

## Simulação de corrida de detritos na bacia do Rio das Pedras que afetou a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão–SP

### SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	2
1.1 EVENTO DE 1994.....	3
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
1.2.1 Modelo Adotado.....	6
2 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
2.1 SIMULAÇÃO 1 .....	10
2.2 SIMULAÇÃO 2.....	12
2.3 SIMULAÇÃO 3.....	16
3 CONCLUSÕES .....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

### Resumo

Corridas de massa geradas por escorregamentos estão entre os riscos ambientais do meio físico que podem causar sérios danos às instalações humanas, devido à alta mobilidade e energia de impacto. Prever a trajetória e alcance do material mobilizado nas encostas da Serra do Mar por meio de modelos dinâmicos é um recurso muito importante na tomada de decisão. Desse modo, o TITAN2D foi calibrado e aplicado com objetivo de simular as mesmas condições em que ocorreu a corrida de massa no ano de 1994, na bacia do Rio das Pedras, na região de Cubatão (SP), na escala 1:10.000. Três simulações foram escolhidas para representar diferentes cenários, com diferentes volumes de material deflagrado, definidos a partir do mapeamento de cicatrizes extraídas de ortofotos. Os resultados mostraram que o comportamento das corridas de massa simuladas representaram satisfatoriamente o fenômeno, principalmente nas médias encostas da bacia. A validação dos resultados foi feita com a altura do material e magnitude da velocidade em vários instantes da simulação, comparadas com imagens aerofográficas em ambiente SIG e de cálculos empíricos de outros trabalhos. Diferentes configurações de pilhas de materiais e variações do ângulo de atrito basal, em função do mapa de materiais, permitiram simulações mais realistas.

**Palavras-chave:** simulação, corridas de massa, landslides, Serra do Mar.

## 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa do tipo escorregamentos translacionais e corridas de detritos ocorrem continuamente em diferentes escalas de tempo e espaço, como parte da evolução natural das encostas do relevo da Serra do Mar (Guidicini & Nieble, 1984, IPT, 1988; Wolle, 1988; Wolle & Carvalho, 1989; Fernandes & Amaral, 2003), pois sob condições de clima tropical em relevo escarpado, como é o litoral paulista, tais movimentos ocorrem de modo localizado e generalizado, geralmente decorrentes de eventos pluviométricos intensos.

Tais tipos de movimentos estão dentre os riscos ambientais naturais relacionados ao meio físico, geológico e de origem exógena (Cerri, 2001), que podem ter a sua probabilidade de ocorrência aumentada devido às mudanças climáticas globais. No relatório do IPCC (2007), os estudos têm mostrado que eventos extremos de precipitação podem aumentar ainda mais que a média, podendo gerar enchentes e alagamentos mais severos e intensos num clima mais quente.

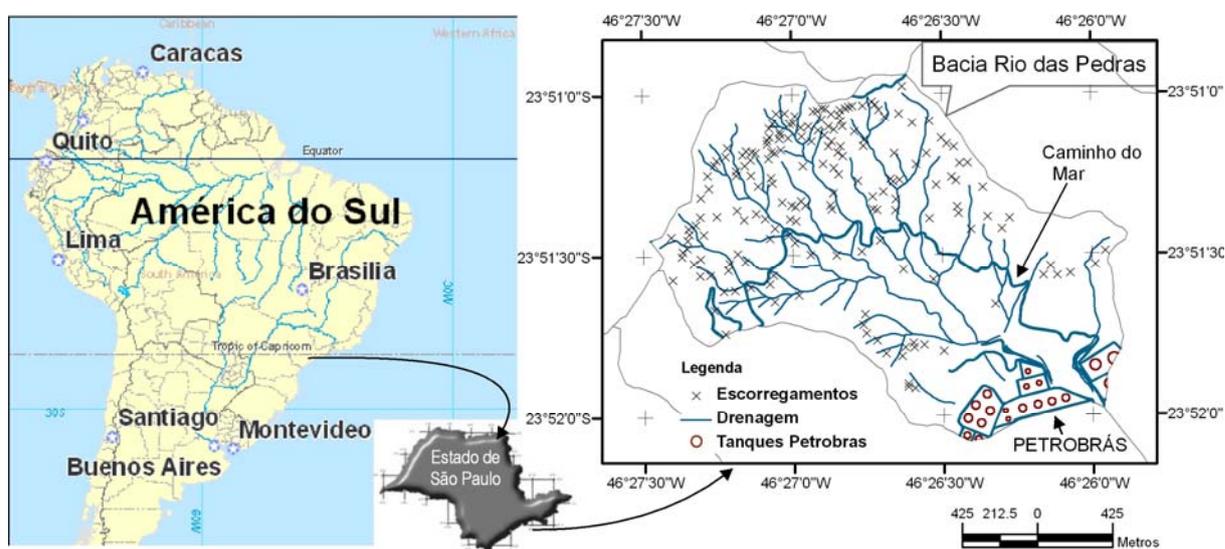
Quando os escorregamentos ocorrem de modo generalizado em pequenas bacias de drenagem com altas distâncias entre interflúvios, vales em “V” encaixados e com vertentes retilíneas, criam-se condicionantes importantes na captação de água, permitindo uma rápida concentração e altos picos de vazão, com potencial de mobilizar um grande volume de material, que é canalizado pelo sistema de drenagem e transforma-se em corridas de massa (lama e detritos), ou “debris flows”.

Uma das principais características das corridas de massa é o potencial de alcançar grandes distâncias com alto poder destrutivo, como o evento ocorrido em 1994 na bacia de drenagem do Rio das Pedras – município de Cubatão, que afetou as instalações da refinaria Presidente Bernardes (PETROBRÁS), causando inclusive a interrupção das atividades por cerca de 2 semanas, com perdas da ordem de 40 milhões de dólares (Gramani, 2001).

A modelagem da maioria dos processos físicos em aplicações como movimentos de massa, requer que os sistemas tenham capacidade de representar tais processos dinamicamente, isto é, realizar simulação numérica de processos dependentes do tempo, como o modelo adotado nesse trabalho que utiliza uma

estrutura matricial (“raster”) para modelar processos de fluxo e distribuição de material, baseado no modelo numérico de terreno (MNT) e ângulos de atrito interno do material e basal com a superfície em que se dá o movimento.

Portanto, o objetivo desse trabalho é testar a aplicação de um sistema de modelagem espacial dinâmica, baseado em estruturas matriciais adaptativas, com a finalidade de simular corridas de massa ocorridas na bacia do Rio das Pedras (FIG. 1.1), na Serra do Mar paulista, município de Cubatão, na escala 1:10.000, gerando assim, diferentes cenários em função da deflagração por eventos pluviométricos.



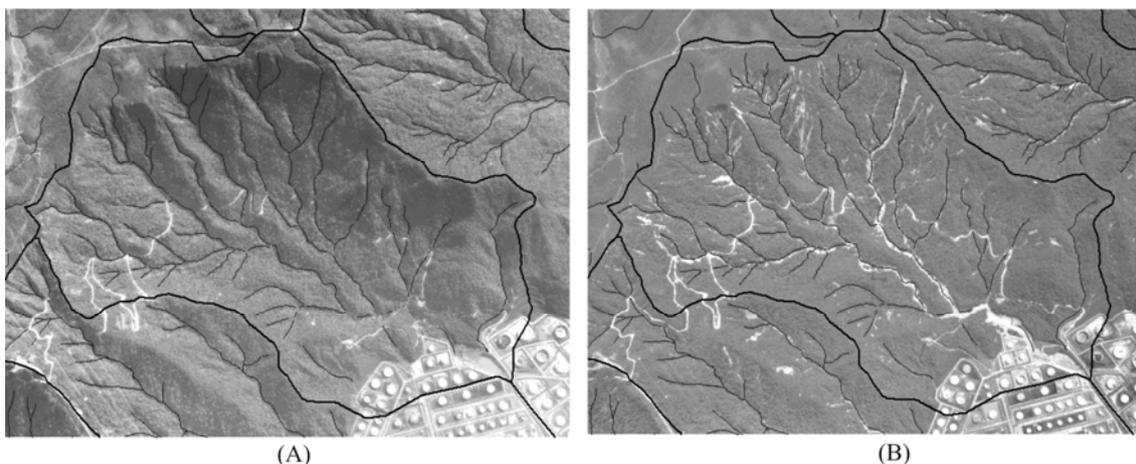
**Figura 1.1** – Mapa de localização da área de estudo.

