

4. Metodologia das análises e casos de estudo

4.1. Metodologia das análises

Os fluxos de detritos são fenômenos de difícil previsão e modelagem. Os estudos sobre este fenômeno encontram-se em aumento e, atualmente, têm sido desenvolvidos modelos de fluxo de detritos baseados em retroanálise. Retroanálise é o processo mediante o qual a reologia e os parâmetros para um determinado fenômeno são variados até que o fenômeno modelado represente uma boa aproximação do evento atual.

A retroanálise dos casos selecionados para estudo desta pesquisa foi realizada por meio de modelagem numérica através de programas que se baseiam na calibração dos parâmetros que governam a reologia da base e do material escorregado. Desta forma, a calibração destes parâmetros representa um dos maiores obstáculos no uso do modelo adotado para o estudo de eventos.

Os modelos são hipóteses da relação entre parâmetros e uma série de variáveis. Para a modelagem de movimentos de massa, as principais variáveis são: a distância percorrida, a espessura de deposição, as velocidades e os parâmetros reológicos que dependem diretamente da propriedade do material da base e das propriedades de atrito do material em movimento.

Geralmente, as variáveis tais como a distância são reportadas, mas as espessuras de deposição e velocidades geralmente não são medidas no evento, tendo que ser aproximadas após o evento. Desta forma, os parâmetros necessários para realizar as modelagens oferecem maiores dificuldades para serem determinados, pois não podem ser medidos diretamente de ensaios de campo ou de laboratório. Estes devem ser encontrados diretamente por meio de retroanálise.

Assim, a metodologia seguida nesta pesquisa inclui a descrição dos casos de estudo, a calibração preliminar de parâmetros, a construção do modelo numérico e, por último, a seleção final dos valores de parâmetros.

4.1.1. Descrição do caso de estudo

Para a realização de uma retroanálise é necessário compilar as informações referentes a cada caso de estudo. Estas informações incluem a topografia antes e após o evento e as observações dos materiais envolvidos, tanto do material que se desloca, quanto do material na base do canal. No caso do material da base, também é importante conhecer o potencial para erodir, pois o volume final do evento vai se relacionar diretamente com o material erodido ao longo do canal.

A topografia pode ser obtida através de curvas de nível, modelos de elevação digital, informações do *Google Earth* ou topografia detalhada realizada no local de estudo. As informações dos materiais envolvidos no evento são obtidas de observações pós-evento realizadas por profissionais da área ou por mapeamentos das zonas afetadas.

4.1.2. Calibração preliminar dos parâmetros

Segundo Aaron *et al.* (*in press*), a calibração dos parâmetros na retroanálise era geralmente realizada por meio da técnica de tentativa e erro. Porém esta técnica possui as desvantagens de: i) alta demanda de tempo; ii) resultados obtidos subjetivamente interpretados por cada pesquisador; iii) sem garantia de sucesso para a combinação de grande quantidade de parâmetros, podendo existir outros parâmetros mais representativos para o caso analisado; iv) geralmente os parâmetros de melhor ajuste não são únicos. A retroanálise baseada em tentativa e erro é subjetiva (McDougall (2006); Galas *et al.* (2007); Cepeda *et al.* (2010)).

As análises de sensibilidade em este trabalho foram executadas utilizando o módulo SENSAN do pacote de estimação de parâmetros PEST (Doherty, 2010), usando uma versão do DAN3D modificada para calcular os parâmetros de calibração (Aaron *et al.*, *in press*)

A calibração dos parâmetros pode ser feita em função de parâmetros adotados como limites, tais como: i) área de impacto; ii) distribuição de velocidades; e iii) distribuição das profundidades de deposição (Aaron *et al.*, *in press*).

Em consequência, é necessário introduzir a área de impacto no programa através de um arquivo com extensão .grd, indicando a área afetada, medida ou

observada após o evento. Este arquivo chama-se de *trimline* e um exemplo é apresentado na Figura 4.1. Neste trabalho as *trimlines* foram definidas por meio de observação de fotografias aéreas após o evento e mapeamentos das áreas atingidas pelos movimentos de massa, realizados por profissionais.

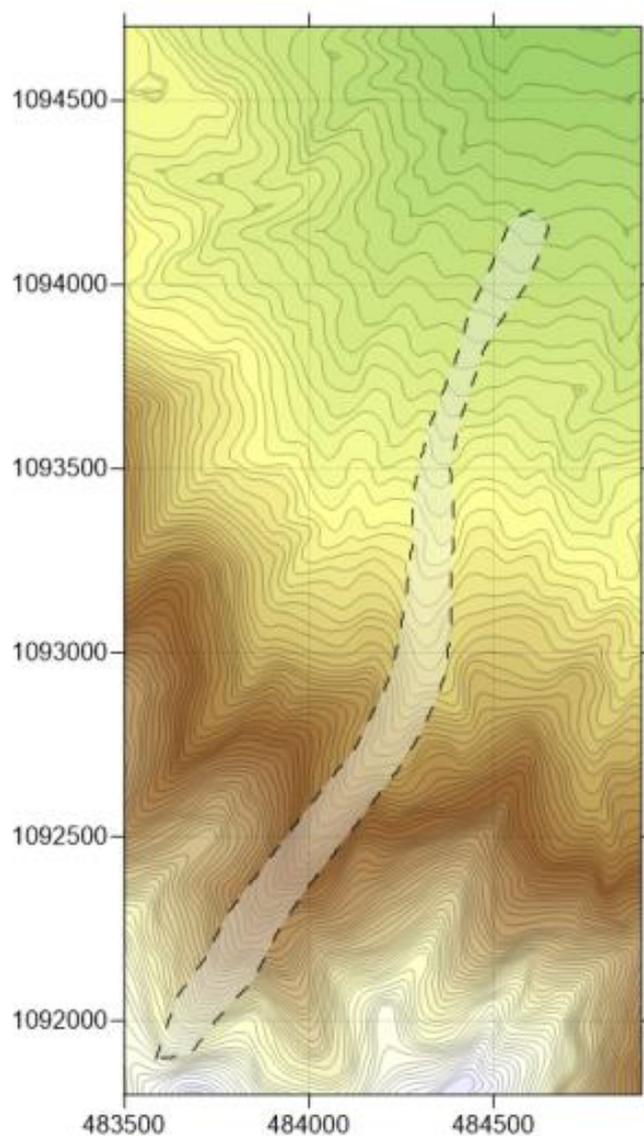


Figura 4.1 – Exemplo de *trimline* definida para um evento.

Uma vez delimitadas as áreas impactadas, utilizou-se o módulo SENSAN para encontrar a faixa dos parâmetros de ajuste que apresentam a melhor aproximação para os dados fornecidos. O módulo SENSAN compara os valores em cada nó do arquivo da zona de impacto (*trimline*) inserida com a saída da zona de impacto do programa DAN3D para todas as combinações de parâmetros possíveis. Se o nó não coincide com a trimline gerada e a área de impacto obtida no programa, ele ganha um valor unitário (igual a 1). Portanto um valor igual a 0 indica um ajuste

perfeito. Na Figura 4.2 pode-se observar este ajuste, onde as cores mais escuras indicam os parâmetros de melhor ajuste.

