

3. Modelagens numéricas de fluxos de detritos

Devido à complexidade dos movimentos de massa surgiu a necessidade de se utilizar ferramentas como a modelagem numérica para seu estudo. Foram propostos diversos programas, e outros se encontram em desenvolvimento para estudar o comportamento destes movimentos. O presente capítulo apresenta uma revisão das diferentes abordagens deste fenômeno, e uma compilação dos programas mais utilizados na modelagem de fluxos de detritos. Finalmente apresenta-se uma descrição detalhada dos programas computacionais utilizados nesta pesquisa.

3.1. Abordagem dos fluxos de detritos

O estudo da previsão de movimentos de massa e seus efeitos, também chamado de *runout analysis* pode ser avaliado do ponto de vista qualitativo ou quantitativo (McDougall, 2006). A análise qualitativa pode ser feita através de observações topográficas seguindo as maiores declividades encontradas no local, e requer experiência para estimar as demais variáveis envolvidas no estudo. Análises quantitativas são menos subjetivas, e podem ser classificadas como empíricas ou analíticas.

Os métodos empíricos são baseados em dados históricos resultando em correlações empíricas. Algumas correlações para encontrar os principais parâmetros foram apresentadas no Capítulo 2. Esta abordagem é utilizada para estimar valores de pico ou instantâneos, entretanto, não fornece informação sobre a distribuição espacial dos parâmetros estudados. Estes métodos são simples, porém mostram um nível de confiança discutível, uma vez que são resultantes de dados coletados em diferentes locais com diferentes topografias, geologia e reologia dos materiais (McDougall, 2006).

Os métodos analíticos são baseados na solução de um sistema de equações com soluções fechadas ou numéricas (modelagem numérica). Por exemplo, o método analítico mais simples é o modelo do bloco deslizando que se baseia na

teoria de trabalho e energia. Deformações internas e energia de dissipação são ignoradas e trata o fenômeno como uma massa concentrada (*lumped mass*). Este modelo pode ser resolvido por soluções fechadas ou métodos numéricos e já foi utilizado por pesquisadores para realizar a modelagem de movimentos de massa (Körner 1975; Pariseau 1980; Perla *et al.* 1980; McLellan e Kaiser 1984; McEwen e Malin 1989; Salm *et al.* 1990; Voellmy 1995; Salm, 1996).

Outros métodos descontínuos que utilizam o método dos elementos discretos têm sido utilizados na modelagem 2D e 3D de movimentos de massa. Entretanto, tem-se dado mais atenção ao emprego de métodos contínuos para movimentos de massa do tipo fluxo, pois consideram a deformação interna dos elementos baseados na teoria da hidrodinâmica.

Os fluxos de detritos são modelados de forma semelhante ao fluxo em canais abertos, utilizando a solução das equações de Saint-Venant. Estas equações correspondem ao caso específico da integração das equações de Navier-Stokes usadas para descrever o movimento geral dos fluxos viscosos.

Desta forma, a modelagem dinâmica dos meios contínuos é mais precisa do que os métodos empíricos tradicionais, pois a geometria e o mecanismo envolvido em cada caso podem ser levados em conta explicitamente (McDougall, 2006).

Modelos com base na dinâmica dos meios contínuos são classificados por McDougall (2006) em: i) modelos através de topografia 2D vs 3D; ii) modelos com enfoque euleriano vs lagrangiano e iii) modelos que requerem parâmetros medidos vs modelos que utilizam parâmetros calibrados.

Os modelos dinâmicos contínuos consideram equações de conservação de massa, momento e energia da mecânica dos fluidos. Estas equações, que descrevem o movimento dinâmico de fluxos de detritos, são integradas em função da profundidade média de fluxo (*depth averaged*) e combinadas com as formulações para fluxos rasos (*shallow flow*) eliminando uma dimensão. Assim, as terminologias 2D ou 3D denotam que o movimento é simulado ao longo da topografia em duas ou três dimensões.

Na abordagem euleriana o marco de referência encontra-se fixo no espaço, resultando na solução de equações mais complexas. Na abordagem lagrangeana, apesar do marco de referência se movimentar com a velocidade local, simplificando as equações governantes, estas são susceptíveis a distorções devido a grandes deformações.

