

Movimentos de Geomassa: Rupturas de Taludes de Encostas e Leitos de Calhas e Corridas Detríticas ou de Lama.

Dimitry V. Znamensky

Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB, CT-11 (Coordenação da Comissão Técnica Interna de Corridas Detriticas ou de Lama),

Brasília - DF, Brasil,

dvzname@gmail.com

Cássio Guilherme Rampinelli

Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil,

Brasília - DF, Brasil,

cassio.rampinelli@integracao.gov.br

Magno Gonçalves da Costa

Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil,

Brasília - DF, Brasil,

magno.costa@integracao.gov.br

RESUMO: No presente trabalho discutem-se os movimentos de geomassa que são de natureza geotécnica (Mecânica dos Solos e das Rochas) e os de natureza hidrotécnica (Hidrologia e Hidráulica Aplicada) inseridos no cenário dos eventos naturais extremos. Esses domínios científico-tecnológicos dos mencionados eventos constituem duas “vertentes” convergentes na sua intersecção que forma o lugar comum ou uma interface compartilhada por estes domínios do saber humano. A matéria interdisciplinar que abrange essa interface pode ser designada como a Mecânica dos Sistemas Granulares Dispersos Supersaturados. De fato, as deformações e os deslocamentos de geomassas localizadas nos taludes de encostas/vertentes conduzem, em determinadas condições críticas, a uma instabilidade parcial ou ao seu colapso total. Os eventos naturais de ruptura dos taludes das encostas/vertentes conhecidos resultam em escorregamentos, que são seguidos ou não, de escoamentos das geomassas dispersas e supersaturadas instabilizadas após a ruptura. Analisam-se os fatores condicionantes dos escorregamentos e dos escoamentos dessa geomassas instáveis. Os escorregamentos ou os movimentos primários são mais conhecidos do que os escoamentos ou os movimentos secundários. Os escoamentos no caso são as corridas detriticas e/ou de lama que ocorrem quando o material regolítico sólido é supersaturado, durante e após a sua ruptura, por chuva efetiva/excedente e se transforma em material fluido-líquido, ou seja, em mistura difásica granular dispersa de sedimentos e água. Destarte a geomassa regolítica original, que é um corpo sólido, se transforma em corpo fluido-líquido com o comportamento nitidamente hidráulico. Do ponto de vista prático é necessário estabelecer uma distinção reológica e morfológica correta entre as geomassas nos seus estados de pré e pós-ruptura. A identificação dos processos que ocorrem no campo é vital para a adequada escolha de solução “profilática” ou “terapêutica” da estabilização das geomassas conforme o seu estado físico. O monitoramento dos processos geotécnicos primários já é bastante bem conhecido, mas não se pode dizer o mesmo dos processos hidrológicos e hidráulicos secundários dos escoamentos ou das corridas de geomassa. O emprego da instrumentação específica para monitorar essa fase das corridas detriticas e de lama é ainda praticamente desconhecido entre nós. As intervenções tecnológicas, que se empregam visando mitigar os efeitos negativos desses movimentos de geomassa, são: as preventivas (ativas) e se aplicam às rupturas dos taludes, ou as corretivas (passivas) quando é o escoamento de corridas detriticas ou de lama. As medidas de controle e do manejo desses escoamentos visam proteger a população, habitações, benfeitorias e o

meio ambiente através dos diversos tipos de intervenções. De modo geral as intervenções consistem em escolha racional de soluções estruturais que maximizem a mitigação dos efeitos indesejáveis dos eventos extremos e simultaneamente provoquem, a um custo mínimo, uma interferência menor possível no meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Geomassas regolíticas, Eventos geohidrológicos naturais e antropogênicos, Eventos extremos e/ou catastróficos, Intervenções ativas e/ou passivas, Soluções estruturais.

1. INTRODUÇÃO

As geomassas, às quais neste trabalho se fazem as repetidas referências, são camadas regolíticas superficiais das formações litológicas diversas que capeam o relevo do território brasileiro em grande profusão.

Os regolitos neste caso são basicamente os solos tropicais, provenientes da alteração e da decomposição “in situ” das rochas ácidas e básicas, ígneas ou eruptivas e das rochas metamórficas e sedimentares.

Os solos residuais são ou produtos resultantes da alteração e decomposição das rochas que ocorre localmente ou os produtos transportados ao longo dos taludes das vertentes e acumulados nas calhas do relevo.

Admite-se que os solos residuais do Brasil formam cinco horizontes pedológicos distintos (I a V) em profundidade.

Esses horizontes abrangem: o solo residual maduro superficial (I); o solo residual imaturo (II) em profundidade intermediária; o solo saprolítico reliquiar (III); o solo da rocha matriz decomposta ou muito alterada (IV) e a rocha matriz fraturada ou sã (V).

Em alguns casos no Brasil a espessura total dessas capas regolíticas atinge a profundidade de algumas dezenas de metros (Vargas 1978; Sowers 1963).

Assim os solos residuais são a principal, mas não a única ou exclusiva, fonte das corridas detriticas que são observadas no Brasil.

Devido às características granulométricas os solos residuais no Brasil favorecem mais a ocorrência de corridas de lama de textura fina, que, às vezes é coesiva e/ou viscosa, e mobiliza assim majoritariamente os solos dos horizontes (I) e (II) mencionados antes.

Já os solos residuais saprolíticos contêm elementos de granulometria intermediária das areias e dos aglomerados de grânulos mais

resistentes e pouco alterados ou decompostos que formam os cascalhos (III) da matriz rochosa.

Em profundidade maior a granulometria dos discretos volumes de geomassa é influenciada em macroescala pelas descontinuidades de origem tectônica ou pelos sistemas de macro/micro fraturamento da matriz rochosa observados nos horizontes (IV) e (V) mencionados por Vargas (1978).

Os processos cinemáticos das geomassas se inserem ao lado dos contínuos e lentos processos de transformação “quase estática” da superfície do relevo, conhecidos como denudação superficial, complementados por súbitas e descontínuas, pontuais e extremamente dinâmicas, rupturas de taludes.

Assim apresentam-se de um modo geral como transformações geomorfológicas singulares do relevo montanhoso ou muito acidentado.

Essas mutações são provocadas pela instabilização e consequente ruptura dos taludes das encostas e que são seguidas por processos de transporte das geomassas rompidas por extensões de menor ou maior magnitude conhecidos como: (a) escorregamentos (superação da resistência mecânica ao atrito); e/ou, (b) escoamentos ou fluxo, estes condicionados pelo teor de água e pela viscosidade do fluido resultante da mistura de sólidos e água.

As geomassas dos processos cinemáticos citados em (b) são geralmente as camadas regolíticas superiores ou os solos residuais rasos (eluvionares, coluvionares ou aluvionares).

Os regolitos rochosos (lateríticos, saprolíticos e de matriz rochosa decomposta/alterada) dos horizontes profundos e próximos aos da rocha sã, geralmente originam os processos citados em (a).

1.1. Movimentos Gravitacionais.

Observe-se que tanto nos escorregamentos, como nos escoamentos o material sólido se move sempre pela ação da gravidade terrestre, ou da sua componente vertical que no caso é o peso da geomassa.

Portanto ambos os tipos dos movimentos de geomassa anteriores são gravitacionais cuja ocorrência se deve exclusivamente à variação do campo de gravidade terrestre que é proporcionada pelo relevo terrestre.

Assim tanto o escorregamento ou o escoamento é uma translação ou transporte da matéria do ponto de um potencial gravitacional maior (h_1) a outro ponto qualquer de potencial gravitacional menor (h_2).

Portanto os escorregamentos/escoamentos acontecem somente quando há um disponível diferencial de potencial $\Delta h = (h_1) - (h_2) \geq 0$.

Os escorregamentos (de corpos sólidos) ou os escoamentos (de corpos líquidos) inexistem nos terrenos horizontais e planos, ou seja, nas superfícies isopácas e de declividade nula, pois neste caso a diferença de potencial é $\Delta h = 0$, ou seja, $(h_1) = (h_2)$.

Já o processo do deslizamento é um fenômeno diferente que ocorre no contato entre dois corpos quando ocorre uma superação do atrito resistente estático mecânico e/ou hidráulico, e que pode ocorrer devido à ação de forças gravitacionais, mas que também se verifica devido à ação das forças de outra natureza qualquer além da mencionada.

O deslizamento é um processo independente de orientação espacial específica, assim pode ser de orientação aleatória qualquer, inclusive horizontal ou ascendente.

O termo deslizamento é considerado neste texto no seu sentido físico mais abrangente e puro que caracteriza a superação da resistência de atrito no contato entre dois corpos materiais quaisquer considerando a participação das forças ativas e reativas de qualquer espécie inclusive as forças gravitacionais.

Para evitar ambiguidade e favorecer uma precisão do texto os termos escorregamento e escoamento, usados neste trabalho, serão sempre associados de uma forma específica com os respectivos eventos físicos da Geomecânica

ou escorregamentos e com os escoamentos da Hidráulica mencionados anteriormente.

1.2. Vertente Geotécnica e Hidrotécnica.

Os escorregamentos e as rupturas dos taludes já foram extensivamente estudados tanto em nosso país como no exterior no passado a ponto de resultar em abundante literatura técnica, que contém diversas classificações consagradas pela prática descrevendo em detalhes os processos cinemáticos dos escorregamentos.

No presente trabalho citam-se como exemplos da classificação dos movimentos de geomassas apenas algumas entre as muitas existentes: (a) Varnes (1978); (b) Magalhães Freire (1965), (c) Guidicini e Nieble (1984) e (d) Augusto Filho (1992).

No presente texto limita-se a discutir entre todos os movimentos conhecidos das geomassas, apenas dois tipos de movimentos que abrangem deformações/deslocamentos.

Considera inicialmente um movimento que corresponde a ruptura do talude pela perda da estabilidade de determinado volume de geomassa localizada sobre o talude e a instalação do processo de escorregamento da massa parcial instável sobre uma massa residual estável.

Este movimento é o resultado acumulado das deformações plásticas irreversíveis que ocorrem no contato das geomassas ao longo da superfície de ruptura formada por planos de menor resistência ao cisalhamento e onde ocorre o movimento relativo de deslizamento entre os dois blocos regolíticos em contato.

Em segunda instância se analisa o movimento do fluxo de material regolítico rompido que ocorre como o processo de escoamento pós-ruptura da geomassa desestruturada e amolgada dos taludes e que conta com a participação de água da chuva em maior ou menor grau que lhe confere maior mobilidade e amplia o percurso da corrida.

Observa-se assim que ocorrem na natureza dois tipos de comportamento cinemático e reológico das geomassas o que permite analisar os eventos em função do cenário de sua ocorrência.