### 1.1 EVENTO DE 1994

Um número elevado de escorregamentos translacionais rasos, deflagrados em 6 de fevereiro de 1994, ocorreram em sua maioria no terço superior das encostas, identificada como sendo a porção mais susceptível a este tipo de movimento de massa na região da Serra de Cubatão (Wolle, 1988), principalmente pelas maiores declividades e presença de manto de alteração de solo que fornece material sólido para as drenagens. (Kanji et al., 1997; Massad et al., 2000).

Segundo Gramani (2001), o material mobilizado das encostas, composto por solos e blocos de rocha, alcançou com alta energia os canais de drenagem, mobilizando também material do leito e vegetação. Porém, ao chegar nas proximidades da refinaria, o canal principal do Rio das Pedras torna-se mais aberto e com declividades reduzidas, induzindo o espriamento e deposição do material.

Com a deposição inicial do material mais grosseiro, o material mais fino continua em movimento na forma de uma lama (“mud flow”), que foi parar nos tanques da refinaria. Em trechos do afluente principal, com a passagem da corrida de detritos, o canal que era em torno de 1 metro, chegou a 40 metros em alguns locais, como mostra FIG. 1.2 comparando as ortofotos de 1986 e 1994, situação antes e após o evento.



**Figura 1.2** – Comparação entre as ortofotos de 1986 e 1994 (Bacia do Rio das Pedras). (A) Antes do evento e (B) após a corrida de detritos que atingiu a refinaria Presidente Bernardes.

O índice pluviométrico no evento de 16 de fevereiro de 1994 foi de 280 mm em 24 horas (IPT, 1994). O volume total de detritos foi estimado em 300.000 m<sup>3</sup> de lama, areia, pedregulhos, rocha e troncos de árvores. Já a velocidade média do fluxo de detritos, estimada por meio de fórmulas empíricas (Massad et al. , 1997), foi da ordem de 10 m/s.

Na área da bacia do Rio das Pedras foram mapeados 182 polígonos de cicatrizes extraídas da ortofoto de 1994 (Lopes, 2006), com uma densidade de 51,6 escorregamentos por quilômetro quadrado, ocorrendo preferencialmente no terço superior das encostas, com declividades médias de 39°, localizados em sua grande maioria entre as cotas 300 a 700 metros.

## 1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram bases cartográficas (cartas plani-altimétricas), ortofotos de 1994 e inventário de cicatrizes. As etapas de trabalho estão representadas na FIG. 1.3, assim como os elementos (mapas) do banco de dados geográfico construído com o SIG SPRING (Câmara et al.,1996), para dar suporte a todas etapas do trabalho.

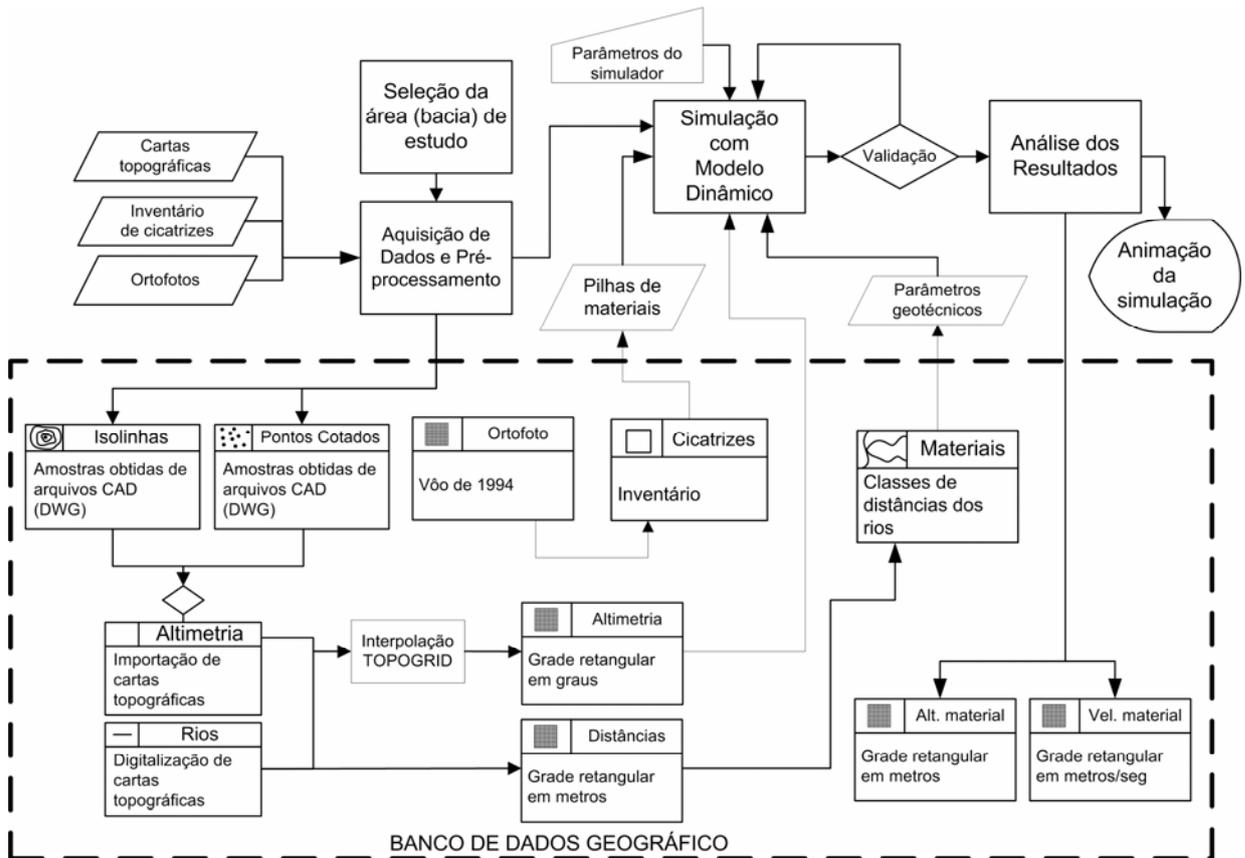


Figura 1.3 – Etapas de trabalho e banco de dados associado.

Os dados de bases plani-altimétricas como estradas, drenagens e amostras de altimetria (isolinhas com equidistância de 5m e pontos cotados), foram obtidas na Agência Metropolitana da Baixada Santista – AGEM no formato DWG do AutoCad. A elaboração de um modelo numérico de terreno (MNT) com tais dados foi realizada com o programa ArcGIS 9.1 (ESRI, 2006) utilizando o interpolador TOPOGRID, pois este apresentou melhor resultado para a representação das encostas e também dos vales, com apoio da drenagem como linha de quebra (Lopes et al., 2006).

O mapa de inventário com polígonos de cicatrizes foi elaborado a partir de fotos aéreas ortorretificadas de um vôo realizado no mesmo ano do evento (Lopes, 2006), sendo que somente uma parte das 182 cicatrizes foi utilizada como pilhas de materiais a serem deflagradas nas simulações. Estas pilhas de materiais foram definidas a partir das medidas dos eixos maiores e menores de cada polígono, além do ângulo do eixo maior, com base no centro de massa de cada polígono. A espessura de cada pilha é definida pelo usuário e o volume é calculado a partir de uma equação parabólica do tipo  $P * (1 - ((x-xc)/xr)^2 - ((y-yc)/Yr)^2)$  – assumindo um ângulo de orientação de zero.