A Figura 4.2 apresenta o exemplo de um resultado obtido na primeira estimativa, o qual estabeleceu que o coeficiente de atrito aproxima-se de 0.3. Os valores obtidos pelo SENSAN são validados com simulações no programa DAN3D para assegurar que o valor obtido corresponde a uma aproximação real do caso.

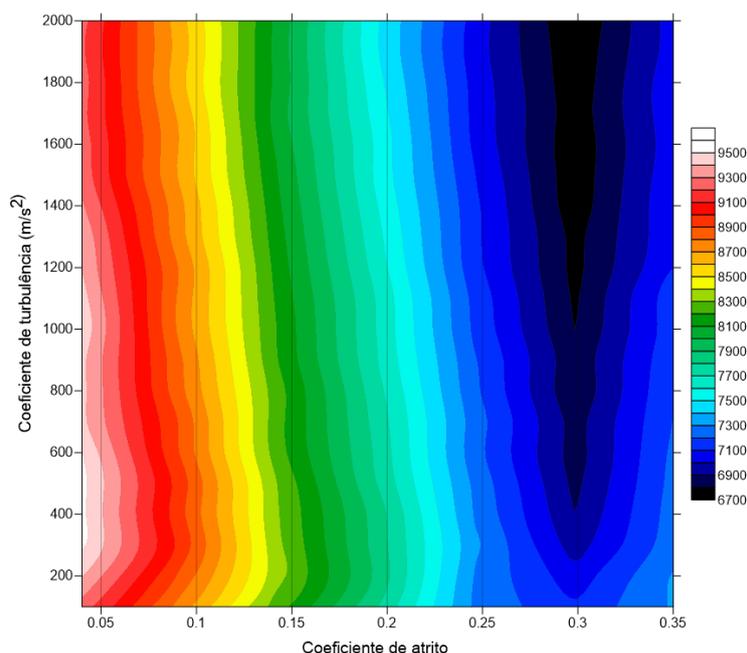


Figura 4.2 – Exemplo de compilação de resultados para seleção dos parâmetros reológicos de melhor ajuste.

Neste caso só o coeficiente de atrito foi ajustado, pois não foi inserida informação de velocidade. O ajuste encontrado corresponde a um ajuste preliminar de parâmetros que deve ser validado como será indicado no item 4.1.4.

4.1.3. Construção do modelo numérico

Para realizar as modelagens numéricas escolheu-se trabalhar com os programas DAN-W e DAN3D desenvolvidos por Hungr (1995) e McDougall (2006).

No programa DAN-W deve-se inserir um perfil aproximado do canal pelo qual houve o movimento de massa, a geometria da massa que se desloca e a largura do canal. Nos casos estudados na Costa Rica, foram utilizadas as informações fornecidas pelo Centro Nacional de Informação Geoambiental (CENIGA, 1998),

representadas por curvas de elevação na escala 1:25 000 permitindo a geração do MED. Pelo programa ArcGIS 10.3, obtém-se os perfis e as medidas de largura dos canais em cada caso. Nos casos estudados no Brasil, utilizaram-se os MED com resolução espacial de 30 m fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000).

O próximo passo é a inserção dos parâmetros da reologia da base e do material que se movimenta. Eles são escolhidos baseados nos procedimentos explicados nas seções 4.1.2 e 4.1.4.

No caso do programa DAN3D é necessário inserir três arquivos em formato .grd. Estes foram obtidos pelo programa Surfer 9, a partir de um arquivo xyz.dat preparado no programa ArcGIS através dos MED. Os arquivos necessários correspondem à topografia do local, zona de iniciação e localização das reologias basais em caso de se utilizar mais de um material. Em ambos os programas são inseridos os parâmetros reológicos devidamente calibrados.

Finalmente, deve-se indicar o grau de erodibilidade, introduzindo a profundidade de erosão sofrida por cada material. No programa DAN-W basta indicar uma profundidade de erosão para cada material. No programa DAN3D o grau de erodibilidade é calculado por meio da taxa de erosão aproximada pela equação 2.3 e o valor máximo de profundidade de erosão é definido pelo usuário.

4.1.4. Seleção final dos parâmetros

Os parâmetros foram calibrados preliminarmente pelo módulo SENSAN, mas uma vez construído o modelo, deve-se verificar se os resultados obtidos correspondem às características observadas e medidas nos casos reais em estudo.

O coeficiente de atrito é ajustado observando se a área de impacto inserida (*trimline*) apresenta uma boa aproximação com as observações de campo. O ajuste do coeficiente de turbulência considera os resultados do módulo SENSAN em função dos dados de velocidade. Porém, é difícil ter essa informação documentada. Neste trabalho o coeficiente de turbulência foi calibrado por meio de comparação de resultados obtidos de simulações de diferentes cenários no DAN3D com resultados medidos/observados nos eventos reais de fluxos de detritos. Finalmente, os parâmetros assim obtidos são inseridos no programa DAN-W e os resultados são

comparados. Os resultados das análises realizadas e sua comparação se encontram no Capítulo 5.

4.2. Casos de estudo

Nestas pesquisas foram selecionados um total de quatro eventos de fluxo de detritos ocorridos em zonas tropicais, deflagrados por chuvas intensas. Dois eventos são fluxos de detritos da Costa Rica, especificamente na província de San José:

- i. Calle Lajas;
- ii. Llano de la Piedra.

Os outros eventos de fluxo de detritos ocorreram em Nova Friburgo, Região Serrana do Rio de Janeiro, Brasil:

- i. Córrego D´Antas;
- ii. Hospital São Lucas.

4.2.1. Fluxo de detritos, Calle Lajas, San José, Costa Rica

4.2.1.1. Localização

O caso de estudo se localiza no bairro de Escazú, distrito San Antonio, província de San José na Costa Rica, conforme mostrado na Figura 4.3. A área de estudo corresponde à parte média e alta da micro-bacia Lajas. A área de estudo foi definida no fuso 16K entre as coordenadas UTM 483500 e 484900 Leste, e 1091800 e 1094700 Norte com Datum WGS84.



Figura 4.3 – Localização do evento Calle Lajas.

4.2.1.2. Geologia local

A região de Lajas caracteriza-se pela presença de rochas sedimentares e vulcânicas. Na parte alta da colina Pico Blanco (acima de 1720 metros), correspondente à zona de iniciação encontra-se um afloramento de rochas cornubianitas, produto do metamorfismo de contato. Descendo pelo canal, na elevação de 1185 m. encontram-se brechas de matriz siltosa na base e nas paredes do canal. Os materiais descritos são ilustrados na Figura 4.4.