Assim têm-se: (a) vertente geotécnica, vinculada aos processos de estabilidade e às

rupturas de taludes das encostas; e, (b) vertente hidrotécnica, ou o escoamento do fluido resultante da mistura de sólidos e água pelas calhas condicionadas pela morfologia das vertentes e pela magnitude do desnível do relevo local (Yablonsky 1972).

1.3. Escorregamento de Geomassas.

Os movimentos que ocorrem no estado físico original da geomassa são as deformações elásticas e plásticas da geomassa e os deslocamentos de macrovolumes finitos, discretos, rígidos, coesos e relativamente indeformáveis, embora ainda suficientemente elásticos em função da deformabilidade regolítica da geomassa condicionada essa por suas propriedades elásticas intrínsecas e por suas descontinuidades reliquias extrínsecas com os seus respectivos preenchimentos nelas presentes.

Assim o resultado final é uma somatória resultante de deformações elásticas reversíveis e plásticas irreversíveis que se verificam na matriz da geomassa e no macrovolume da massa regolítica considerada.

As deformações e os deslocamentos resultantes são tratados como grandezas lineares unidimensionais ou como grandezas bidimensionais planas ou tridimensionais ou espaciais.

Essas mudanças de volume (variações de extensão) ou de forma (variações de configuração geométrica) são provocadas por causas distintas.

Os escorregamentos de geomassa sólida granular incoesiva ocorrem inicialmente se a declividade natural do talude de encosta $\text{tg}\theta \geq \text{tg}\theta_R$, ou seja, excede a declividade do talude de geomassa no seu estado de repouso quando o seu ângulo de atrito interno é φ_{EST} .

Neste caso a ruptura dos taludes de encostas ocorre condicionada pelo: (a) fator topográfico do relevo com taludes naturais ou artificiais íngremes de grande declividade θ ; (b) fator geotécnico que abrange a espessura da camada regolítica e , a densidade dos grãos sólidos ρ_s , a porosidade regolítica n , e o grau de saturação da geomassa do talude ($G_s \leq 1$); e por fim (c) ou o caso quando ocorre a conjunção ponderal de todos esses fatores citados.

Em se tratando do fator geotécnico estabelecem-se as características principais existentes entre as classes de movimentos de geomassas que se detalham a seguir: (a) os escorregamentos de geomassa regolítica, insaturada ou saturada ($G_s \leq 1$), que ocorrem com o teor de umidade natural ou com o máximo teor de umidade contido pela estrutura regolítica original, e (b) os escorregamentos da geomassa regolítica rompida, supersaturada e fluidificada ($G_s > 1$), que apresentam uma participação significativa de água, geralmente de origem pluvial ou a chuva efetiva excedente, infiltrada/escoada em maior ou menor grau.

Nos dois casos os escorregamentos das geomassas rompidas são movimentos translacionais que podem ser rasos e planares, ou profundos e côncavo-circulares, mas onde as geomassas que se movem mantêm o seu estado físico original, ou seja, são corpos sólidos considerados antes e depois da ruptura.

Entretanto o padrão da ruptura influencia a extensão do trajeto percorrido pela geomassa rompida em cada caso particular.

A extensão do talude de uma encosta ou vertente escreve-se como $D = \{H^2 + L^2\}^{1/2}$, onde altura $H = f(\text{sen}\theta)$ e projeção horizontal do talude $L = f(\text{cos}\theta)$ condicionam a extensão do percurso.

De modo geral observa-se que a magnitude do percurso da geomassa no caso de escorregamentos citados, pouco se afasta da própria extensão do talude que rompeu.

Tanto no caso das rupturas rasas e planares, envolvendo os volumes menores, como no caso de rupturas circulares profundas e de volume maior, o material rompido se desloca e se acumula ao pé do talude.

Skempton e Hutchinson (1969) e Crozier (1973), citados por Walker e Fell (1987), indicam que a magnitude do quociente d/l , onde o numerador (d) é a espessura da geomassa em movimento e o denominador (l) a extensão do seu percurso, é o índice morfométrico mais versátil que estabelece a diferenciação entre os diversos tipos de movimentos da geomassa que resultam por ocasião das rupturas de taludes.

Observe-se que as rupturas dos taludes ocorrem pela ação das forças ativas e atuantes que são as projeções das componentes senicas do peso da geomassa instabilizada $T = P_M \text{sen}\theta$.

Já as forças que correspondem às projeções das componentes cosenicas do peso da geomassa instabilizada se escrevem como $N = P_M \cos\theta$, e que podem ser (1) superiores, (2) iguais ou (3) inferiores às forças passivas e resistentes $T' = N \operatorname{tg}\varphi_{\text{EST}} + c$.

As forças passivas e resistentes mencionadas são definidas pela mobilização do atrito interno (φ) e da coesão (c) da geomassa considerada.

No caso (1) ocorre um estado de desequilíbrio da geomassa e se verifica o seu colapso estrutural ou a ruptura do seu talude natural o que figura como $C_s = (T/T') < 1$.

Neste caso a geomassa entra em processo de deformação plástica crescente ou infinita, que é um processo cinemático de escorregamento ou escoamento da geomassa se esta estiver supersaturada.

Nos casos remanescentes (2) e (3) verificam-se respectivamente os estados de equilíbrios indiferente ou estável, ambos compatíveis com deformações elasto-plásticas reduzidas, reversíveis ou não da geomassa, e que são traduzidos pela expressão $C_s = (T/T') \geq 1$.

Os coeficientes de segurança definidos acima se escrevem em função dos parâmetros geotécnicos do material regolítico prestes a se romper (φ_{EST} e c) e do parâmetro geomorfológico da declividade do talude natural θ , como:

$$\cos\theta (\operatorname{tg}\varphi_{\text{EST}} + c) \leq \operatorname{sen}\theta \quad (01)$$

Onde: θ é o ângulo do talude de encosta; φ é o ângulo de atrito interno estático e c é a coesão da geomassa regolítica, que se desconsidera frequentemente se é granular e, portanto incoesiva ($c \rightarrow 0$).

Observe-se que um escorregamento da geomassa regolítica ocorre sempre no sentido descendente da encosta ou da calha, partindo necessariamente da sua cota superior e se dirigindo para uma cota inferior do talude ou talvegue.

Observe-se ainda que o escorregamento seja também um processo de deslizamento da geomassa.

Entretanto o deslizamento entre dois corpos quaisquer se verifica independentemente da direção segundo a qual se manifesta esse movimento.

Para o caso particular de escorregamentos de geomassas, esses ocorrem ao longo da superfície de ruptura dos taludes ou dos leitos dos canais e das calhas que são elementos instáveis.

Os deslizamentos se verificam sempre quando $T \geq T'$, ou seja, a componente de cisalhamento senica atuante (T) é igual ou maior do que a componente cosenica resistente ao cisalhamento (T').

Assim a resistência ao deslizamento é definida pela rugosidade das superfícies dos dois corpos em contato (imbricamento) em primeiro lugar e em segundo lugar por um coeficiente de atrito interno dinâmico e pela coesão (adesão) que são mobilizados durante o deslizamento entre os dois corpos quaisquer.

1.4. Escoamento de Geomassas

Os materiais das rupturas de taludes naturais das encostas-vertentes ou dos canais e das calhas que contem os sedimentos ali depositados são as fontes das corridas detriticas naturais.

Os reservatórios de contenção dos rejeitos inertes de mineração constituem outra fonte de sistemas granulares dispersos bifásicos de sedimentos e do fluido (liquido) dispersor em grandes quantidades.

Ao ocorrerem rupturas das estruturas de retenção, verificam-se neste caso as corridas detriticas de lama de natureza antropogênica cujo alcance pode ser muito grande já que depende do volume estocado e da mobilidade do sistema disperso, ou seja, da sua efetiva viscosidade.

A classificação entre as potenciais corridas de detritos e as de lama é definida pela curva granulométrica da mescla granular que representa a fase solida do sistema disperso bifásico saturado ou supersaturado capaz de escoar.

Os processos de escoamento hidráulico de geomassas mobilizadas no meio natural ocorrem principalmente devido às precipitações pluviais intensas e/ou prolongadas, isto é, P_{TO} são as chuvas totais que atingem as encostas-vertentes e escoam pelos canais dos cursos de água, ou por calhas de drenagem do cenário geomorfológico considerado em cada caso.

As distintas parcelas da precipitação figuram como a altura (h) das colunas de água por unidade de superfície da bacia (m^2), obtendo-se os respectivos volumes (m^3) da chuva retida, infiltrada ou escoada e as respectivas vazões médias (m^3/s) quando os volumes obtidos são normalizados em relação à duração (s) da precipitação total.

A chuva total $P_{TO} = P_{AR} + P_{EE} + P_{EV}$, que se precipita sobre a área unitária de uma bacia hidrográfica qualquer, ao atingir a sua superfície sólida imediatamente contribui: para abstrações ou retenções iniciais (P_{AR}), essas provocadas pela vegetação arbórea, arbustiva e gramínea (P_{AV}), e pela rugosidade e/ou irregularidade da superfície natural do relevo (P_{IR}).

As superfícies do terreno natural, que são planas ou inclinadas e que são desprovidas de capa vegetal apresentando uma superfície regular sem rugosidades acentuadas apresentam a parcela $P_{AR} = P_{AV} + P_{IR} \cong 0$.

Por outro lado devido a geralmente curta duração das precipitações pluviais as parcelas relativas à evaporação (P_{EV}) são desprezadas por serem muito pequenas.

Somente depois de ocorrerem as possíveis retenções iniciais e de ter sido iniciado, simultaneamente, o processo de infiltração é que a precipitação pluvial se considera uma chuva efetiva/excedente figurando como: $P_{EE} = (P_{TO} - P_{AR})$.

A chuva efetiva/excedente é a soma de duas importantes parcelas que se escrevem $P_{EE} = (P_{ES} + P_{EI})$ e que geram simultaneamente os processos de escoamento superficial (P_{ES}) e a correspondente infiltração que é seguida do escoamento subsuperficial (P_{EI}).

A chuva efetiva/excedente relacionada com o escoamento superficial abrange duas parcelas distintas de escoamento superficial e se escreve $P_{ES} = P_{ES-d} + P_{ES-i}$; (1) que é incorporada diretamente ao escoamento nos canais ou nas calhas da rede hidrográfica da bacia (P_{ES-d}) e (2) a que é recolhida e drenada pela superfície natural do terreno, que é inclinada, rugosa e eventualmente revestida pela vegetação rasteira, que constitui o escoamento superficial indireto das vertentes sob a forma de uma lamina delgada (P_{ES-i}) que flui.

O escoamento indireto (P_{ES-i}) apresenta o comportamento hidráulico de regime laminar

que é cineticamente linear ou turbulento quadrático.

O escoamento eventualmente ocorre em regime intermediário ou misto, situado entre os dois regimes anteriormente citados.