### 1.2.1 Modelo Adotado

O modelo matemático adotado neste trabalho para simulação do alcance e trajetória de corridas de massa, resume-se na definição dos parâmetros necessários para calcular o momento em uma direção  $x$  de uma profundidade média de uma massa em movimento em cada instante  $t$ , dada pela EQ. 1.1:

$$\partial_t(h\bar{v}_x) + \partial_x\left(h\bar{v}_x^2 + \frac{1}{2}k_{ap}g_z h^2\right) + \partial_y(h\bar{v}_x\bar{v}_y) = \underbrace{\frac{e_s v_x}{A} + \frac{g_x h}{B} - hk_{ap} \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial\bar{v}_x}{\partial y}\right) \partial_y(g_z h) \sin\phi_{\text{int}}}_{C} - \underbrace{\operatorname{sgn}(\bar{v}_x) \left[ g_z h \left( 1 + \frac{\bar{v}_x}{r_x g_z} \right) \right]}_D \tan\phi_{\text{bed}} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

onde

- $r_x$  = raio de curvatura na direção  $x$  na superfície basal;
- $A$  = momento devido à erosão;
- $B$  = força gravitacional dirigida;
- $C$  = força intergranular de Coulomb devido à velocidade normal gradiente para a direção do fluxo;
- $D$  = força de resistência devido ao atrito de Coulomb na base do movimento;

O sistema de equações acima, estritamente hiperbólico e não linear, foi implementado no programa TITAN2D (Iverson & Denlinger, 2001, Patra et al., 2005), um ambiente computacional paralelo que trabalha sobre uma grade adaptativa, e que utiliza o esquema de “Godunov” para resolver as equações diferenciais parciais (EDP).

O esquema de grade adaptativa utilizada no TITAN2D permite uma concentração no poder computacional em locais de especial interesse. Uma grade mais refinada permite capturar, por exemplo, a borda do caminho percorrido por um fluxo (corrida de massa), assim como locais onde a topografia muda mais bruscamente. Já numa grade menos refinada podem ser aplicados cálculos onde os valores mudam pouco, sendo relativamente constantes.

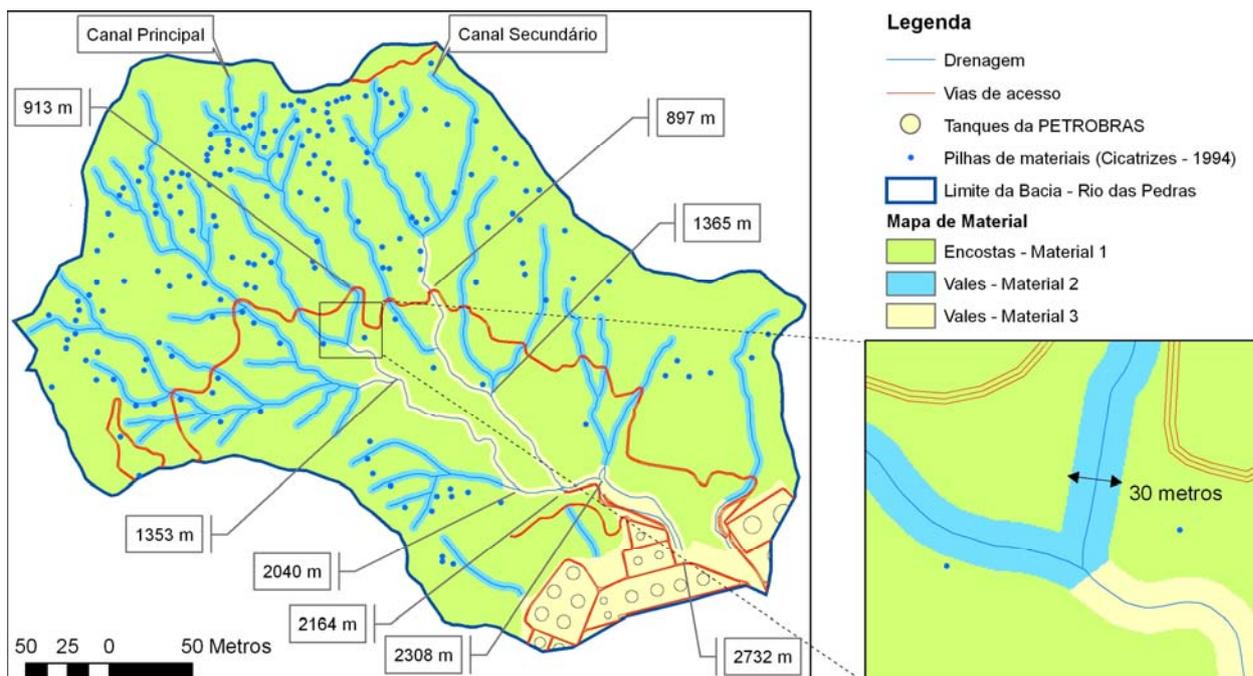
O TITAN2D realiza as simulações dentro da área definida pelo MNT, que contém dados na forma X,Y,Z, isto é, longitude, latitude e elevação em metros. O arquivo de MNT foi convertido para o formato definido pelo SIG GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), o qual faz interface com o TITAN2D. A precisão das simulações é altamente dependente da qualidade e resolução do MNT,

assim como, dos parâmetros **ângulo de atrito interno** do material ( $\phi_{int}$ ) e **basal** com a superfície em que se dá movimento ( $\phi_{bed}$ ), os quais refletem no comportamento da corrida de massa, produzindo diferentes trajetórias, alcances, altura do material e velocidades.

O programa TITAN2D apenas realiza as simulações com os parâmetros acima. Para visualização dos resultados foi utilizado o programa “Titan GMFG Viewer” que permite ver a simulação no modo “altura da pilha” ou “magnitude da velocidade”. É possível apresentar quadro a quadro em função do tempo de amostragem ou ainda de modo contínuo. Pode-se optar pela sobreposição de elementos vetoriais, como estradas, rios e construções, por meios de arquivos no formato ASCII-SPRING. Os filmes nos formato AVI (*Audio Video Interleave*) ou MPEG (*Moving Pictures Expert Group*) relativos às simulações foram criados através da captura a tela do computador em animação.

Para obter simulações mais realistas foi utilizado um mapa de materiais que corresponde a um mapa com a mesma área do MNT, também no formato matricial (raster) do SIG GRASS, que informa a variação do ângulo de atrito basal em função de diferentes superfícies definidas pelo usuário. Tal mapa foi elaborado a partir de toda rede de drenagem criando um mapa de distâncias (“buffering”) com largura de 30 metros (FIG. 1.4). Diferentes valores do ângulo de atrito basal nas encostas (Material 1) e nos canais de drenagem foram fornecidos, pelo fato das vertentes apresentarem declividades maiores e praticamente mantêm-se o mesmo nível de saturação até atingir os canais. Nos canais há um aporte de água maior favorecendo o transporte da massa, assim, estes foram divididos em canais de primeira ordem (Material 2) que estão nas porções superiores da bacia com maiores declividades e canais de segunda ordem (Material 3) com aporte maior de água nas porções inferiores da bacia e com menores declividades.

A FIG. 1.4 mostra ainda alguns pontos na rede de drenagem que foram utilizados para descrever as simulações a seguir. Foram definidos alguns pontos no canal principal do Rio das Pedras e em seu afluente secundário, em que foram marcadas as distâncias a partir das suas cabeceiras.



**Figure 1.4** – Mapa de materiais definido a partir da rede de drenagem para variação do ângulo de atrito com a superfície em que se dá o movimento e principais distâncias medidas em dois canais (principal e secundário) a partir de suas cabeceiras.

Os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) utilizados nas simulações partem da hipótese que o material rompeu-se e irá desenvolver um movimento, portanto, foram adotados valores de ângulo de atrito interno menores que qualquer valor residual medido por ensaios de resistência de cisalhamentos. Considerou-se também que, fatores como a redução do ângulo de atrito interno, redução da coesão, redução da viscosidade e aumento da pressão neutra, são fatores intrínsecos que favorecem a mobilidade de uma corrida (IPT, 1988). Em testes para calibração de um modelo numérico semelhante, Bertolo & Wieczorek (2005) chegaram a valores entre  $25^\circ$  e  $26^\circ$  de atrito interno até atingir a rede drenagem e a partir desse ponto utilizou valores de  $5,7^\circ$  e  $11,5^\circ$  para ângulo de atrito basal.

Há outros parâmetros do simulador que devem ser fornecidos e que influenciaram diretamente no tempo de processamento, tais como; **número de pontos da grade regular na direção Y** (quanto maior o número de pontos, maior o tempo de processamento), **comprimento da corrida** (definido em metros com valor suficiente para que a corrida atinja o alcance desejado), **número máximo de passos -“times steps”** (define um número máximo de passos no processamento), **tempo máximo** (valor em segundos do tempo de processamento utilizado como um dos critérios de parada) e **tempo de amostragem** (valor em segundos que define

com que frequência os arquivos de saída com altura do material e velocidade são armazenados para posterior visualização.

