

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MONITORAMENTO DE TALUDES COM USO DE SOFTWARE DE
INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS**

Yuri Matheus Minutella Bortoletto Machado

Yuri Matheus Minutella B. Machado

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

De Acordo: *Fernando*

Monografia

TF – 45/18

São Paulo

2018

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho, pela orientação e paciência ao longo da realização deste trabalho e a equipe do laboratório de mecânica dos solos da Poli pela ajuda com o talude.

Aos meus pais, minha irmã e minha avó, por sempre estarem presentes e me apoiarem durante todos os momentos da minha graduação.

Aos meus amigos mais próximos: Tom, Sacolé, Escrota, Pintolé, Indy, Bilbo, Baia e principalmente ao Lucas Vinicius Santos, vulgo Gretchen, que me prestou auxílio nos mais diversos momentos ao longo desta graduação.

RESUMO

O projeto consiste na avaliação de um método de monitoramento de taludes em áreas de risco por meio de fotografias tiradas por telefones celulares, fornecidas pelos próprios moradores locais, e posteriormente analisadas em *software* que permite realizar medições entre duas fotografias tiradas em sequência temporal.

Diversas encostas pelo mundo apresentam um certo risco de sofrer o fenômeno de movimentação de massa, onde uma grande quantidade de material se desloca ao longo da frente do talude, destruindo e danificando construções ao longo do caminho. Tal fenômeno é um dos principais causadores de catástrofes naturais no Brasil. Atualmente existem diversos modos de realizar monitoramento de encostas sujeitas a movimentos de massa, podendo ser divididos entre métodos diretos, que medem a variação de forma do talude diretamente, e métodos indiretos, que monitoram diversos outros fatores que podem condicionar uma encosta ao colapso. Entre os métodos diretos pode-se citar o método empregado por este projeto, a fotogrametria.

No projeto foram utilizadas fotografias tiradas em sequência de um talude artificial montado em laboratório dentro de um tanque de acrílico. A câmera fotográfica foi posicionada em um suporte fixo para que não houvesse alteração dos resultados decorrente de movimentos da câmera. As imagens obtidas foram então analisadas no *software* ImageJ, um programa livre que permite, entre outras funções, a realização de medidas entre duas ou mais fotografias. Também foi realizada medições de uma malha de 20 pontos, espaçados entre si por uma distância conhecida, ao longo de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 metros de distância de onde foi montado o telefone celular, de modo a se determinar como a resolução da câmera do telefone é afetada pela distância.

A análise da resolução do aparelho de acordo com a distância mostrou que a precisão das medidas feitas pelo *software*, da malha, não sofre grande influência da distância, visto que o erro encontrado tanto para 5 quanto 30 metros correspondia a uma faixa entre 2% e 9% do valor real esperado. Entretanto, o tamanho real que um pixel representa nas imagens aumenta de forma exponencial conforme a distância da câmera ao objeto aumenta. Já pela análise do colapso do talude em laboratório, foi possível detectar variações na forma do talude de desde 2,2 milímetros a até 1,8 centímetros entre duas fotos consecutivas. Aliando-se as duas informações obtidas, é possível determinar que o método proposto é factível e pode ser um grande auxílio para monitoramentos em escalas locais de encostas sujeitas a movimentos de massa.

ABSTRACT

Several slopes around the world present a certain risk of suffering the mass movement phenomenon, where a large amount of material moves along to the front of the slope, destroying and damaging constructions along the way. This phenomenon is one of the main causes of natural catastrophes in Brazil. There are currently several ways to monitor slopes subject to mass movements, and they can be divided between direct methods, which measure slope form variation directly, and indirect methods, which monitor several other factors that can condition a slope to collapse. Among the direct methods we can mention the method used by this project, the photogrammetry.

In the project, photographs were taken in sequence from an artificial slope created in laboratory inside an acrylic tank. The camera was positioned on a fixed stand so there was no change in the results caused by camera movements. The images obtained were then analyzed in the software ImageJ, a free program that allows, among other functions, measurements between two or more photographs. Measurements of a 20-point mesh were also made, spaced by a known distance, along 5, 10, 15, 20, 25 and 30 meters distance from where the cellphone was located, in order to determine how the resolution of the phone's camera is affected by distance.

The analysis from the phone's resolution, according to the distance, showed that the accuracy of the measurements made by the software, of the mesh, do not suffer much influence from the distance, since the error found for both 5 and 30 meters corresponded to a range between 2% and 9% of the expected real value. However, the actual size that a pixel represents in images increases exponentially as the distance from the camera to the object increases. _ By the analysis of the slope's collapse in laboratory, it was possible to detect variations in the form of the slope_ from 2.2 mm to 1.8 cm between two consecutive photos. By combining the two information obtained, it is possible to determine that the proposed method is feasible and can be a great help for monitoring on local scales of slopes subject to mass movements.

Sumário

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	4
2. METAS E OBJETIVOS	5
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	5
3.1. Métodos de monitoramento geotécnico	10
3.2. Fotogrametria	13
3.3. Fotogrametria Digital	14
3.4. Sensoriamento remoto aplicado a movimentos de massa.	15
3.4.1. Aplicações de fotogrametria 2D em estudos de encostas	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. Características da câmera do celular	18
4.2. O software ImageJ	18
4.3. O <i>software</i> para análise de estabilidade de talude	18
4.4. Modelo físico	19
4.5. Solo utilizado	19
5. RESULTADOS OBTIDOS	19
5.1. Calibração das imagens	19
5.2. Análise de estabilidade	23
5.3. Montagem do Modelo Físico	23
5.4. Dificuldades surgidas e alterações nos objetivos originais	29
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
7. CONCLUSÕES	31
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

Os principais desastres naturais que ocorrem no Brasil são causados por fenômenos da dinâmica externa do planeta. Dentre eles, um dos principais são os movimentos de massa, diversas vezes erroneamente utilizado como sinônimo de escorregamentos. Augusto Filho (1992) resume os movimentos de massa em quatro tipos principais, sendo eles: rastejos, escorregamentos, quedas e corridas, de materiais como solo e rocha. Varnes (1978), propôs umas das classificações mais aceitas internacionalmente, separando os movimentos de acordo com o material transportado e o tipo de movimento. O fenômeno de movimento de massa ocorre em taludes quando estes perdem estabilidade, atingindo o ponto de ruptura. Guidicini e Nieble (1984) classificam os fatores condicionantes ao escorregamento de massas em dois tipos principais, os agentes predisponentes, que são conjuntos de características intrínsecas ao material, e os agentes efetivos, que são responsáveis pelo desencadeamento do fenômeno.

O monitoramento de encostas suscetíveis a movimentações é de extrema importância para a prevenção de riscos e muitas vezes trata-se da única ferramenta disponível para que danos sejam evitados em casos de taludes que não podem ser estabilizados ou que podem sofrer súbito aumento de velocidade (Travelletti et al. 2012).

Para monitoramento de taludes, uma série de instrumentos foram desenvolvidos e alguns deles são apresentados por Hanna (1985), como extensômetros, inclinômetros, tiltômetros. A escolha do tipo de monitoramento mais adequado é dependente de diversos fatores, como tipo de movimento envolvido, a velocidade de deslocamento do material, a frequência de aquisição de dados desejada e os custos envolvidos no projeto (e.g. Travelletti et al. 2012). Franklin e Denton (1973) sintetizam várias técnicas para monitoramento geotécnico, dentre elas o uso de fotogrametria, tanto aérea quanto terrestre, Travelletti et al. (2012) ainda inclui métodos geodésicos, que envolvem a colocação de marcadores ao longo da encosta a ser monitorada, a fim de adquirir dados com relação a variação na geometria em períodos distintos por meio de medições feitas a partir de satélites utilizando GPS. Fotogrametria trata-se da ciência ou tecnologia de se obter informação confiável por meio de imagens, atualmente, por meio de fotografias (Coelho e Brito, 2007). Inicialmente era um processo lento e custoso, o que fez com que sua utilização fosse secundária, entretanto, com o avanço da tecnologia, por meio da implementação de computadores e mais recentemente de fotografias digitais, tornou-se uma importante fonte de informações que complementa e facilita estudos em diversas áreas, entre elas a geotecnia.

A proposta inicial do trabalho era, após realizar a verificação a respeito da precisão do *software* de estudo de imagens de acordo com as distâncias escolhidas, em laboratório, se iniciar o monitoramento em campo de encostas em situação de risco, sendo inicialmente

localizada na localidade denominada Morada do Sol, e posteriormente na região do Sapopemba, zona leste do município de São Paulo. Ambas as áreas foram descartadas devido a problemas de segurança no local. Sendo assim optou-se por realizar a etapa de monitoramento também em laboratório, por meio da construção de um talude artificial em modelo reduzido.

O estudo consiste na análise de movimentações de massa partir do uso de fotografias obtidas por meio de telefones celulares (*smartphones*) com câmeras, a fim de propor um método de monitoramento de baixo custo de instalação e manutenção.

2. METAS E OBJETIVOS

O objetivo do projeto é avaliar o uso de fotografias, tiradas por meio de telefones móveis (*smartphones*) portadores de câmera fotográfica, para monitorar movimentação de encostas, utilizando o *software* ImageJ.

As metas são:

- Testar o uso do *software*, verificando sua resolução em diferentes condições de distância.
- Avaliar os resultados de um monitoramento feito em laboratório de um modelo experimental.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Os problemas relacionados a taludes, quer sejam naturais ou artificiais, estão associados ao que se denomina movimentos de massa, ou seja, movimentação de materiais de diversas naturezas como solo, rocha e vegetação, ao longo da bancada ou encosta do talude devido a ação de atração gravitacional (Tominaga, 2009).

Os movimentos de massa podem apresentar diversas variedades, com relação à geometria do movimento, tipo de material transportado, agentes causadores entre outros fatores. Assim, abre-se uma vasta gama de possibilidades para a criação de sistemas de classificação, muitos dos quais mostram boa aplicabilidade de caráter mais regional devido as condições locais na qual foram elaboradas (Gudicini e Nieble, 1984). Os principais movimentos de massa, resumidos por Augusto Filho (1992) são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Quadro apresentando os tipos de movimento de massa. Extraído de Augusto Filho, 1992.