A parcela (P_{EI}) da chuva efetiva/excedente que se infiltra verticalmente e gera um escoamento subsuperficial hipodérmico condicionado pelo avanço da frente de saturação no subsolo.

Essa frente de saturação busca alcançar o lençol freático e se incorporando nele aumenta a carga hidrostática/hidrodinâmica de pressão ou de percolação do lençol freático.

Assim a parcela da infiltração (P_{EI}) é formada pelo escoamento subsuperficial raso, ou a percolação hipodérmica (P_{EI-r}), ou então pelo escoamento subsuperficial profundo ou a percolação freática (P_{EI-f}).

A presença da modalidade do escoamento subsuperficial é definida pela profundidade do horizonte impermeável rochoso, ou seja, pela espessura da capa regolítica permeável que o cobre.

Observe-se que a percolação hipodérmica (P_{EI-r}) apresenta uma resposta muito rápida às chuvas efetivas intensas manifestando-se como rupturas planares e rasas de taludes, ou como um entalhamento da superfície natural do terreno que forma calhas erosivas segundo a direção do maior declive dos taludes.

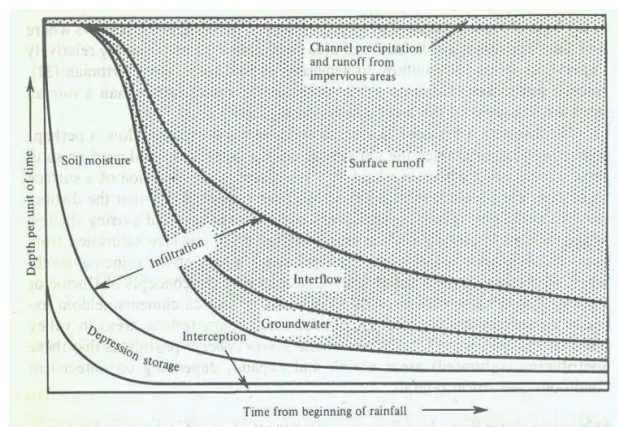


Figura 1. Escoamento subsuperficial raso ou hipodérmico e o freático ou profundo expressos em altura de coluna de água de chuva (mm), apud Linsley et al. (1988).

A percolação freática (P_{EI-f}) é determinada pela posição do nível de água da superfície freática (NA) que apresenta os seguintes três comportamentos do reservatório subterrâneo do lençol freático: (1) ascensional ($\Delta NA > 0$), (2)

depleccional ($\Delta NA < 0$) ou (3) estacionário ($\Delta NA = 0$).

As parcelas que formam o teor de água subsuperficial estão representadas na Figura 1 (Linsley et al., 1988).

Pode se afirmar que de uma forma geral a percolação hipodérmica é associada ao regime transitório variável no tempo e no espaço, ou um processo de “transient state seepage” (versão anglo-saxônica), e a percolação freática é um fluxo ou o escoamento subsuperficial praticamente estacionário, contínuo, uniforme e quase constante no tempo e no espaço, sendo assim um processo de “steady state seepage” (versão anglo-saxônica).

A percolação nos solos regolíticos ocorre em regime linear ($v = k \frac{dh}{dx}$) regida pela Lei de Darcy, com velocidade muito baixa e constante, e que na prática se considera nula, quando o lençol freático se situa em solos impermeáveis ou argilosos.

O processo é fortemente condicionado pelo teor inicial de umidade natural endógena (h_A) variando entre o valor máximo ou total de saturação ($G_s = 1,0$) e o valor mínimo ou de completa aeração ($G_s = 0$) da camada regolítica quando ($G_A = 1$).

É evidente que a altura da coluna de água freática do subsolo determina a pressão neutra que reina no solo e que se reflete no nível da sua resistência ao cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento na presença do elevado teor de umidade natural h_A decresce significativamente principalmente se o citado parâmetro tende para o limite de liquidez, ou seja, quando ($h_A \rightarrow LL$).

Nessa situação a geomassa apresenta as deformações plásticas irreversíveis ou começa fluir no estado de saturação total ($G_s = 1,0$) e sua estrutura passa por processos de amolgamento devido ao grande aumento dos graus de liberdade que decorre da redução e supressão de vínculos estruturais originais.

Neste estagio ocorrem as rupturas locais ocasionadas simultaneamente pelo peso adicional de água de saturação e pela redução da resistência de coesão e atrito das geomassas potencialmente instáveis.

Nos casos quando se verifica ainda o acréscimo adicional de umidade externa exógena, a fluência da geomassa aumenta em

função da magnitude do parâmetro P_{ES} definido anteriormente.

O parâmetro P_{ES} neste caso corresponde à diferença do teor de água do sistema disperso e figura como $\bar{h}_A = h_A - LL$, que é a altura da chuva efetiva/excedente disponível durante a ruptura.

Percebe-se assim que as principais causas geradoras das corridas detriticas e de lama são as chuvas efetivas excedentes que atingem as vertentes.

As chuvas efetivo-excedentes se integram a geomassa rompida e com ela se misturam e homogeneizam as misturas em maior ou menor grau durante os deslocamentos iniciais do incipiente escoamento hidráulico.

Assim para a condição $h_A = LL + \bar{h}_A$ a geomassa fica no seu estado supersaturado ($G_s \geq 1$) e muda de estado físico, passando a escoar como um fluido (líquido) não newtoniano o que será visto mais adiante.

A geomassa sólida se transforma em fluido e forma um sistema granular disperso bifásico que se comporta como líquido viscoso, biviscoso, inercial-dilatante, ou pseudo-plástico, conforme a classificação de Locat (1997).

A mobilidade da mistura formada é quantificada pelo índice de fluidez $I_F = \frac{\bar{h}_A - LP}{I_p} > 1,0$, o qual é condicionado pela intensidade e duração da chuva efetiva/excedente ($\bar{h}_A = it$) e pelo índice de plasticidade ($I_p = LL - LP$) do material regolítico rompido, ou a diferença entre os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) de Atterberg (Vargas 1978).

Em função de inúmeros estudos e das investigações dos solos tropicais residuais já realizadas no país e conforme as características dos regimes pluviométricos das regiões serranas do país, o parâmetro índice de fluidez de corridas detriticas (I_F) é uma grandeza possível de ser estimada para as diversas condições geomorfológicas de cada lugar.

Portanto para se quantificar o parâmetro (I_F) é necessário conhecer:

- (a) espessura da camada regolítica (e);
- (b) índice de plasticidade do solo residual (IP);
- (c) umidade natural inicial do solo residual do talude (h_{AS});
- (d) intensidade média da chuva total ($\bar{i}$),
- (e) duração da chuva total na bacia ($\Delta t = s$); e,

(f) magnitude da chuva efetiva excedente (P_{EE}) capaz de provocar a supersaturação e fluidez da geomassa ($G_s > 1$).

Os parâmetros listados de (a) até (c) são geotécnicos e podem ser determinados sem grande dificuldade, já os parâmetros de (d) até (f) são hidrológicos e contêm as dificuldades peculiares às informações deste setor.

A Fig.2 seguinte apresenta a síntese dos escoamentos parciais de água (hidrografa simplificada triangular) e dos sedimentos, que formam a mistura ou a corrida de detritos e/ou de lama, conforme a classe da fase sólida envolvida no escoamento, figurando na equação qualitativa seguinte: Debrisgrama = Hidrograma + Sedigrama.

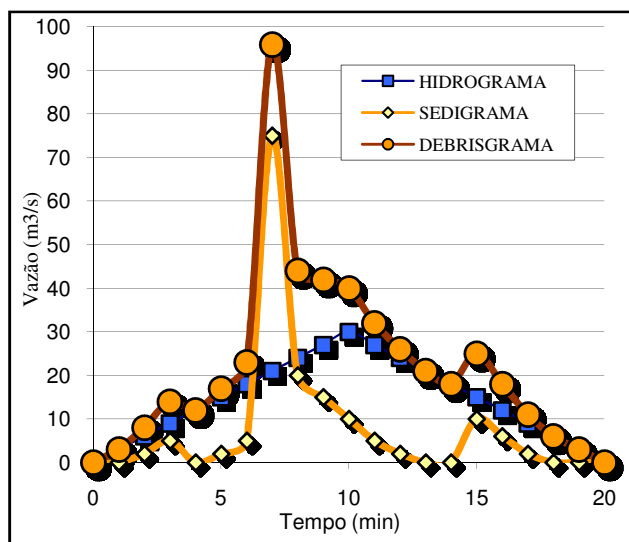


Figura 2. Hidro-sedi-debrisgrama de hidrografa triangular com 3 inserções de geomassa.

O processo de escoamento da mistura íntima do solo e de água apresenta características nitidamente hidráulicas e recebe a designação vernácula de “Fluxo ou Corridas Detriticas e/ou de Lama”; (ver Fig. 2 anterior).

O processo também é conhecido como o “fluxo de detritos” ou “debris flow” e “mudflow” (“mud-flood”) que é a versão anglo-saxônica universalmente muito difundida e que também é usada entre-nos com muita frequência (Znamensky 2001).

Levando em conta a natural heterogeneidade e potência das camadas regolíticas, bem como, as complexidades inerentes dos processos hidrometeorológicos, as soluções dos problemas das duas vertentes tecnológicas mencionadas no

início não oferecem resultados práticos precisos e exatos.

As soluções obtidas não são determinísticas, mas frequentemente são apenas probabilísticas, pois tanto os dados iniciais, que analisam a estabilidade dos taludes, ou os que definem a supressão/contenção e os manejos das corridas detriticas são de obtenção muito difícil, onerosa, e consomem muito tempo nem sempre oferecendo uma informação suficientemente precisa.

Observe-se que o cenário fenomenológico é demasiado complexo, pois abrange uma atuação simultânea ao nível de intensidades distintas e de duração variável ao longo do tempo dos fenômenos situados no amplo conjunto de parâmetros geomorfológicos, geohidrotécnicos, topológicos, hidrogeológicos e hidráulicos, climáticos e edafológicos.

2. PARAMETROS BÁSICOS DE CORRIDAS DETRÍTICAS OU DE LAMA.

As corridas detriticas são os escoamentos de misturas de grãos sólidos e água onde seu comportamento reológico e classificação das misturas dependem muito dos dois importantes parâmetros que são citados a seguir:

- (1) Concentração volumétrica ou ponderal das misturas; e,
- (2) Composição granulométrica da geomassa regolítica ou o espectro da mescla granular dos sistemas dispersos difásicos.

Obviamente diversos outros parâmetros geotécnicos de solos tropicais e de rochas alteradas que lhes dão a origem e formam o material regolítico que dos taludes naturais das encostas e vertentes são de capital importância para o complexo estudo de natureza geotécnica e hidráulica, ou seja, inicialmente a análise de perda de estabilidade e rupturas dos taludes e posteriormente para análise de corridas de detritos/lama do material rompido.