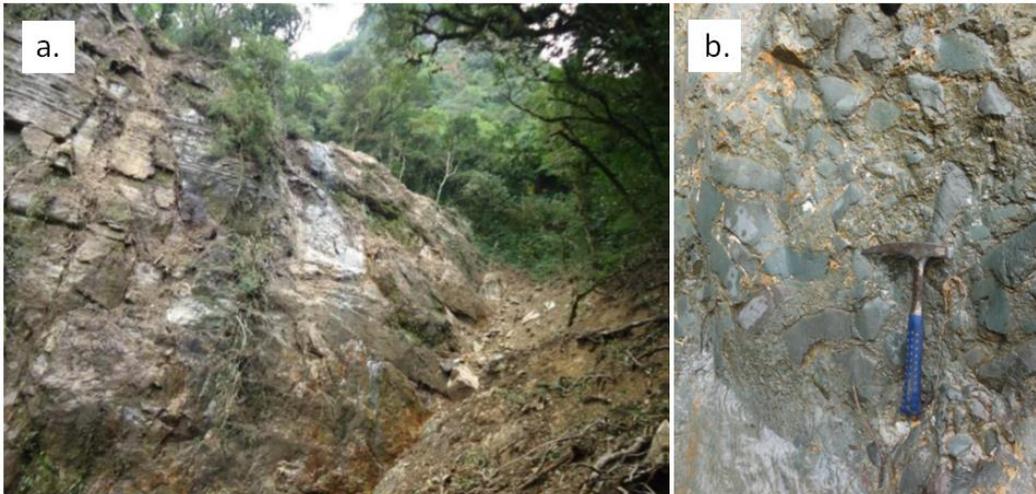


Figura 4.4 – Rochas da área de Calle Lajas: (a) Afloramento de cornubianitas; (b) Afloramento de brechas (CNE, 2010).

Na parte inferior do canal com elevação aproximada de 1025 m encontram-se formações de arenito alterado e aluvião com matriz siltosa pouco plástica nas paredes e na base do canal, assim como blocos angulosos com tamanho máximo de 1,0 m ao longo do canal. Os materiais descritos são observados na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Materiais do canal: (a) Na base do canal; (b) Nas paredes do canal.

4.2.1.3. Geomorfologia do local

Na parte alta da colina Pico Blanco encontra-se um afloramento de rochas cornubianitas que correspondem a rochas muito resistentes ao intemperismo resultando em encostas íngremes de até 35° de inclinação. Há evidências da presença de escarpas secundárias a cerca de 15 m atrás da escarpa principal, onde

se observa material instável que poderia produzir um evento de magnitudes similares ao evento ocorrido no ano 2010.

Descendo da parte mais alta para a parte intermediária da bacia, as margens do canal são arredondadas e as encostas caracterizam-se por apresentar cicatrizes de instabilidade antigas, com pequenos desprendimentos de material (Figura 4.6a). O sistema de drenagem é do tipo subdendritico, de ordem 2 (Figura 4.6b) e caracterizado pela presença de canais em forma de “V”.



Figura 4.6 – Aspectos da bacia: (a) Morfologia do canal com pequenos desprendimentos das paredes; (b) Sistema de drenagem (CNE, 2010).

Na zona média e baixa encontra-se uma zona plano-ondulada que apresenta inclinações de cerca de 10° e canal de fluxo de seção reduzida com largura inferior a 2,5 m e profundidade inferior a 0,7 m, portanto representa um canal de pequena vazão. Na zona baixa, as encostas apresentam inclinações entre 12 e 15% e a seção transversal do canal principal aumenta até alcançar 3,5 m de largura.

4.2.1.4. Descrição do evento

As chuvas contínuas e intensas ocorridas durante as duas últimas semanas de outubro no ano 2010, juntamente com as fortes chuvas da noite de 3 de Novembro de 2010, levaram à saturação das encostas da região do evento estudado. Os materiais perderam resistência e se colapsaram na parte alta da encosta da área conhecida como *Salto de los Caballos* (Figura 4.7a). O desprendimento teve sua origem na parte superior da bacia na cota 2085 m. A massa instável (rochas,

sedimentos, árvores) se movimentou até encaixar no talvegue (Figura 4.7b) da vertente Lajas, gerando um fluxo de detritos.

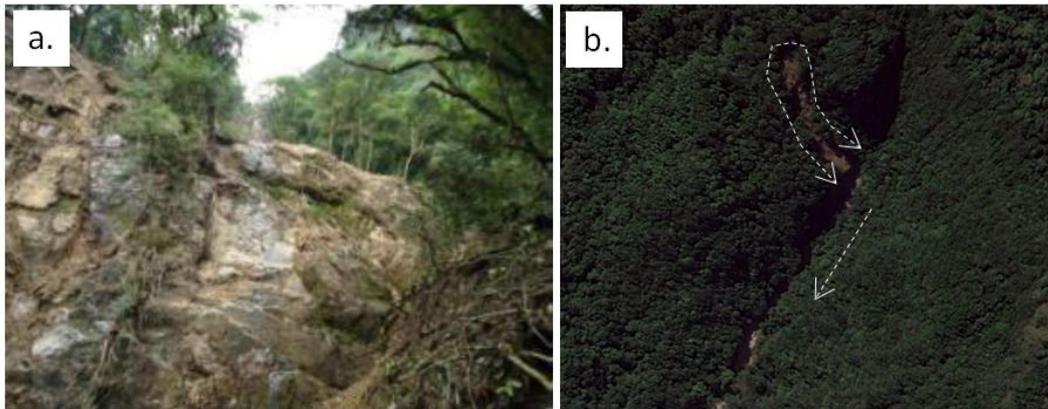


Figura 4.7 – Início do fluxo de detritos: (a) Ruptura em Salto de los Caballos; (b) Zona de iniciação do movimento.

Foram transportados blocos de rocha ígnea e sedimentar com diferentes tamanhos. A granulometria predominante foi grosseira, incluindo troncos de árvores e restos de detritos da infraestrutura que foi destruída pela massa movimentada. O movimento envolveu blocos de cornubianita de até 4.10 x 2.40 x 0.70m (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Detalhes dos blocos de Cornubianita depositados ao longo do setor de “La Catarata”.

A maior elevação da zona de iniciação do movimento foi na cota 2085 m. O movimento começou como uma massa escorregada lateralmente que atingiu o talvegue da vertente Lajas como mostrado na Figura 4.9a. Esta massa desceu pela encosta conforme indicado na Figura 4.9b, até atingir a comunidade de Lajas, local onde o material foi depositado.