Para validar os resultados das simulações foram utilizados os dados de saída, isto é, altura do material mobilizado com a área de inundação e a magnitude da velocidade em um tempo qualquer definido, para comparar com cálculos empíricos relatados em outros trabalhos.

A posição final do material mobilizado e a magnitude da velocidade retrata o alcance que a massa atingiu. Assim, tais resultados foram incorporados ao banco de dados geográfico (FIG. 1.3), onde foram cruzados com outros mapas e imagens, o que permitiu comparar com relatos dos casos históricos de corridas de massa, assim como gerar diferentes cenários, em função da quantidade de pontos (pilhas) deflagrados em diversas simulações.

As condições de pré-ruptura do talude e de precipitação não foram abordadas nas simulações. No caso da precipitação, considerada como agente efetivo na deflagração dos escorregamentos, foram consideradas as condições semelhantes ao registrado no dia do evento, isto é, ação combinada de chuva precedente (acumulada por 4 dias) e chuva intensa de curta duração, com índices pluviométricos acima de 250 mm – 300 mm diários.

## **2 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O trabalho inicial foi estabelecer uma coerência entre os parâmetros requeridos pelo programa e os dados disponíveis. Foram necessários vários testes para obter um equilíbrio entre a resolução da grade numérica de altimetria, a resolução da grade computacional, o número de pilhas de materiais a serem deflagrados, do tempo de processamento e dos ângulos de atrito interno e basal, com a configuração do computador utilizado.

Devido algumas limitações encontradas na versão atual do TITAN2D, foram realizadas simulações com quantidades variáveis de pilhas de materiais e conseqüentemente diferentes resoluções do MNT. O Quadro 2.1 mostra os valores de ângulo de atrito basal, o número de pilhas e a resolução do MNT utilizados em três simulações apresentadas nesse trabalho.

Simulação	Número de Pilhas	Resolução do MNT	$\phi_{int}$	$\phi_{bed}$ Material 1	$\phi_{bed}$ Material 2	$\phi_{bed}$ Material 3
1	32	1m	20	19	17	10
2	55	2m	20	19	17	10
3	84	3m	21	19.5	18	8

**Quadro 2.1** – Parâmetros utilizados nas simulações.

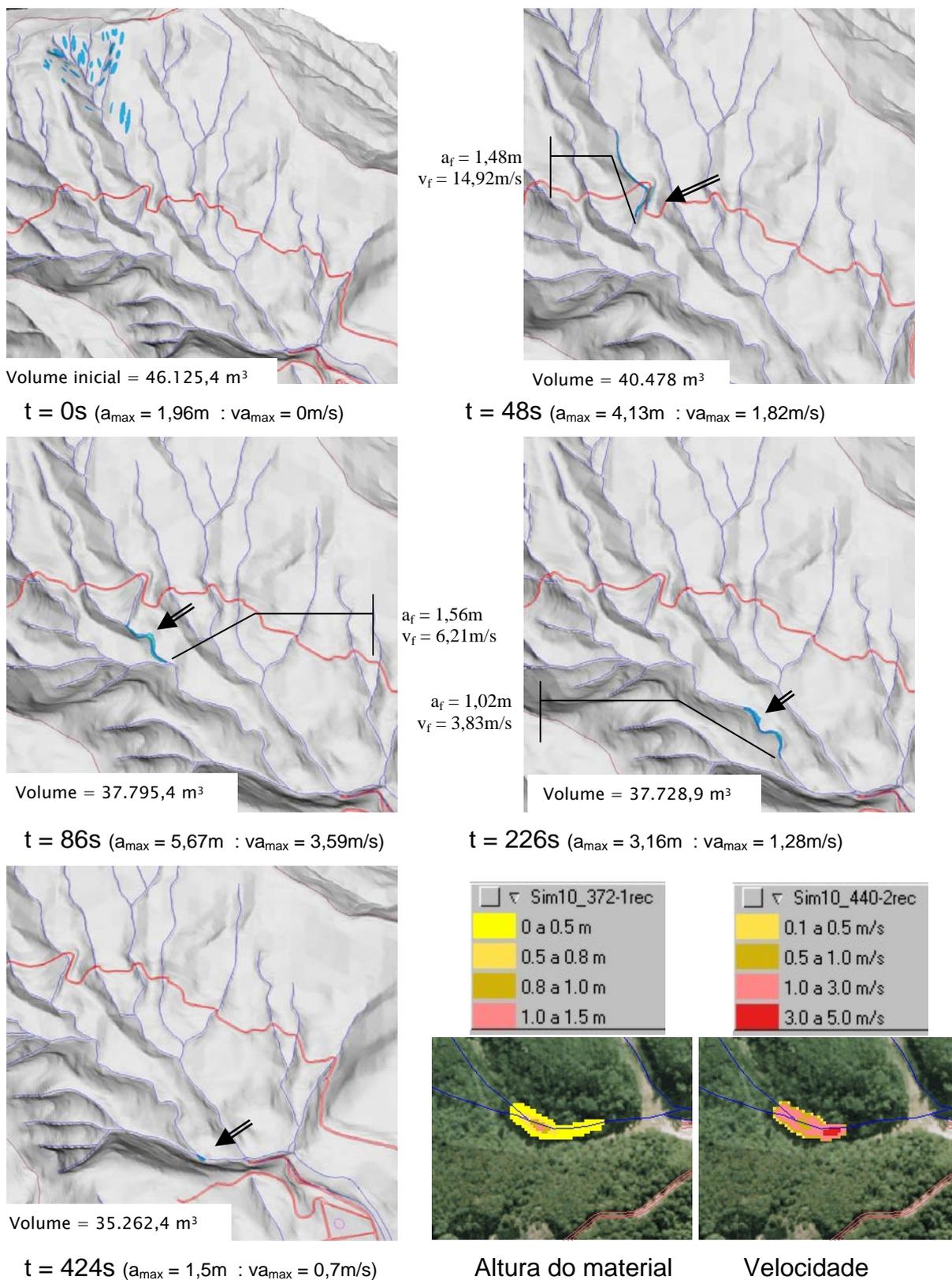
Em cada simulação foram adotados valores diferentes para **tempo máximo** de processamento (entre 240s e 420s), **tempo de amostragem** (entre 2s e 3s) e **número máximo de passos** (entre 40.000 e 55.000), suficientes para que o material atingisse as proximidades da refinaria, com um valor de 2.800m de distância máxima a ser percorrido pela pilha mais distante.

## 2.1 SIMULAÇÃO 1

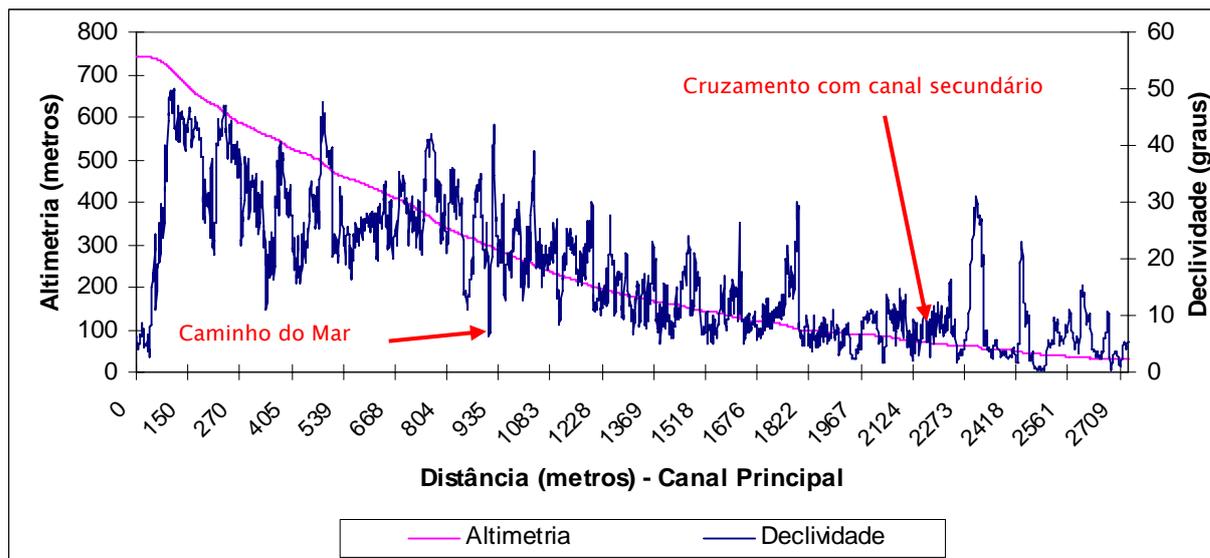
Vários testes para calibração dos valores de atrito basal e interno foram utilizados, dos quais os melhores resultados foram aqueles com os valores de 19° (material 1), 17° (material 2) e 10° (material 3) para atrito basal e de 20° para atrito interno, quando foram deflagradas simultaneamente 32 pilhas de materiais, com um volume inicial de 46.125,4m<sup>3</sup>.