Entre propriedades morfológicas geotécnicas da geomassa que constitui a fase sólida das corridas, citam-se principalmente as seguintes: (1) espessura das camadas regolíticas formando os taludes das encostas/vertentes; (2) porosidade ou compacidade dos regolitos e (3) teor de água

ou umidade natural que também é chamada umidade inicial e que representa a carga inicial de saturação da geomassa.

Os parâmetros tais como a resistência ao cisalhamento drenado ou não drenado, o espectro granular e suas curvas granulométricas, a densidade absoluta e relativa, a variação do nível de água do lençol freático, a permeabilidade vertical e horizontal das camadas litológicas, a gênese geológica, a composição mineralógica e a alteração e decomposição das rochas matrizes condicionam o comportamento geomecânico, geohidrológico geofísico e hidráulico dos volumes rompidos de geomassas mobilizadas no escoamento.

2.1. Concentração Volumétrica ou Ponderal.

Os parâmetros de concentração $C_{V/P}$ e/ou de difusão $D_{V/P}$, volumétrica ou ponderal, na sua forma adimensional, são empregados nos estudos relacionados com o escoamento das corridas de detritos macro e meso-granulares e de lama micro-granulares, conforme Takahashi, (1991), O'Brien, Julien e Fullerton (1993) e numerosos outros autores que se deixa de citar.

Os parâmetros adimensionais volumétricos (C_V) e ponderais (P_V) das corridas detriticas/lama figuram como:

$$C_V = \frac{V_S}{V_T} = \frac{V_S}{V_S + V_A} \quad (02)$$

$$P_V = \frac{P_C}{P_T} = \frac{P_C}{P_C + P_A} \quad (03)$$

Onde: V_S ou P_S são volume ou peso da fase sólida; V_A ou P_A são volume ou peso da fase líquida e V_T ou P_T são volume ou peso total da mistura.

Os parâmetros de concentração descritos definem a massa unitária ou a densidade absoluta das corridas consideradas como sistemas dispersos ou misturas e que se escrevem como:

$$\rho_{CD} = C_V \rho_S + (1 - C_V) \rho_A \quad (04)$$

Considerando apenas a concentração volumétrica, a magnitude do coeficiente de concentração $C_V = 0,50$ representa o valor limite

ou de transição entre os dois estados físicos da geomassa.

De fato, o limite máximo de $C_V = 1,00$, corresponde ao corpo material no estado sólido e o limite simétrico mínimo $C_V = 0$ é um corpo material no estado líquido (no caso água pura desprovida de sedimentos).

Assim as misturas de concentração $0,70 < C_V \leq 1,00$ representam os sistemas granulares dispersos pouco úmidas, com a predominância das características de corpo sólido coesivo ($c \neq 0$) e friccional ($\phi \neq 0$).

As misturas de C_V $0,30 < C_V \leq 0,70$ são os sistemas granulares dispersos que abrangem a maioria parte das corridas detriticas, mantendo uma predominância das características do corpo líquido viscoso ($\eta > 1$) com ambos os parâmetros c e $\phi \rightarrow 0$, quando próximo ao limite inferior e c e $\phi \neq 0$, quando próximo ao limite superior.

As concentrações ($C_V < 0,30$) de sólidos contidos no volume total das misturas, são designadas como suspensões de sedimentos finos, de grande, pequena e baixa concentração ($C_V \rightarrow 0$), e se consideram como escoamentos de lama ("mudflow") ou de vasa muito fluida ("mud flood"). Esses sistemas dispersos são fluidos não newtonianos ou líquidos de alta turbidez e baixa viscosidade ($\eta \rightarrow 1$) conforme Umeyya (1983).

2.2. Espectro Granular da Geomassa Regolítica.

A composição granulométrica da massa regolítica desempenha um relevante papel na definição das propriedades e características morfológicas e reológicas das corridas durante a fase de escoamento das geomassas rompidas.

A grande dificuldade consiste em amostrar e lhes definir convenientemente as suas curvas granulométricas e outros parâmetros como, por exemplo, as densidades absolutas ou relativas.

As curvas granulométricas resultam da integração dos histogramas da distribuição granulométrica por classes discretas representadas por partículas sólidas de sedimentos considerados de forma esférica.

Trata-se, em essência, de uma análise gravimétrica, onde o peso dos sedimentos alocados em cada classe do histograma são os

parâmetros interesse primordial e o volume e a forma considerados de interesse secundário.

Dado à imensa variação da magnitude das dimensões de partículas sólidas que representam o universo dos detritos, o sistema usual de análise granulométrica e da representação dos seus resultados que atualmente se usa em Mecânica dos Solos torna-se algo inadequado.

Vários autores (Scott 2000; Whipple 1997; Takahashi 1991) recentemente têm empregado com sucesso a sistemática inicialmente proposta por Udden (1898), modificada por Wentworth (1922), e aperfeiçoada por Krumbein (1941) de representar granulometrias de massas regolíticas estáveis e das corridas detríticas ou de lama e “lahars” em particular.

A mencionada proposta consiste no emprego do parâmetro Φ , ou diâmetro de Wentworth, que a AGU (“American Geophysical Union”) passou a utilizar oficialmente para representar as curvas granulométricas dos sedimentos transportados pelos rios ou os acumulados nos depósitos de sedimentos dos reservatórios, e mais recentemente para a descrição granulométrica das mesclas de corridas detríticas/de lama.

A expressão básica que estabelece a relação entre os parâmetros diâmetro de sedimentos de grãos esféricos e diâmetro (dimensional ou não) de Wentworth é a seguinte:

$$D_i = D_0 \left(\frac{1}{2}\right)^\Phi \quad (05)$$

Com D_i diâmetro genérico do universo granular, expresso no sistema (SI) em milímetros; $D_0 = 1$ ou diâmetro referencial unitário daquele universo e Φ diâmetro de Wentworth obtido através do uso da progressão geométrica.

Observe-se que as curvas granulométricas construídas com o emprego do diâmetro Φ de Wentworth são similares às clássicas curvas granulométricas preconizadas por normas técnicas nacionais ou estrangeiras e relacionam-se entre si através da expressão $D = 10^{-0,301 \Phi}$ que figura em milímetros.

Alguns autores usam o parâmetro diâmetro de Wentworth (1922) para representar o espectro granulométrico de corridas detríticas no que foram seguidos pelos autores deste trabalho e de outros textos anteriores

Znamensky (2011), Znamensky e Gramani (2000).

3. TRANSFORMAÇÃO E MUTAÇÃO DO ESTADO FÍSICO DAS GEOMASSAS.

O movimento conhecido como as corridas detríticas e/ou de lama, ocorre somente na presença simultânea dos seguintes fatores condicionantes:

- (a)-Gradiente topográfico acentuado do relevo (ou declividade das encostas/vertentes de calhas e canais);
- (b)-Teor crítico de água livre contida na massa regolítica (a umidade endógena do solo e a umidade exógena proporcionada por chuvas ou outras fontes);
- (c)-Disponibilidade suficiente de geomassa regolítica (ou um potencial volume instabilizado e que é mobilizado na ruptura se ela ocorrer).

O pré-requisito necessário para ocorrer uma mutação do sistema granular coeso (sólido) em sistema granular disperso bifásico (fluido) é $N/\Delta E \geq 1$.

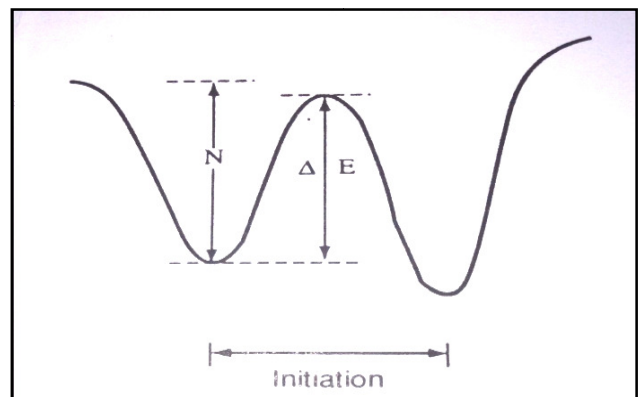


Figura 3. Transformação do potencial do sistema granular coeso para o sistema disperso. Cui e Thornes (1996).

Essa condição está representada na Fig. 3, onde N é a transformação ou a mutação potencial do sistema sólido para o fluido figurando o ΔE como o patamar energético potencial do sistema original conforme Cui e Thornes (1996).

A condição crítica quando se iniciam as corridas detríticas e/ou de lama se estabelece definindo uma superfície crítica limite que separa o espaço físico em duas partes distintas:

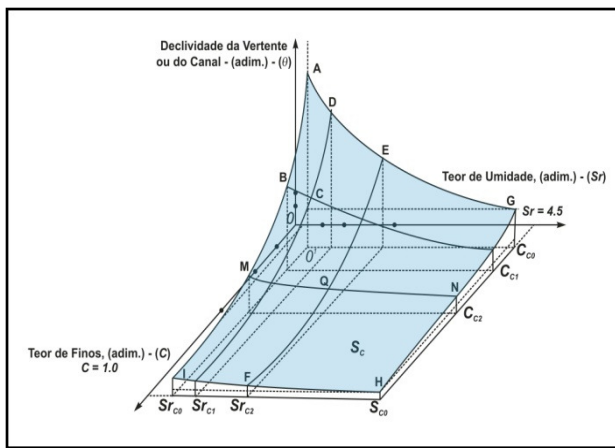


Figura 4. Superfície crítica limite (Cui e Thornes 1996).

(a)-Semi-espaço de geomassas no estado sólido, de equilíbrio mecânico estável, entretanto deformável durante a pré-ruptura;

(b)-Semi-espaço de geomassas no estado líquido, de um fluido não newtoniano em processo de escoamento na condição de pós-ruptura.

A superfície crítica na Fig. 4, que estabelece os limites entre os estados físicos (semi-espacos) mencionados foi obtida empiricamente e se escreve analiticamente como segue (Cui e Thornes 1996):

$$A_1 S_R^2 + A_2 S_R + \frac{B_2}{C-B_1} + D\theta + F = 0 \quad (06)$$

Nesta expressão o parâmetro (S_R) é o teor total de água contida na mistura bifásica e $(U = \frac{B_2}{C-B_1})$ é o parâmetro correspondente ao diâmetro característico da mescla granular detalhado mais adiante, e (θ) é a declividade estável limite do terreno natural (talude da encosta ou do eixo da calha).

As grandezas mencionadas em (06) são todas adimensionais, sendo (S_R) e (U) são os “inputs” (ou variáveis independentes), e (θ) é o “output” (ou variável dependente).