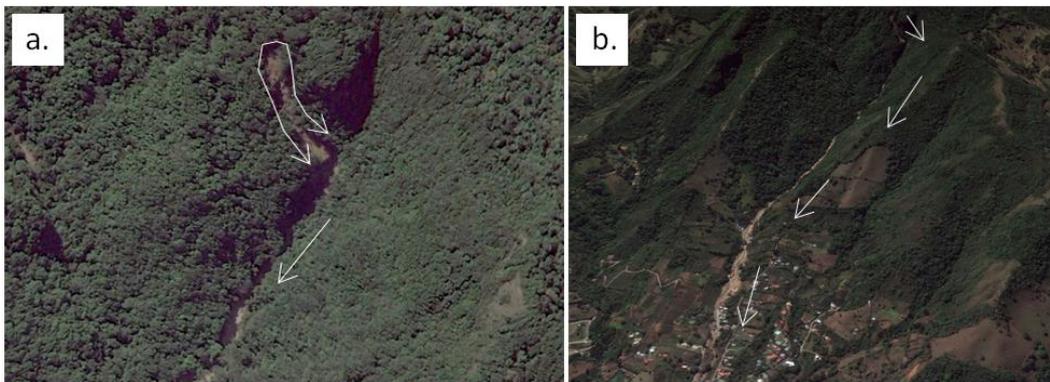


Figura 4.9 – Vista aérea do fluxo de detritos Calle Lajas: (a) Zona de iniciação; (b) Zona de transporte (Google Earth, 2010).

4.2.1.5. Caracterização do evento

A topografia antes do evento foi obtida da base topográfica disponibilizada pelo CENIGA (1998) levantada com escala de 1:25 000. A partir desta informação foi gerado um modelo de elevação digital através do sistema de informação geográfica, ArcGIS versão 10 e foi obtido um perfil do canal do fluxo de detritos conforme apresentado na Figura 4.10.

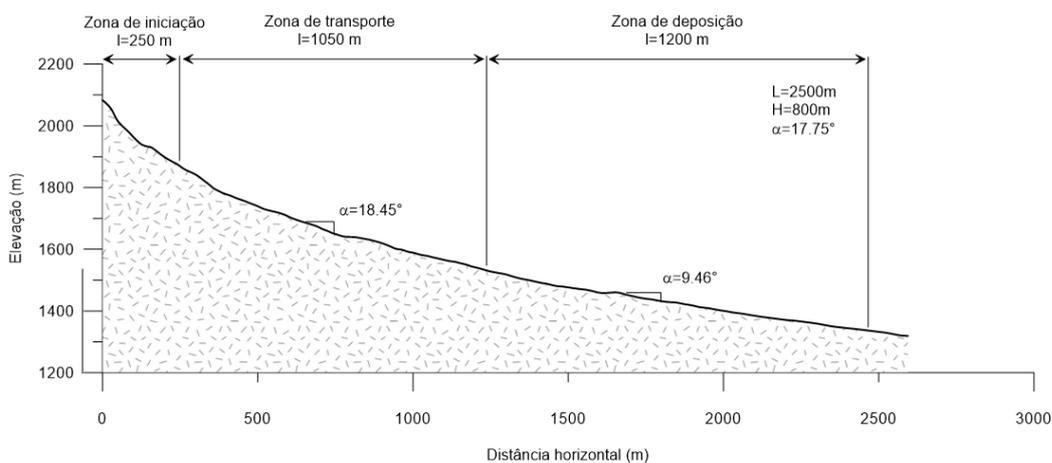


Figura 4.10 – Perfil e parâmetros geométricos do evento de Calle Lajas.

Segundo as inspeções de campo realizadas pela CNE após do evento, foi estimado um volume de deposição de 65.000 m^3 de material com espessura variável igual a 6,0 m no setor de *La Catarata*, 1,8 m na área de *El Roque* e 0,5 a 1,0 m no setor de *El Zapote*. No entanto, o material deslocado no topo da encosta corresponde, no máximo, a 10 – 20 % do volume total de deposição. (CNE, 2010). Assim, foi definido um volume inicial de 9.000 m^3 para realizar as análises

numéricas. Foi evidente o poder erosivo do fluxo através do canal facilitando a incorporação de material e aumentando consideravelmente o volume final (65.000 m³) depositado na comunidade de Lajas.

A CNE (2010) estimou as velocidades ao longo da trajetória utilizando a equação $v = \sqrt{2gh}$ onde g é a força da gravidade (9,81 m/s²) e h corresponde à altura alcançada pelo fluxo em cada seção. Foi calculada uma velocidade máxima de 12,5 m/s a uma distância de 1.020 m a partir da zona de iniciação do movimento.

A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação do movimento até o ponto mais distante atingido pelo movimento de massa, identificando que a massa foi deslocada por um único canal por uma distância de 2,5 km.

A área plana de deposição foi estimada em função do mapeamento após o evento realizado pela CNE (2010). A área de deposição estimada corresponde a aproximadamente 39.800 m³.

4.2.2.

Fluxo de Detritos, Llano de la Piedra, San José, Costa Rica

4.2.2.1.

Localização

O caso de estudo se localiza no bairro *El Llano de la Piedra*, entre as localidades *Santa Maria de Dota* e *San Marcos de Tarrazú*. A área de estudo localiza-se na parte alta da ravina Concha e o rio Mesa Figura 4.11. A área de estudo foi definida no fuso 16K entre as coordenadas UTM 171288 e 172848 Leste, e 1067750 e 1068860 Norte com Datum WGS84.

4.2.2.2.

Geologia do local

A zona onde aconteceu o movimento pertence à formação geológica *Caraigres* e caracteriza-se pela presença de rochas sedimentares (arenitos e argilitos). Estas rochas formam solos residuais lateríticos (siltes argilosos vermelhos) com espessuras de intemperismo entre 2,0 e 10,0 m. Segundo Sáenz (1997), o mergulho dos diferentes estratos de rocha são paralelos à topografia.



Figura 4.11 – Localização do evento Llano de la Piedra.

Bermudez (1997) reporta que, na primeira capa do perfil do solo, encontra-se um material vermelho com muitas raízes e espessura variando até 2,7 m. Em seguida há um silte arenoso de cor vermelho-amarela entre as profundidades de 1,5 m a 4,0 m. Depois, encontra-se uma camada de silte-argiloso com estruturas de rocha alterada a partir de 2,5 até 7,0 m de profundidade. No quarto estrato, encontra-se rocha intemperada com presença de material arenoso e alguns afloramentos de rocha sã. Este estrato encontra-se entre 7,0 e 24,0 m. Finalmente, a última camada apresenta rocha intemperada e altas porcentagens de rocha sã. A zona de transporte com o material erodido no canal é mostrada na Figura 4.12.

O pé do talude consiste em uma zona de depósitos de coluviões (Figura 4.12b), devido à acumulação de detritos de eventos anteriores. O Rio Pirrís encontra-se na base do talude e, portanto a zona de deposição é de origem colúvio-aluvial, produto da combinação dos materiais provenientes do rio e da encosta (Bermudez, 1997).



Figura 4.12 – Fluxo de detritos Llano de la Piedra: (a) Material erodido no canal; (b) Material na zona de deposição.