A distinção entre modelos que requerem parâmetros medidos e modelos que utilizam parâmetros calibrados se concentra na forma de encontrar os parâmetros que descrevem a reologia dos materiais envolvidos no movimento. A abordagem de parâmetros medidos é utilizada por pesquisadores que acreditam que o movimento pode ser descrito por relações constitutivas, que são função das propriedades intrínsecas dos materiais. Por outro lado, modelos com parâmetros calibrados, requerem retroanálises, realizadas por meio de tentativa e erro para encontrar os parâmetros adequados para cada reologia.

McDougall (2006) propõe que a abordagem dos parâmetros medidos poderia ser considerada como idealista, pois não existem ensaios padronizados para avaliar as propriedades de, por exemplo, uma avalanche de rocha com detritos viajando a rápidas velocidades. Por outro lado, o processo de calibração dos parâmetros pode consumir muito tempo e requer de bases de dados e informação de eventos anteriores, que geralmente são de acesso restrito ou mesmo inexistentes.

3.2. Programas disponíveis no mercado

Diversos programas baseados na dinâmica dos meios contínuos têm sido desenvolvidos. A primeira tentativa foi proposta por Lang *et al.* (1979), modificando um modelo euleriano em 2D para incluir a resistência de atrito no programa AVALNCH.

Outro modelo euleriano em 2D foi modificado por Dent e Lang (1980) para incluir várias combinações de resistência de atrito, viscosa e turbulenta. Dent e Lang (1983) também incluem uma resistência bi-viscosa similar à reologia de Bingham no programa BVSMAC. Jeyapalan (1981) e Jeyapalan *et al.* (1983) propõem um modelo euleriano em 2D que inclui a reologia de Bingham.

O'Brien *et al.* (1993) apresentam um modelo euleriano em 3D que adota uma reologia quadrática no programa FLO2D, ainda utilizado por diversos pesquisadores.

Hungr (1995) apresenta um modelo lagrangiano em 2D que considera as características das tensões internas, do arrastre e as diversas reologias no modelo DAN-W. Chen e Lee (2000) propõem o modelo lagrangeano em 3D no programa comercial MADFLOW, que incorpora a reologia de atrito.

Sailer *et al.* (2002) apresentam um modelo lagrangiano em 3D que considera o arrastre do movimento no programa SAMOS. Mangeney-Castelnau *et al.* (2003) desenvolveram um modelo em 3D baseado na teoria de Savage-Hutter para simular fluxos granulares no programa SHWCIN. Pirulli (2005) propôs modificações para aprimorar o modelo de SHWCIN e criou o modelo RASH3D.

Pitman *et al.* (2003) apresentam um modelo euleriano em 3D baseado na teoria de Savage-Hutter para fluxos granulares no programa TITAN2D. McDougall (2006) criou o programa DAN3D, como uma atualização do programa DAN-W, utilizando uma formulação lagrangeana em 3D e incorporando o método numérico de SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*).

Nakatani *et al.* (2007) oferecem o programa KANAKO, que utiliza o método das diferenças finitas. O Instituto Federal Suíço para pesquisas de avalanche de neve (WLS/SLF, 2010) desenvolveu o programa RAMMS, inicialmente para avalanches de neve e atualmente incorpora uma rotina específica para fluxos de detritos.

Nesta pesquisa são apresentadas as principais características dos programas mais utilizados atualmente para a modelagem de fluxos de detritos.

3.2.1. KANAKO

KANAKO foi desenvolvido pelo Laboratório de Controle de Erosão da Universidade de Kyoto. O programa inicialmente foi proposto como uma ferramenta para avaliar o desempenho de barragens tipo *sabo dams* para o controle de erosão e contenção de sedimentos.

A primeira versão do programa simula fluxos de detritos unidimensionais (Nakatani *et al.*, 2007) e utiliza as formulações de Takahashi *et al.* (1987) e Takahashi e Nakagawa (1991) para resolver as equações de quantidade de movimento e conservação da massa, bem como as equações de erosão e deposição. Na versão 2D são utilizadas as equações propostas por Takahashi *et al.* (2001) e Takahashi (2007) e o efeito de barragens de controle pode ser simulado pelo modelo desenvolvido por Satofuka e Mizuyama (2005, 2006).