As variáveis da expressão (06) são afetadas por coeficientes A_1, A_2, C, B_1, B_2 e D , que são os parâmetros que definem as famílias de numerosos hiperplanos potenciais que separam os estados de equilíbrio estático e de equilíbrio dinâmico dos respectivos dois estados físicos de geomassas.

As grandezas citadas são todas adimensionais, inclusive a grandeza constante F que é um parâmetro que descreve a condição de contorno dos processos de escoamento que

ocorrem nas encostas ou nas calhas de forma diferenciada.

O quociente $B_2/(C - B_1)$ figura também como o produto da constante B pelo parâmetro U , que é o diâmetro característico dos sedimentos macrogranulares ou grãos da mescla granular $C = B_1 + B_2 = 1$.

O produto BU caracteriza assim a participação dos sedimentos grãos no processo da mutação e corresponde ao índice de grãos da mescla granular ou (“coarsness”) segundo os autores.

Assim $BU = \frac{B_2}{(C-B_1)}$ figurando como uma grandeza $U \propto C^{-1}$, ou seja, como uma proporção que em (06) determina na razão inversa a participação dos sedimentos grãos (para corridas detriticas rochosas), ou dos sedimentos finos (para corridas de lama) na razão direta das suas respectivas presenças na mescla granular da massa regolítica.

O mencionado índice (“coarsness”) poderá ser representado pelo módulo de finura da mescla granular calculado utilizando-se os diâmetros de Wentworth descritos anteriormente.

Os ensaios e as investigações realizadas no campo por Chen et al. (1983), Si et al. (1985); os ensaios e as pesquisas de laboratório de Cui (1992); e as pesquisas correlatas de John (1983) descrevem a superfície critica limite pela fórmula empírica seguinte:

$$2,49 S_R^2 + 8,01 S_R + \left\{ \frac{3,49}{(C-0,10)} - (\theta + 7,02) \right\} = 0 \quad (07)$$

A expressão (07) da superfície limite foi obtida a partir de um grande numero de ensaios (50) em canal de vidro de declividade variável.

Nesses ensaios se fez variar os parâmetros S_R e C , de forma conveniente e se determinou a declividade limite do parâmetro θ .

Assim se definiu o ângulo máximo do talude da encosta do material proveniente do local específico da província de Sichuan-China que foi estudado por Cui e Thornes (1996).

Uma combinação das expressões (06) e (07), anteriores representa a iniciação das corridas, em função de (S_R, U) como figura na superfície de equilíbrio derivada M_f representada na (Fig. 5) seguinte e onde esta superfície de equilíbrio derivada se refere a as corridas de lama mais ou

menos viscosa representadas por misturas de cascalho, areia e silte argiloso (caulim), todos materiais provenientes da Província de Sichuan-China.

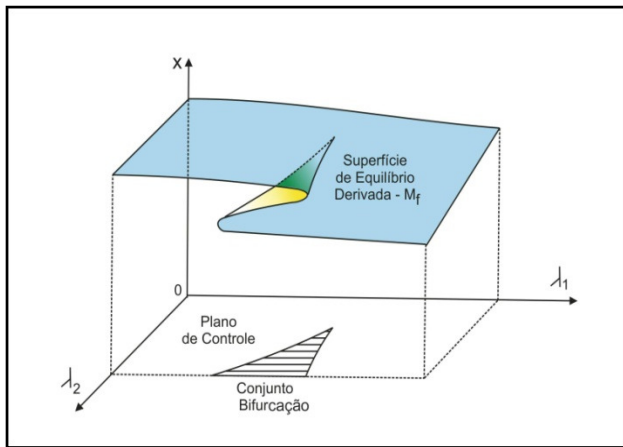


Figura 5. Superfície de equilíbrio derivada e a sua projeção como Plano de controle (Cui e Thornes 1996).

A superfície derivada (M_f) contém uma singularidade geométrica chamada cúspide e se escreve analiticamente como:

$$V(S_R, U) = \left(\frac{A}{4}\right) S_R^4 + \left(\frac{1}{2} B\right) U S_R^2 + (Q) \theta S_R \quad (08)$$

Nessa equação as grandezas (A), (B) e (Q) são os novos parâmetros ou coeficientes numéricos que caracterizam a ruptura da geomassa acima caracterizada e são vinculados à transformação do seu estado físico do corpo sólido para um de fluido (líquido).

As propriedades da geomassa aqui expostas consideram apenas dois parâmetros (principais) que participam do processo de ruptura e transformação de geomassa conforme a teoria das catástrofes de R. Thom (1975).

As grandezas dos fatores que controlam, ou dos “inputs”, ($S_R = \lambda_1$) e ($U = \lambda_2$) e a do fator de comportamento ou “output” (θ), já foram definidas em (06).

De acordo com a teoria das catástrofes ou de mutações de Thom (1975) é possível descrever e determinar os pontos singulares da nova função contendo a singularidade geométrica da cúspide para a condição da função (08) $V(S_R, U) = 0$.

Calculando-lhe as derivadas em relação às variáveis (S_R) e (U), e considerando (1) o teor total de umidade ou supersaturação da geomassa (09), e (2) a mescla da composição

granulométrica da geomassa no seu estado de pós-ruptura (10) tem-se.

$$\frac{\partial V(S_R)}{\partial (S_R)} = AS_R^3 + BUS_R + Q\theta = 0 \quad (09)$$

$$\frac{\partial V(U)}{\partial (U)} = \frac{1}{2} BS_R^2 = 0 \quad (10)$$

A expressão (09) é uma superfície cúbica em (S_R) (ver Fig.5), que descreve a mutação do estado físico da geomassa representada pela figura geométrica da cúspide, e/ou pela projeção da sua bifurcação no plano horizontal cartesiano ($\lambda_1 \lambda_2$).

Alternativamente a expressão derivada (10) é sendo nula para qualquer valor de (S_R), indica que o estado físico da geomassa independe da granulometria do regolito.

Isto se percebe bem pela presença do eixo da bifurcação paralela ao eixo λ_2 (ver Fig. 5), que figura no plano ($\lambda_1 \lambda_2$).

A natureza corrobora também a afirmativa e torna-a válida, pois os espectros granulares das geomassas que são encontrados nas corridas detriticas macro ou mesogranulares, e nas corridas de lama microgranulares (coloidais), apresentam uma grande variação de magnitude dos grãos sólidos, mas se encontram tanto nos regolitos em estado coeso sólido (pré-ruptura), quanto naqueles em estado fluido-líquido (pós-ruptura), isto é, nas corridas.

Os dois parâmetros que representam as variáveis independentes ou fatores controlantes e que determinam a transformação do estado físico da geomassa respondem respectivamente pela mobilidade ou fluência (S_R), condicionada pela concentração volumétrica (C_V) da mistura, e pela adoção de um adequado modelo reológico, como por exemplo, o de Corpo de Bingham, condicionado pelo respectivo espectro granular do sistema disperso granular em escoamento.

Percebe-se, sem entrar em pormenores analíticos mais profundos, que a introdução de variação paramétrica discreta, tal como ($\pm \Delta S_R$) e/ou ($\pm \Delta U$), poderá resultar ou na manutenção do estado físico em que se encontra a geomassa ou na mutação/transformação do seu estado físico.

Percebe-se que, quando a geomassa está na proximidade imediata à superfície crítica limite, esta é alcançada ou abandonada quando se

estipula a variação paramétrica das variáveis (S_R) e (U), que controlam, isoladamente ou em conjunto, a estabilidade e a deformabilidade da geomassa.

Adotando a classificação de geomassa regolítica nos seus estados de pré e pós-ruptura, proposta por Cui e Thornes (1996), tem-se:

(a) Geomassa regolítica sólida, estruturada, estável, e quase saturada se localiza sobre o talude de encosta ou o leito da calha e se denomina um “quase debris-flow”;

(b) Geomassa regolítica supersaturada fluida e instável, com a sua estrutura original amolgada e com os vínculos intergranulares destruídos que escoam sob a ação da gravidade, chama-se um “debris-flow propriamente dito”.

Assim as geomassas, definidas em (a) e (b), são localizadas imediatamente abaixo ou acima da superfície limite crítica em (06) e (07).

O princípio de divergência, cuja formulação analítica não se apresenta aqui em detalhes, quando é aplicado às expressões (09) e (10) admite a coexistência simultânea dos estados físicos definidos em (a) e (b), na proximidade imediata da cúspide da superfície de equilíbrio derivada.

A mutação do estado depende da variação infinitesimal, no caso da expressão (09) e/ou (10), aplicada no conveniente sentido e que resulta:

(1) na manutenção do status do estado físico da geomassa; (2) na transformação do seu estado físico; ou, (3) no eventual retorno da geomassa ao estado físico original (histerese) como é citado por Christofolletti (1999).

$$\frac{d^2V(S_R)}{d(S_R)^2} = (3A)S_R^2 + \left(\frac{B_2}{C-B_1}\right)U \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2V(U)}{\partial(U)^2} = 0 \quad (12)$$

Observe-se que derivando as expressões (09) e (10) se obtém as expressões das seguintes derivadas segundas (11) e (12):

O expoente da variável (S_R) em (11) indica claramente a grande importância que o teor de umidade da geomassa representa no processo da ruptura e da transformação ou mutação.

Percebe-se que a cada mescla granular (U) regolítica da geomassa, pronta a se transformar

em um fluido (líquido), corresponde um determinado teor (S_R) de água livre superficial e/ou subsuperficial.

Assim as ações preventivas de se evitar as rupturas de taludes devem concentrar-se inicialmente no manejo de água da chuva efetiva/excedente local que participa do processo, ou seja, na drenagem superficial e subsuperficial.

4. CONTROLE DAS CORRIDAS POR MEIO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

4.1. Considerações Iniciais.

O equilíbrio e a estabilidade dos taludes de encostas/vertentes de relevo natural pressupõem uma continuidade física da matéria e a ausência de deslocamentos relativos significativos entre as partes contíguas de geomassas no estado sólido.

Entretanto apesar de inicial ausência de deslocamentos, a geomassa sólida dos taludes tem a propriedade de cedência, ou seja, a capacidade de apresentar pequenas deformações sem comprometer a estabilidade e o equilíbrio.

Neste caso a geomassa sólida desenvolve uma redistribuição por todo seu volume das tensões internas que se denomina relaxação e que lhe garanta a continuidade da matéria.

As pequenas deformações que surgem são lineares (compressão/tensão) e as angulares de distorção (cisalhamento/corte).

Ambas as classes de deformações são as respostas às pequenas variações de esforços externos ou internos que são aplicados ao material regolítico.

Entretanto a capacidade de se manter uma condição de equilíbrio estável pela geomassa não é ilimitada.

Se as deformações da geomassa se tornam exageradas e elas atingem toda massa do corpo, ele passa a apresentar um estado de deformação lenta ou de cedência contínua conhecida também como fluência ou “creep”.