PROCESSOS	DINÂMICA/GEOMETRIA/MATERIAL
Rastejos (creep)	- vários planos de deslocamento (internos) - velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade - movimentos constantes, sazonais ou intermitentes - solo, depósitos, rocha alterada/fraturada - geometria indefinida
Escorregamentos (slides)	- poucos planos de deslocamento (externos) - velocidades médias (m/h) a altas (m/s) - pequenos a grandes volumes de material - geometria e materiais variáveis: - Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com 1 plano de fraqueza - Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas - Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (falls)	- sem planos de deslocamento - movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado - velocidades muito altas (vários m/s) - material rochoso - pequenos a médios volumes - geometria variável: lascas, placas, blocos etc. - Rolamento de matacão - Tombamento
Corridas (flows)	- muitas superfícies de deslocamento - movimento semelhante ao de um líquido viscoso - desenvolvimento ao longo das drenagens - velocidades médias a altas - mobilização de solo, rocha, detritos e água - grandes volumes de material - extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Rastejos são movimentos de massa que ocorrem de maneira lenta e contínua, transportando material ao longo de uma grande extensão de área, no qual a massa transportada se comporta como uma espécie de fluido altamente viscoso. O principal agente causador deste movimento é a força gravitacional, com atuação forte nas camadas mais superficiais do solo, de efeitos de expansão e contração ocasionados por variações de temperatura, resultando em movimentação encosta abaixo, ilustrados pela Figura 1.

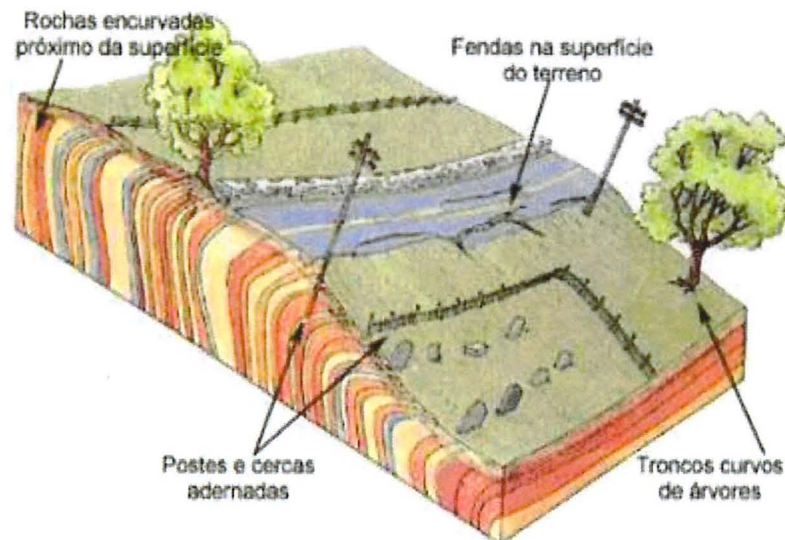


Figura 1 - Ilustração esquematizando o processo de rastejo.

Como este tipo de movimento afeta uma grande área, geralmente é difícil a diferenciação entre material transportado e material estacionário, entretanto evidências de rastejo podem ser observadas por meio de alterações na verticalidade de árvores e postes, blocos rochosos deslocados de sua posição inicial, trincas em muros e paredes, entre outros (Sharpe, 1938). Segundo Terzaghi (1953), rastejos não passam de velocidades superiores a 0,3 metros por dez anos, salvo casos muito raros de movimentação rápida.

Escorregamentos são movimentos que ocorrem durante um curto intervalo de tempo, onde a velocidade cresce de 0 a 0,3 metros por hora, sendo que velocidades de alguns metros por segundo podem ser alcançadas (Terzaghi, 1953). O volume de massa deslocado é bem definido e sua movimentação ocorre para baixo e para fora da bancada do talude.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), para que aconteça um escorregamento, a é preciso que haja redução da resistência ao cisalhamento ou aumento da tensão de cisalhamento. A alteração destas grandezas ocorre de forma gradual, resultando em uma deformação inicial no corpo do material situado acima da possível superfície de escorregamento, e pode se dar por redução da resistência ao cisalhamento (por exemplo, infiltração de água) ou aumento das tensões de cisalhamento atuantes sobre a superfície de escorregamento (por acréscimo de carga, por exemplo). Já a velocidade de movimentação depende quase que exclusivamente da inclinação da superfície do talude, da causa inicial do movimento e da natureza do terreno.

Os escorregamentos podem ser classificados de acordo com a geometria da superfície de movimentação, subdivididos em três tipos, sendo eles: escorregamentos rotacionais, escorregamentos translacionais e escorregamentos em cunha (Guidicini e Nieble, 1984).

Escorregamentos rotacionais são caracterizados pela separação do talude do material movimentado por uma superfície que mais se aproxima a um arco de circunferência, conforme ilustrado pela Figura 2.

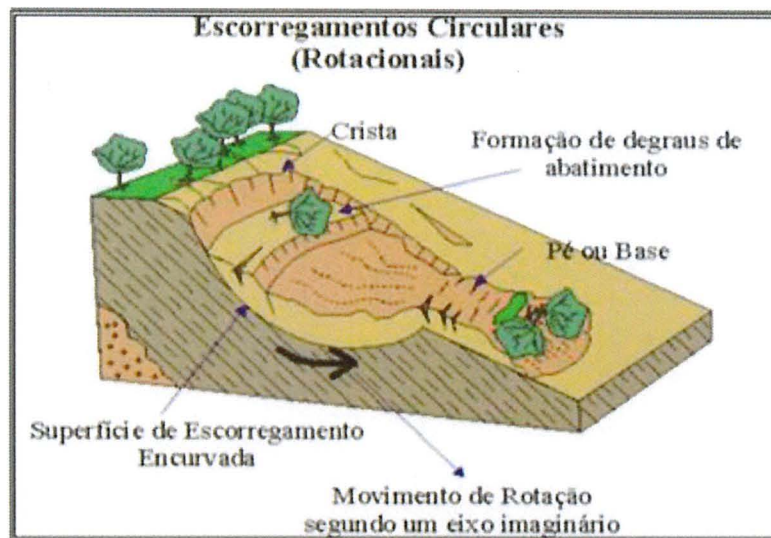


Figura 2 - Esquema de escorregamento rotacional. Extraído de Wiggers (2013), modificado de Infanti Jr. e Fomasari Filho (1998).

Escorregamentos translacionais podem ocorrer em taludes menos inclinados do que aqueles em que se desenvolvem escorregamentos rotacionais. Formam superfícies de ruptura de geometria aproximadamente planar, associadas à anisotropias e heterogeneidades existentes em maciços rochosos e em solos, como mostra a Figura 3. Tais heterogeneidades são originadas a partir de processos geológicos, hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos (Guidicini e Nieble, 1984; Tominaga, 2009).

Escorregamentos em cunha ocorrem quase exclusivamente em regiões onde o manto de alteração é pouco espesso e o relevo é fortemente controlado por estruturas geológicas. Sua movimentação ocorre quando duas estruturas planares (como falhas, por exemplo) se intersectam em um eixo de maneira desfavorável à estabilidade do talude, e então por alterações nas forças de resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante por fatores diversos, acontece a movimentação da cunha ao longo do eixo de intersecção (Tominaga, 2009).

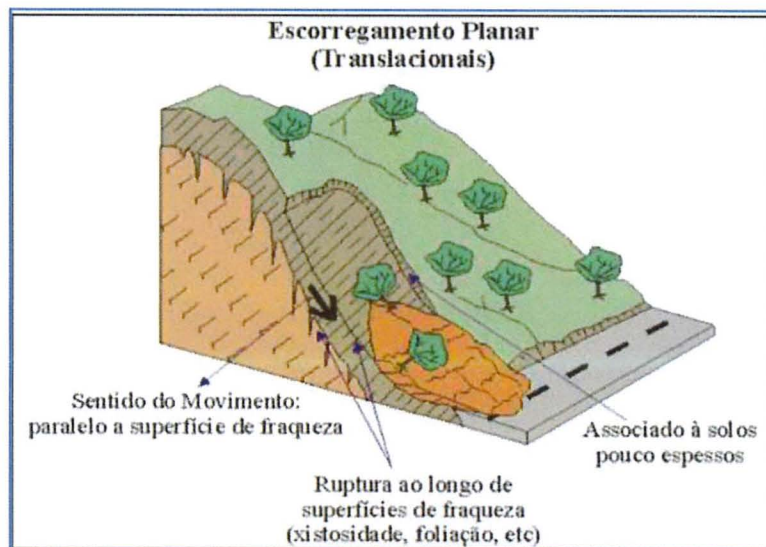


Figura 3 - Esquema de escoamento translacional. Extraído de Wiggers (2013), modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

Quedas de blocos ou detritos é uma ação de queda livre a partir de uma elevação, sem ocorrência de movimentos de superfície. Segundo Guidicini e Nieble (1984), quedas são ocasionadas por diversos fatores, nos quais podemos citar variações térmicas do maciço, erosão por meio aquoso, alívio de tensões, entre outros, podendo também ser resultado da combinação de fatores.

Corridas são movimentos de massa rápidos que mostram comportamento de fluido de alta viscosidade. O solo passa a se comportar como um líquido principalmente por adição de água, ultrapassando assim o limite de liquidez do material, ou por efeito de vibrações originadas naturalmente ou de forma antrópica. Carregam consigo materiais de natureza diversa, desde vegetação a rochas e construções, como mostrado na Figura 4. Apresentam o maior poder de destruição entre os movimentos devido a ampla área que afeta e à energia do fenômeno, que atinge velocidades de metros por segundo.

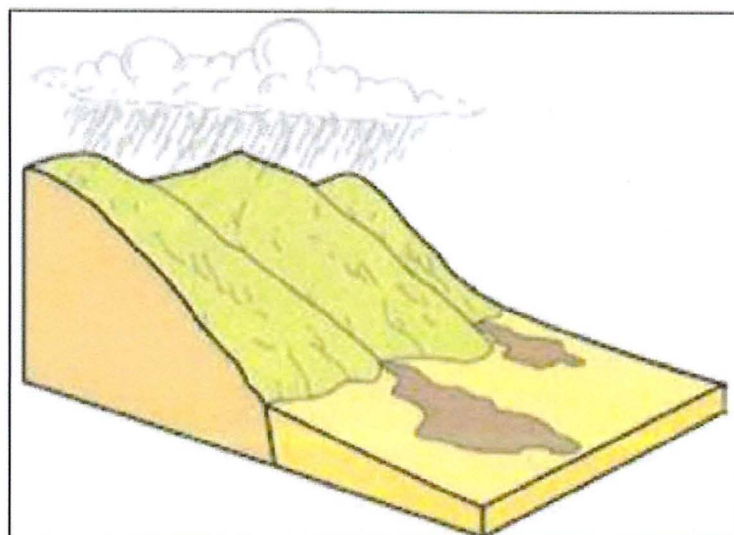


Figura 4 - Esquema de corrida de massa (flow). Extraído de Lopes (2006).

