambientes geológicos da Serra do Mar e da Serra Geral, apresentados na bibliografia geotécnica, estão listados no Quadro 6.

2.4.1. Serra do Mar

A Serra do Mar é uma sequência de montanhas que apresenta uma dinâmica muito ativa, relacionada a movimentos de massa. A mesma estende-se desde o norte do Estado de Santa Catarina até o sul da Bahia. A Serra do Mar apresenta características geológicas e

geomorfológicas muito semelhantes em toda a sua extensão, configurando bacias na forma de pequenos anfiteatros. Suas escarpas atingem de 800 m a 1200 m de altura (GRAMANI & KANJI, 2001). Este ambiente geológico apresenta elevada potencialidade à ocorrência de escorregamentos que podem evoluir transformando-se em corridas de detritos.

Observam-se na região sudeste do país o maior predomínio de ocorrências de corridas de detritos, especificamente nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, principalmente nas encostas próximas à Cubatão (SP).

Dentre as ocorrências de corridas de detritos na Serra do Mar, referenciadas na bibliografia, o acidente ocorrido em Caraguatatuba (SP), em março de 1967, é considerado um dos mais expressivos movimentos de massa ocorridos no mundo ocasionado pela ocorrência de fortes chuvas. No mesmo ano do acidente catastrófico em Caraguatatuba, outro grande processo ocorreu nas encostas da Serra das Araras (RJ).

No Estado de São Paulo, na área da Serra de Cubatão, registraram-se corridas de detritos no viaduto IV (EFSJ), na Grotta Funda (RFF), na Via Anchieta e alguns eventos menores no Braço Norte e Rio Cachoeira. No litoral norte, destaca-se o caso de Ubatuba (SP). No estado do Rio de Janeiro, podem ser citadas as corridas de detritos de Petrópolis e dos Morros do Quitite e do Papagaio. No Estado de Santa Catarina, as corridas de detritos na Serra de Tubarão.

Conforme Massad et al. (1997), na região de Cubatão (SP), a área é dominada por rochas gnáissicas, com estrutura paralela à serra, porém com mergulhos para o seu interior; ao pé da serra, ocorrem micaxistos, menos resistentes. Nessa região, ocorrem várias falhas, algumas ao longo de trechos retilíneos dos principais córregos. O manto de solo residual ocorre de forma generalizada ao longo da encosta e pode ter espessuras significativas nas elevações superiores (600 a 800 m); esses solos estão sujeitos a escorregamentos em virtude da elevada declividade (acima de 35°) e à incidência de chuvas concentradas. Os poucos afloramentos rochosos resultam principalmente dos escorregamentos e da erosão dos cursos d'água. Nas partes inferiores da encosta, ocorrem depósitos coluvionares e aluvionares.

Os depósitos coluvionares são constituídos de matriz de solos argilo-arenosos e siltoarenosos, com abundante quantidade de fragmentos e blocos de rocha, em proporções diversas. Os depósitos aluvionares, que podem alcançar 8 m de espessura, desenvolvem-se basicamente ao longo de todos os cursos d'água e são constituídos principalmente de areias, seixos, cascalhos e blocos de rocha, provenientes do transporte em alta velocidade. Esses blocos de rochas têm normalmente dimensões métricas (1,5 a 2 m), mas excepcionalmente encontram-se blocos de até 6 m ou 7 m de diâmetro, transportados pela elevadíssima energia das corridas de detritos. A chuva média anual na região serrana é de 3000 mm e a temperatura média varia de 20 a 25 °C durante o ano.

A região onde se concentraram esses acidentes compreende também as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral; nesse local, as sequências de derrames basálticos são superpostas por unidades vulcânicas ácidas (rochas riodacíticas). Os derrames basálticos são de espessura pequena a moderada no local, raramente ultrapassando 15 metros; já os derrames de topo (ácidos) apresentaram-se com espessuras de até 60 metros. A região apresenta três principais lineamentos tectônicos regionais (N30E; N70E; N60W), que condicionam as

formas de relevo e as direções das principais drenagens. Face às características geológicas e morfológicas das encostas, os escorregamentos translacionais de taludes infinitos, as corridas de detritos e a queda de blocos são os movimentos mais frequentes.

Nº	Local/data	Vol. (m³)	H/L	Chuva	Vel.	Área da bacia	Perdas
1	Vale do Paraíba (MG/SP) 1948 e 2000 Serra da Mantiqueira	$> 10^6$					250 mortes, centenas de casas destruídas
2	Serra das Araras (RJ) 1967 Serra do Mar	$> 2,5 \times 10^5$		275 mm-24 h 114 mm-1 h 70 mm/h			1200 mortes, destruição de muitas casas e algumas estradas
3	Caraguatatuba (SP) 1967 Serra do Mar	2×10^6 $7,6 \times 10^6$	0,07	586 mm-48 h 420 mm-24 h			120 mortes e 400 casas destruídas
4	Tubarão (SC) 1974 Serra do Mar			742 mm-384 h 354 mm-72 h			195 mortes e a cidade inundada
5	Serra de Maranguape (CE) 1974		0,28	> 140 mm-24 h		10,4 km²	12 mortes e muitas casas destruídas
6	Lavinhas (SP) 1986-2000 Serra da Mantiqueira	$> 1,6 \times 10^5$	0,13	> 70 mm-1 h	22 m/s	17,5 km²	11 mortes e muitas casas e pontes destruídas
7	Cubatão (SP) 1985, 1994 e 1996 Serra do Mar	3×10^5 (94) $1,6 \times 10^4$ (96)	0,27	40 mm-1 h 250 mm-24 h	10 m/s	2,64 km²	10 dias de paralisação na produção de óleo – perda de US\$ 44 milhões
8	Petrópolis (RJ) 1998 Serra do Mar			145 mm-24 h 414 mm-144 h			171 mortes, 1100 casas foram interditadas
9	Timbé do Sul (SC) 1995 Serra Geral	$> 3 \times 10^6$	0,12	> 500 mm-24 h	2,5-5 m/s	23,1 km²	29 mortes, perdas na agricultura e destrui- ção de algumas casas
10	Ubatuba (SP) 1996 Serra do Mar			442 mm-13 h > 10 mm/10 min.			Parte da rodovia Taubaté-Ubatuba foi destruída
11	Via Anchieta (SP) 1999 Serra do Mar	$> 3 \times 10^5$	0,18	128 mm-24 h 274 mm-72 h 481 mm-192 h			Parte da Via Anchieta destruída
12	Grota Funda (SP) 1975 Serra do Mar	$> 10^6$			8,4 m/s		Afetados estrada de ferro e pilar da ponte
13	Quitite e Papagaio (RJ) 1995 Serra do Mar	9×10^4 (Q) $4,2 \times 10^4$ (P)	0,47	115 mm-24 h 202 mm-24 h 199 mm-24 h	5,3 m/s (Q) 2,8 m/s (P)	2,13 km² (Q) 2,52 km² (P)	Destruição de cimenas de casas e morte
14	Viaduto IV (SP) 1971 Serra do Mar						Destruição do viaduto da ferrovia Santos- Jundiaí
15	São Vendelino (RS) 2000 Serra Geral	$1,3 \times 10^4$	0,3	148 mm-2 h	9 m/s	10 km²	3 mortes e a rodovia RS-122 interditada por 2 meses

Quadro 6: Características e consequências dos principais casos de corridas de detritos no Brasil (GRAMANI & KANJI, 2001).