4.2.2.3. Geomorfologia do local

A zona onde aconteceu o fluxo de detritos é uma região montanhosa com ocupações do solo inadequadas. Na parte alta da encosta encontra-se a cicatriz de um escorregamento pretérito, acontecido em 1955 (Figura 4.13). Após o primeiro movimento de massa a cicatriz na crista do talude desceu cerca de 5 m (comunicação pessoal: Marco Valverde) e parte do material deslizado foi depositado na margem esquerda do Rio Pirrís mudando a morfologia do local. As encostas possuem inclinações constantes na faixa de 25° e 30°.



Figura 4.13 – Detalhe da cicatriz de deslizamento antigo no topo da encosta (Bermudez,1997).

4.2.2.4. Descrição do evento

O dia 27 de julho foi o dia mais chuvoso do ano 1996 na zona do Llano de la Pedra, com registros de 271 mm de chuva na estação pluviométrica mais próxima do local do evento. Consequentemente, foi desencadeado o fluxo de detritos no dia 28 de julho.

Em 1955 foi registrado outro evento com magnitude similar, mas são poucas as referências documentais que ainda podem ser consultadas com informações deste fluxo de detritos. No segundo evento, estudado nesta pesquisa a água se infiltrou nas antigas fraturas e pela cunha instabilizada elevando as poropressões que resultou na perda de resistência no material da encosta.

O movimento iniciou-se na cota 1660 m onde um grande bloco de material deslizou e parte dele ficou no setor médio da encosta devido às condições topográficas do local, como mostrado na Figura 4.14a. O evento pode ser caracterizado como um movimento típico rotacional no topo da encosta, seguido por uma avalanche de detritos que erodiu um canal e espalhou-se na zona de deposição. Uma vista aérea após o movimento é apresentada na Figura 4.14b.

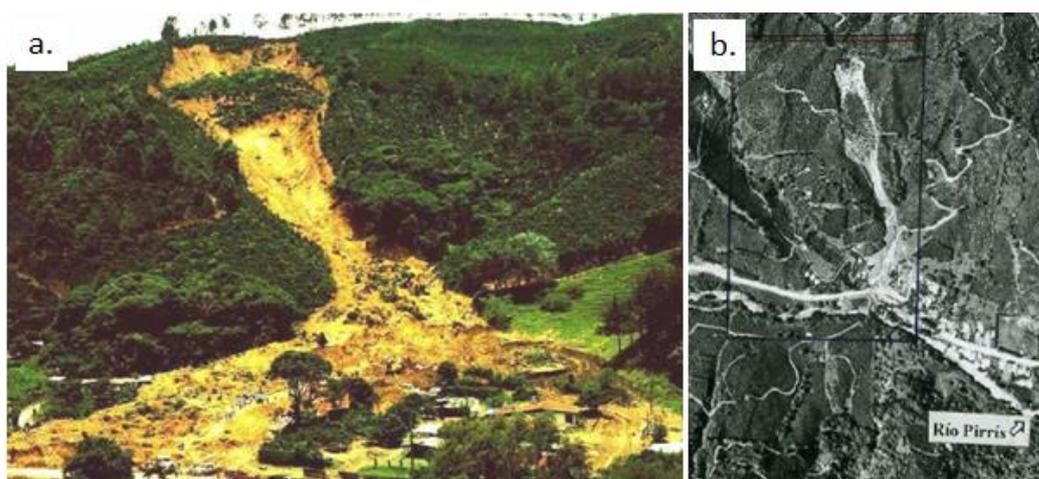


Figura 4.14 – Fluxo de detritos de Llano de la Piedra: (a) Vista frontal do movimento; (b) Vista superior do movimento.

De acordo com o perfil de solo descrito anteriormente, o movimento mobilizou praticamente todas as camadas de solo residual, atingindo até a quarta camada de material (rocha alterada). A permeabilidade desta camada é alta, logo favoreceu a infiltração de água. O evento resultou em 11 mortos, 7 casas destruídas e perdas da infraestrutura pública.

4.2.2.5. Caracterização do evento

A topografia antes do evento foi obtida da base topográfica disponibilizada pelo CENIGA (1998) levantada com escala de 1:25 000. A partir desta informação foi gerado um modelo de elevação digital através do programa de sistemas de informação geográfica, o programa ArcGIS versão 10, e foi obtido um perfil do canal percorrido pelo fluxo de detritos como mostrado na Figura 4.15.

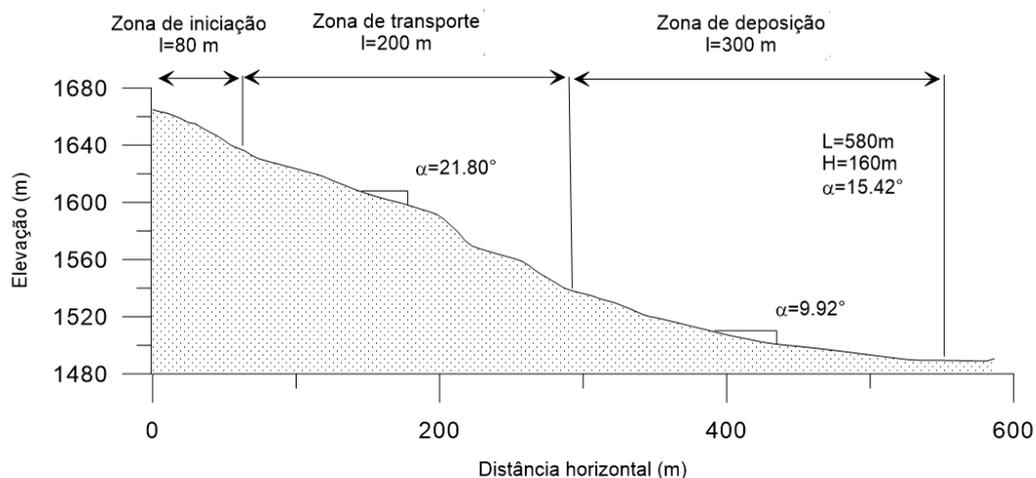


Figura 4.15 – Perfil e parâmetros geométricos do caso de Llano de la Piedra.

A superfície de ruptura foi determinada mediante ensaios de refração sísmica e topografia a cada metro, realizados após o evento. A partir destes resultados e observações de campo, estimou-se que o material rompido tem uma espessura média de 15 m e um volume inicial de 40.000 m³ e volume final de 100.000 m³. A distância percorrida foi medida em 580 m e a extensão de deposição em 300 m.

Não foram estimadas velocidades do evento, mas os vizinhos indicam que a rapidez do movimento não permitiu que várias pessoas fugissem, embora tendo percebido que o material estava se aproximando do local. Portanto, foi estimado que o movimento ocorreu com velocidades de rápidas a muito rápidas. A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação do movimento até o ponto mais distante atingido pelo fluxo. A massa foi deslocada por um único canal até atingir o Rio Pirrís.