3.1. Métodos de monitoramento geotécnico

Diversas técnicas utilizando diferentes tipos de instrumentos foram desenvolvidas para realizar monitoramentos geotécnicos em campo, desde simples métodos de pesquisa à complexos aparelhos que fazem medidas de pressão e deformação (Hanna, 1985).

A instrumentação geotécnica de taludes tem como objetivo verificar o comportamento deste ao longo do tempo. Segundo Kennedy (1971), a instrumentação de taludes se faz necessária por duas principais razões: verificar se um talude se comporta de acordo com o que para ele foi previsto e fazer acompanhamento e predições de um talude que se mostra no início de ruptura ou se movendo. Hanna (1985) lista diversos tipos de instrumentação, cujas medidas obtidas permitem diversas formas de controle de estruturas geotécnicas. Entre elas se encontram instrumentos usados para medidas de movimento de solo (*groundmovement*), que segundo o próprio autor é possivelmente a medida mais comum obtida em instrumentação de campo. As medidas de movimento geralmente constituem-se em subsidência e soerguimento, movimentos laterais, mudanças de posição e mudanças de dimensões.

Franklin e Denton (1973) sintetizam alguns métodos e aparelhos para realizar medidas em campo tanto para solo como para rochas, separando em dois grupos distintos quanto à natureza das medidas que fornecem: métodos de medição direta de movimentos e métodos de medição indireta de movimentos.

Entre os métodos de medição direta podemos citar o levantamento topográfico, fotogrametria aérea e terrestre, extensômetros de superfície e instrumentos de subsuperfície.

O levantamento topográfico é realizado utilizando teodolitos e trenas para verificar a colinearidade entre marcos superficiais anteriormente colocados e alinhados, fornecendo informações sobre movimentações a partir da mudança de posição dos marcos.

Os métodos fotogramétricos mais antigos, datados do final da década de 60, apresentam menor precisão em suas medidas se comparados com os métodos topográficos, porém abrangem uma grande área de monitoramento. Neste método, diversas fotografias são tiradas ao longo de um certo intervalo de tempo a partir de um ponto fixo. Em seguida, essas imagens são examinadas em um estereocomparador, onde será determinado se houve ou não movimento e até mesmo sua magnitude. O grande problema deste método se encontra em pequenos erros nos alinhamentos das fotos na hora da comparação e na colocação da câmera em campo, ou seja, é um método muito dependente do processo de ajuste (Hanna, 1985).

Métodos de monitoramento de subsuperfície são talvez os mais comuns e confiáveis métodos empregados. Muitas vezes existem situações em que que medições superficiais não são práticas, por falta de marcos referenciais permanentes (Hanna 1985), sendo necessário o uso de instrumentos de subsuperfície. A instrumentação deste tipo de monitoramento envolve diversos instrumentos, listados em Hanna (1985). Fornecem medidas de deslocamentos e deformações internas aos taludes, obtidas por meio de instrumentos que medem a separação entre pinos de referência e variações na tensão (extensômetros e medidores de tensão), instrumentos capazes de medir pequenas variações de elevação entre dois pontos (tiltômetros) e instrumentos que fornecem dados referentes a desvios verticais (inclinômetros) e a desvios horizontais (deflectômetros) (Hanna 1985).

Os métodos de medição indireta de movimentos consistem em medidas que não se baseiam em observações nas alterações na forma e geometria do talude, sejam estas internas ou externas. São caracterizadas por observações de condicionantes de estabilidade de taludes e suas mudanças, ou seja, monitoram as causas da instabilidade dos taludes que provocam os movimentos de massa e por

isso podem alertar sobre movimentações antes mesmo que ocorram ou sejam detectadas pelos métodos diretos (Franklin e Denton, 1973).

Travelletti et al (2012), por sua vez, separam os métodos de monitoramento de deslocamentos de encostas em dois grandes grupos: métodos geodésicos e técnicas de sensoriamento remoto (que incluem o uso de fotogrametria digital). O primeiro consiste na utilização de marcadores tanto externos quanto internos ao talude a fim de realizar medições quanto a variações topográficas por meio de alterações de parâmetros geométricos como ângulo, distâncias e diferenças de elevação. Embora tenham a vantagem de apresentar alta precisão e grande facilidade na automação na fase de aquisição dos seus dados, devido à grande discrepância de taxas de movimentação de encostas ao longo do tempo associadas a diversos fatores, este método apresenta informações pontuais discretas do deslocamento e também apresentam alto custo de instalação e manutenção, o que restringe sua aplicabilidade somente a áreas onde o risco à população é de fato alto.

As técnicas de sensoriamento remoto, por sua vez, apresentam custos mais baixos se comparados a métodos geodésicos, e apresentam a capacidade de discriminar áreas estáveis de instáveis em mapas de escalas desde locais a regionais, uma vez que informações podem ser coletadas por meio de equipamentos colocados em plataformas terrestres, instalados em aeronaves ou satélites. Travelletti et al. (2012) apontam que a crescente melhora ao longo das últimas décadas de técnicas terrestres, entre elas a *Terrestrial Optical Photogrammetry* ou TOP, para monitoramentos de escalas locais mostram diversas vantagens em relação a técnicas baseadas em imagens obtidas por aeronaves e satélites, como a maior flexibilidade e adaptabilidade a distintos ambientes no quesito de geometria e frequência de aquisição dos dados, e ainda a instalação permanente de uma estação de monitoramento permitindo monitoramento contínuo de encostas.

Entre os métodos indiretos destacados por Franklin e Denton (1973), existe a medição de pressão e nível da água. A água é um importante fator condicionante da instabilidade de taludes, uma vez que exerce grande influência na resistência ao cisalhamento da massa com possibilidade de movimento, em uma relação em que quanto maior o grau de saturação do material (maior nível piezométrico), menor a resistência ao cisalhamento e a coesão. O nível da água pode ser facilmente monitorado por meio de piezômetros (Guidicini e Nieble, 1984).

A medição de cargas e pressões em estruturas de contenção se faz necessária para avaliar a situação do talude, se está caminhando para condições de maior ou menor estabilidade, devido principalmente a mudanças nas tensões aplicadas no talude, mudanças estas que podem provocar movimentos de massa. Os instrumentos utilizados são células de carga, equipamentos que medem as variações de cargas aplicadas sobre as estruturas de contenção.

Mais recentemente, técnicas mais sofisticadas de monitoramento geotécnico utilizando diversos equipamentos, entre eles câmeras fotográficas foram desenvolvidas. McHugh e Girard (2003) apresenta três técnicas distintas para monitoramento de quedas de rochas e movimentos em taludes: uma que faz uso de um imageador hiper-spectral terrestre, outra baseada no uso de um radar interferométrico e uma terceira técnica que se utiliza de câmeras para obtenção de fotografias.

3.2. Fotogrametria

Fotogrametria trata-se da ciência que se utiliza de imagens, neste caso, fotografias para realizar medições. A palavra é derivada do grego *photon*, significando luz, *grafos*, que significa escrita e *metron*, medida (Coelho e Brito, 2007). As primeiras aplicações de fotogrametria em geotecnia datam da década de 1960, quando ocorreu o início da implementação de computadores no processamento das imagens. Por se tratar de um processo lento e complexo, não teve muitas aplicações neste período, contudo, com o avanço da tecnologia e surgimento de recursos como fotografias digitais e computadores mais potentes, as análises relacionadas a fotogrametria se tornaram mais fáceis e acessíveis (Viana, 2015).

Os primeiros usos de fotogrametria, embora hoje seja associada com fotografias e câmeras fotográficas, datam de bem antes de suas invenções, de meados do século XV, onde Leonardo Da Vinci se utilizava de seus princípios para o uso em desenhos com perspectiva.

Com a invenção da fotografia em 1826 pelo francês Joseph Niépce, teve início o desenvolvimento e evolução da fotogrametria, podendo esta ser dividida em quatro períodos distintos: Fotogrametria pioneira (1840-1900); Fotogrametria analógica (1901-1950); Fotogrametria analítica (1951-1990) e Fotogrametria digital (1990- atualmente) (Coelho e Brito, 2007).

O primeiro período, designado como fotogrametria pioneira, sucedeu a invenção da fotografia. Em 1840 algumas ideias foram inicialmente propostas, como a de Argo, que empregava o uso de fotografias para levantamentos topográficos, mas somente em 1851 que as primeiras técnicas e princípios foram desenvolvidas por Aimé Laussedat, conhecido como o “Pai da Fotogrametria” (CPT 2008). Em 1849 ele se utilizou de fotografias terrestres para fins de mapeamento topográfico.

No início do século XX, o primeiro estereocomparador foi desenvolvido por Pullfrich, marcando o início do segundo período da fotogrametria. Tal aparelho facilitava o trabalho com as imagens, já que substituía os diversos cálculos a serem realizados por aparelhos óptico-mecânicos (Coelho e Brito, 2007). Outro importante avanço deste período que também impulsionou a evolução da fotogrametria foi a invenção do avião, sendo que em 1909 a primeira fotografia aérea, tirada a partir de um avião, foi feita por Wilbur Wright. Foi também neste período que importantes associações foram criadas, como a *International society for Photogrammetry* (ISP), atual ISPRS, foram fundadas.

Com a invenção do computador durante a segunda guerra mundial, deu-se início ao período da fotogrametria analítica. A grande quantidade de cálculos, anteriormente substituídos por aparelhos mecânicos, passaram a serem feitos de maneira computacional, facilitando e agilizando ainda mais os processos envolvidos (Coelho e Brito, 2007). As bases da fotogrametria analítica foram estabelecidas nessa época por Helmut Schimdt em 1953.