2.4.2. Serra Geral

As encostas basálticas da Formação Serra Geral no sul do Brasil envolvem os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. A Formação Serra Geral define o acidente geográfico

escarpa da Serra Geral (denominada Aparados da Serra na região), com altitudes que oscilam de 300 a 1000 m. Destaca-se a ocorrência de lineamentos de dimensões variadas, que podem, em sua grande maioria, representar falhas de extensão regional ou sistemas de fraturas associados à deformação rúptil imposta nessas estruturas geológicas. Essas feições podem ser encontradas encobertas por depósitos de encosta e como parte da calha das principais drenagens verificadas na região.

A escarpa da Serra Geral enquadra-se em um cenário geológico-geomorfológico que tem grande susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa. A Formação Serra Geral é caracterizada por duas sequências de derrames vulcânicos distintos e justapostos: (a) sequência básica, predominantemente nos níveis inferiores, representada por basaltos toleíticos de textura afanítica, estrutura maciça e coloração preta a esverdeada; e (b) sequência ácida, predominantemente em direção ao topo do pacote vulcânico, onde predominam riolitos, dacitos e riodacitos de coloração acinzentada a avermelhada. Nesta formação pode-se também verificar a ocorrência de diques, arenitos intertraps e corpos irregulares de diabásio.

Em dezembro de 1995 ocorreram chuvas torrenciais na região sul do estado de Santa Catarina provocando a ocorrência de diversas corridas de detritos associadas a instabilidades de taludes (GRA-MANI & KANJI, 2001). A área afetada compreendeu as bacias do Rio Figueira e Fortuna, em Timbé do Sul (SC), do Rio Pinheirinho, em Jacinto Machado (SC), e do Alto São Bento, em Siderópolis (SC) (cerca de 50 km ao norte). Estas chuvas tiveram elevada intensidade provocando enchentes violentas, muitos escorregamentos e enxurradas catastróficas. Centenas de pessoas ficaram desabrigadas e pelo menos 29 pessoas morreram. Houve grande perda de solo agricultável, prejudicando a principal atividade econômica de muitas famílias.

Segundo Gramani (2001), neste evento os materiais dos canais foram mobilizados pelas corridas, alterando a morfologia das drenagens. Onde os vales apresentavam-se localmente estreitos, blocos foram arrancados e carregados por mais de 100 m de distância.

Por similaridade a outros fenômenos, nos vales afunilados provavelmente ocorreu a formação de barramentos naturais de detritos que, ao interromper o fluxo temporariamente, provocam grandes ondas de detritos ao romperem pouco tempo depois. Grandes troncos de árvore, provenientes da encosta da serra, formaram depósitos laterais de grande expressão. Muitas vezes a enxurrada (ou enxurro de detritos) aproveitou antigos leitos secundários das drenagens, ampliando a área destruída e remobilizando os materiais. É interessante notar que as grandes movimentações de massa se restringiram às três bacias e não apresentaram transição para as áreas vizinhas, que não foram afetadas por escorregamentos. Isto demonstra a importância das chuvas intensas como deflagradoras dos processos e sua concentração em áreas relativamente localizadas.

Na bibliografia podem ser encontrados trabalhos como os de Pellerin et al (1997) apud Gramani (2001), que afirmam que a formação de uma cumulonimbus foi responsável pela ocorrência de escorregamentos generalizados na região de Timbé do Sul (SC) em dezembro de 1995. Em dezembro de 2000, a região de São Vendelino (RS) foi submetida a uma chuva atípica de grande intensidade e duração da ordem de 2 horas, devido a uma nuvem gigantesca (muito provavelmente um cumulonimbus) que teve condições favoráveis

de formação. Estudos sobre a atuação de cumulonimbus (nuvem que provoca chuva forte, granizo e trovoadas) estimam que a mesma pode chegar a precipitar um total de 500 mm/hora, com o ciclo se completando entre 1 e 2 horas.

Devido à ocorrência de corrida de detritos e devido à necessidade de obtenção de dados para projetos de obras de estabilização, Azambuja et al. (2001b) analisaram dados históricos de chuvas obtidos das estações pluviométricas disponíveis na região de São Vendelino (RS).

Os registros pluviométricos diários do ponto meteorológico de São Vendelino foram obtidos do período entre 1970 e 1998. Também foram obtidos registros pluviométricos diários do ponto meteorológico de Caxias do Sul (RS), no período entre 1943 e 1994.

Após as análises, os autores realizaram uma avaliação probabilística desses registros. Os dados analisados foram originados a partir de leituras diárias de chuvas, entretanto foi possível plotar no gráfico da Figura 6 as curvas intensidade (mm/h) versus duração das precipitações (min). No gráfico citado, também foi plotada a precipitação observada em 24 de dezembro de 2000, cuja estimativa de recorrência (Tr) seria da ordem de 250 anos. Como pode ser observado, o equilíbrio do ambiente daquela data estava fundamentado em precipitações mais modestas do que a ocorrida, razão pela qual é compreensível que, em tais condições de chuvas, extensivas instabilidades de talude tenham se manifestado.

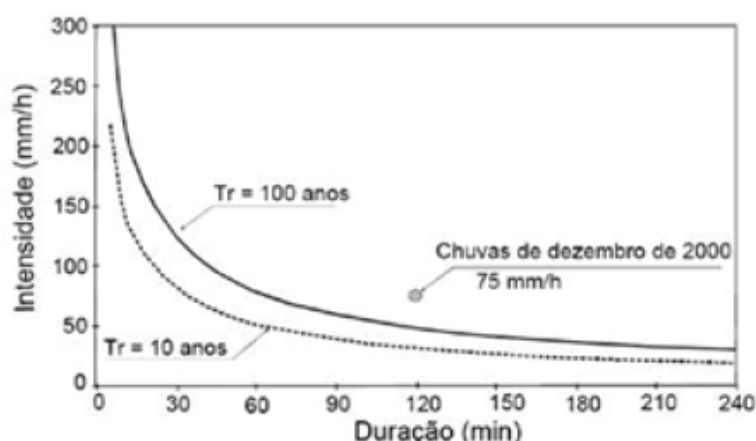


Figura 6: Análise das relações duração x intensidade das chuvas

Entre os tipos de instabilidades ocorridas na área de estudo, foram identificados escorregamentos rotacionais de taludes de solo, rastejos de massas de solo, quedas de blocos, escorregamentos translacionais e corridas de detritos. Durante o episódio das chuvas intensas foram verificados rastejos de massas coluvionares. Também ocorreram diversos escorregamentos translacionais na direção dos talwegues e dos canais naturais de drenagem das bacias da região. Como esses canais de drenagem são extensos, com declividade acentuada e com bacias de contribuição amplas, houve condições particularmente favoráveis para a formação de corridas de detritos.