A cedência evolui sob a ação de carga permanente constante ao longo do tempo e pode diminuir e se extinguir ou então crescer e atingir o estado de ruptura ou colapso.

Assim a deformação cumulativa da geomassa se transforma em deslocamento com inúmeras rupturas locais as quais, ao atingir a deformabilidade limite, resultam em ruptura.

Destarte um deslocamento de rastejo do talude ao longo de um intervalo de tempo grande se transforma em ruptura franca ou colapso estrutural total.

Introduz-se na análise da estabilidade das geomassas e de suas estruturas de retenção um fator de segurança C_{FS} que representa a reserva ou margem de segurança estipulada e prescrita pelas normas técnicas de acordo com as características de cada estrutura e da importância da obra em cada caso.

O coeficiente/fator de segurança C_{FS} é uma grandeza adimensional que necessariamente é > 1 , pois representa uma razão entre forças resistentes/estabilizadoras e forças atuantes que instabilizam a geomassa e a associada estrutura de retenção:

$$C_{FS} = \frac{\sum F_{RES/EST}}{\sum F_{ATU/INS}} \geq 1 \quad (14)$$

A fim de poder atender às condições necessárias para assegurar o equilíbrio estável dos taludes e das estruturas de retenção das geomassas recorre-se geralmente a:

- Redução das forças ativas e instabilizadoras sendo elas as solicitações exógenas ou externas e as endógenas ou internas;
- Aumento das forças passivas ou resistentes estabilizadoras também figurando como solicitações externas ou internas;
- Combinação conjunta e simultânea dos dois procedimentos anteriores.

Do ponto de vista exclusivamente geotécnico procura-se agir ativamente sobre os parâmetros da equação Coulomb-Mohr modificando lhes de forma conveniente os valores dos parâmetros de resistência coesivo-adesiva e/ou granulo-friccional:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' \quad (15)$$

Onde: τ , tensão de cisalhamento (kP); c' , coesão/adesão efetiva (kP); σ , tensão efetiva normal de compressão (kP); u , tensão neutra ou poro-pressão (kP) e φ' , ângulo de atrito interno estático efetivo da geomassa (adim.).

O parâmetro (φ') é um valor intrínseco do material do talude que lhe define o limite máximo da declividade ou o ângulo de talude no seu estado de repouso.

Os parâmetros seguintes, exceto (u), podem ser aumentados: (1) a coesão/adesão (c), por meio do aumento de imbricamento na superfície de cisalhamento e por injeções de contato ou de sutura; (2) a tensão normal (σ), pela aplicação da protensão na direção de um peso virtual inserido.

A tensão neutra/poro-pressão (u) pode ser reduzida ou anulada ($u \rightarrow 0$) pela drenagem da geomassa e assim aumentar a tensão efetiva.

Todas comentadas intervenções são medidas de natureza preventiva ou ações ativas de prevenção “profiláticas” dos escorregamentos e que se aplicam somente no estágio correspondente a pré-ruptura dos taludes.

4.2. As Preservações dos Taludes Naturais de Corte/Aterro no seu Estágio de Pré-Ruptura.

Os procedimentos relacionados a seguir são usuais e são muito bem conhecidos na prática de engenharia geotécnica brasileira e que serão comentados aqui apenas superficialmente.

Entre as diversas técnicas empregadas citam-se: (a) retaludamento das encostas; (b) redução de sobrecargas desestabilizantes e/ou incremento de sobrecargas estabilizantes externamente aplicadas em locais adequados do talude; (c) emprego de ancoragens protendidas, ou não protendidas; (d) grampeamento do solo; (e) emprego do reforço de geotexteis (grelhas, tiras e telas); (f) estruturas de retenção por estruturas de arrimo; (g) impermeabilização e drenagem superficial dos taludes; (h) drenagem interna da geomassa dos taludes por meio de poços ou galerias de drenagem e de drenos radiais ou sub-horizontais extensos; (i) proteção e reforço do talude pela cobertura de camada vegetal capaz de conter árvores, arbustos ou grama.

4.3. As Preservações dos Leitos de Canais e Calhas no seu Estágio de Pré-Ruptura.

Os canais e as calhas naturais recebem o escoamento permanente ou intermitente de cursos de água perenes ou temporários.

No caso das vazões normais frequentes e com período de retorno pequeno os escoamentos que ocorrem são estudados em Hidromorfologia Fluvial um tema que não é abordado aqui.

Mas quando se trata de eventos extremos, raros e intensos, a preservação e conservação dos canais e calhas, naturais ou artificiais, ocorrem utilizando-se um revestimento protetor executado em: solo cimento, concreto armado, concreto asfáltico ou mantas impermeáveis plásticas.

Usam-se também tubulações plásticas, de concreto, ou metálicas como alternativas.

As superfícies tornam-se impermeáveis e de baixa rugosidade o que favorece o escoamento e impede a penetração e a infiltração de água no subsolo, mas todas as soluções citadas são geralmente de um alto custo.

4.4. O Controle e Manejo do Escoamento de Corridas Detriticas e de Lama Pós-Ruptura

Os sistemas granulares dispersos bifásicos formam um numeroso conjunto de classes de escoamento diferenciado determinadas por: (1) concentração volumétrica ou ponderal das misturas dispersas bifásicas e (2) composição granulométrica da mescla granular de geomassa.

Os valores distintos dos parâmetros na Fig. 6 definem qualitativamente os campos das diversas classes de escoamento em função das seguintes grandezas:

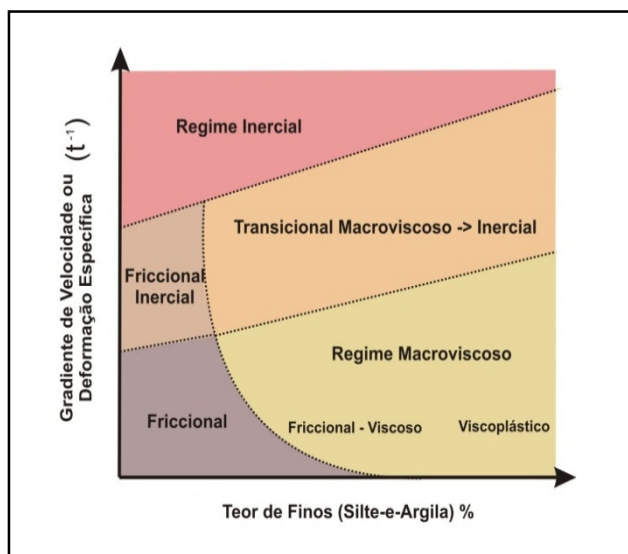


Figura 6. Teor de finos versus Gradiente da velocidade do escoamento ou Deformação específica. (Whipple 1997).

(a) teor de finos da mescla, segundo o eixo dos “x”, e

(b) gradiente de velocidade ou a deformação específica cisalhante (distorção), segundo o eixo dos “y”.

Um exame mais detalhado da citada figura revela a grande importância desempenhada pela fração dos finos regolíticos microgranulares no comportamento reológico das geomassas rompidas e que escoam.

Sobrepondo os elementos da Fig. 6, aos da superfície crítica limite apresentada na Fig. 3 anterior, percebe-se bem que as corridas de lama que são representadas pelas misturas viscoplasticas (argilas coesivas), viscosas friccionais (siltes de coesão aparente) e as friccionais (areias finas incoesivas), são os escoamentos que ocorrem com os valores mais baixos do gradiente de velocidade, ou seja, no regime macroviscoso Bagnold (1954).

O escoamento macroviscoso do modelo de Bagnold acontece em regime hidráulico laminar ou turbulento determinado por parâmetros de dispersão, velocidade, viscosidade e densidade absoluta, definidos pela concentração linear (λ) e a volumétrica (C_v) da mistura macro granular.

Já o modelo reológico de Bingham (1922), descrito a seguir, se usa com sucesso para representar o comportamento reológico das misturas oriundas de solos residuais (estado sólido de pré-ruptura) quando as misturas dispersas bifásicas são de lama ou microgranulares, no estado fluido (líquido) de pós-ruptura.

O citado modelo reológico é um corpo elasto-visco-plástico ou também chamado de corpo bivisco, pois representa simultaneamente as geomassas sólidas de alta viscosidade, no seu estágio de pré-ruptura, e as misturas de baixa viscosidade ou fluidas, no seu estágio de pós-ruptura como exposto na expressão (16):

$$\tau = \tau_{lim} + \eta(\dot{\gamma})^n = \tau_0 + \eta \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (16)$$

Onde: τ_0 é a tensão limite de cedência; $\dot{\gamma}$ é a razão da deformação cisalhante específica (deformação lenta do corpo sólido); η é o coeficiente de viscosidade dinâmica aparente (grande deslocamento ou o escoamento do

corpo fluido-líquido); e n é um expoente classificatório adimensional do fluido.

Se o parâmetro n apresenta valores inferiores à (< 1) ou superiores (> 1) à unidade, tem-se: no primeiro caso o fluido pseudo-plástico (fluido de Casson) segundo (Locat 1997), e no segundo caso o fluido dilatante inercial (Bagnold 1954) em ambos os casos os fluidos são não newtonianos, entretanto quando o expoente $n = 1$ o fluido é newtoniano.

Praticamente toda a fase sólida da mistura é representada neste caso por solos residuais evoluídos ou maduros (Vargas 1978), pois são produtos de alteração e decomposição das rochas matrizes (gnaisse, granitos, diábases, e outras) do cristalino brasileiro.

Os solos residuais que revestem os taludes das encostas/vertentes das: Serra do Mar, Serra da Mantiqueira, Serra Geral, e outras, são responsáveis pelos extensos escorregamentos lineares primários, planares e geralmente rasos observados nas vertentes das citadas cadeias de montanhas.

Nestes casos a faixa dos finos regolíticos representa aproximadamente de 10% a 30% da curva granulométrica em peso da geomassa que escoou pós-ruptura.

A observada magnitude dos valores de finos já é suficiente para conferir aos escoamentos pós-ruptura características viscosas ou viscoplásticas conforme (Coussot 1997).

Na medida em que o parâmetro $g = dv/dx$, gradiente de velocidade aumente, os escoamentos se tornam inicialmente macroviscosos e depois friccionais inerciais ou simplesmente inerciais.

A remobilização dos depósitos de colúvio que não alcançaram as calhas durante os episódios de chuvas anteriores se insere nesse cenário.

O escoamento inercial se torna turbulento quando a concentração volumétrica (C_v) da mistura diminui e a magnitude da fase sólida aumenta (Φ).

Isto ocorre quando, ao escoar, as partículas sólidas graúdas participam dos choques e/ou colisões entre os grãos sólidos fatos que conferem ao fluxo um comportamento dilatante-inercial.