O modelo numérico utilizado é o método das diferenças finitas. O programa precisa de 16 parâmetros de controle para a modelagem numérica, entre eles: tempo de simulação, diâmetro do material, peso específico do material da base, peso

específico do fluxo, coeficiente de erosão, coeficiente de Manning, entre outros (Liu *et al.*, 2013). Outros dados de entrada como topografia e parâmetros hidrológicos são necessários para realizar as simulações.

3.2.2. TITAN2D

TITAN2D foi desenvolvido pelo *Geophysical Mass Flow Group* da Universidade Estadual de Nova Iorque em Buffalo. O programa foi desenvolvido para o estudo de fluxos granulares, deslocados sobre a superfície natural do terreno. Combina a simulação numérica com um modelo digital do terreno (DEM) vinculado a interface de um sistema de informação geográfica (GIS).

O programa requer dados de entrada tais como volume inicial do movimento, ângulo de atrito da base e ângulo de atrito interno do fluxo granular. Como resultados diretos, obtêm-se representações dinâmicas da profundidade do fluxo e momento, e pode-se derivar a velocidade, profundidade de deposição e área de impacto.

O programa é baseado nas equações de profundidade média para um fluxo incompressível contínuo do tipo Coulomb para águas rasas. As equações de conservação e momento são resolvidas com um termo de atrito tipo Coulomb para avaliar a interação interna da massa deslizada e a interação entre a massa deslizada e a superfície da base.

O programa tem sido mais utilizado para simular movimentos iniciados por atividade vulcânica como lahares ao redor do mundo (Pitman *et al.*, 2003; Palacios *et al.*, 2004; Procter *et al.*, 2004; Sheridan *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; Murcia *et al.*, 2010;).

3.2.3. FLO-2D

O FLO-2D foi desenvolvido por O'Brien *et al.* (1993) e baseia-se em um modelo bidimensional de diferenças finitas capaz de simular fluxos sobre topografias complexas em zonas urbanas. O programa exige dados de entrada tais como geometria, hidrologia e reologia. É baseado nas equações de profundidade para águas rasas e nas equações de conservação da massa e quantidade de movimento. As equações de conservação de momento são resolvidas com um termo

de atrito tipo Coulomb para avaliar a interação interna da massa deslizada e a interação entre a massa deslizada e a superfície da base.

O modelo já foi utilizado para modelar diversos casos internacionais de fluxos de detritos (Julien e O'Brien, 1997; Lin *et al.*, 2005; Garcia e Lopez, 2005; Rickenmann *et al.*, 2006; Tecca *et al.*, 2006; Segato *et al.*, 2006; Cetina *et al.*, 2006; Barrios e Olaya, 2007; Armento *et al.*, 2008; Gentile *et al.*, 2008; Stolz e Huggel, 2008; Hsu *et al.*, 2010 e Boniello *et al.*, 2010).

3.2.4. RAMMS

Ramms (*Rapid Mass MovementS*) é um programa de modelagem numérica em 3D desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Avalanches de Neve do Instituto Federal da Suíça (WSL / SLF). Originalmente desenvolvido para modelar avalanches de neve, também é utilizado para modelar outros tipos de movimentos de massa como fluxos de detritos (Cesca e D'Agostino, 2006; Kowalski, 2008; Graf e McArdell, 2011; Hussin *et al.*, 2012).

O programa RAMMS se fundamenta na solução numérica de equações de profundidade média de segunda ordem, utilizadas para movimento de fluxos granulares. Códigos para levar em conta a influência da erosão e do material de arraste estão em desenvolvimento (Christen *et al.*, 2012).

O modelo é uma generalização quase unidimensional. O programa Ramms utiliza o modelo contínuo de fluxo de Voellmy-Salm (Salm, 1993) baseado na lei de fluxo de Voellmy (1955), e descreve os fluxos de detritos como um modelo contínuo de profundidade média. Este modelo incorpora os parâmetros de atrito e turbulência para simular os eventos. Para a obtenção destes parâmetros devem ser realizadas retroanálises de eventos bem documentados.