Segundo Azambuja et al. (2001b), relatos de moradores antigos indicaram que a região já havia apresentado outros casos de movimentos de massa do tipo corridas de detritos, porém nada com tal intensidade e poder de destruição. Conforme o autor, foram contabilizados 47 importantes escorregamentos de taludes, entre os quais 10 foram corridas

de detritos. Seis rodovias vicinais foram soterradas com toneladas de solo, blocos de rocha e árvores e a principal rodovia estadual (RS 122) de acesso a Caxias do Sul (RS) foi interrompida completamente em 10 pontos. Infelizmente, o episódio ainda contabilizou três vítimas fatais. O Quadro 6, apresentado anteriormente, mostra as características e consequências dos principais casos de corridas de detritos de diversos ambientes geológicos no Brasil (GRAMANI & KANJI, 2001).

2.5. Discussão Sobre Condições de Ruptura

O estado de tensões que ocorrem em campo antes da ocorrência de rupturas de taludes tem grande influência da direção das tensões principais (σ_1) e da magnitude da tensão principal intermediária (σ_2) como pode ser visualizado nas Figuras 7 e 7b. Estas figuras ilustram a atuação das tensões principais em elementos de solo ao longo de superfícies de cisalhamento hipotéticas de duas rupturas de talude, uma rotacional e outra translacional. Na Figura 7^a estão representadas três situações em que a direção da tensão principal maior (σ_1) varia de elemento para elemento ao longo da superfície de cisalhamento. Para estes casos os comportamentos de campo podem ser bem representados a partir de ensaios triaxiais de compressão convencionais, ensaios simple shear (ou ensaios hollow cylinder) e ensaios triaxiais de extensão. Já para o caso da Figura 7b, a direção das tensões principais não é próxima de 0° ou 90° na maioria da superfície de ruptura. Esta rotação de tensões principais pode ser efetuada no ensaio hollow cylinder, podendo-se simular as condições de deformação plana ou outras condições de variação da tensão principal intermediária.

Segundo Skempton & Hutchinson (1969), taludes infinitos consistem em taludes de encostas naturais que se caracterizam pela sua grande extensão e pela reduzida espessura do manto de solo. A experiência brasileira, e em especial no sul do país, indica rupturas com valores de 5 a 20 m de largura, espessura de 1,5 a 4 m envolvendo toda a camada de solo e comprimentos bastante variáveis entre 50 e 150 m (BRESSANI et al., 1997).

Stark & Eid (1998) citam em seu trabalho que a maioria das análises de estabilidade de taludes são realizadas em duas dimensões utilizando o método do equilíbrio limite. Este método calcula o fator de segurança de rupturas de taludes assumindo a condição de deformação plana. Portanto, neste método está implicitamente assumido que a superfície de ruptura é infinitamente larga e, assim, os efeitos de três dimensões são negligenciáveis. Na prática, os taludes não são infinitamente largos e os efeitos de três dimensões influenciam em suas estabilidade. Duncan (1992) afirma que análises de estabilidade em duas dimensões são apropriadas para taludes porque fornecem uma análise conservativa do fator de segurança, já que os efeitos de resistência ao cisalhamento das extremidades laterais da superfície de ruptura não são levados em consideração. É interessante observar que embora ensaios em deformação plana não sejam rotineiramente utilizados para definição dos parâmetros de ruptura de taludes, muitos casos de comparações entre retro análises de rupturas e resultados de ensaios triaxiais convencionais tem mostrado boa concordância entre os parâmetros derivados.

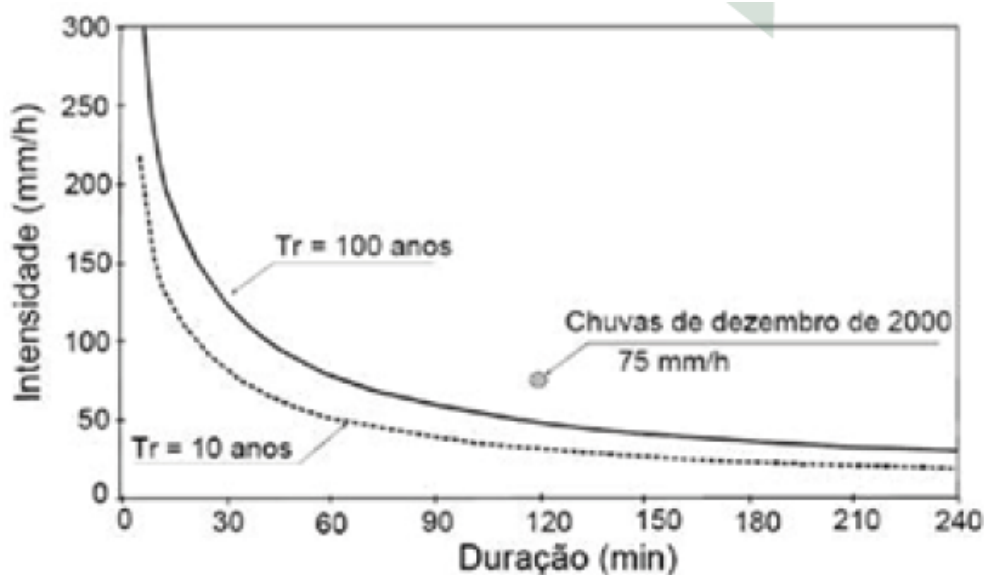


Figura 7: Tensões principais na superfície de cisalhamento (a) em uma ruptura rotacional de talude e (b) em uma ruptura translacional de talude (adaptado de SKEMPTON & HUETHINSON, 1969).

Para estudar o efeito da rotação das tensões principais e da variação da tensão principal intermediária foram realizados ensaios utilizando o equipamento hollow cylinder. Este ensaio permite o controle da direção e da magnitude das três tensões principais através da imposição de carregamento axial, torque e diferentes pressões hidráulicas (internas e externas) a um corpo de prova de solo com formato tubular. Assim, é possível submeter os corpos de prova a trajetórias de tensões com rotação das tensões principais (variação de α entre 0° e 90°) e com variação da tensão principal intermediária (variação do parâmetro b entre 0 e 1,0). Os ensaios realizados para este trabalho tiveram o objetivo de pesquisar o comportamento do solo, quando submetido a trajetórias de tensões que simulam as condições pré-ruptura do talude rompido na área de amostragem.