Neste caso O'Brien e Julien (1985) propõem o modelo reológico quadrático que figura como:

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{du}{dy} \right) + \zeta \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (17)$$

Onde; τ_0 é a cedência limite; η é o coeficiente de viscosidade dinâmica cujo inverso é o parâmetro fluência do sistema granular disperso e ζ é o parâmetro ou o coeficiente turbulento-dispersivo de Bagnold (1954).

4.5. Tipos Básicos de Estruturas de Controle e Manejo do Escoamento de Corridas Detriticas e de Lama.

As estruturas empregadas para o controle, manejo, e a regularização do fluxo dos escoamentos de corridas detriticas ou de lama deparam-se com os seguintes problemas de natureza hidráulica:

- 1- Controle do nível de energia cinética das corridas detriticas rochosas;
- 2- Controle do nível de energia potencial das corridas de detritos e de lama;
- 3- Avaliação dos empuxos estáticos e dinâmicos ou de impactos-choques das corridas exercidos contra as estruturas.
- 4- Controle do escoamento ou das grandezas: velocidade do fluxo, vazão de ponta, duração do escoamento e o volume do escoamento.
- 5- Processos dissociativos das fases de corridas ou a separação entre os sólidos e o líquido da mistura (sistema disperso granular bifásico supersaturado).
- 6- Deposição e estocagem dos componentes: (a) fase sólida separada da mistura; (b) sua acumulação em reservatório de rejeitos e o armazenamento da fase líquida em separado possibilitando sua devolução a rede hidrológica local da bacia; e (c) acumulação estocagem da mistura em reservatório.
- 7- Condução por escoamento do material das corridas até os pontos de sua deposição definitiva em vales ou reservatórios de grandes dimensões.

A primeira providência é a identificação dos ietogramas responsáveis por escorregamentos ocorridos ou uma avaliação hipotética da precipitação pluvial específica capaz de gerar um episódio similar aos ocorridos.

A avaliação da chuva efetiva/excedente no escoamento superficial direto ("runoff") e da parcela de infiltração junto com o lençol

freático é fundamental no equacionamento hidráulico e hidrológico desse problema.

Assim o criterioso estudo da condutividade hidráulica das camadas subsuperficiais e o monitoramento do lençol freático ao longo percurso do fluxo tornam-se obrigatórios.

Em segundo lugar após a identificação geotécnica do material regolítico da corrida é realizada uma estimativa do volume sólido total da geomassa transportada.

4.6. Estruturas Destinadas ao Controle Específico

As barragens de controle e do manejo de corridas detriticas são construídas para se obter a retenção total das misturas bifásicas ou para o exercício de determinadas funções hidráulicas específicas relacionadas a seguir:

- a)- Dissipação de energia cinética;
- b)- Seleção granulométrica macrogranular;
- c)- Retenção parcial dos sólidos e a regulação do fluxo líquido das corridas;
- d)- Retenção integral das corridas;

As estruturas de retenção integral são construídas em enrocamento pesado ou em concreto ciclópico ou alternativamente em concreto-massa, simples e não armado, sendo essa solução preferida dos engenheiros japoneses e chineses (“Sabo dams”) que asseguram na prática a retenção total das corridas detriticas.

A dissociação física ocorre por decantação e sedimentação da fase dispersa no reservatório e uma drenagem posterior da fase dispersoide.

Nisto essas estruturas se assemelham muito com as barragens de rejeitos da mineração, que retém os inertes finos provenientes dos processos industriais de uma forma permanente, drenando a água usada no transporte da fase dispersa.

Um exemplo clássico, que ainda é pouco conhecido entre-nos, é a barragem de enrocamento Médeo, no rio Almatynka em Cazaquistão, descrita por Kuzmin (1974) e Schuster (2000).

A estrutura foi erigida para assegurar proteção à cidade de Almaty (capital do Cazaquistão), contra as frequentes corridas de detritos causadas por “GLOF” (“glacial lake

outburst flood”), que descem dos Montes Alatau ou Tien-Shan.

Entre as diversas soluções analisadas foi escolhida a construção da barragem de enrocamento, com cerca de 100 metros de altura com a capacidade de reter e acumular cerca de $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ de material conjugado (sólido e líquido).

O funcionamento da estrutura ocorreu ainda durante a fase final de sua construção (1973).

Ocorreu nessa data um enchimento parcial do reservatório por detritos e pela água do degelo de um lago glacial de altitude com a decorrente redução do volume de retenção inicialmente previsto.

A água de degelo liberada mobilizou uma grande quantidade de geomassa de morenas e de sedimentos aluvionares da superfície de equilíbrio derivada (M_f), provocando uma corrida de detritos com $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ de volume total.

A vazão líquida máxima de escoamento alcançou $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, e a vazão média estimada foi cerca de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

As ondas da corrida percorreram um trajeto de 11 quilômetros em 20 minutos atingindo a barragem com a velocidade de cerca de $9,0 \text{ m/s}$.

O reservatório da barragem Médeo, que estava inda em processo de construção, armazenou durante as 2 horas seguintes, todo o volume inicial da corrida.

A solução adotada para fazer face ao ocorrido e garantir a finalidade da estrutura foi executar lhe um alteamento adicional de 40 metros ficando assim a barragem de Médeo com uma altura final de 140 metros, que, provavelmente, é o recorde mundial deste tipo de construção.

4.7. Experiência estrangeira de execução de obras do controle e manejo de corridas detriticas e de lama

As soluções de dissipação da energia cinética e de seleção granulométrica executadas em concreto armado são utilizadas com frequência pelos engenheiros austríacos, italianos e suíços na Europa e pelos engenheiros japoneses e chineses na Ásia.

Para reter os blocos de geomassa com volume e peso maior se empregam as barreiras

vazadas ou os dissipadores de energia cinética que retêm e separam os grandes volumes individuais da geomassa pela sua interceptação ou pela redução da velocidade de escoamento anulando-lhes o arraste.

A partir de certa magnitude dos grãos sólidos torna-se viável promover a separação entre as duas fases componentes das misturas por meios mecânicos (retenção por peneiramento) o que está detalhado em Znamensky (2008) e Znamensky e Tamada (2003).

Algumas dessas estruturas são descritas em detalhes por Heumader (2000); Fiebiger (1997), Watanabe (1988) e outros autores citados por Okubo et al., (1997) em Armanini e Michiue (1997).

Mais recentemente empregaram-se no Japão estruturas metálicas em aço (tubulares reticuladas) descritas por Mizuyama et al. (1995) ou as barragens células, executadas com as estacas pranchas metálicas tendo o seu interior preenchido por enrocamento e/ou areia (materiais locais), Armanini e Michiue (1997).

4.8. A Experiência Brasileira de Execução de Obras para Corridas Detriticas e de Lama.

A pesar de ser o Brasil um território desprovido de montanhas de grande altura o seu relevo e a interação da litosfera e da hidrosfera do seu território criam as condições propícias para a ocorrência rotineira de movimentos de geomassas alguns dos quais evoluem e são classificados como o fluxo (escoamento) de detritos.

Outros dois fatores que contribuem para a ocorrência deste cenário são: (a) Solos residuais tropicais de uma grande espessura que revestem as vertentes das bacias hidrográficas, e, (b) Regime pluvial de significativa magnitude presente em determinadas regiões do território nacional.

A conjunção desses elementos potencializa o movimento das geomassas principalmente ao longo da costa da Região Sudeste do Brasil e das suas proximidades que é a parte mais densamente habitada e economicamente mais desenvolvida do país.

Assim os eventos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos extremos tem se verificado nas regiões serranas dos estados litorâneos de

Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e também em menor número nos estados interioranos de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás.

Os mencionados eventos têm causado enormes danos ecológicos ao meio ambiente, grandes danos econômicos a infraestrutura urbana e de campo e os incalculáveis e trágicos danos decorrentes da perda de preciosas vidas humanas.

As obras visando a estabilidade de taludes, deixando de lado as soluções pontuais urbanas menores, foram executadas no Brasil no setor de transporte rodoviário e ferroviário nas encostas da Serra do Mar próximo a cidade do Rio de Janeiro e São Paulo.

Os clássicos exemplos são as rodovias e ferrovias do Rio de Janeiro a Petrópolis e de Santos a São Paulo.

A engenharia nacional já se deparou nestes locais com alguns problemas híbridos, isto é, simultaneamente geotécnicos e hidráulico-hidrológicos e especificamente vinculados ao meio natural das serranias nacionais.

Os processos de desenvolvimento econômico e social fizeram se sentir ao longo dos anos como processos de desmatamento, reversão dos cursos de água e da implantação de complexos industriais e suas obras anexas.

Na Baixada Santista surgiram em meados do século passado a Usina Hidrelétrica da Light (Henry Borden), a Siderúrgica Cosipa, o Polo petroquímico Ultrafértil e a Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras.

Como uma consequência decorrente deste desenvolvimento industrial ocorreu um intenso e paralelo desenvolvimento urbanístico e demográfico da cidade de Cubatão acompanhada pela próxima cidade e porto de Santos.

As primeiras ocorrências documentadas de corridas detriticas de grandes proporções ocorreram na: Ferrovia Santos-Jundiaí no trecho da descida da Serra do Mar (corrida de rocha), no morro de Montserrat em Santos (corrida de solo residual e detritos rochosos) e o movimento lento (“creep”) do regolito na curva da Rodovia Anchieta (Santos-São Paulo) na Serra do Mar.

Mais recentemente corridas de detritos macrogranulares ocorreram na bacia do Córrego

das Pedras nas proximidades da refinaria Presidente Bernardes comprometendo o seu funcionamento normal e obrigando a Petrobras a implantar estruturas de dissipação da energia cinética de blocos de rocha e de retenção de detritos granulares menores.

5. CONCLUSÕES

Em primeiro lugar é necessário estudar e delimitar em planta as bacias hidrográficas de todas as ordens conhecendo-lhes as áreas das suas respectivas superfícies drenantes, e classificando suas formas geométricas com as grandezas lineares, superficiais ou volumétricas.

Os parâmetros serão considerados no espaço unidimensional em extensão (cumprimentos), e no plano (perímetros, comprimentos, larguras, declividades) bem como no espaço tridimensional (hipsometria e outras grandezas pertinentes) Christofolletti (1980).

A avaliação de potencial ocorrência das corridas detriticas e/ou de lama implica no conhecimento mais preciso possível e determinação de numerosos e diversificados fatores, relacionados com o meio ambiente e com os processos físicos dos seus eventos.

As ações que resultam na formação de um banco de dados referentes a uma determinada área geográfica abrangem a execução dos levantamentos no campo e a confecção de numerosos e específicos mapas e documentos cartográficos especiais.

Algumas das grandezas questionadas são medidas até com uma relativa facilidade. São as grandezas geotécnicas, às quais se tem um acesso fácil e se dispõe de ferramentas de campo e/ou laboratoriais para a realização dos ensaios disponíveis.