A FIG. 2.1 mostra no tempo t=0s, as 32 pilhas de materiais que foram selecionadas do inventário para serem transportadas pelo canal principal (FIG. 1.4). Como todas as pilhas são deflagradas ao mesmo tempo, após 20 segundos o material de cada pilha somou-se a um único volume de material no canal de drenagem. No tempo t=48s a corrida de massa atinge a pista do “Caminho do Mar”, criando um acúmulo de material sobre a pista (altura de 4,13m) e uma queda na velocidade (1,82m/s), enquanto à frente da corrida segue o canal da drenagem a uma velocidade de 14,92m/s.

Nota-se que entre os tempos t=86s e t=226s o material avança a velocidades decrescentes na frente da corrida, de 6,21m/s a 3,83m/s, respectivamente. Tal fato deve-se à declividade decrescente, principalmente a partir da distância de 1.353m no canal principal, como mostra os perfis da declividade e altimetria ao longo do canal principal na FIG. 2.2. Nota-se ainda que a corrida apresentou-se mais delgada e encaixada a partir desta distância.



**Figura 2.1** – Resultados da simulação 1 – 32 pilhas. (onde  $a_{max}$  = altura máxima da pilha,  $va_{max}$  = velocidade do material na altura máxima,  $a_f$  = altura a partir de 1m na frente da corrida,  $v_f$  = velocidade na frente da corrida e **seta dupla** indica local da altura máxima).



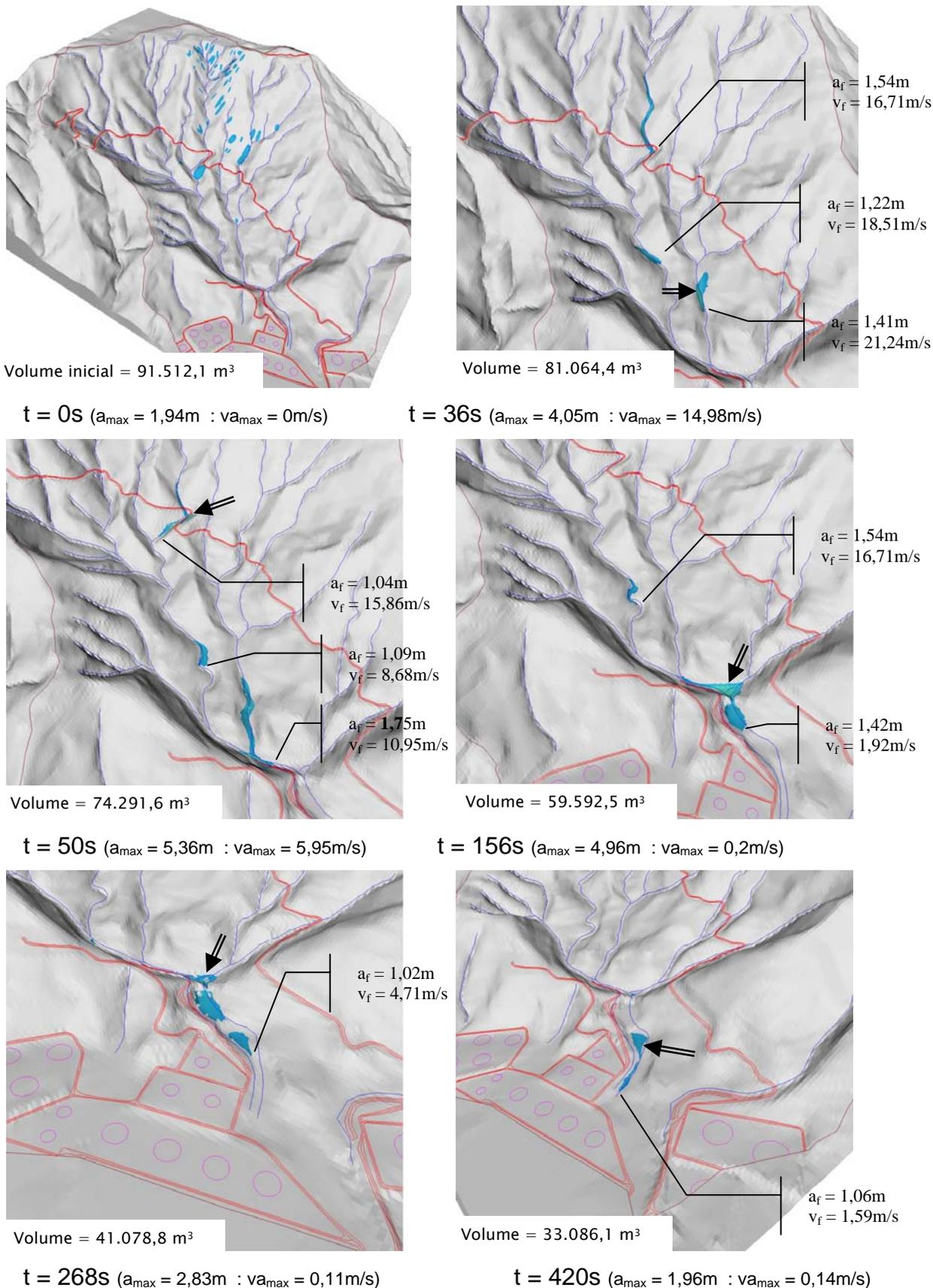
**Figure 2.2** – Perfis da declividade e altimetria ao longo do canal principal do Rio das Pedras.

A uma distância de 2.040m no canal principal, no cruzamento com um afluente na margem direita, a velocidade cai para 0,7m/s no tempo  $t=424s$ . A partir desse tempo não é possível mais ver a altura do material no programa “Titan GMFG Viewer”, por limitar sua visualização a partir de 1 metro. Desse modo, transferiu-se a visualização da altura do material e da velocidade nesse tempo para o SPRING, em que se pode observar que praticamente não havia mais movimento, principalmente na frente da corrida, com valores de 0,002m/s. Observa-se ainda que o volume ao longo da corrida caiu de  $46.125,4m^3$  para  $33.262,4m^3$ , isto é, uma perda de 26% do material, que ficou retido ao longo da trajetória.

## 2.2 SIMULAÇÃO 2

Nesta simulação foram adicionadas pilhas de materiais no canal principal e algumas no canal secundário, num total de 55 pilhas, com um volume inicial de  $91.512,1m^3$ . Após alguns testes para calibração, chegou-se aos valores de  $19^\circ$  (material 1),  $17^\circ$  (material 2) e  $10^\circ$  (material 3) para atrito basal e de  $20^\circ$  para atrito interno.

A FIG. 2.3 mostra que no tempo  $t=36s$  as 55 pilhas de materiais deflagradas simultaneamente transformam-se em três corridas de massas, com velocidades distintas. A velocidade mais alta (21,24m/s) da corrida do canal secundário deve-se ao fato das declividades serem altas nos trechos iniciais das pilhas selecionadas, isto é, até uma distância de aproximadamente 950m nesse canal (FIG. 1.4).