O mecanismo de ruptura do tipo corridas de detritos está intimamente associado ao comportamento mecânico dos solos e ao fluxo de água sub-superficial que se estabelece nos mesmos (KANJI et al., 1997). No regime normal de chuvas, rupturas isoladas são rotineiras e parte do processo de evolução; porém, um evento pluviométrico de grande intensidade causa um número muito maior de rupturas simultâneas, às vezes seguidas da ocorrência de corridas de detritos, em função da geometria da bacia (Kanji et al., 2000). Na bibliografia são encontrados trabalhos que apontam valores pluviométricos de 50 a 70 mm/h como limites para a deflagração de rupturas catastróficas como apresentado na Figura 2.6 (rupturas em colúvios com posterior deflagração de corridas de detritos) (KANJI et al., 1997). Valores similares de precipitação (148mm/2 h) foram medidos durante a chuva que provocou uma sequência de escorregamentos e corridas de detritos associados em dezembro de 2000, na RS 122, município de São Vendelino (RS).

Os escorregamentos que geram corridas de detritos geralmente começam em cotas bastante elevadas (que normalmente apresentam as maiores declividades) e causam a ruptura nas cotas inferiores num processo progressivo (KANJI & GRAMANI, 2001). Segundo Ellen & Fleming (1987), a instabilidade comum em taludes rasos de colúvio envolve dois distintos

componentes de movimento: um escorregamento raso rotacional ou translacional seguido por um escoamento da massa perturbada. Este modo de ruptura resulta de uma cicatriz relativamente pequena localizada no início do deslizamento, formando a seguir uma longa língua formada pelo escoamento de solo liquefeito e por corridas de detritos. Vários autores notaram que o início e o tipo do movimento do talude de colúvio estão relacionados à sua espessura (ELLEN & FLEMING, 1987; FLEMING & JOHNSON, 1994).

Morgan et al. (1997) relatam que a maioria das instabilidades de taludes do tipo corridas de detritos inicia-se a partir de escorregamentos rasos (solos, detritos ou escorregamentos de massas rochosas), principalmente em encostas íngremes com abundantes solos residuais e coluvionares. As principais condições favoráveis para a ocorrência das corridas de detritos seriam: (a) abundante fonte de partículas e detritos de solos e/ou de rocha, (b) encostas íngremes (geralmente acima de 25°), (c) fonte abundante de água atingindo solos suscetíveis a escorregamentos (colúvios) e (d) vegetação esparsa. No caso brasileiro (ou tropical), a vegetação não parece ser tão importante, pois tem sido observadas corridas de detritos em áreas completamente florestadas, sendo que a superfície de ruptura passa por baixo das raízes.

Fleming et al. (1989) estudaram a rápida transformação de escorregamentos em corridas de detritos, considerando as propriedades de dilatação e contração dos solos como fatores para a geração do fenômeno. Os autores consideraram que, com poucas exceções, as corridas de detritos são resultados de escorregamentos nos quais ocorrem os processos de dilatação e posterior incorporação de água, reduzindo drasticamente a resistência ao cisalhamento e com o material adquirindo grande fluidez.

Segundo Lacerda (1989), a ruptura pode ocorrer mesmo com valores de poro-pressão inferiores ao valor necessário para que a trajetória de tensões efetivas atinja a envoltória de ruptura experimental. Segundo o autor, isto pode ocorrer devido às variações cíclicas de poro-pressão, por efeitos normais de ciclos chuva-drenagem, que levam os solos residuais a uma espécie de fadiga. O aumento da poro-pressão faz com que o estado de tensões efetivas do solo se aproxime das condições de ruptura. Segundo Lacerda et al. (1997), durante esta fase, ocorre um acúmulo de deformações que provocam a queda de resistência do solo. Como realçado pelo autor, as condições de campo vigentes em regiões tropicais são bastante propícias a esse mecanismo. Para verificação experimental deste mecanismo, Lacerda (1989) propôs a realização de uma série de ensaios triaxiais drenados com variação cíclica de poro-pressão. Os resultados desses ensaios mostraram que, quando a ciclagem se processa na parte interna da superfície de escoamento plástico, definida a partir de ensaios triaxiais convencionais drenados, ocorre a quebra das ligações entre as partículas, que induz à ruptura pelo efeito da ciclagem. Esta interpretação tem suporte experimental em evidências mostradas por Bressani & Vaughan (1989) para um solo artificialmente cimentado que perdeu parte de sua resistência ao cisalhamento quando foi submetido à ciclagem de tensões. Pode ser um fator importante quando a estrutura do solo (normalmente interpretada como cimentação) é um fator preponderante na resistência do material. Lacerda (2007) apresenta observações de campo e laboratório relacionando-as com a iniciação de corridas de detritos em solo saprolítico e coluvionar na região sul do Brasil.

O autor aponta evidências de que, na região do Rio de Janeiro, a iniciação de corridas de detritos pode também ser causada por impacto de blocos de rochas providas de cotas mais elevadas, além de chuvas intensas de longa duração.

Ao estudar as corridas de detritos vinculados a chuvas, é importante conhecer ou inferir o fluxo de água no subsolo. Embora o incremento da poro-pressão durante chuvas intensas seja esperado, sua distribuição no talude dependerá da variabilidade da permeabilidade tanto vertical quanto nas direções laterais e longitudinais, além das condições de umidade presente no solo antes da chuva analisada. Um excelente trabalho de coleta de dados piezométricos foi realizado por Johnson & Sitar (1990) mostrando que fluxos de água da rocha inferior pode promover grandes aumentos de poro-pressão no solo de maneira muito rápida e este aumento é diretamente vinculado às precipitações. Através de dados experimentais obtidos com instrumentação de campo, Johnson & Sitar (1990) mostraram que ocorrem picos de poro-pressão em diferentes tempos e em diferentes posições dos taludes, indicando que pulsos de poro-pressão seguem em direção a cotas inferiores da encosta durante as precipitações. Mostraram também que este pico de poro-pressão ocorria próximo do limite com o material rochoso inferior. Como decorrência das condições locais em Briones Hills, California, EUA, os picos de poro-pressão ocorriam e dissipavam dentro de intervalos de apenas 24 h.

Anderson & Sitar (1995) fizeram uma interessante revisão de diversas publicações relacionadas a rupturas e corridas de detritos, com ênfase nas trajetórias de tensões seguidas antes da ruptura. Em taludes íngremes, as tensões já estão próximas das envoltórias de resistência ao cisalhamento. Nestas condições, a condição de não-saturação e a presença de sucção ajudam a manter a estabilidade dos taludes. Durante chuvas intensas, a poro-pressão faz com que as tensões efetivas se aproximem da envoltória, primeiro pela redução da sucção e depois pela presença de poro-pressão positiva. Assim, a trajetória de ensaio de laboratório assimétrico drenado mais adequada para estudar a condição de campo seria uma trajetória aproximadamente horizontal que altera as tensões iniciais de campo (ponto A da Figura 8) por uma situação de descarregamento até, eventualmente, encontrar a envoltória de resistência do solo e romper (ponto C da Figura 8). Estas mesmas trajetórias de tensões efetivas para o caso de taludes já haviam sido sugeridas por Brand (1981, 1985), Lambe et al. (1989) para a análise da resistência ao cisalhamento de solos em taludes.