A grande dificuldade é a heterogeneidade natural dos solos residuais no caso, que coloca em cheque a aplicação imediata dos resultados pontuais obtidos sem um adequado tratamento estatístico.

A obtenção das grandezas hidrológicas básicas também é relativamente fácil. Entretanto a transformação da chuva em deflúvio, a evapotranspiração, a infiltração e percolação apresentam as costumeiras dificuldades de obtenção, sistematização e de extrapolação dos

dados observados, com as quais se depara no campo de meteorologia, hidrogeologia e hidráulica, além das de outras em áreas afins.

Somente os dados de campo obtidos com a instrumentação geotécnica, meteorológica, e o monitoramento específico e criterioso das corridas, orienta a correta escolha e tomada das decisões.

A situação de campo requer algumas respostas às seguintes perguntas: (1) Qual é a participação do lençol freático inicial presente e disponível na camada regolítica em relação à magnitude do (G_s) presente e disponível na camada?; (2) Que NA apresenta o lençol freático em relação a espessura da camada regolítica para que ocorra o escoamento hipodérmico raso ou o freático profundo?; (3) Que valores de intensidade ($i = \Delta h / \Delta t$) ou altura e duração da chuva total (P_{TO}) resultam em precipitação efetiva-excedente (P_{EE}), capaz de alcançar, provocando e/ou completando, a supersaturação ($G_s > 1$) da camada regolítica em consideração e gerando a sua ruptura e liquefação?

Os problemas de extrapolação dos dados estatísticos obtidos ainda persistem e uma indeterminação estará sempre presente nos fenômenos aleatórios e randômicos de processos naturais o que conduz as soluções para um campo probabilístico e que representa sempre uma multiplicidade de soluções e a dificuldade (processo) de escolha de uma delas.

AGRADECIMENTOS

Os autores apresentam os seus agradecimentos ao Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) pelo apoio dado por sua Diretoria à divulgação desse tema junto a ABMS.

Por sua vez é reconhecida a colaboração oferecida pelos órgãos governamentais tais como Ministério de Integração Nacional, Ministério de Cidades que foi muito apreciada e considerada muito bem-vinda.

REFERÊNCIAS

- Armanini, A. e Michiue, M. (1997), *Recent developments on debris flows*, em Springer-Verlag 1997, Berlin and Heidelberg GmbH&Co.

- Augusto Filho, O. (1992), Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica, em *Anais da 1ª COBRAE*, Eds. ABMS/ABGE/PUCRJ, Rio de Janeiro, RJ, V. 2, pgs. 721-733.
- Bagnold, R. A. (1954), Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, em *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 225, London, Great Britain, pgs. 49-63.
- Bingham, E. C. (1922), *Fluidity and Plasticity*, Mc Graw Hill, New York, N.Y.
- Chen, G. X. et al. (1983), *Debris Flow Control*, Railway Press (in Chinese), Beijing, pgs. 7.
- Christofoletti, A. (1992), *Modelos sobre Mudanças e Dinâmica Evolutiva dos Sistemas em Modelagem de Sistemas Ambientais*, 2002, Ed. Edgard Blücher Ltda., Cap. 6, Parágrafo C, pgs. 113-121.
- Christofoletti, A. (1980), *Geomorfologia*, Ed. Edgard Blücher Ltda. 2a. Edição 1980, Cap. 4, pgs. 102-127.
- Coussot P. (1997), *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR Monograph, Ed. Balkema (1997), Rotterdam, Netherlands, pgs. 255.
- Crozier, M. J. (1973), *Techniques for the morphometric analysis of landslips*, em *Zeitschrift für Geomorphologie*, 17 (1), pgs. 78-101.
- Cui, P. (1990), *Study on the Initiation Mechanism of Debris Flow*, PHD Dissertation (in Chinese), Beijing Forestry University, pgs. 6.
- Cui, P. (1992), *Study on theoretical methods the Initiation Mechanism of Debris Flow by means of experiment*, Chinese Science Bulletin Vol. 37 (9), pgs. 759-763.
- Cui, P., Thornes, J. and Junwei, G. (1996), Study on the properties of Debris-flow initiation by means of Catastrophe Theory, in *International Symposium Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen*, Vol. 3, pgs. 103-112.
- Fiebigler, G. (1997), Structures of debris flow countermeasures, em *Proceedings of 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ed. Cheng-Iung Chen, 1997, ASCE American Society of Civil Engineers, New York, USA, pgs. 596-605.
- Gottschalk, L. C. (1964), *Sedimentation* em *Handbook of Applied Hydrology*, Ven Te Chow, Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, NY, Sec. 17-1.
- Guidicini, G. e Nieble, C. M. (1976), *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Ed. Edgard Blücher, Universidade de São Paulo, São Paulo, pgs.171.
- Heumader, J. (2000), Technical debris-flow countermeasures in Austria-A review, em *Proceedings of 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pgs. 553-564.
- John, L. I. (1983), *Debris flow, Progress in Physical Geography*, Vol. 7(4), pgs. 469-496
- Krumbein, W. C. (1941), Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, August 1941; Vol. 11; no. 2, pgs. 64-72
- Kuzmin, K. K. (1974), *A catastrófica corrida de detritos de 1973 e a barragem de Médeo (em russo)* em *Gidrotechnicheskoe Stroitelstvo*, Ed. Energia, No. 3, 1974, pgs. 10-12.
- Larras, J. (1972), *Hydraulique et Granulats*. Editions Eyrolles, Paris, France.
- Linsley, R. K. Jr., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H. (1988), *Hydrology for Engineers*, Mc Graw-Hill Book Company, London, 1988, pgs. 492.
- Locat, J. (1997), Normalized Rheological Behavior of fine muds and their flow properties in a pseudo plastic regime, em *Proceedings of 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ed. Cheng-Iung Chen, 1997, ASCE American Society of Civil Engineers, New York, USA, pgs. 260-269.
- Magalhães Freire, E. S. de (1965), *Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática*, em *Construção*, Rio de Janeiro, No. 8, pgs. 10-18.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., and Mizuno, H. (1995), *Control of passing sediment with grid-type dams*, em *Journal Japanese Society of erosion Control Engineering*, V. 47, no. 5, 1995, pgs. 59-65.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y. e Fullerton, W. T. (1993), Two dimensional water flood and mudflow simulation, em *ASCE, J. Hyd. Eng.* 119,(2), pgs. 244-259.
- Okubo, S., Ikeya, H., Ishikawa, Y., Yamada, T. (1997), *Development of new methods for countermeasures against debris flows*, em *Armanini e Michiue (1997)*, pgs. 166-185.
- Schuster, R. L. (2000), Outburst debris-flows from failure of natural dams em *Proceedings of 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Balkema 2000, Rotterdam, Netherlands, pgs. 29-42.
- Scott, K. M. (2000), *Precipitation-triggered debris-flow at Casita Volcano, Nicaragua* em *Proceedings of 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pgs. 3-13.
- Si, Y. F. et al. (1985), *Lanzhuo Glacial and Frozen Earth Institute Preface*, Academia Sínica (4), Science Press (in Chinese), Beijing, pgs. iv-v.
- Skempton, A. W. and Hutchinson, J. N. (1969), Stability of natural slopes and embankment foundations. State of the art Volume, em *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, pgs. 291-340.
- Sowers G. F. (1963), Engineering Properties of Residual Soils Derived from Igneous and Metamorphic Rocks, em *Proc. of 2nd Pan-Am Conf. Soil Mech. Found Engr. In Brazil*, Vol. 1, pg. 39.
- Takahashi, T. (1991), "Debris Flow", International Association for Hydraulic Research (IAHR), Monograph, Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Thom, R. (1975), *Structural stability and morphogenesis: an outline of a general theory of model*, Ed. W. A. Benjamin 1975, Reading, Mass.
- Umeya, K. (1983), Rheology of Powder Systems, em *Advances in the Mechanics and the Flow of Granular Materials*, M. Shahinpoor, Ed. Trans Tech. Publications, Clausthal, Germany, Vol. II, pgs. 719-744.

- Vargas, M. (1951), Resistência e Compressibilidade de Argilas Residuais, tese da EPUSP. Ed. Impressora IPSIS, São Paulo, Brasil, pgs. 146
- Vargas, M. (1978), *Introdução a Mecânica dos Solos*, Ed. Mc Graw-Hill do Brasil, Ltda. São Paulo, Brasil, pgs. 510.
- Varnes, D. J. e Cruden, D. M. (1978), *Landslides, investigation and mitigation*. em Turner, A. K. e Schuster, R. L. (Eds), Special Report 247, Washington D.C.: Transportation Research Board, Ed. National Academy Press, Chapter 3, pgs. 36-75.
- Walker, B. F. e Fell, R. (1987), *Soil Slope Instability and Stabilization*, em *Proceedings of an Extension Course-Sidney-Australia*, Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Watanabe, M. (1989), Some problems in flood disaster prevention in developing countries em *Proceedings of the Technical Conference Hydrology of Disasters, Geneve, Switzerland 1988*, Ed. Earthscan Publications, London, England. pgs. 84-105.
- Wentworth, C. (1922), A scale of grade and class terms for clastic sediments em *Journal of Geology*, 30, pgs. 377-392.
- Whipple, K. X. (1997), Open-Channel Flow of Bingham Fluids: Applications in Debris-Flow Research, *The Journal of Geology*, 1997, vol.105, pgs. 243-262.
- Yablonsky, V. V. (1972), Análise hidrológica do processo de corridas detriticas, em *Anais da Academia de Ciências da Ucrânia*, Kiev, Ucrânia, n. 177, pgs. 92-97.
- Znamensky, D. V. (2008). Debris flow control in Brazilian tropical rain forest mountains. *Proc. of the Inter. Conference on Debris flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection*, 2008, Pyatigorsk, Russia, pgs. 351-354.
- Znamensky, D. V. (2011), Granulometria das Mesclas de Sedimentos provenientes dos Solos Tropicais e que concorrem para a formação das Corridas Detriticas, em *Anais do V Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste*, Brasília-DF. pgs. 347-355.
- Znamensky, D. V. e Gramani, M. F. (2000), Debris flow grain size analysis, em *Proceedings of 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Balkema 2000, Rotterdam, Netherlands, pgs. 537-545.
- Znamensky, D. V. e Tamada, K. (2003), Estruturas de Controle e de Manejo das Corridas Detriticas ou de Debris Flow, em *Anais do XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Ed. CBDB, (2003), Salvador-BA, pgs. 15.
- Znamensky, D. V. e Teixeira da Cruz, P. (2001). Influencia da Fase Sólida das Corridas de Detritos na sua Reologia e Classificação, *Anais da III COBRAE*, (2001) Rio de Janeiro, Brasil, pgs. 177-184.