Dentre os principais dados de entrada, destacam-se: (i) a topografia, por meio de um modelo de elevação digital; (ii) informação sobre o início do movimento, seja do volume da área desprendida ou um hidrograma do evento; e (iii) os parâmetros reológicos dos materiais.

Como dados de saída o programa RAMMS fornece imagens de altura de fluxo, velocidade de fluxo, pressão de fluxo, forças de impacto, assim como perfis da altura, velocidade e pressão de fluxo em determinados locais para projeção de estruturas.

Os métodos numéricos têm a grande vantagem de serem capazes de calcular o movimento do fluxo sobre terrenos topográficos irregulares. Além disso, eles podem calcular os parâmetros relacionados como a profundidade de fluxo e pressão de impacto em cada ponto do trajeto e os resultados serem acoplados a funções de vulnerabilidade para avaliação quantitativa do risco (Quan Luna *et al.*, 2011).

3.3.

Programas DAN-W e DAN3D utilizados na pesquisa

O DAN-W e o DAN3D foram desenvolvidos para modelagem prática de movimentos de massa reais e, assim, prover de soluções através de um número mínimo de parâmetros que requerem calibração. Porém, consideram características importantes como a complexidade da reologia, a heterogeneidade, a rigidez interna e a capacidade de incluir o material arrastado no trajeto. Ambos os modelos são baseados em formas lagrangianas da integração da profundidade das equações de Saint Venant aplicadas a coordenadas curvilíneas.

A abordagem semi-empírica consiste em uma abordagem por um lado empírica, porque requer a calibração de eventos anteriores e, por outro lado analítica, pois utiliza diferentes soluções analíticas para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. Esta abordagem semi-empírica é baseada no conceito de “fluxo equivalente” definida por Hungr (1995) onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas. Na Figura 3.1, observa-se a abordagem de fluxo equivalente aplicado a uma avalanche de rocha.

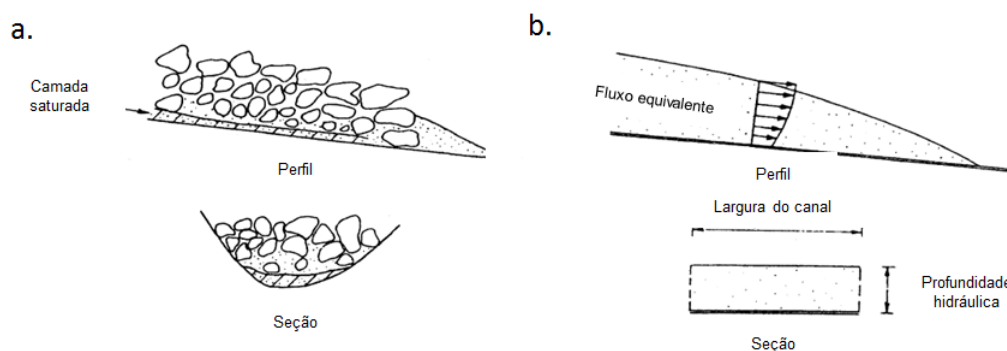


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do conceito de fluxo equivalente (Mod. Hungr, 1995).

O material em movimento e o material da base podem ser governados por reologias diferentes. No caso destes programas a reologia interna é assumida sempre como de atrito, governada pelo ângulo de atrito e a reologia da base é uma combinação das reologias de atrito, turbulentas e viscosas (*open reological kernel*) que atuam na base do movimento. Isto permite uma abordagem mais real, visto que, geralmente os movimentos de massa consistem de um material mais rígido que flui sob um material que possui maior mobilidade (Hungre e McDougall, 2009).

Logo, a reologia da base e seus parâmetros associados, são selecionados baseando-se na calibração empírica através da retroanálise de movimentos de massa acontecidos que representem o movimento em estudo. Portanto os parâmetros obtidos são considerados aparentes e não podem ser estimados em laboratório (Hungre e McDougall, 2009).

3.3.1. Equações governantes do DAN-W e DAN3D

A continuidade do modelo é assegurada pelo balanço de massa. O modelo DAN-W assegura a continuidade através de um sistema de blocos deformáveis de volume fixo interpolando a partir de funções de suavização (*smoothing functions*). O volume de controle é de forma trapezoidal, representando o material carregado entre cada coluna de referência.