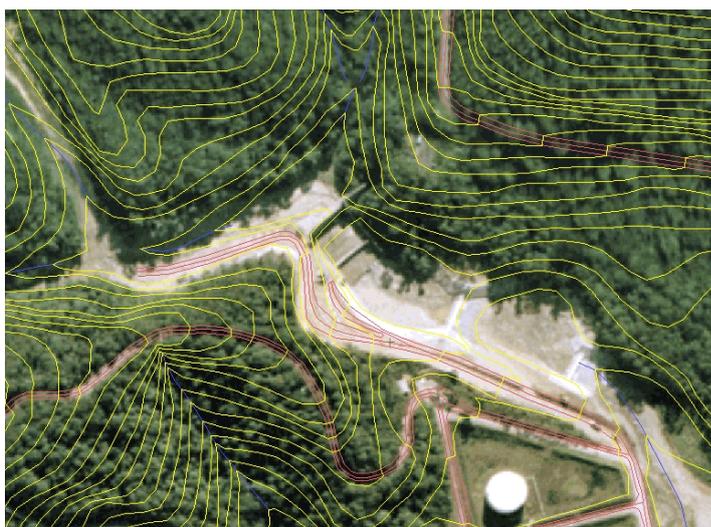


**Figura 2.3** – Resultados da simulação 2 – 55 pilhas. (onde  $a_{max}$  = altura máxima da pilha,  $va_{max}$  = velocidade do material na altura máxima,  $a_f$  = altura a partir de 1m na frente da corrida,  $v_f$  = velocidade na frente da corrida e **seta dupla** indica local da altura máxima).

No tempo  $t=50s$ , as três corridas adquirem velocidades menores (FIG. 2.3) e um ponto de acúmulo de material é criado no cruzamento com a pista do “Caminho do Mar”, resultando numa altura de material de 4,13m nesse ponto, semelhante ao ocorrido na simulação 1.

No tempo  $t=156s$ , duas corridas se juntam em um volume de material que se acumula logo após o cruzamento do canal principal com o secundário (distância de 2164m), pois as declividades nesse trecho estão em torno de  $10^\circ$ , já nas proximidades da refinaria. Nota-se nesse tempo que o acúmulo de material deve-se a existência de barragens construídas após o evento para retenção e quebra de energia das corridas, sendo que o MNT utilizado reflete tais mudanças no canal de drenagem.

Após o tempo  $t=268s$  a corrida de massa que estava no canal principal atinge o volume maior que estava nas proximidades da refinaria e provoca um avanço maior de material na frente da corrida. Nota-se nesse tempo e no anterior que há um estrangulamento do material na distância de 2308m, devido a obras de engenharia criadas no canal de drenagem. A FIG. 2.4A e 2.4B mostra o trecho próximo à refinaria com as curvas de nível sobrepostas a ortofoto de 2001 e uma foto do local.



(A)



(B)

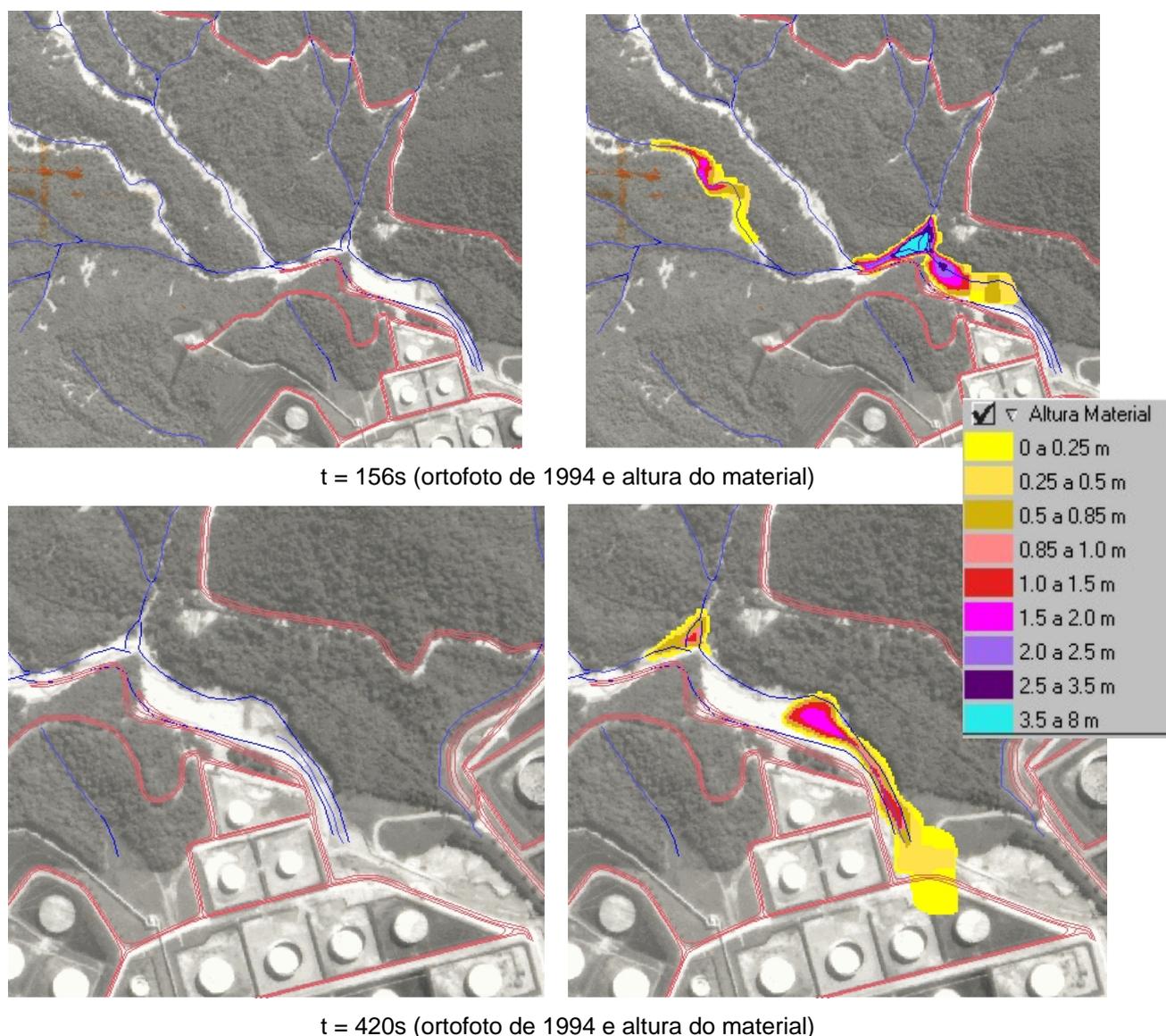
FONTE: Foto IPT (2002)

**Figura 2.4** – Região da refinaria na ortofoto de 2001 e foto de campo após obras de controle.

No tempo  $t=420s$  (FIG. 2.3) a frente da corrida atinge a distância de 2732m e chega bem próximo aos tanques da refinaria, com um volume de  $33.086,1m^3$  e

uma velocidade de 1,59m/s na frente de 1,06m de altura máxima. Como o programa “Titan GMFG Viewer” limita-se a mostrar alturas de material acima de 1 metro, transferiu-se os resultados para o banco de dados no SPRING, permitindo assim mostrar o alcance máximo do material, com alturas em torno de 20cm e velocidades muito pequenas, em torno de 0,01m/s (FIG. 2.5).

Na FIG. 2.5, pode-se comparar as ortofotos de 1994, obtidas logo após o evento, com os resultados da simulação nos tempos  $t=156s$  e  $t=420s$ , os quais mostram que o material mobilizado pela simulação encaixa-se bem ao canal de drenagem, refletindo inclusive o alargamento do canal.