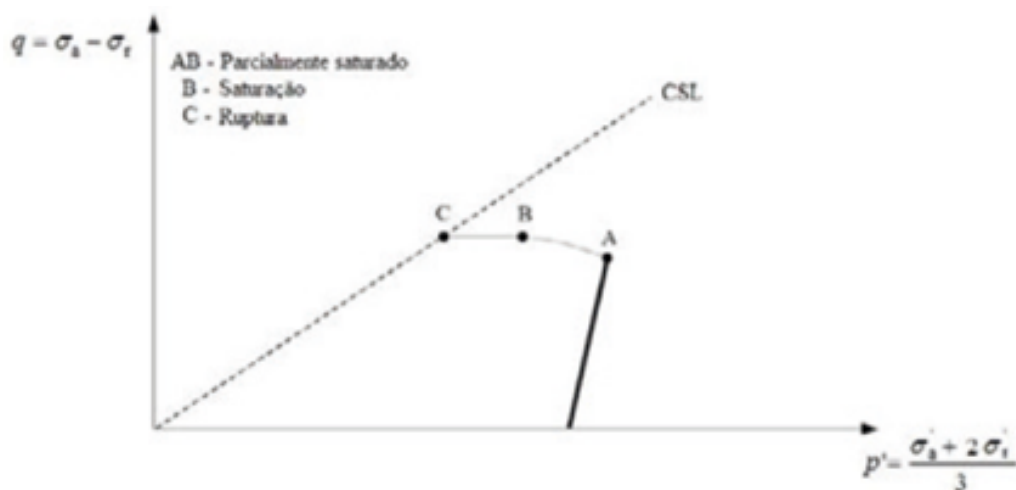


Figura 8: Trajetória de tensões seguida para um elemento de solo em um talude com aumento de poro-pressão.

Anderson & Riemer (1995) realizaram ensaios triaxiais convencionais e especiais (ensaios CSD – constant shear drained) para avaliação do potencial de colapso, isto é, a possibilidade de ocorrerem grandes deformações com queda de resistência ao cisalhamento. Foram testadas diferentes amostras de solo (areia bem graduada e solo coluvionar) com trajetórias de tensões drenadas com aumento progressivo da poro-pressão até a ruptura das amostras. Os autores obtiveram colapso em alguns ensaios de carregamento convencional em amostras fofas, o que não ocorreu nos ensaios CSD. Posteriormente Santos Jr. et al. (1996) discutiram resultados de ensaios CSD em solo coluvionar e solo residual oriundo de granito da encosta do Soberbo no Rio de Janeiro. Os autores citados concluíram que, em geral, o comportamento dos solos com as mesmas condições iniciais, submetidos a trajetórias de tensões em ensaios CSD, apresentam comportamento diferenciado em relação ao comportamento de ensaios triaxiais convencionais embora os parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos a partir dos diferentes ensaios tenham sido similares.

Anderson & Sitar (1995) apresentaram os resultados de um estudo do comportamento dos solos coluvionares de Briones Hill (Califórnia, EUA), que são susceptíveis a corridas de detritos. Eles realizaram ensaios triaxiais especiais em amostras indeformadas e submetidas a: (a) ensaios triaxiais drenados com tensão desvio constante (CSD), a partir de adensamento anisotrópico, e (b) ensaios de carregamento axial de compressão não drenados, a partir de adensamento anisotrópico (consolidated anisotropically undrained - CKoU).

Os autores concluíram que os solos testados de maneira drenada mobilizavam a resistência ao cisalhamento com expansão volumétrica e os corpos de prova ensaiados de forma não-drenada apresentavam uma rápida iniciação da ruptura (deformações axiais menores do que 0,5%), com pico de resistência definido, geração de poro-pressões positivas e acentuada queda da tensão desvio. Além disto, a envoltória de pico de resistência ao cisalhamento efetiva dos ensaios não drenados mostrava um ângulo de atrito interno de pico um pouco superior à definida pelos ensaios triaxiais drenados. Os autores concluíram que a solicitação não-drenada em campo pode causar corridas de detritos nos solos estudados.

Bressani et al. (2005) apresentaram um estudo do comportamento de um solo coluvionar oriundo de arenito, a partir de resultados de ensaios triaxiais CIU e CID. Silveira et al. (2004a, 2004b) apresentaram resultados de ensaios geotécnicos realizados com este solo. A região de origem do solo investigado pelos autores mencionados abrangia as encostas da Formação Serra Geral, cobertas por colúvios, entre os municípios de São José dos Ausentes (RS) e Timbé do Sul (SC), as quais apresentam grande susceptibilidade à ocorrência de instabilidade de taludes. Os autores encontraram evidências de que as trajetórias efetivas dos ensaios triaxiais têm um considerável efeito na envoltória de resistência ao cisalhamento encontrada, assim como em outros casos encontrados na bibliografia. Entre estes casos encontra-se o trabalho apresentado por Casagrande & Wilson (1953), o qual apresenta resultados de ensaios drenados e não drenados em dois materiais argilosos, cujos resultados, em termos de envoltória de resistência ao cisalhamento, eram maiores para os ensaios não-drenados do que para os ensaios drenados sem efeito de velocidade de deformação. Bressani & Vaughan (1989) apresentaram resultados de ensaios drenados convencionais comparados com drenados com trajetória horizontal (como as trajetórias apresentadas na Figura 9). Os

autores encontraram uma envoltória de resistência mais elevada para estes últimos ensaios do que a envoltória dos ensaios convencionais. O mesmo comportamento já havia sido encontrado por Brenner et al. (1985). Bressani et al. (1995) comentam que a comparação do comportamento dos ensaios convencionais drenados e não-drenados apresentados segue a tendência geral de maior resistência ao cisalhamento para trajetórias do tipo horizontal.

Kanji et al. (2000) desenvolveram uma metodologia onde se pode avaliar a suscetibilidade de ocorrência de corridas de detritos a partir de mapas de risco. Os autores consideram que a suscetibilidade, de uma área ou região, à ocorrência de corridas de detritos depende, basicamente, da existência e da combinação dos fatores pluviométricos, inclinação da encosta, inclinação de canais, área da bacia, altura das encostas, aspectos geológicos (tipo de rocha e de solo, espessuras, características físicas, erodibilidade), vegetação e uso e ocupação do terreno. Os fatores que interferem no processo, seus pesos relativos (W) e as respectivas classes (C) definidas pelos autores estão apresentados no Quadro 7. A determinação dos pesos para cada parâmetro foi estabelecida definindo-se a ordem de importância de cada fator, após análise e comparação dos inúmeros casos descritos na bibliografia. A nota parcial para cada atributo (NP) foi dividida em intervalos regulares, admitindo-se valores de 0 a 10.