Durante os anos 80, com o advento de imagens digitais, teve o surgimento da fotogrametria digital, cuja grande inovação foi a utilização de imagens digitais como a principal fonte de dados. Nos anos 90, com o desenvolvimento e avanço dos computadores, câmeras fotográficas e *scanners*, o processamento e obtenção de imagens foi facilitado, permitindo-se assim uma maior quantidade de dados que poderiam ser adquiridos.

3.3. Fotogrametria Digital

Segundo Coelho e Brito (2007), entende-se por fotogrametria como a ciência e tecnologia de se obter informação confiável por meio de imagens geradas por sensores. A princípio as imagens eram obtidas por meio de sensores analógicos, apresentando problemas com relação a resolução ou nitidez, dificultando a distinção dos vários objetos fotografados. Associado com este problema, ainda existia a falta

de capacidade de processamento dos computadores, dificultando ainda mais a obtenção de informações (Coelho e Brito, 2007).

Com o advento dos sensores digitais, as informações que podiam ser adquiridas por meio das imagens aumentaram, bem como a facilidade de processamento graças a sistemas computacionais mais avançados. Surgiu assim a fotogrametria digital, podendo ser interpretada como a ciência e tecnologia de se obter informação confiável por meio de imagens digitais geradas por sensores.

O objetivo principal da fotogrametria trata-se de uma transformação entre dois sistemas, sendo eles o sistema bidimensional (fotográfico) e o sistema tridimensional, o próprio espaço-objeto (entende-se por espaço-objeto qualquer objeto ou espaço tridimensional a ser imageado). Ou seja, trata-se da reconstrução do espaço por meio de imagens bidimensionais, no caso, fotografias, através do efeito da estereoscopia, efeito este que ocorre quando duas imagens apresentam uma certa superposição entre elas, sendo esta obtida por meio de duas imagens adquiridas quando em paralaxe (Coelho e Brito, 2007). Entretanto, embora técnicas tridimensionais sejam as mais comuns, fotogrametria utilizando apenas imagens adquiridas sem paralaxe ainda possui grande aplicação, como mostra Travelletti et al. (2012), onde utilizam conjuntos de imagens sem estereoscopia, obtidas ao longo de um certo intervalo de tempo para identificar deslocamentos de material na região dos alpes franceses.

3.4. Sensoriamento remoto aplicado a movimentos de massa.

O sensoriamento remoto é um dos recursos indiretos mais indispensáveis na obtenção de informações para realização de mapas de cunho geológico-geotécnico, sendo empregados principalmente sensores orbitais (satélites) e aéreo. Pode-se dividir a aplicação de sensores remotos para a investigação de movimentos de massa em três etapas distintas: detecção e classificação dos movimentos; monitoramento de áreas sensíveis; e análise espacial e temporal de áreas de risco sujeitas a movimentos (Lopes e Arruda, 2015).

Para a primeira etapa, detecção e classificação dos movimentos de massa, são geralmente utilizados sensores montados em aeronaves, devido a velocidade de resposta, podendo programar voos logo após a ocorrência de fatores que desencadeariam movimentações de encostas. Além de aerolevantamentos, também podem ser empregados nesta fase imagens obtidas por satélites ópticos de alta resolução, aplicáveis quando a cobertura de nuvens é baixa; imagens de radar,

aplicáveis mesmo em condições de alta nebulosidade; imagens de drone; e imagens estereoscópicas, que permitem análises tridimensionais. Durante esta etapa é necessário que se identifique a geometria, o tipo e a profundidade do movimento ocorrido, bem como a inclinação do talude ou encosta onde aconteceu o evento (Lopes e Arruda, 2015).

A segunda etapa consiste no monitoramento das regiões onde houve movimentação do terreno. Serão obtidas nesta fase informações como extensão em área, velocidade do movimento e alterações topográficas do movimento de massa. São utilizadas várias técnicas, sendo as principais imagens de satélites ópticos e radar, onde alterações no terreno são identificadas em imagens obtidas antes e depois de eventos; Sistema Global de Navegação por Satélite, onde uma rede de sensores permite delimitar a área em movimento na ordem de centímetros por ano; e por fim, estereofotogrametria, que permite a análise tridimensional da área a ser monitorada (Lopes e Arruda, 2015).

A última etapa, definida como análise espacial e temporal de áreas de risco, consiste na construção de mapas de risco que contenham informações como probabilidade espacial, probabilidade temporal, tipo, magnitude e velocidade do movimento da massa. Essas informações são úteis para a prevenção e planejamento, a fim de evitar danos relacionados a possíveis eventos futuros. É importante ressaltar que estes mapas representam a probabilidade de ocorrência do fenômeno, não certeza (Lopes e Arruda, 2015).

3.4.1. Aplicações de fotogrametria 2D em estudos de encostas

Travelletti et al. (2012) propõem um método de monitoramento de encostas instáveis utilizando fotogrametria 2D para se obter informações sobre deslocamentos sofridos na mesma. Em seu trabalho, uma encosta localizada nos Alpes franceses, já monitorada por métodos geodésicos através de GPS diferencial, foi usada para testes de monitoramento permanente por meio do que chamam de *Terrestrial Optical Photogrammetry*.

O método proposto consiste em usar técnicas de correlação entre duas imagens obtidas em momentos distintos, fazendo uso de feições no solo presentes em áreas estáveis, que não mostraram deslocamentos, para a sobreposição destas. O deslocamento da encosta pode ser observado ao se identificar distorções em padrões do solo do talude monitorado. Para se quantificar a movimentação sofrida é necessário que se estabeleça uma das imagens, geralmente a mais antiga, como a

referência inicial. Em seguida, assumindo-se que não ocorreu mudança de posição do ponto de aquisição das imagens, os deslocamentos são medidos entre as duas imagens por processo automatizado que verifica as mudanças pixel a pixel entre as fotografias. Devido a aquisição oblíqua das imagens em relação a movimentação de massa, as distâncias medidas entre as fotografias não podem ser interpretadas como deslocamentos reais em escalas métricas, sendo necessário a ortorretificação com um modelo digital de terreno de alta resolução, obtido por LiDAR, a fim de se obter medidas quantitativas para o campo de deslocamentos. Por fim, os dados obtidos são comparados com aqueles adquiridos pelo GPS diferencial previamente instalado.

Os resultados obtidos através do monitoramento com câmera proposto permitiram identificar deslocamentos de 3 m dia^{-1} em períodos de aceleração e $0,02 \text{ m dia}^{-1}$ durante o período de desaceleração, resultados estes de acordo com a cinemática conhecida para a encosta estudada e com os dados de GPS. Para distâncias maiores, entre 300-900 metros mostraram grande variação no tamanho do pixel de acordo com a resolução da câmera e com o ângulo de incidência da linha de visada. Áreas onde este ângulo é inferior a 5 graus mostraram alta sensibilidade a movimentos da câmara, sendo recomendado um posicionamento mais perpendicular possível ao vetor de deslocamento. A maior fonte dos erros encontrados neste método é referente a pequenos movimentos da câmera e ao uso de um modelo digital de elevação (MDE) mono temporal, podendo ser corrigidos com uma aquisição regular de MDE e uso de imagens estereoscópicas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto fez uso de fotografias tiradas por meio de um aparelho celular, posicionado em pontos fixos e utilizando pontos de referências posicionados em um modelo físico criado em laboratório. O modelo físico, montado em laboratório, utilizou um solo residual de gnaiss obtido no campus na USP. O talude criado teve sua movimentação induzida pela presença de água e carregamento. As imagens obtidas foram processadas em um *software* onde foi possível fazer medidas de movimentação do mesmo.

Antes da aplicação ao caso do modelo físico do talude o *software* foi avaliado por meio de medidas preliminares de objetos com tamanhos conhecidos, verificando-se a precisão e resolução do *software* para diferentes distâncias permitindo encontrar uma distância ótima na qual poderá ser posicionado o aparelho celular para monitoramentos em campo.

4.1. Características da câmera do celular

Foi utilizado no projeto para a obtenção das imagens um telefone celular Asus Zenfone 3 (ZE520KI), equipado com um sensor Sony IMX298 de 16 MP, com imagens de tamanho 4656x3492.

4.2. O software ImageJ

O ImageJ é um *software* em Java de domínio público de processamento e análise de imagens, inspirado no programa NIH image para Mac. O programa trabalha com diversos formatos de imagem, como JPEG, TIFF e GIF. O *software* permite o cálculo áreas, medição de distâncias e ângulos, cria gráficos de acordo com as informações da imagem. O ImageJ permite ainda tratamento da imagem com funções de processamento básico, como manipulação de contraste, suavização, entre outros (Ferreira e Rasband, 2012).

O *software* ImageJ possui uma ferramenta denominada *stack*, a qual permite o empilhamento de diversas imagens, a fim de permitir a visualização de várias delas por alternância. Se as fotografias foram obtidas adequadamente, elas estarão alinhadas quando realizar o *stack* entre elas. Caso haja algum deslocamento, este pode ser corrigido manualmente dentro do próprio programa. Com as imagens empilhadas, sempre em pares, um anterior e um posterior, é preciso determinar a escala a ser trabalhada. Para tanto é necessário que na fotografia exista um objeto de dimensões conhecidas. O ImageJ permite que, através de uma linha de tamanho real conhecido, possa se determinar quanto de distância um pixel representa. A partir deste procedimento, basta traçar qualquer linha no plano da fotografia, que a distância será determinada.

4.3. O software para análise de estabilidade de talude

O GeoStudio trata-se de um conjunto de *software* voltado para análises geotécnicas de diversas naturezas, entre elas a análise de estabilidade de taludes. A rotina para análise de estabilidade de taludes por equilíbrio limite denomina-se Slope/W e foi utilizada neste projeto para a avaliação do fator de segurança do talude artificial montado em laboratório. O software é um comercial, mas permite o uso na versão estudante, que possui funções limitadas. O procedimento de uso do software está descrito no item 4.4.

4.4. Modelo físico

O modelo físico utilizado foi montado conforme o modelo computacional obtido pelo Slope/W, em um tanque de acrílico cuja altura é 90 cm, largura 115 cm e espessura de 3 cm. Utilizou-se um solo previamente coletado pelo laboratório de mecânica dos solos, arranjado em camadas de 10 cm de altura, de forma a se atingir 80 cm de altura. Entre as camadas foram dispostos alguns marcadores feitos a partir de giz para quadro negro, a fim de se poder monitorar o deslocamento destes durante o colapso do modelo.