4.2.3. Fluxo de Detritos, Hospital São Lucas, Rio de Janeiro, Brasil

4.2.3.1. Localização

O caso de estudo localiza-se na região serrana do estado de Rio de Janeiro, especificamente no bairro de Duas Pedras, da cidade de Nova Friburgo, no estado de Rio de Janeiro em Brasil (Figura 4.16). A área de estudo foi definida no fuso 23K entre as coordenadas UTM 752540 e 753900 Leste e, 7535500 e 7537200 Norte com Datum WGS84. O evento foi assim denominado devido a sua proximidade do Hospital São Lucas, grande centro de excelência de atendimento de pacientes cardíacos da região serrana.



Figura 4.16 – Localização do evento Hospital São Lucas.

4.2.3.2. Geologia do local

O Morro Duas Pedras é formado por rochas graníticas do Proterozóico pertencentes a suíte Serra dos Órgãos.

A zona de iniciação do movimento é constituída por um maciço rochoso alterado e o talvegue onde o material se transladou (zona de transporte) é composta

por um maciço rochoso competente. Já na zona de deposição onde se localiza o hospital e os prédios anexos encontra-se um depósito antigo de talús. O depósito de talús tem espessura variando entre 5,0 m e 8,0 m, e é capeado por um aterro com espessura média de 3,0 m a 4,0 m. Abaixo, do talús encontra-se um solo residual de granito, com textura arenoso-argilosa, no qual foram registrados valores elevados de SPT e alta permeabilidade (CSCF, 2007).

4.2.3.3. Descrição do evento

As fortes chuvas ocorridas nos dias 10 e 11 de Janeiro de 2011 geraram grandes movimentos de massa na Região Serrana de Rio de Janeiro, especificamente no Morro Das Pedras. A encosta sofreu vários deslizamentos translacionais, sendo um deles o que resultou no início do fluxo de detritos atingiu o Hospital São Lucas localizado na zona leste do Morro de acordo com a Figura 4.17a e Figura 4.17b.



Figura 4.17 – Fluxo de detritos Hospital São Lucas: (a) Vista aérea; (b) Vista frontal do Morro Das Pedras.

O fluxo de detritos do Hospital São Lucas começou no topo da escarpa rochosa, aproximadamente na cota 1310 m no contato solo/rocha. Ressalta-se que o movimento que atingiu o hospital foi acompanhado de outro fluxo de detritos

paralelo como se mostra na Figura 4.17b. Além disto, o fluxo de detritos do Hospital São Lucas também apresentou duas zonas de iniciação, sendo que uma delas foi bifurcada, resultando em outro movimento de massa na parte norte da escarpa conforme mostrado na Figura 4.17a e Figura 4.18a. Este movimento também será analisado e descrito no item 4.2.4 deste trabalho.

Na zona de iniciação do evento do Hospital São Lucas a declividade média da encosta é de 40° e tem uma extensão de 25 m. O movimento começou pela mobilização de vários blocos, que misturados com solo, desceram pela escarpa rochosa sem uma canalização definida (avalanche de detritos) até atingir o talvegue no meio da encosta, transformando-se em um fluxo de detritos. A Figura 4.18b apresenta a zona de iniciação do movimento.

Descendo da parte mais alta para a parte intermediária (zona de transporte) aflora a escarpa rochosa com declividade aproximada de 33° e comprimento de 425 m. Neste setor o material atingiu o tálus depositado no talvegue e erodiu de forma importante o canal conforme mostrado na Figura 4.18c. Esta zona contribuiu com a maior parte do material depositado.

Finalmente foi depositado o material devido à interrupção parcial do fluxo e à mudança da inclinação da encosta reduzida a 18° . Nesta zona foram depositados blocos de rocha, conforme mostrado na Figura 4.18d.



Figura 4.18 – Vistas aéreas do fluxo de detritos do Hospital São Lucas.

4.2.3.4. Características do evento

O volume inicial do evento foi calculado a partir das observações de campo e fotografias aéreas. Estimou-se uma massa mobilizada de 1000 m^3 descendo pela escarpa rochosa. O material atingiu o talvegue e erodiu o canal resultando em um volume final de aproximadamente 12.000 m^3 .

A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação até o ponto mais distante atingido pelo fluxo de detritos. Inicialmente, o material se movimentou pela escarpa rochosa até atingir o talvegue por uma distância total de 830 m e com diferença de elevações de 435 m. Desta forma, foi obtido um ângulo de fahrböschung de $29,3^\circ$ para o evento (Figura 4.19).

Não foi possível estimar valores de velocidade no local, apesar de testemunhas reportarem a elevada rapidez do movimento. A área planimétrica de

deposição foi estimada em função das imagens aéreas antes e após o evento obtendo-se assim uma área de 25.000 m².

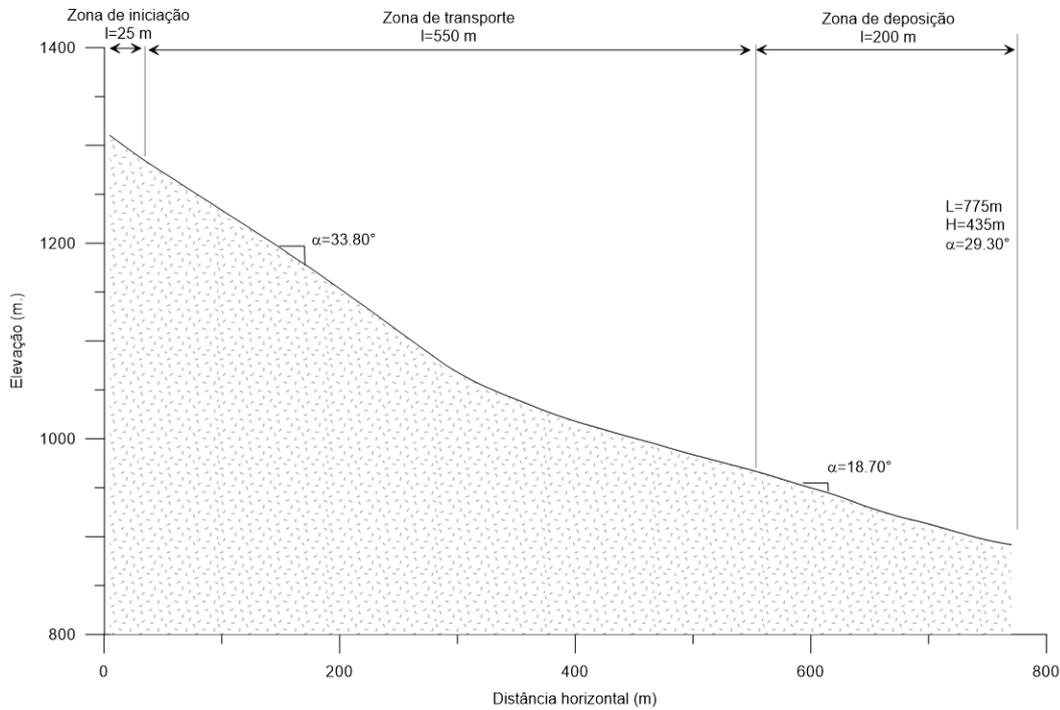


Figura 4.19 – Perfil e características geométricas do evento do Hospital São Lucas.