Por outro lado o DAN3D utiliza o método numérico de SPH (*smooth particle hydrodynamics*). O SPH é um método numérico sem malha baseado em formulações lagrangianas (Liu e Liu, 2010) e foi originalmente desenvolvido para estudar fenômenos astrofísicos (Lucy, 1977; Gingold e Monaghan, 1997). Este método divide o volume total em partículas distribuídas em colunas de referência que podem incrementar seu volume devido ao arraste.

No SPH todos os cálculos são feitos no centro das partículas e a distribuição é dada pela função de Gauss. Portanto, o volume de controle pode ser visualizado com o formato de sino. A implementação do SPH no DAN3D é esquematizada na Figura 3.2.

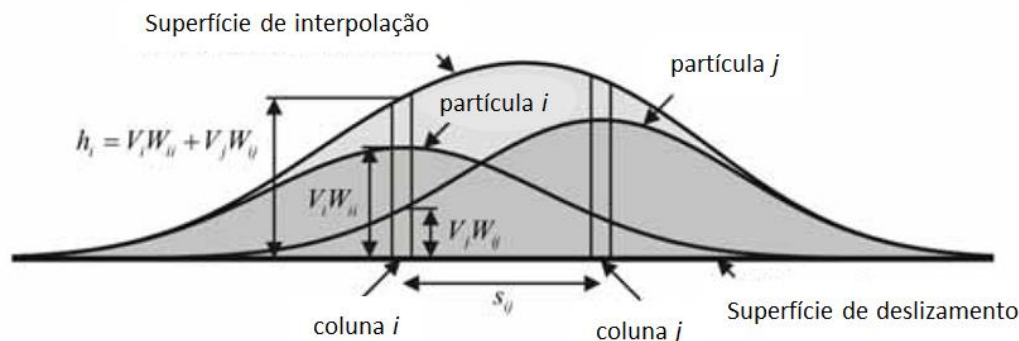


Figura 3.2 – Interpretação do SPH em um marco de profundidade média (Mod. McDougall, 2006).

Considerando o equilíbrio dinâmico de uma coluna de referência, as equações de balanço de momento são baseadas nas equações de profundidade média de Saint-Venant e de águas rasas para a coluna de referência. Assim, nas direções x e y , respectivamente, tem-se:

$$\rho h \frac{Dv_x}{Dt} = \rho h g_x - k_x \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_{zx} - \rho v_x E \quad (3.1)$$

$$\rho h \frac{Dv_y}{Dt} = \rho h g_y - k_y \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.2)$$

Onde, os termos à esquerda da equação são acelerações locais da coluna de referência. Os termos à direita das equações são: i) primeiro termo: componente da força da gravidade; ii) segundo e terceiro termo: relacionados com as pressões; iii) quarto termo: só aparece na direção de x (direção do fluxo) e corresponde à resistência ao cisalhamento na base e o arraste gerado pelo movimento.

No caso do programa DAN-W estas colunas de referência representam blocos com um volume fixo. Para o programa DAN3D, as colunas de referência são distribuídas ao longo da massa que se movimenta.

Ambos os modelos permitem considerar o material erodido pela passagem do fluxo no canal na modelagem. O programa DAN-W simula o material de arraste através do dado de entrada referente à profundidade de erosão. Desta forma, o programa determina a taxa de erosão levando em conta a profundidade de fluxo e a velocidade para cada ponto do movimento. O programa DAN3D simula o material de arraste por meio da taxa de erosão estabelecida como dado de entrada, que pode ser obtida por tentativa e erro, conforme já apresentado no item 2.2.5.

Os dois modelos não consideram a micromecânica interna, pois se concentram em aspectos externos do comportamento. O software só consegue modelar fluxo paralelo à base, simplificando os movimentos internos.

3.3.2. Reologia dos materiais

Os programas DAN-W e DAN3D supõem uma reologia de atrito no material que se movimenta, governada pelo ângulo de atrito. Para o material da base, o DAN-W inclui as reologias: atrito, plástico, newtoniano, turbulento, atrito de Coulomb, Bingham e Voellmy. No caso do programa DAN3D pode-se utilizar: atrito, plástico, Newtoniano, Bingham e Voellmy. Nesta pesquisa foram adotadas as reologias de atrito e Voellmy para o desenvolvimento das modelagens de eventos de fluxos de detritos.