4.5. Solo utilizado

O solo utilizado neste projeto foi coletado pelo laboratório de mecânica dos solos da escola politécnica da Universidade de São Paulo e foi obtido próximo ao portão 3 do campus Butantã da Universidade de São Paulo, localizada na zona oeste do município de São Paulo – SP. Tal solo mostra uma granulometria predominantemente siltosa, sendo que cerca de 60% de seus grãos se encontram nesta faixa de tamanho, 9% na fração argila e o restante (31%) na faixa granulométrica das areias.

O limite de liquidez calculado foi de 47% de umidade, porém o limite de plasticidade não foi possível de se determinar devido a pouca quantidade de argila no solo. Por fim, foi-se determinada a densidade dos grãos em $2,7355 \text{ g/cm}^3$ e densidade máxima seca em $1,594 \text{ g/cm}^3$

5. RESULTADOS OBTIDOS

O projeto foi dividido em quatro partes: calibração das imagens, análise de estabilidade do modelo físico, montagem do modelo físico e o monitoramento do modelo físico por meio de fotos. Descreve-se a seguir os resultados obtidos em cada uma destas etapas.

5.1. Calibração das imagens

Praticamente todos os aparelhos celulares fabricados hoje em dia são providos de câmeras fotográficas capazes de tirar fotos de qualidade suficiente para serem processadas e medidas pelo método proposto.

Para a etapa de verificação da precisão do *software* de acordo com a distância, foi decidido utilizar um cartaz com uma pequena malha de pontos de distâncias reais conhecidas, conforme mostrado na Figura 5. Para a verificação de fato, fotografias foram tiradas em distâncias de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 metros (Figura 6), para posteriormente realizar medições através do ImageJ e assim averiguar as distâncias máximas de posicionamento do telefone celular em campo sem que haja grande perda de informação por parte da obtenção de dados. Salienta-se que inicialmente foi feita uma tentativa de calibração utilizando-se uma régua em conjunto com um transferidor. Este processo se mostrou pouco acurado.

Na etapa de calibração das imagens foi utilizada uma malha regular de 20 pontos, espaçados por 10 centímetros entre si, cada ponto tendo 0,5 centímetros de diâmetro, e ainda foi adicionada uma escala de 10 cm para servir como parâmetro de calibração para medição de distâncias no ImageJ, como mostrado na Figura 5. Fotografias foram obtidas a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 metros de distância e posteriormente medidas pelo ImageJ.

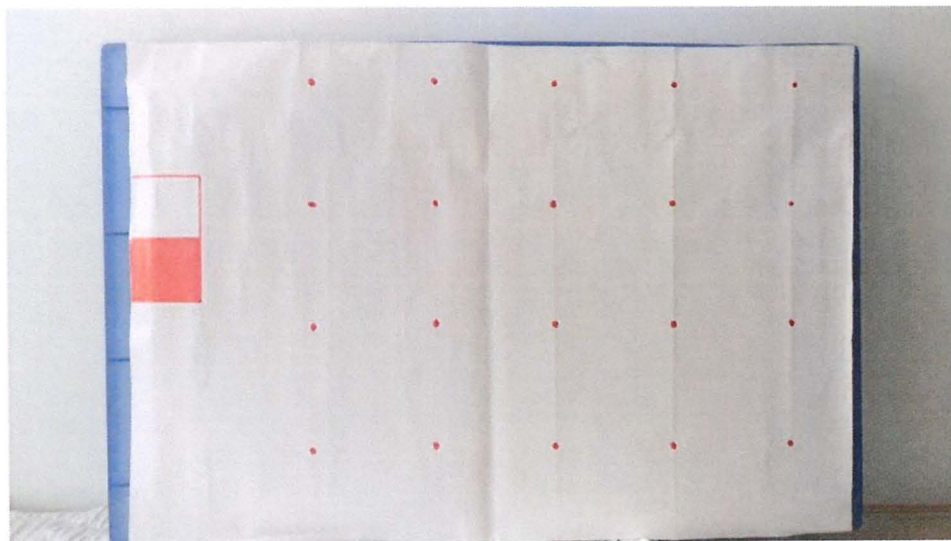


Figura 5 – Malha de pontos utilizada durante a etapa de calibração das imagens.

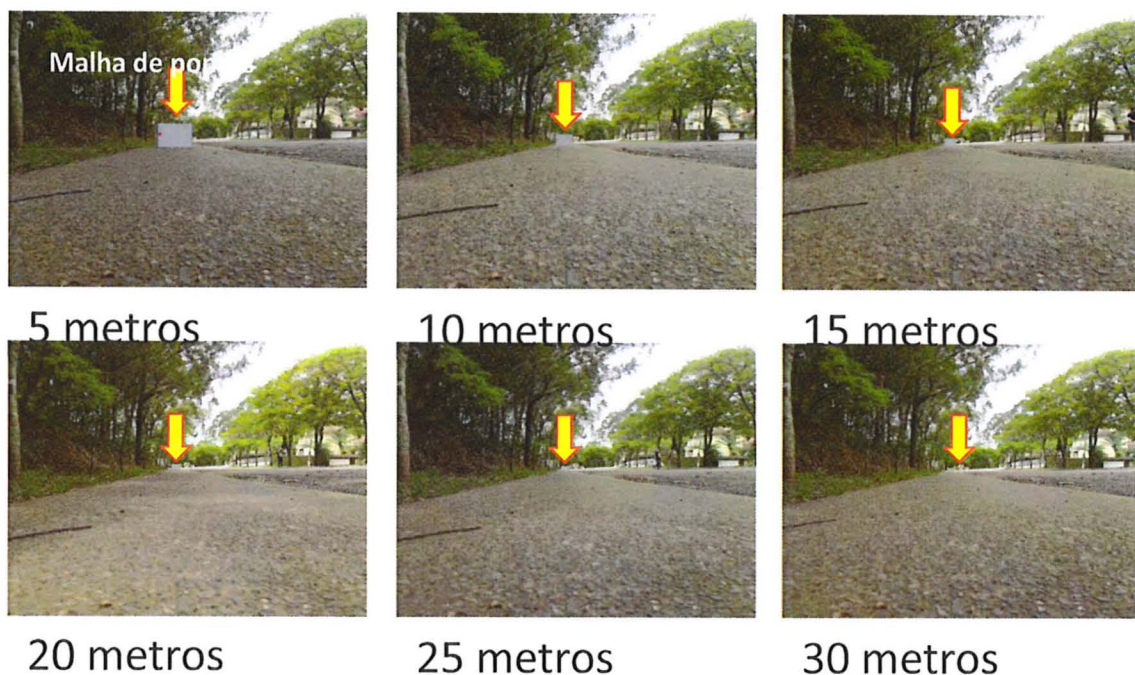


Figura 6 – Malha de pontos fotografada a diferentes distâncias.

Os resultados das medições, em termos de distância e porcentagem de erro sobre a distância real conhecida são apresentados na Figura 7.

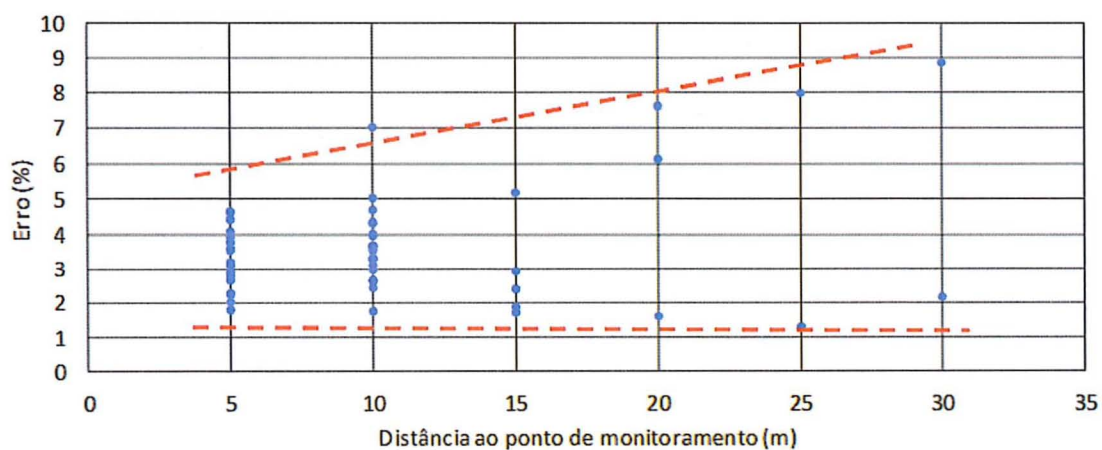


Figura 7 – Variação do erro com a distância. Os pontos azuis são referentes a porcentagem do erro em relação à distância real.

É possível observar que os erros obtidos durante as medições se apresentam em uma faixa constante, entre 1,2% e 9% do valor real esperado para todas as fotografias, entretanto a quantidade de pontos que podem ser observados e que permitem a retirada de medidas precisas cai rapidamente de acordo com a

distância, sendo possível verificar a posição de todos os 20 pontos nas fotografias referentes a 5 e 10 metros e apenas 3 pontos quando a câmera se localiza a 30 metros do objeto fotografado. Contudo, vale ressaltar que embora os pontos fossem quase invisíveis a 30 metros, a escala ainda podia ser vista com relativa facilidade.

Por meio das fotografias verifica-se também, além da quantidade de pontos que podem ser facilmente distinguidos, a quantidade de *pixels* que compõem cada um deles reduz com a distância também, sendo em torno de 30 *pixels* por ponto a 5 metros de distância a 4 *pixels* por ponto em 30 e 25 metros. A escala, colocada juntamente com a malha de pontos, passa de 75 *pixels* representando 10 centímetros na fotografia tirada a 5 metros, para 37, 24, 19, 15 e 13 *pixels* representando o mesmo comprimento nas demais fotografias tiradas na sequência. Tal comportamento mostra que o tamanho que um pixel representa na fotografia aumenta de forma exponencial com o inverso da distância, conforme ilustra a Figura 8.