4.2.4.

Fluxo de Detritos, Córrego D'Antas, Rio de Janeiro, Brasil

4.2.4.1.

Localização

O caso de estudo localiza-se no bairro de Córrego D'Antas, na cidade de Nova Friburgo, no estado de Rio de Janeiro, Brasil. Conforme mostrado na Figura 4.20 a área de estudo corresponde à parte alta da encosta do Morro Duas Pedras e foi definida no fuso 23K entre as coordenadas UTM 752540 e 753900 Leste e, 7535500 e 7537200 Norte com Datum WGS84.



Figura 4.20 – Localização do evento Córrego D’Antas em Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

4.2.4.2. Geologia do local

O Morro Das Pedras é formado por rochas graníticas do Proterozóico pertencentes a suíte Serra dos Órgãos. O talvegue por onde deslocou a massa na trajetória inicial é formado por duas famílias de fraturas subverticais, mergulhando para o sudoeste segundo a direção $238^{\circ}/75^{\circ}$ e para o nordeste segundo a direção $320^{\circ}/80^{\circ}$, persistentes em todo o maciço, indicadas na Figura 4.21.

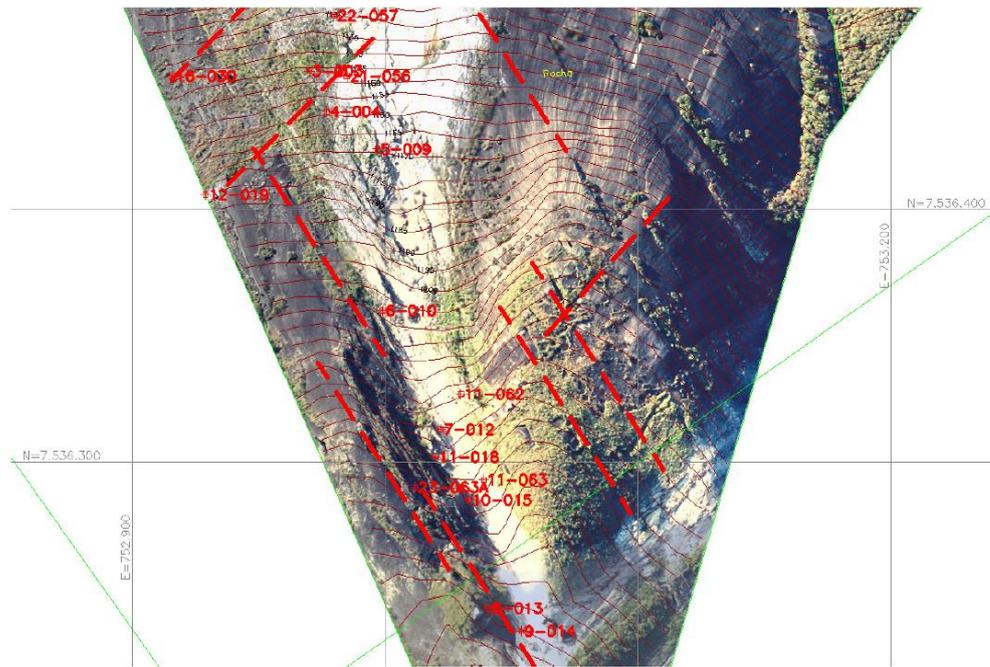


Figura 4.21 – Fraturas subverticais do maciço destacadas na ortofoto (Geomecânica, 2011).

Durante o mapeamento geológico foram observados pontos de surgência de água nas juntas de alívio e fraturas. Essas discontinuidades condicionam o caminhamento das águas pluviais e favorecem o desconfinamento e deslocamento das lascas rochosas através da infiltração e aumento da poropressão. A base da encosta apresenta um depósito de material colúvional e tálus, originados de movimentos pretéritos, que se estendem desde a base da escarpa rochosa até a rodovia RJ-130 e possui mais de 10 m de espessura (Portella *et al*, 2013).

4.2.4.3. Descrição do evento

As fortes chuvas ocorridas nos dias 10 e 11 de Janeiro de 2011 geraram grandes escorregamentos na região serrana de Rio de Janeiro, especificamente no Morro Duas Pedras. O desprendimento teve sua origem na face norte da escarpa rochosa com a cota máxima atingindo aproximadamente 1360 m. Parte do material colapsado se deslocou na direção Norte para Córrego D'Antas e parte na direção leste para o Hospital São Lucas conforme mostrado na Figura 4.22a e Figura 4.22b.

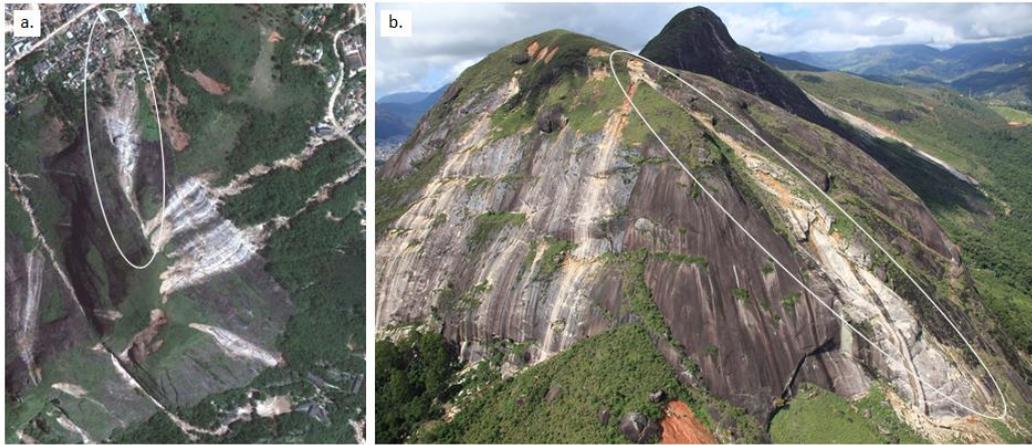


Figura 4.22 – Fluxo de detritos Córrego D’Antas: (a) Vista aérea por satélite; (b) Vista das trajetórias para Córrego D’Antas e Hospital São Lucas.