Reologia de Atrito

A resistência é proporcional à tensão efetiva normal à base da camada, que é a diferença entre a tensão total (σ) e a poro pressão na base, expressa por:

$$\tau_{zx} = -\sigma' \cdot \tan \varphi \quad (3.3)$$

Onde φ é o ângulo de atrito dinâmico da base.

A determinação de poropressões em um movimento de massa é extremamente complexa e, portanto, em estabilidade de taludes é comum assumir que a poropressão se relaciona com a tensão total pela razão $r_u = \frac{u}{\sigma_z}$, a qual poder ser substituída na Equação 3.3:

$$\tau_{zx} = -\sigma \cdot (1 - r_u) \cdot \tan \varphi \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 pode ser simplificada para incluir somente variáveis dependentes, introduzindo o termo de ângulo de atrito da base (φ_b):

$$\tau_{xz} = -\sigma_z \cdot \tan \varphi_b \quad (3.5)$$

O uso do ângulo de atrito da base (φ_b) constante representa a adoção de uma hipótese de carregamento intermediário entre drenado e não drenado. Porém, esta aproximação precisa ser validada no processo de calibração do modelo. McDougall (2006) reporta que os modelos governados por atrito acarretam valores maiores de velocidade e, geralmente, uma diminuição da frente de depósitos (*tapering*).

Na Figura 3.3 apresentam-se as relações entre os parâmetros de atrito descritos nas Equações 3.3, 3.4 e 3.5.

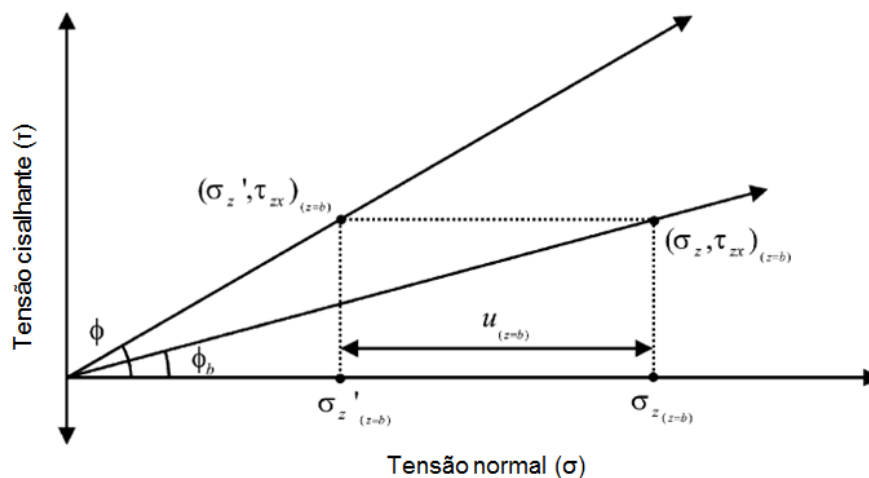


Figura 3.3 – Relação entre os parâmetros utilizados no modelo de atrito (McDougall, 2006).

Para utilizar o modelo de atrito é necessário conhecer os seguintes parâmetros: peso específico (kN/m^3), ângulo de atrito (graus), coeficiente de poropressão (r_u), ângulo de atrito interno (graus) e profundidade máxima de erosão (m).

Reologia de Voellmy

O modelo de resistência de Voellmy combina os modelos de atrito e turbulência e a resistência é calculada por:

$$\tau_{zx} = - \left(\sigma_z \cdot f + \frac{\rho \cdot g \cdot v_x^2}{\xi} \right) \quad (3.6)$$

Onde f é o coeficiente de atrito e ξ é o parâmetro de turbulência. O primeiro termo da equação considera as componentes do atrito e o segundo termo, introduzido por Voellmy em 1955, é utilizado nos programas para considerar qualquer possível resistência dependente da velocidade. As condições de curvatura do trajeto do fluxo e de transferência do momento causada pela erosão do canal são consideradas explicitamente nos programas (Hungr e McDougall, 2009).