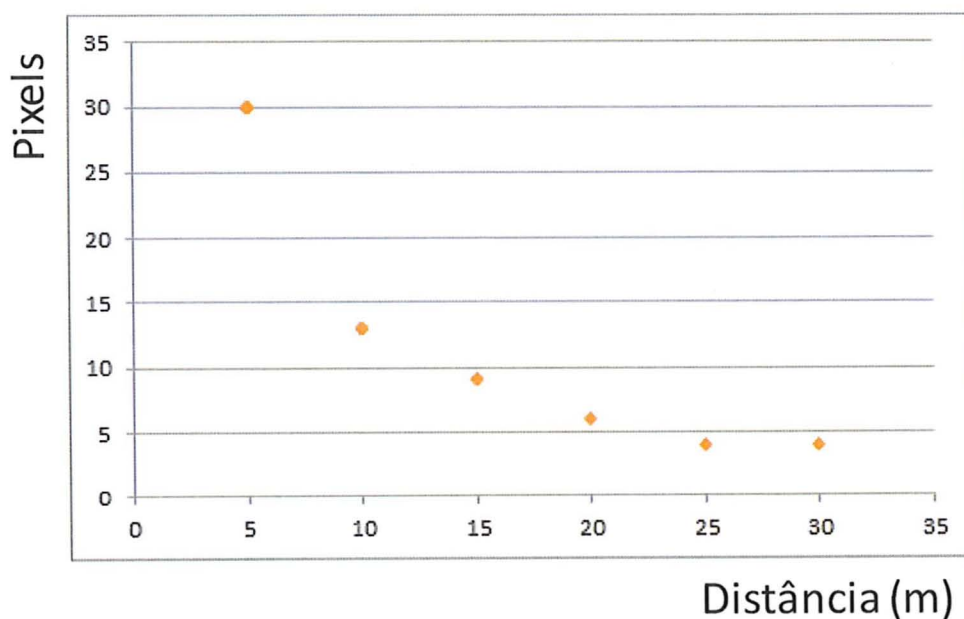


Figura 8 – Gráfico representando a quantidade de *pixels* que compõem 1 ponto vermelho da malha, pela distância (em metros).

5.2. Análise de estabilidade

Antes da execução do talude artificial em laboratório utilizou-se o *software* Slope/w da GeoStudio para avaliar a condição de estabilidade do talude criado. Neste programa foi modelado o talude com as dimensões do modelo (70 centímetros de altura por 80 centímetros de comprimento), como mostrado pela Figura 9. O modelo seria montado de forma a levar o fator de segurança abaixo de 1 pelo aumento da linha piezométrica, levando o talude a ruptura de modo a se possibilitar o monitoramento.

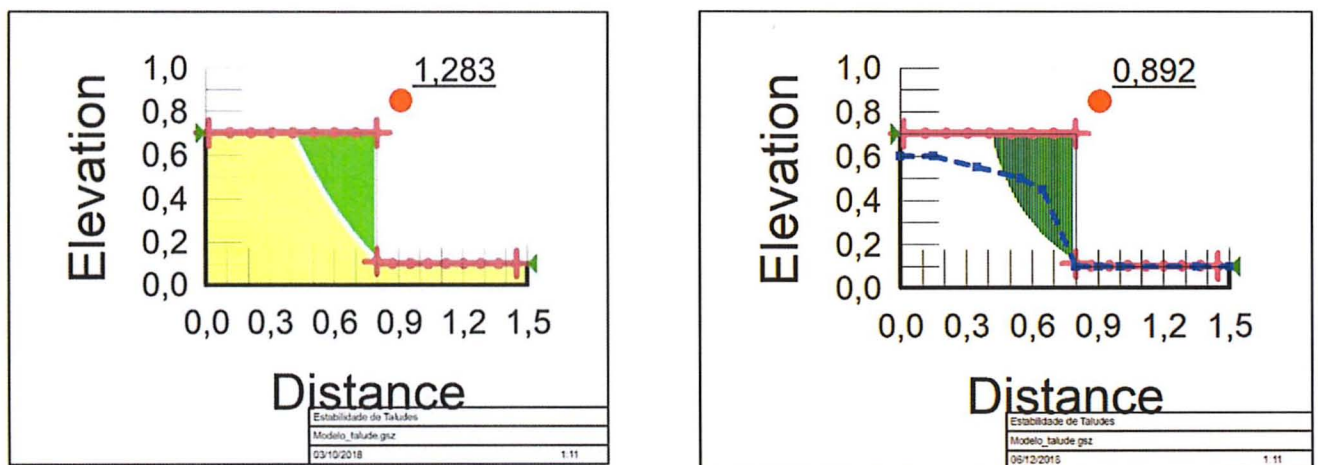


Figura 9 – (Esq.) Talude modelado pelo software GeoStudio. (Dir) Talude modelado pelo software GeoStudio com linha piezométrica.

5.3. Montagem do Modelo Físico

O solo foi preparado adicionando-se água e homogeneizando-se o material, conforme ilustra a Figura 10. O solo foi compactado de modo a obter uma densidade seca de $1,59 \text{ g/cm}^3$ utilizando-se um teor de umidade de compactação de 9.2%. O solo foi compactado em camadas de 10 cm.



Figura 10 – Preparação do solo a ser utilizado na montagem do talude

A montagem do modelo físico do talude, foi feita utilizando-se um tanque de acrílico com espessura de 3 cm, altura de 90 cm e largura de 115 cm, conforme ilustra a Figura 11. Na Figura observa-se a brita, usada para induzir a entrada de água no solo, o guia separador entre a brita e o solo, o solo compactado e a haste de compactação.



Figura 11 – Tanque de acrílico utilizado na construção do talude.

Para compactar o solo de modo a se obter um talude vertical, foi criada uma estrutura de madeira que foi removida após a compactação. Dentro do talude foram colocados elementos identificadores de posição. Inicialmente se utilizou segmentos plásticos, mas estes não se mostram efetivos para uma adequada visualização. Desta forma optou-se por utilizar segmentos de giz. Na Figura 12 está apresentado

o modelo já compactado, antes da introdução da água, onde se observa também os pontos de monitoramento.

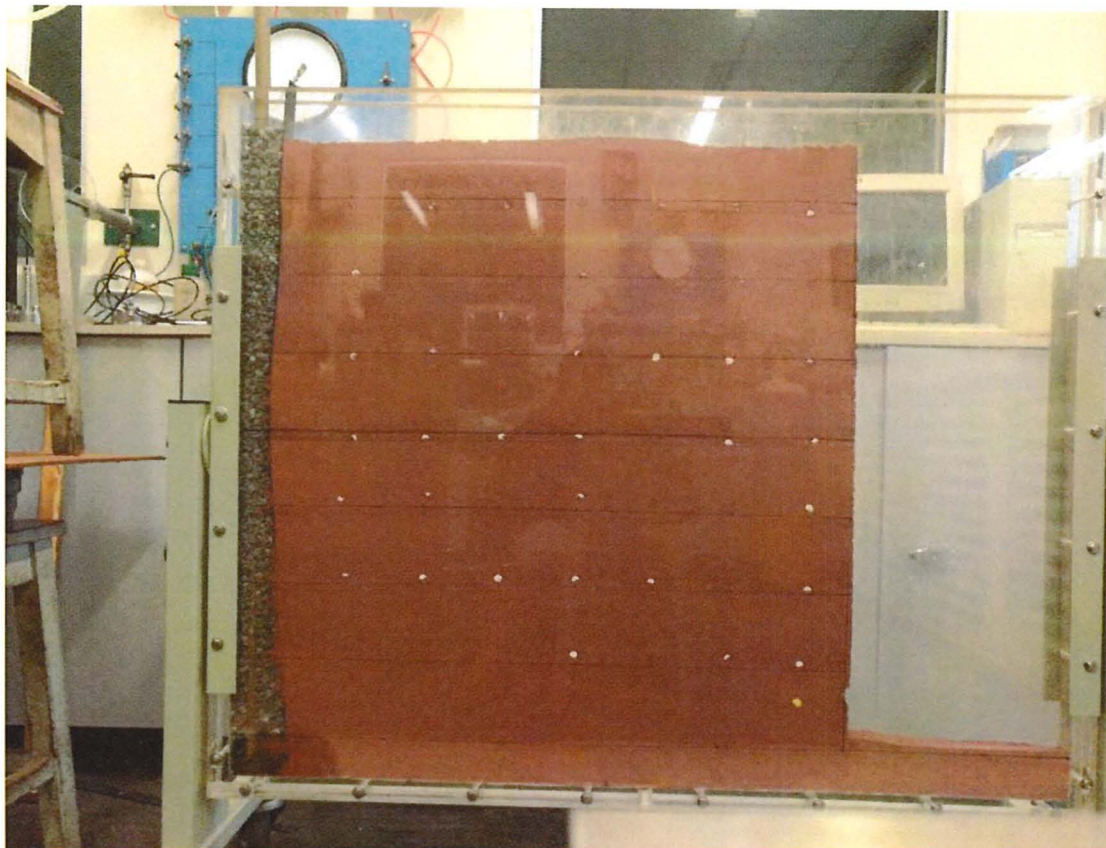


Figura 12 – Talude artificial completo, com o cascalho para controle do nível da água na esquerda e os marcadores em branco.

Após a montagem, a água foi introduzida por meio de um tubo colocado na base da brita que recebeu água por um sistema de vasos comunicantes. A água foi lentamente criando uma linha piezométrica.

A Figura 13 apresenta o avanço da frente de saturação. Nas imagens de A a D pode-se observar este avanço da água pelo interior do talude, identificado como a linha tracejada azul que se propaga da esquerda para a direita. Até chegar na posição indicada pela Figura 10D foram necessários 4 dias.