**Figura 2.5** – Validação dos resultados da simulação 2 nas ortofotos de 1994.

### 2.3 SIMULAÇÃO 3

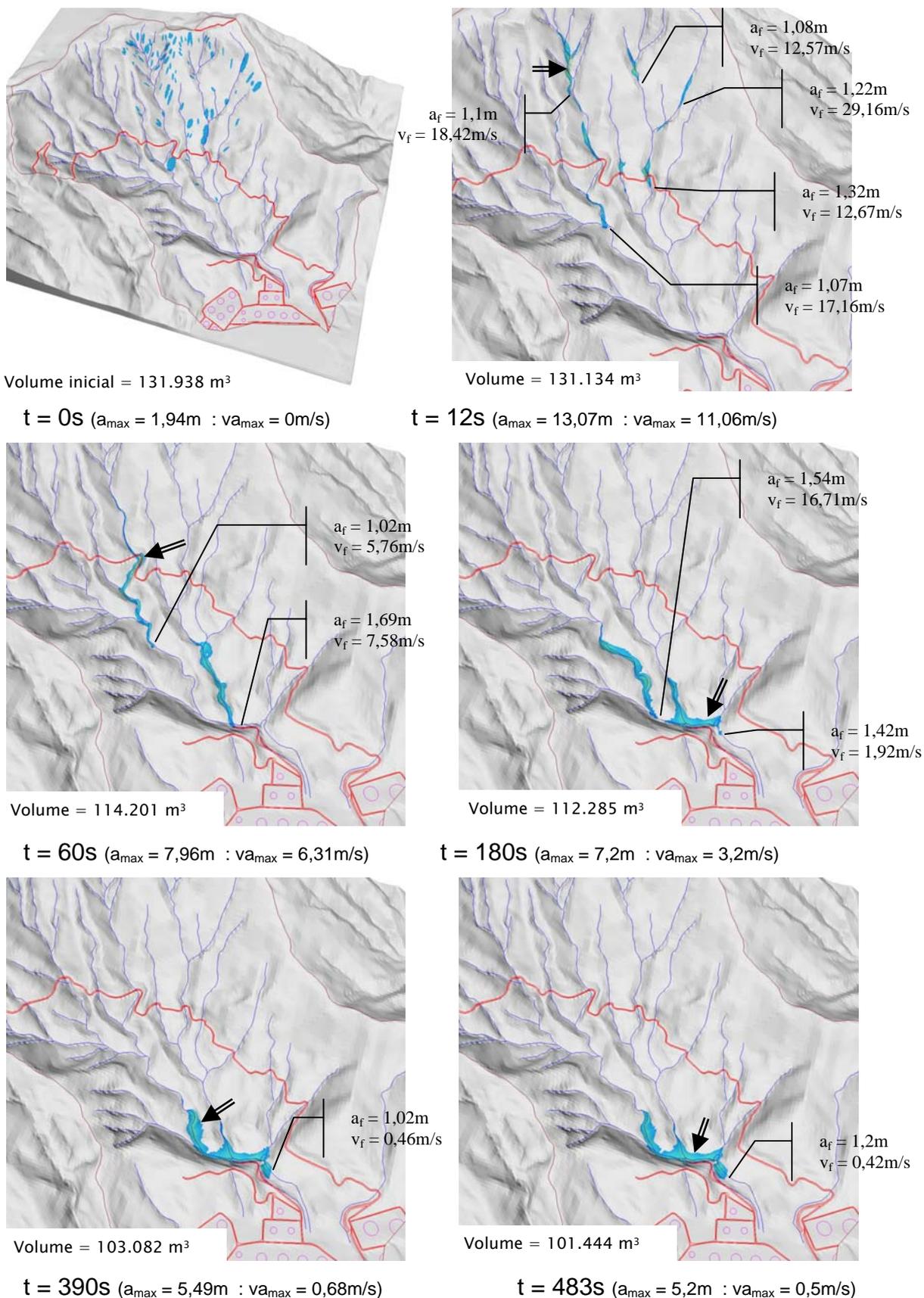
Nesta simulação foram incluídas mais algumas pilhas de materiais no canal principal e no canal secundário, num total de 84 pilhas, com um volume inicial de  $131.938\text{m}^3$ . Após alguns testes para calibração, chegou-se aos valores de  $19,5^\circ$  (material 1),  $18^\circ$  (material 2) e  $8^\circ$  (material 3) para atrito basal e de  $21^\circ$  para atrito interno.

Foram adotados os parâmetros de **tempo máximo** de 484s com **tempo de amostragem** de 3s, ou um **número máximo de passos** de 75.000, suficientes para que o material atingisse as proximidades das instalações da PETROBRAS. A resolução do MNT utilizado foi de 3x3 metros.

A FIG. 2.6 mostra que no tempo  $t=12\text{s}$  as 84 pilhas de materiais deflagradas simultaneamente transformam-se em oito pequenas corridas de massas, com velocidades distintas. Conforme já constatado, no canal secundário, no intervalo de 680m a 780m de distância, as corridas ganham velocidade pelo fato das declividades serem altas nesse intervalo, acima de  $40^\circ$ . Passados aproximadamente 100m do cruzamento com o “Caminho do Mar”, as declividades caem para valores entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , mostrando um comportamento mais realista nos canais de drenagem.

No tempo  $t=60\text{s}$ , duas corridas desenvolvem velocidades menores, uma no canal principal com velocidade de  $5,76\text{m/s}$  e outra no canal secundário com velocidade de  $7,58\text{m/s}$ , medidos na frente dessas, com um volume de  $114.201\text{m}^3$ . Nota-se que a corrida no canal secundário atingiu a distância de 1784m numa velocidade inferior quando comparada com a mesma corrida na simulação 2 com a velocidade de  $10,95\text{m/s}$  e a um tempo de  $t=50\text{s}$ .

No tempo  $t=180\text{s}$ , duas corridas se juntam em um volume de material que se acumula logo após o cruzamento do canal principal com o secundário (distância de 2164m), pois as declividades nesse trecho estão em torno de  $10^\circ$ , já nas proximidades da refinaria, com um volume de  $112.285\text{m}^3$ .



**Figura 2.6** – Resultados da simulação 3 – 84 pilhas. (onde  $a_{max}$  = altura máxima da pilha,  $va_{max}$  = velocidade do material na altura máxima,  $a_f$  = altura a partir de 1m na frente da corrida,  $v_f$  = velocidade na frente da corrida e **seta dupla** indica local da altura máxima).

Nos tempos seguintes  $t=390s$  e  $t=483s$ , praticamente não há diferenças visuais na FIG. 2.6. Apenas algumas alterações como a posição da altura máxima de material que estava na parte inferior e que se deslocou para frente e um pequeno acréscimo de material na frente da corrida após transpor a barragem na distância 2308m. O espalhamento do material com alturas menores que 1m só foi possível analisar após transferir os resultados para o banco de dados no SPRING, em que foram comparados alguns tempos sobrepostos as ortofotos de 1994 (FIG. 2.7).

Na FIG. 2.7, no tempo  $t=60s$  observa-se que o volume em movimento está bem ajustado aos canais principal e secundário. Nota-se na corrida que está no canal principal, que ao cruzar com a estrada “Caminho do Mar”, cria-se um acúmulo de material sobre a pista que se estende com alturas abaixo de 0,5m até uma curva mais abaixo (seta dupla na figura).

No tempo  $t=483s$  o material apresenta três pontos de acúmulo, com alturas acima de 3,5m e com velocidades na sua maioria abaixo de 0,1m/s. Estes três pontos são criados por um estrangulamento criado pela isolinha de 90m (detalhe na FIG. 2.7) e por uma barragem na distância de 2308m.

Mais pilhas de material foram adicionadas às simulações anteriores. Foram feitos vários testes com as 100 maiores pilhas, das 182 pilhas disponíveis no inventário de 1994. O elevado tempo de processamento exigiu que grades numéricas com resoluções menores fossem testadas, entretanto, o problema encontrado parece não ter relação com a resolução do MNT, nem do número de cicatrizes, mas com a distribuição das pilhas pela área da bacia.