A intensidade das chuvas (R) é o principal agente envolvido no processo de ocorrência decorridas de detritos, portanto possui um peso maior na análise aqui referenciada. A inclinação da encosta (S) corresponde a outro fator de grande importância, contribui com o aporte de material para os canais. A inclinação dos canais (D) é importante, pois afeta a energia/potência hidráulica disponível para o transporte de água e sedimentos. O fluxo tem sua trajetória condicionada pela forma da seção transversal do canal. A área da bacia (A) é responsável pela captação, distribuição, amortecimento e concentração das águas pluviais, interferindo diretamente na transformação da chuva em vazão – escoamento superficial e, portanto, nas condições de infiltração e percolação da água no solo). A altura da encosta (H), além de influenciar na geração de escorregamentos, também é considerada como fonte de energia para o desenvolvimento do fluxo. Estes quatro fatores aqui apresentados podem ser considerados como condicionantes geomorfológicos intervenientes na suscetibilidade de áreas de risco.

A vegetação e o uso e ocupação do solo (V) correspondem à porcentagem da área ocupada e florestada, expondo ou não o solo à dinâmica externa. Os aspectos geológicos ou geoindicadores (G) incluem a determinação do tipo de rocha e solo, suas propriedades geotécnicas e estruturais, e o mapeamento de depósitos que indiquem a recorrência do fenômeno na respectiva área.

A nota final (SG), variando de 0 a 100, é obtida a partir do cálculo do somatório das notas parciais de cada classe multiplicados pelo seu respectivo peso relativo (Equação 3). O Quadro 7 mostra a classe de suscetibilidade de ocorrência de corridas de detritos, partindo do enquadramento dos fatores anteriormente citados em diferentes classes e procedendo uma nota final.

$$\text{Equação 3: } SG = \sum NP_i \cdot W_i$$

Onde: SG é a nota final (nota de suscetibilidade); NP é a nota parcial; e W é o peso relativo de cada fator de risco.

Ortigão & Sayão (2004) apresentam em seu trabalho um exemplo de nota de suscetibilidade calculado para uma situação real, Bacia do Córrego das Pedras (Serra do Mar – Cubatão-SP), onde ocorreu uma grande corrida de detritos em 1994. Este evento foi detalhadamente descrito por Massad et al. (2000). Consideraram-se os seguintes valores: $R_2=60$ mm/h; $S_2=35^\circ$; $D_2=15^\circ$; $A_1=2,64$ km²; $H_2=650$ m; $V_4<30\%$; $G=G_1$. A partir da metodologia referenciada, tem-se que a nota final é 22 (SG). Conclui-se que a suscetibilidade de geração de corridas de detritos na área é, de fato, alta.

Gramani (2001) apresenta outros três exemplos além do exemplo citado no parágrafo anterior calculados para algumas situações reais e com características distintas. Os mesmos encontram-se apresentados a seguir: (a) Caso Bacias dos Rios Paios e Jacu (Serra da Mantiqueira, município de Lavrinhas-SP). Neste caso se consideraram os seguintes valores: $R_2=65$ mm/h; $S_2=38^\circ$; $D_3=15^\circ$; $A_3=12$ km²; $H_2=720$ m; $V_4<30\%$; $G=G_1$, tem-se que o resultado é 32, sendo a suscetibilidade média de geração de corrida de detritos (b) Caso Bacia adjacente ao Córrego das Pedras, com condições geológicas e geomorfológicas menos favoráveis à formação de corridas de detritos, os valores obtidos foram: $R_3=40$ mm/h; $S_3=30^\circ$; $D_2=15^\circ$; $A_1=1$ km²; $H_2=500$ m; $V_4<30\%$; $G=G_2$, tem-se que a nota final é 53,75. A suscetibilidade neste caso é baixa, como verificado na área. (c) Caso Venezuela (cidades portuárias do estado de Vargas), os valores estimados foram: $R_1=80$ mm/h; $S_1=45^\circ$; $D_2=20^\circ$; $A_2=5-10$ km²; $H_1=800$ m; $V=V^3$; $G=G_1$, tem-se o resultado de 7. Neste caso a suscetibilidade é muito alta para a área.

Fatores	Classe (C)	Peso relativo (W)	Atributos	Nota parcial (NP)
Chuva (R) (mm/h)	R1	3	>80	0
	R2		60-80	2,5
	R3		30-60	7,5
	R4		<30	10
Inclinação da encosta (S) (graus)	S1	2,5	>45	0
	S2		45-30	2,5
	S3		15-30	7,5
	S4		<15	10
Inclinação do canal (D) (graus)	D1	0,5	>25	0
	D2		15-25	2,5
	D3		10-15	7,5
	D4		<10	10
Área da bacia (A) (km ²)	A1	1	<5	0
	A2		5-10	2,5
	A3		10-20	7,5
	A4		>20	10
Altura da encosta (H) (m)	H1	1	>750	0
	H2		500-750	2,5
	H3		200-500	7,5
	H4		<200	10
Chuva (R) (mm/h)	R1	3	>80	0
	R2		60-80	2,5
	R3		30-60	7,5
	R4		<30	10
Inclinação da encosta (S) (graus)	S1	2,5	>45	0
	S2		45-30	2,5
	S3		15-30	7,5
	S4		<15	10
Inclinação do canal (D) (graus)	D1	0,5	>25	0
	D2		15-25	2,5
	D3		10-15	7,5
	D4		<10	10
Área da bacia (A) (km ²)	A1	1	<5	0
	A2		5-10	2,5
	A3		10-20	7,5
	A4		>20	10
Altura da encosta (H) (m)	H1	1	>750	0
	H2		500-750	2,5
	H3		200-500	7,5
	H4		<200	10

Quadro 7: Fatores utilizados na determinação da suscetibilidade de uma área na geração de corridas de detritos, atributos e notas parciais estabelecidas (KANJI et al.,2000).