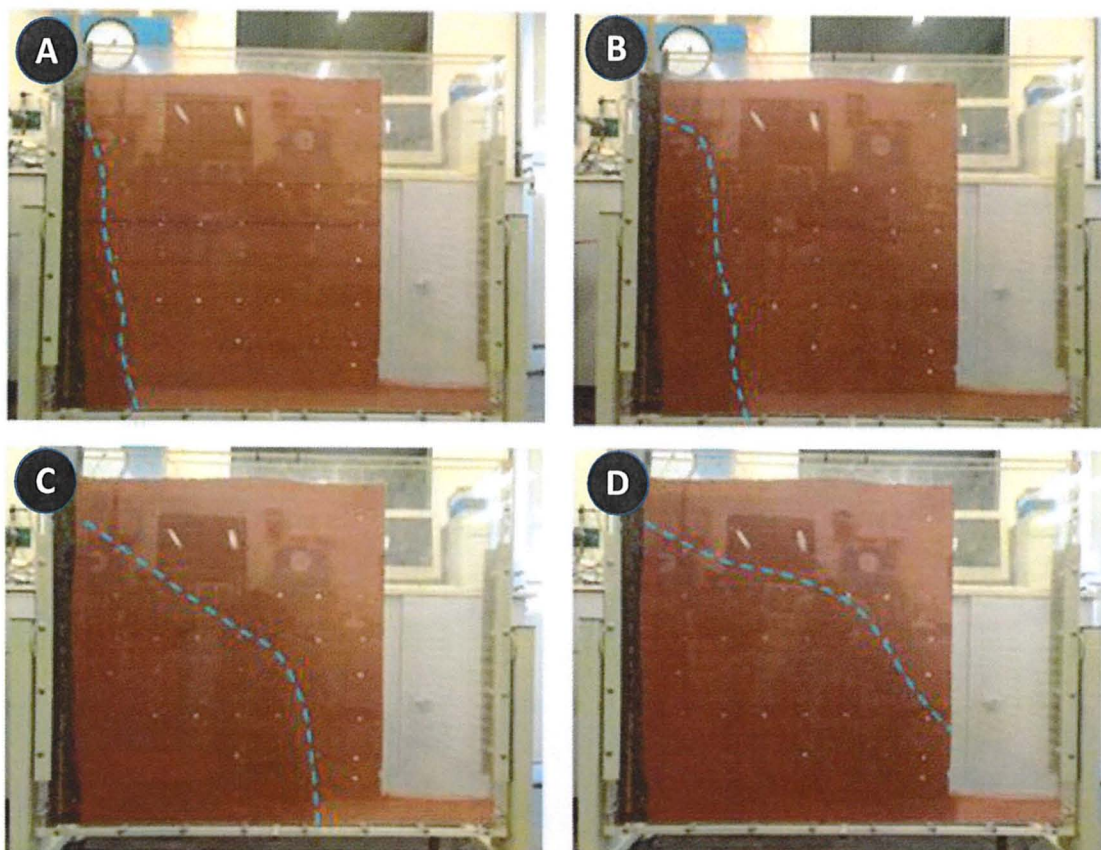


Figura 13 – Avanço da frente de saturação.

Embora se tenha feito uma retro-análise para determinar o nível freático que levaria a ruptura do talude, isto não foi observado. Este fato foi possivelmente devido ao excesso de adesão do acrílico com o solo. Esta adesão não é considerada pelo software. Desta forma procurou-se induzir algum tipo de movimentação por meio do excesso de água e aplicação de carga na superfície. Desta forma obteve-se um processo erosivo que permitiu o monitoramento do movimento.

O processo de movimentação foi induzido pela aplicação de carga e pelo aumento do nível de água a jusante, que induziu uma erosão no pé do talude. A Figura 14 ilustra algumas fases do que foi observado.

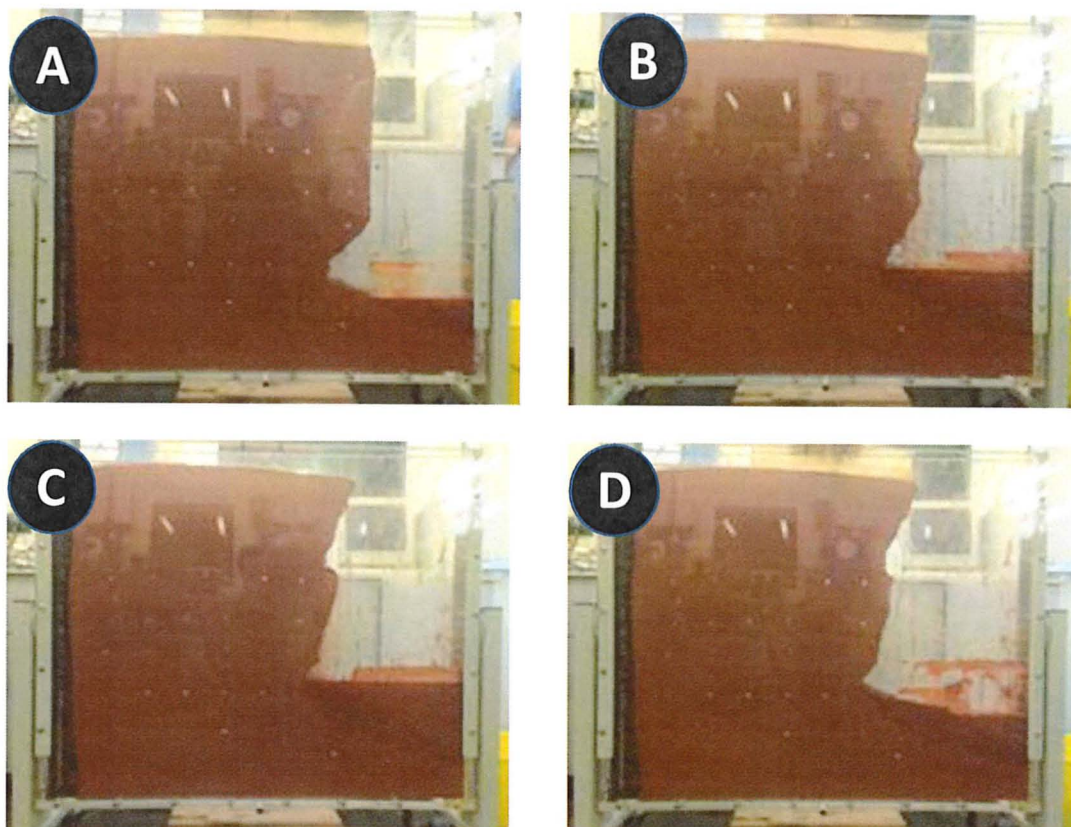


Figura 14 – Avanço do processo erosivo.

Para captura das imagens, utilizadas nas análises, posicionou-se o celular a uma distância de 1 m do tanque de acrílico de forma que este ficasse totalmente visível na tela do aparelho, e a 70 centímetros de altura do chão, tomando-se imagens de modo a tentar capturar os eventuais.

Antes de se identificar que o talude não iria romper, diversas fotografias foram tiradas do talude em sequência temporal, de modo a se capturar o momento do eventual colapso do talude. As imagens foram obtidas ao longo de 2 horas aproximadamente, em intervalos não regulares de tempo para a posterior análise pelo *software* ImageJ.

Inicialmente foram colocados marcadores no interior do talude para que se tivessem referenciais a fim de se realizar as medições de deslocamento da massa durante o colapso, entretanto estes não foram utilizados, visto que ao se adicionar água no sistema, este passou a sofrer erosão e não entrou em colapso. Desta forma, foi feito o monitoramento do avanço da erosão.

Para o monitoramento do avanço da frente de erosão, foram selecionados 4 pontos a partir da primeira fotografia da sequência, como mostra a Figura 15. As medidas foram sendo feitas da direita para a esquerda, conforme a frente de erosão avançava ao longo do tempo. A ruptura do talude não ocorreu da forma esperada, uma vez que a ruptura planar não se desenvolveu. Como mencionado foi necessária a indução de uma movimentação por meio de acréscimo de carga e por saturação de água do sistema.

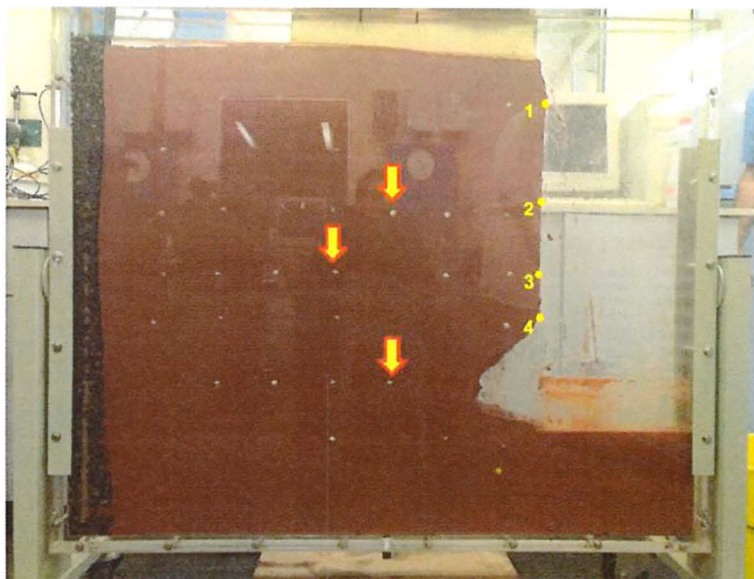


Figura 15 – pontos iniciais (em amarelo) a partir dos quais foram medidos o avanço da erosão.

Após a aquisição das imagens a partir da situação indicada na Figura 15, foram tomadas imagens para análise. A Figura 16 apresenta os deslocamentos inferidos ao longo do tempo para quatro ponto (indicados na foto).

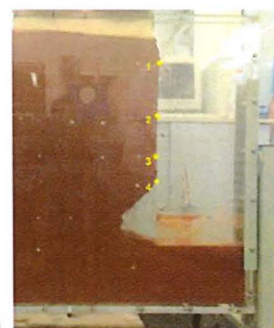
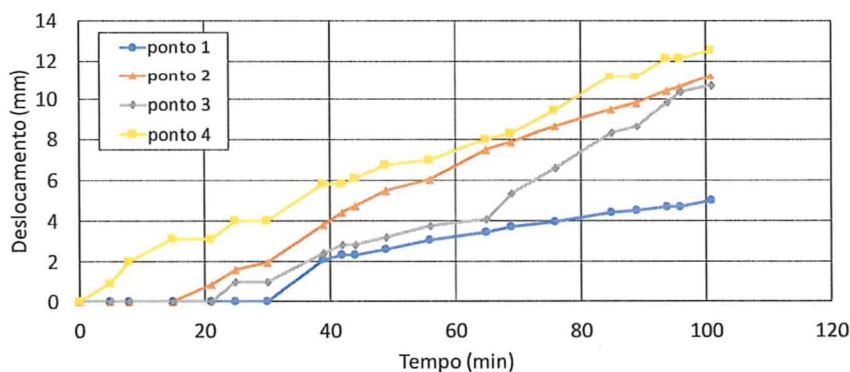


Figura 16 – Gráfico de deslocamento ao longo do tempo

Observa-se no gráfico da Figura 16, e pelas fotos anteriormente apresentadas que partes da frente do talude se movimentaram de forma variável. Houve

momentos onde não foram observadas movimentações significativas e outros em que o movimento foi rápido. O monitoramento foi capaz de captar velocidades da ordem de 0,3 mm/min.