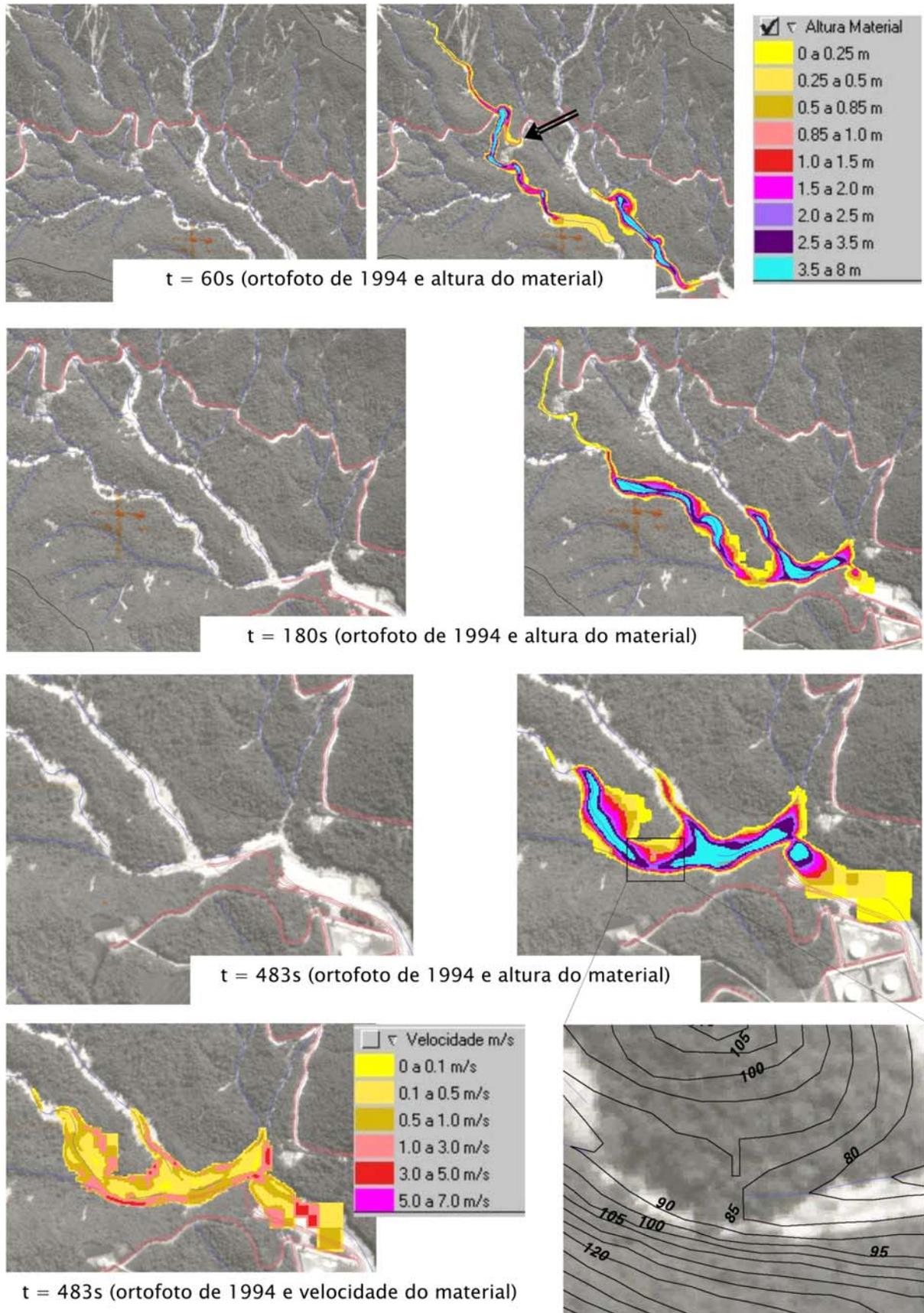


Figura 2.7 – Validação dos resultados da simulação 3 nas ortofotos de 1994.

### 3 CONCLUSÕES

Mesmo com o número reduzido de pilhas de material utilizadas nas simulações, concluiu-se que o comportamento das corridas de massa simulado representou satisfatoriamente o fenômeno, principalmente nas médias encostas quando todo material está no canal de drenagem, quando as velocidades variam de 8 a 16m/s.

Nas porções mais altas da serra, quando o material ainda está nas encostas, as pilhas atingem uma velocidade um pouco elevada, em torno de 18 a 29m/s, até atingirem os canais de drenagem, quando passam a ter um outro comportamento em função das menores declividades em relação às encostas e da mudança no valor do ângulo de atrito basal.

Nas baixas encostas da serra, o material das corridas pode ter seu movimento praticamente paralisado, sem alcançar as distâncias esperadas, caso a declividade do canal diminua bruscamente como nas proximidades da refinaria. Como o valor de ângulo de atrito interno é mantido constante durante a simulação, o material pode não alcançar uma distância esperada, mesmo reduzindo-se o ângulo de atrito basal com ajuda do mapa de materiais.

Em qualquer das porções das encostas ou dos canais de drenagem, nota-se que seria muito útil a possibilidade de se fornecer diferentes ângulos de atrito interno, permitindo um controle mais efetivo das corridas de massa.

Conclui-se que a utilização dos mapas de materiais foi importante para controlar a mudança de ângulo de atrito basal, podendo assim dar um caráter mais realista às simulações, semelhante ao que vem sendo utilizado por outros modelos, que fazem uso de parâmetros reológicos como viscosidade e coeficiente de turbulência.

As simulações realizadas com o TITAN2D, que tem caráter estritamente friccional, mostraram-se adequadas com os resultados obtidos, porém, se algumas limitações como o tamanho da grade de cálculo, relacionada à distribuição das pilhas, o ângulo de atrito interno do material invariável e a dimensão das pilhas no instante inicial, configurado por uma única equação, forem sanadas, os resultados poderiam ter sido melhores. A utilização de outros modelos combinados também é

uma recomendação para tratar fenômenos tão complexos como as corridas de massa.

A geração de cenários sob tais condições como obtido na bacia do Rio das Pedras, onde diferentes volumes foram deflagrados, mostraram que novas corridas de massa podem afetar instalações industriais, como registrado na refinaria Presidente Bernardes em 1994. O fato de se ter utilizado um MNT que inclui as obras de contenção nas proximidades da refinaria, mostrou que quando dezenas de pilhas de materiais são deflagradas simultaneamente, o volume de material mobilizado transpõe essas obras, criando um cenário mais pessimista e produzindo uma força de impacto maior do que se as pilhas fossem deflagradas em diferentes tempos.

Mesmo com as características do modelo utilizado pelo TITAN2D e das limitações encontradas, as simulações mostraram o potencial desse modelo para ser aplicado em áreas semelhantes, que poderiam incluir instalações urbanas e/ou industriais que seriam afetadas por futuras corridas de massa. Desse modo, o modelo adotado poderia ser utilizado para dar apoio e subsídios à tomada de decisão por parte da PETROBRÁS e de outros órgãos como defesa civil, secretaria de transportes e prefeituras, criando políticas públicas com o objetivo de minimizar os efeitos das corridas.

### Referências Bibliográficas

BERTOLO, P.; WIECZOREK, G.F. Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, vol. 5, p. 993-1001, 2005.

CÂMARA, G; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, n.20: (3), p.395-403, May-Jun 1996.

CERRI, L.E.S. **Subsídios para a seleção de alternativas de medidas de prevenção de acidentes geológicos**. Rio Claro, 2001. 78p. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop Help**. Redlands, California, USA, 2005.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 4.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. Cap. 3, p. 123-194.

GRAMANI, M.F. **Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. 2001. 372f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos) – EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2.ed. São Paulo. Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Levantamentos básicos na folhas de Santos e Riacho Grande, Estado de São Paulo**. São Paulo, 1986. Relatório n 23394, 5 vol.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Estudo geotécnico dos principais mecanismos de instabilização na Serra do Mar**. São Paulo, 1988. Relatório n 25957.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Working Group I, AR4, Chapter 11. Regional Climate Projections. Paris, 2007. [http://www.cptec.inpe.br/mudancas\\_climaticas/](http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/)

IVERSON, R.M.; DENLINGER, R.P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain – 1. Coulomb mixture theory. **Journal of Geophysical Research**, n.B1: (106), p.537-552, Jan-10, 2001.

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F.; ARAUJO FILHO, H.A. Basic and common characteristics on debris flows. In: PANAMERICANO SYMPOSIUM LANDSLIDES, 2 - COBRAE, 2, 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: p.223-231.

LOPES, E.S.S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista, na escala de 1:10.000**. Rio Claro, 2006. 276p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; VIDOTTI, M.; MERINO, E.R. Análise de modelo numéricos de terreno para modelos geomorfológicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia. **Anais**. V.2, p.1-9.

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A.; ARAUJO FILHO, H.A. Comparison between estimated and mesured debris flow discharges and volume of sediments. In: PANAMERICANO SYMPOSIUM LANDSLIDES, 2 - COBRAE, 2, 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: p.213-222.

MASSAD, F. et al. Characteristics and volume of sediment transported in debris flows in Serra do Mar, Cubatão, Brazil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE DEBRIS FLOW DISASTER OF DECEMBER 1999 IN VENEZUELA, 2000, Caracas. **Anais**. Caracas: 12p.

PATRA, A.K. et al. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, n.139, p.1-21, Jan 2005.

WOLLE, C.M. **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. São Paulo, 1988. 394p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, p. 27-36, 1989.