Nota final (SG)	Suscetibilidade
0-15	Muito alta
15-30	Alta
30-50	Média
50-80	Baixa
80-100	Muito baixa

Quadro 8: Intervalos das análises e suscetibilidade de ocorrência de corridas de detritos (KANJI et al., 2000)

3. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, A.; RIEMER, M. M. Collapse of Saturated Soil due to Reduction in Confinement. Jour-nal of Geotechnical Engineering, 121(7), 544-552, 1995.
- ANDERSON, S. A.; SITAR N. Analysis of Rainfall- Induced Debris Flows. Journal of Geotechnical Engineering, 121(7), 544-552, 1995.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma Proposta Metodológica. 1ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (1º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, v. 2, 721-733, 1992.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (ed.) Geologia de Engenharia, São Paulo: ABGE, cap. 15, p. 243-269, 1998.
- AVELAR, A. S. Iniciação e Desenvolvimento de Fluxos Detríticos em Encosta: Ensaios Triaxiais de Choque e em Caixa Experimental Abordando o Caso do Soberbo (RJ). Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- AZAMBUJA, E.; ZENI, C. A.; BRESSANI, L. A.; NANNI, A. S. Avaliação dos Fluxos de Detritos em Alto Feliz no Rio Grande do Sul. 3ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (3º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, p. 17-24, 2001a.
- AZAMBUJA, M. A. E.; AZAMBUJA, E.; NANI, A. S.; UMANN, L. V.; STRAUS, M. Cadastro de Instabilidades e Projetos de Obras de Estabilização na RS 122 – Trecho entre São Vendelino (RS) e Nova Milano (RS). vol. 1, Cadastro e Manifestações Geotécnicas de Instabilidade, DAER/RS, 139 p., 2001b.
- BRAND, E. W. Analysis and Design in Residual Soils, Engineering and Construction. In: Tropical Soils, Proc. ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference Tropical and Residual Soils, Honolulu, Hawaii, ASCE, p. 89-146, 1981.
- BRAND, E. W. Predicting the Performance of Residual Soil Slope. Proc., 11th Int. Conf. On Soil Mech. and Found. Engrg., A. A. Balkema, Rotterdam. The Netherlands, v 5, 2541-2578, 1985.
- BRENNER, R. O.; TAM, H. K.; BRAND, E. W. Field Stress Path Simulation of Rain-Induced Slope Failure. Proc., 11th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engineering, Ed. Balkema, Brookfield, v. 2, p. 991-996, 1985.
- BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D.; TONON, J. Principais Tipos de Instabilidade de Taludes Junto a Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá (MT), Anais: ABPv, v. 2, p. 516-527, 1995.
- BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D.; SILVEIRA, R. M. Resultados de Ensaios Triaxiais em um Solo Coluvionar de Arenito da Escarpa da Serra Geral em Timbé do Sul (SC). 4ª Conferência Brasileira

- de Estabilidade de Encostas (4º COBRAE), Salvador (BA), Anais, ABMS/ABGE, 2005.
- BRESSANI, L. A.; VAUGHAN, P. R. Damage to Soil Structure During Triaxial Testing. Proc., 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., A. A. Balkema, Brookfield, v. 1, p. 17-20, 1989.
- BROMHEAD, E. N. The Stability of Slopes. 2nd ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 411p., 1986.
- CASAGRANDE, A.; WILSON, S. D. Prestress Induced in Consolidated-Quick Triaxial Tests. Proc. of the Third International Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Switzerland, v. 1, p. 106-110, 1953.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: Turner, A. K.; Shuster, R. L. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 36-75, 1996.
- ELLEN, S. D.; FLEMING, R. W. Mobilization of Debris Flows from Soil Slip, San Francisco Bay Region, Califórnia, 1987. In: TURNER, A. K. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 525- 554, 1996.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de Massa: uma Abordagem Geológico-Geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. (Orgs), Geomorfologia e Meio Ambiente. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro (RJ), 2º ed., p. 123-194, 1998.
- FLEMING, R. W.; ELLEN, S. D.; ALGUS, M. A. Transformation of Dilative and Contractive Landslide Debris into Debris Flow – An Example from Marin Country, California. Engineering Geology, v. 27: p. 201-223, 1989.
- FLEMING, R. W.; JOHNSON, A. M. Landslides in Colluvium. U. S. Geological Survey Bulletin 2059-B, 24 p. 1994, In: TURNER, A. K. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 525-554, 1996.
- FREIRE, E. S. D. Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática, Revista Construção, Rio de Janeiro (RJ), p. 10-18, 1965.
- GRAMANI, M. F. Caracterização Geológica-Geotécnica das Corridas de Detritos (Debris Flows) no Brasil e Comparação com alguns Casos Internacionais. Dissertação de Mestrado, EPUSP – USP, SP, 372 p., 2001.
- GRAMANI, M. F.; KANJI, M. A. Inventário e Análise das Corridas de Detritos no Brasil. 3º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (3º COBRAE). Rio de Janeiro (RJ), 2001.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Editora da USP/Edgard Blucher, 2º ed., 1984.
- HACK, J. T.; GOODLETT, J. C. Geomorphology and Forest Ecology of a Mountain Region in the Central Appalachians. U. S. Geological Survey Professional, paper 347, 66 p., 1960 In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., 525-554, 1996.
- HUTCHINSON, J. N.; BROMHEAD, E. N.; LUPINI, J. F. Additional Observations on Coastal Landslides of Folkestone Warren. Quartely Journal. Eng, Geot. v. 13, p. 1-31, 1980.
- HUTCHINSON, J. N. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides. Proc. In: Relation to Geology and Hydrogeology, 5th International Symposium on Landslides, Lausanne., v. 1, 3-35, 1988.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS Ocupação de Encostas. Publicação IPT nº 1831, 216 p., 1991.
- JOHNSON, K. A. C.; SITAR, N. Hydrologic Conditions Leading to Debris-Flow Initiation. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, p. 789-801, 1990.
- KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; MASSAD, F.; ARAÚJO FILHO, H. A. Basic and Common Characteristics of Debris Flows, 2ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (2º COBRAE), Rio de Janeiro (RJ), p. 223-232, 1997.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F.; MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; ARAÚJO, H. A. Main Factors Intervening in the Risk Assessment of Debris Flow. Int. Workshop on the Debris Flow Disaster of Dec. 1999 in Ve-nezuela, Caracas, 2000.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F. Metodologia para Determinação da Vulnerabilidade à Corridas de Detritos em Pequenas Bacias Hidráulicas, 3ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (3º COBRAE), Rio de Janeiro (RJ), Anais: ABMS/ABGE, p. 75-84, 2001.
- LACERDA, W. A. Estabilidade de Encostas Naturais e Estruturas de Retenção. In: 2º Colóquio de Solos Tropicais e suas Aplicações em Engenharia Civil, Porto Alegre (RS), Anais: CPGEC/UFRGS, p. 201-217, 1989.
- LACERDA, A. W. Landslide Initiations in Saprolite and Colluviums in Southern Brazil. Field and Laboratory Observations, Geomorphology, v. 87, p. 104-119, 2007.
- LACERDA, W. A.; SANTOS JR., O. F.; EHRLICH, M. Efeito das Variações de Poro-pressão sobre a Estabilidade de Encostas em Solos Residuais. 2ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (2º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, v. 1, p. 381-388, 1997.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics, SI version – ed. John Wiley and Sons, 553p., 1969.
- LEROUEIL S. Geotechnics of Slope before Failure, IX International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro (RJ), p. 863-885, 2004.
- MACIAS, J.; AMARAL. C.; VARGAS JR., E. Retro análise do Comportamento Mecânico das Corridas de Massa de 1996 no Rio de Janeiro: Determinação da Velocidade de Deslocamento e da Viscosidade dos Materiais Envolvidos. 2º Simpósio Panamericano sobre Escorregamentos e 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, v. 1, p. 243-251, 1997.
- MASSAD, F. Debris Flows em Cubatão, São Paulo: Obras de Controle e Impactos Ambientais, XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, (XI COBRAMSEG), Brasília (DF), v. 2, p. 1265-1272, 1998.
- MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; KANJI, M. A.; ARAUJO FILHO, H. A. Comparisons Between Estimated and Measured Debris Flow Discharges and Volume of Sediments, 2ª. Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (2º COBRAE). Rio de Janeiro (RJ), p. 213-222, 1997.
- MIDRIAK, R. Debris Flow and their Occurrence in the Czechoslovak High-Mountain West Carpa- thians, International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba- Japan. p. 175-180, 1985.
- MORGAN, B. A. et al. Debris Flows Hazards in an Area Affected by the June 27, 1995 Storm in Madison County, Virginia. U. S. Geological Survey, Open File Report 97-438, 14 p., 1997.
- ORTIGÃO J. A. R.; SAYÃO A. S. F. J. Handbook of Slope Stabilisation, Ed. Springer, 478 p., 2004.
- PINHEIRO, R. J. B.; BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D. A Study on the Residual Shear Strength of two