Esta reologia tem sido muito utilizada para modelar vários movimentos de massa como avalanches de neve, avalanches de rochas, fluxos de detritos e

avalanches de detritos (Körner, 1976; Perla *et al.*, 1980; Rickenmann e Koch, 1997; Hungr *et al.*, 2002; Revellino *et al.*, 2004).

Em comparação com o modelo de Atrito, o modelo de Voellmy fornece melhores resultados de velocidade e distribuição da área de deposição (McKinnon *et al.*, 2008). Para utilizar este modelo é necessário conhecer e/ou aproximar os parâmetros de peso específico (kN/m^3), tensão cisalhante (kPa), viscosidade (kPa-s), ângulo de atrito interno (graus) e profundidade máxima de erosão (m).

A reologia do material afeta diretamente os parâmetros de velocidade e distribuição da área de deposição. Por exemplo, um modelo de atrito produz velocidades relativamente altas e áreas de deposição que vão se estreitando na frente. Em contraste, um modelo de atrito-turbulento como o de Voellmy, prevê velocidades menores e áreas de deposição que vão se acumulando na frente (Hungr e McDougall, 2009).

3.3.3. Características do DAN-W

O programa DAN-W utiliza um modelo lagrangiano unidimensional para a solução das equações de fluxo ao longo de um canal bidimensional definido pelo usuário. Os dados de entrada (*inputs*) requeridos são:

- Parâmetros de controle: número de materiais, número de elementos e fator de forma de acordo com a seção transversal do canal;
- Topografia: perfil de elevação-distância que inclua duas linhas: i) o trajeto do movimento de massa; e ii) a superfície do material definindo o topo da camada instável. O perfil inserido no programa deve ser razoavelmente simplificado e conter entre 15 e 25 pontos para evitar instabilidade do modelo resultando em estimativas erradas dos parâmetros. A largura do canal também pode ser indicada para cada distância ou selecionar um canal unitário;
- Materiais: indicação da localização de cada material e suas propriedades de acordo com a reologia selecionada em cada caso.

Como saída (*output*), o programa DAN-W gera um relatório com dados sobre o número de elementos, intervalo de tempo utilizado, tempo transcorrido desde o início da corrida, tipo de configuração e fator de forma inserido. Também gera arquivos com informações de velocidade máxima, velocidade máxima na frente,

deslocamento na frente, deslocamento traseiro, centro de gravidade, ângulo de viagem, *fahrböschung*, volume final, área inicial e área final. Todos estes resultados podem ser utilizados para gerar gráficos que representam a simulação do movimento.

3.3.4. Características do DAN3D

O DAN3D utiliza um modelo lagrangiano bidimensional para a solução das equações de fluxo ao longo de um modelo de elevação digital (MED) definido pelo usuário. Nesta pesquisa foi utilizada a versão atualizada em 01-29-2009. Os dados de entrada (*inputs*) requeridos são:

- Parâmetros de controle: número de materiais, número de partículas, taxa de erosão, tempo máximo da simulação, número de elementos computacionais, coeficiente de suavização, coeficiente de suavização de velocidade e coeficiente de resistência;
- Topografia: Modelo de elevação digital (MED) do local de estudo e a profundidade e localização da massa que se desloca. Estes arquivos devem ser inseridos com extensão .grd. Nesta dissertação foi utilizado o programa Surfer V9 para a criação destes arquivos;
- Materiais: Inserção de arquivo com extensão .grd com a localização dos materiais escolhidos na análise e as respectivas propriedades reológicas.

O programa DAN3D fornece uma série de arquivos com extensão .grd para análise do problema. Estes gráficos incluem: espessura local do fluxo no nó analisado, erosão, espessura máxima de deposição, velocidades máximas, vazão de pico, entre outros. Também, são obtidos gráficos de velocidade, vazão e profundidade para cada intervalo de tempo definido na simulação, assim como da área de impacto. Adicionalmente são gerados relatórios que indicam o incremento do volume a cada intervalo de tempo, volume final, ângulo de viagem e distância percorrida.

Nesta pesquisa, foram utilizados os parâmetros de $N=4000$ (número de elementos) e $B=4$ (coeficiente de suavização), pois produziram os resultados com menor dispersão, conforme analisado na pesquisa de Silva (2015).