O Morro Duas Pedras sofreu vários deslizamentos na vertente norte, sendo que o escorregamento principal teve seu início no topo do maciço, no contato solo/rocha, e prosseguiu orientado por uma linha de fraturas, erodindo a camada de solo residual e expondo o topo rochoso alterado (Portella *et al.* 2013). O movimento foi originado como consequência do acréscimo da poropressão na camada de solo localizada no topo da escarpa. Os blocos de grande volume da zona de iniciação tiveram pequeno deslocamento e não foram agregados ao fluxo de detritos, como observado na Figura 4.23a. A Figura 4.23b apresenta uma vista geral do maciço com as cicatrizes da passagem do fluxo sobre o afloramento rochoso e os depósitos na parte média da encosta.

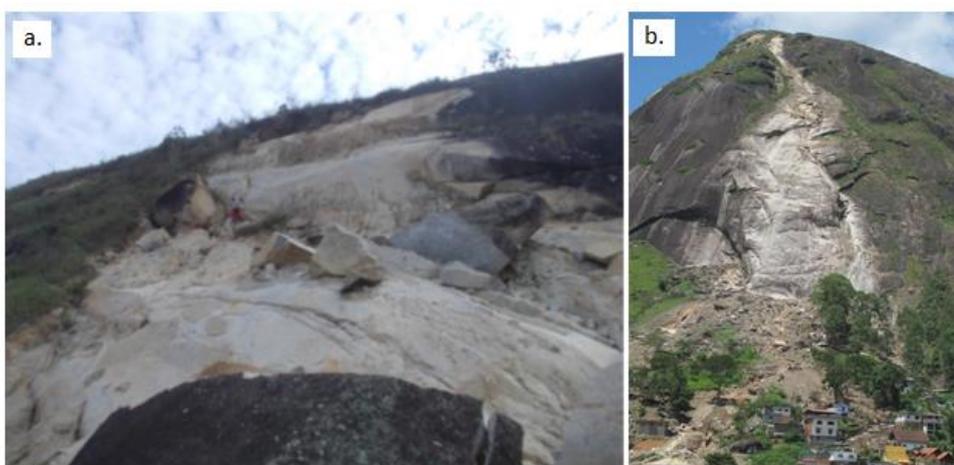


Figura 4.23 – Detalhes do fluxo de detritos: (a) Zona de iniciação do movimento; (b) Vista do escorregamento principal na escarpa rochosa (Geomecânica, 2011).

Na zona de iniciação a declividade média da encosta é de 45°. Descendo da parte mais alta para a parte média (zona de transporte), aflora a escarpa rochosa com declividade entre 40° e 60°, na qual o fluxo de detritos se encaixou por mais de 300 m até chegar à zona de deposição com redução da inclinação para 26°.

O material na zona de transporte é dividido em três canais como mostrado na Figura 4.24. O canal 1 possui trechos íngremes e o volume menos significativo oriundo da encosta rochosa. A maior parte do material colapsado prossegue pelos canais 2 e 3. No caso do canal 2 o fluxo atingiu a Rua Mario Pinto, destruindo casas e fazendo vítimas fatais. O canal de erosão 3 concentrou o maior volume atingindo a Rua Vazante e destruindo o maior número de casas. Houve um movimento secundário, na cabeceira d'água existente, que percorreu o canal 4. Apesar da erosão profunda sofrida pelas margens do talvegue em forma de “V” e da proximidade do fluxo de detritos em relação às casas lindeiras, os danos sofridos foram pouco significativos nesta área.



Figura 4.24 – Fluxo de detritos dividido em 4 canais em Córrego D'Antas.

4.2.4.4. Características do evento

Segundo as inspeções de campo realizadas no local estima-se que cerca de 1.000 m³ de material contendo solo e blocos de rocha tenham sido inicialmente mobilizados, originando o movimento que foi agregando mais massa ao se encaixar no talvegue. Um volume final entre 7.000 m³ e 16.000 m³ foi estimado por Motta (2014) baseado em relações empíricas.

A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação do movimento até o ponto mais distante atingido pelo fluxo de detritos. Foram evidenciados 3 canais, mas a distância percorrida foi calculada a partir do canal mais extenso e estimou-se que a massa deslocada percorreu uma distância aproximada de 780 m. A Figura 4.25 apresenta o perfil com as principais características do fluxo de detritos no canal principal.

Uma área plana de deposição foi estimada em função do mapeamento após o evento por Pelizone (2014) e Motta (2014) correspondente a 35.000 m² e 31.000 m² respectivamente. A velocidade do fluxo de detritos não foi medida, porém sobreviventes da tragédia reportaram a extrema rapidez e violência do evento.

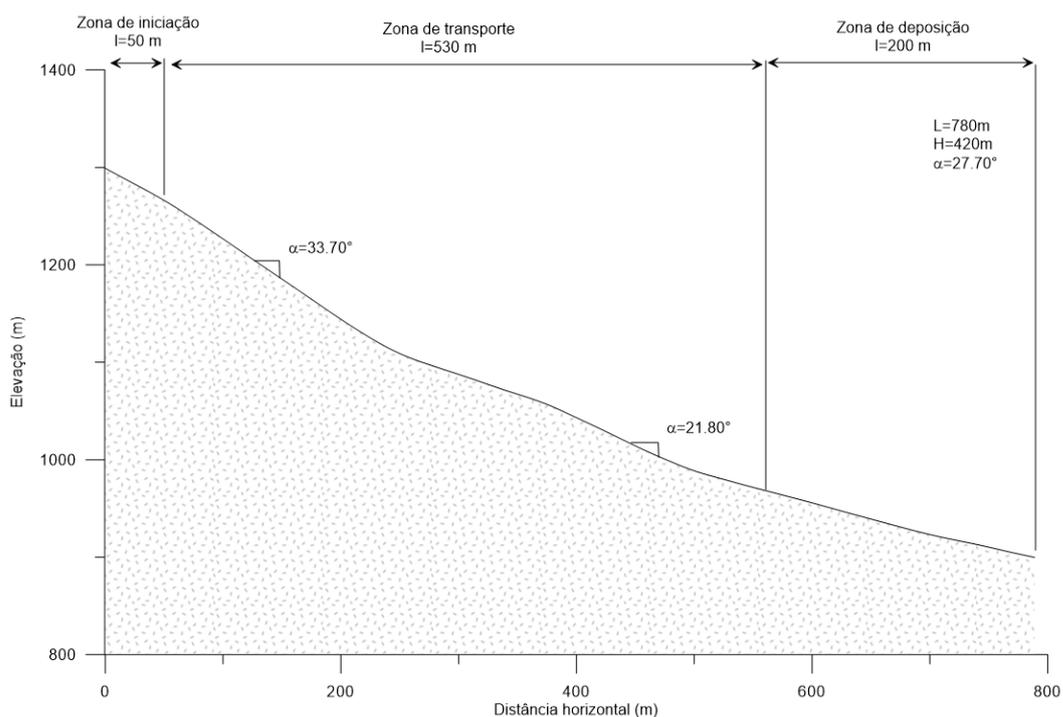


Figura 4.25 – Perfil e características geométricas do evento do Hospital São Lucas.