- Unstable Slope in the State of Rio Grande do Sul, 2ª Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas (2º COBRAE), Rio de Janeiro (RJ), Anais: ABMS/ABGE, p. 443-452, 1997.
- PINHEIRO, R. J. B. Estudo de Alguns Casos de Instabilidade da Encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), 318 p., Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, 2000.
- SASSA, K. The Geotechnical Classification of Landslides, Proc. 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, p. 31-45, 1985^a.
- SASSA, K. The Mechanism of Debris Flow, Proc. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 1173-1176, 1985b.
- SASSA, K.; FUKUOKA, H. Prediction of Rapid Landslide Motion, Proc. XX International Union of Forestry Research Organization (IUFRO), World Congress, Finland, Technical Session on Natural Disasters in Mountainous Areas, p. 71-82, 1995.
- SASSA, K. Geotechnical Classification of Landslides, Landslide News, nº 3, p. 21-24, 1989.
- SILVEIRA, R. M.; Feuerharmel, C.; Bica, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; Gehling, W. Y. Y.; MARTINELLO, I. Resistência ao Cisalhamento Saturada e Não Saturada de Solos Coluvionares do Gasoduto Bolívia--Brasil, IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (4º GEOSUL), Curitiba (PR). Anais: ABMS, 2004a.
- SILVEIRA, R. M.; Feuerharmel, C.; Bica, A. V. D.; Bressani L. A.; Gehling, W. Y. Y.; Oliveira H. R. Laboratory Testing of Colluvium Soils Adjacent to a Gas Pipeline, IX International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro (RJ), 2004b.
- SHARPE, C. F. S. Landslide and Related Phenomena, New York, Columbia University Press, 137 p., 1938.
- SKEMPTON, A. W.; HUCHINSON, J. N. Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations, State-of-the-art Report, 7th ICSMFE, Mexico, Proc.: State-of-the-art vol., p. 291-340, 1969.
- STINY, J. Die Muren. Verlag der Wagnerschen Universitäts, Innsbruck, Austria. (Translated by M. Jakob and N. A. Skermer, Debris Flow, EBA Engineering Consultants, 139p., 1910.
- TURNER, A. K. Colluvium and Talus, In: Turner, A. K.; Schuster, R. L. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington D. C., p. 525-554, 1996.
- VARNES, D. J. Landslide Types and Processes, In Special Report 29: Landslide and Engineering Practice, E. B. Eckel, ed., HRB, National Research Council, Washington D. C., p. 20-47, 1958.
- VARNES, D. J. Slope Movement and Types and Processes, In: Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (eds.), Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington D. C., p. 11-33, 1978.
- TAKAHASHI, T. Initiation and Flow of Various Types of Debris Flow, 2nd Intern. Conf. on Debris Flow Hazards Mitigation, Taipei, p. 15-25, 2000.
- TAKAHASHI, T. Japan-China Joint Research on the Preservation from Debris Flow Hazards, Intern. Scientific Research Program, nº 03044085 Kyoto University, p. 100-113, 1994.
- TAKAHASHI, T.; SATOFUKA Y.; CHISHIRO, K. Dynamics of Debris Flows in the Inertial Regime, In: proc. 1st Int. Conf. on Debris Flows Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Cheng-Lung Chen (Ed.) ASCE, New York, N. Y., p. 239-248, 1997.

TERZAGHI, K. Mechanism of Landslides, Tradução: Mecanismos de Escorregamento de Terra, Tradução de E. Pichler. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1967, 41 p., 1950.

WOLLE, C. M. Análise dos Escorregamentos Translacionais numa Região da Serra do Mar no Contexto de uma Classificação de Mecanismos de Instabilidade de Encostas, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (SP), 406 p., 1988.

WOLLE, C. M. Taludes Naturais – Mecanismos de Instabilidade e Critérios de Segurança, São Paulo (SP), 345 p., Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1980.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em Encostas na Serra do Mar – Brasil, Solos e Rochas, 12 (nº único): p. 27-36, 1989.

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. Rain Induced Landslides in Southeastern Brazil, Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ISSMFE, Rio de Janeiro (RJ), v. 3, p. 1639-1642, 1989.

ZNAMENSKY, D. Corridas de Detritos ou (Debris Flows); Dissertação de Mestrado, EPUSP-USP, São Paulo (SP), p. 198, 2001.

4. AUTOR

Rodrigo Moraes da Silveira

Possui graduação em engenharia civil pela Universidade Federal de Santa Maria (2001), mestrado e doutorado em engenharia civil/geotecnia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003 e 2008).

Em 2007, desenvolveu parte de sua tese de doutorado na modalidade doutorado sanduíche do CNPq, na Colorado State University (EUA).

Em 2008-2010 foi bolsista doutor do Programa Nacional de Pós-doutorado (PNPD) da CAPES quando desenvolveu pesquisa relacionada a engenharia ambiental.

Tem experiência na área de engenharia civil, com ênfase em geotecnia e geotecnia ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: desastres ambientais, ensaios geotécnicos de campo e laboratório, estabilidade de taludes e instrumentação com fibra óptica e gestão de resíduos.

Atualmente atua como pesquisador sênior dos Institutos Lactec e professor do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia (Institutos Lactec), além de coordenar o laboratório de geotecnia dos Institutos Lactec.

Também atua como professor adjunto da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) nos cursos de engenharia civil e engenharia ambiental.



CREA-PR
Conselho Regional de Engenharia
e Agronomia do Paraná