Além das medidas de avanço da erosão, características qualitativas também podem ser observadas, como é o caso de uma pequena deformação sofrida no topo do talude devido a aplicação de uma carga colocada de forma a induzir a ruptura, como mostra a Figura 17.

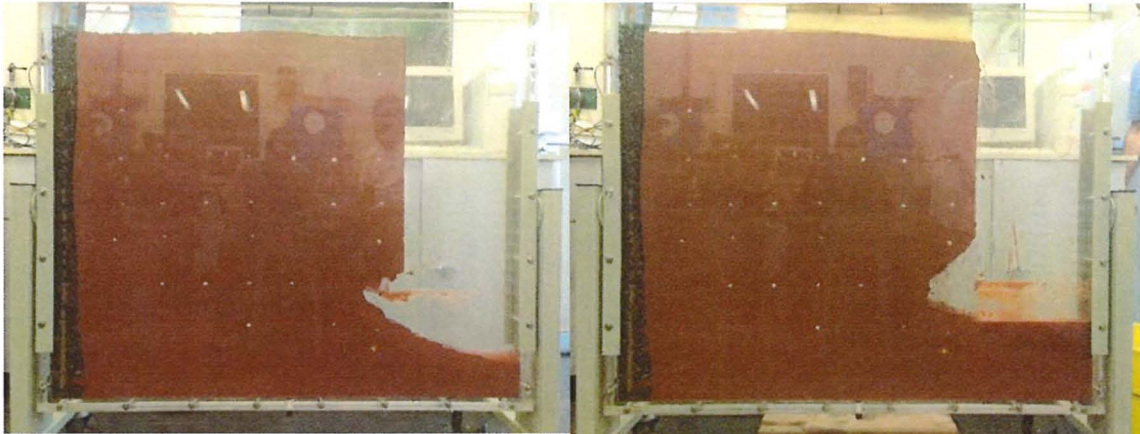


Figura 17 – Imagem ilustrando a deformação sofrida no talude por acréscimo de carga (bloco de madeira sobre o canto superior direito do topo do talude).

5.4. Dificuldades surgidas e alterações nos objetivos originais

A proposta inicial do projeto consistia na calibração das imagens em laboratório seguida pelo monitoramento em campo de um talude real, por meio de fotografias tiradas pelos moradores locais e enviadas para análise. A primeira área a ser monitorada localizava-se no bairro Butantã, entretanto, por motivos de segurança esta área foi descartada e por volta do final do mês de junho uma nova região foi proposta na região do Sapopemba, porém pelos mesmos motivos da área anterior a região também foi descartada. Optou-se, portanto, pelo uso de um modelo físico de laboratório.

É importante salientar alguns aspectos que tiveram que ser superados durante o estudo:

- A execução do modelo físico exigiu a construção de um sistema de escoramento para se obter um talude vertical.
- O processo de compactação teve que ser feito em camadas separando-se o sistema de entrada de água do solo compactado.

- O modelo físico não foi adequadamente representado pelo estudo de estabilidade por equilíbrio limite tendo em vista a adesão criada entre o solo e o acrílico.
- Foi necessária a indução da movimentação com uso de carga e água, de modo a permitir o monitoramento de algum movimento.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir das análises feitas a respeito da calibração das imagens pode-se averiguar que a colocação dos aparelhos é possível de ser feita a distâncias relativamente grandes dos taludes a serem monitorados, uma vez que a precisão das medidas é pouco afetada. Porém deve-se evitar a tomada de objetos de dimensões pequenas como referenciais para a realização das medidas, já que sua distinção pode ser comprometida devido a resolução do aparelho a ser utilizado.

Durante a fase de posicionamento do telefone celular em campo, deve ser levado em conta também o tipo de movimento de massa envolvido, a fim de se aplicar o melhor método de monitoramento possível (Lopes e Arruda, 2015).

A eficiência do método proposto aplica-se a movimentos de escala local, devido a resolução apresentada pelos aparelhos empregados, excluindo-se assim o monitoramento de movimentações do tipo rastejo como um todo, sendo possível monitora-los dividindo-os em seções. Quedas e corridas, por serem fenômenos que se propagam a velocidades elevadas devem ser monitorados por meio de uma frequência mais elevada, ou seja, com menor intervalo de tempo entre as imagens e principalmente em conjunto com outros dados geotécnicos e meteorológicos. Escorregamentos, por atuarem em escalas relativamente pequenas se comparados com rastejos, e velocidades de deslocamento mais baixas que quedas e corridas, são objetos alvos do método proposto, uma vez que além das medidas de movimentação obtidas, dados de caráter mais qualitativo também podem ser obtidos, como acúmulo de lixo nas encostas, fluxo de água superficial, aumento de carga sobre o talude através de construções irregulares, entre outros.

A análise da movimentação do talude artificial em laboratório provou que esta era possível de ser feita por meio de imagens obtidas através de aparelhos celulares. Aliando-se a etapa de calibração das imagens, conclui-se que sua aplicabilidade em campo é possível e factível, porém alguns cuidados devem ser tomados. Como a proposta é que as fotografias sejam tiradas pelos próprios

moradores locais com seus próprios aparelhos celulares, deve-se instruí-los sobre a forma correta de coletar os dados e também levar em conta que estes serão obtidos por máquinas diferentes, com sensores diferentes, sendo necessário aplicar métodos de correção para que se possa comparar imagens obtidas por estes diversos sensores. Travelletti et al (2012) ressaltam distorções obtidas devido a aquisição a longas distâncias de imagens cuja linha de visada se encontra oblíqua ao plano que contém o vetor de movimento da massa em deslocamento, indicando que o bom posicionamento da câmera em campo é de suma importância para uma boa aquisição de dados, sendo possível utilizar parâmetros como rachaduras em residências, inclinação em postes e árvores e cicatrizes na encosta.

É importante evidenciar que se trata do monitoramento do espaço (3D) por meio de planos (2D), sendo assim, a distância obtida por meio das medições feitas nas fotografias nem sempre representam as distâncias reais devido a eventuais obliquidades encontradas no relevo com relação ao plano da foto (Travelletti et al, 2012). Propõe-se, portanto, o monitoramento em diversas visadas distintas a fim de se melhor interpretar o movimento.

7. CONCLUSÕES

Os estudos realizados para o presente trabalho permitiram concluir que:

- As imagens obtidas por meio de câmeras fotográficas de telefones celulares podem ser utilizadas para monitoramento de encostas, desde que haja um acompanhamento por profissionais para o tratamento das imagens..
- O método proposto para o monitoramento de encostas em áreas de riscos se mostrou promissor, visto que as análises realizadas pelo *software* ImageJ permitiram avaliar distâncias entre dois pontos com um erro máximo de 9% a 30 metros de distância.
- Com base no monitoramento do modelo físico foi possível detectar movimentações com velocidades de aproximadamente 0,3 mm/min.
- Embora seja necessário a captura de imagens na mesma posição para se ter dados precisos e acurados, considera-se que o método é simples e pode ser utilizado pela população de áreas de risco como monitoramento adicional.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augusto Filho, O (1992). Caracterização Geológico-Geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica. *Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas* v. 2, 721-734. Rio de Janeiro: ABMS-ABGE-ISSMGE

Coelho, L., Brito, J.N (2007). *Fotogrametria Digital*. Rio de Janeiro: eduerj.

CPT – The Center for Photogrammetric Training 2008. *History of Photogrammetry*. Curtin University, Australia, 36 p. Disponível em: <http://spatial.curtin.edu.au/local/docs/HistoryOfPhotogrammetry.pdf>. Acesso em 13/07/2018.

Ferreira, T., Rasband, W. (2012). *ImageJ user guide*. Acesso em 20 de março de 2018, < <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>>

Infanti Jr., N, Fornasari Filho, N. (1998). Processos de dinâmica superficial. In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. *Geologia de Engenharia* (131-152). São Paulo: ABGE.

Franklin, J. A., Denton, P. E. (1973). The monitoring of rock slopes. *The quarterly Journal of Engineering Geology* 6 (3/4), 259-286.

Guidicini, G., Nieble, C. M. (1984). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Editora Edgar Blücher

Hanna, T. H. (1985). *Field instrumentation in geotechnical engineering*. Rockport: Trans Tech Publications.

Kennedy, B. A. (1971). Methods of monitoring open pit slopes. *13th Symposium on Rock Mechanics*, 537-572. New York: ASCE.

Lopes, E. S. S., Arruda Jr., E. R. (2015). Sensoriamento remoto para deslizamentos. In: Sausen, T. M., Lacruz, M. S. P. (Eds.), *Sensoriamento remoto para desastres* (213-247). São Paulo: Editora Oficina de Textos.

McHugh, E. L., Girard, J. M. (2003). *Evaluating techniques for monitoring rock falls and slope stability*. Spokane Research Lab. Acesso em 14 de março de 2018,< <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/etfmr.pdf>>

Sharpe, C. F. S. (1938) – *Landslides and related phenomena*. New York: Columbia University Press.

Terzaghi, K. (1953). *Mecanismos de escorregamentos de terra*. São Paulo: IPT

- Tominaga, L. K. (2009). Escorregamentos. In: Tominaga, L. K., Santoro, J., Amaral, R., *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*, 25-38. São Paulo: Instituto Geológico.
- Travelletti, J., Delacourt, C., Allemand, P., Malet, P., Schmittbuhl, J., Toussaint, R., Bastard, M. (2012). Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslides monitoring: Application, potential and limitations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, 70, 39-55.
- Viana, C. D. (2015). *Análise estrutural de descontinuidades baseadas em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Schuster & Krizek (eds.). *Landslides: analysis and control*, 11-33. Washington DC: National Academy of Sciences.
- Wiggers, M. M. (2013). *Zoneamento das áreas de risco a movimentos de massa no perímetro urbano do município de Caxias do Sul (RS)*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.