

Processos de movimentos de massa em Belo Horizonte, MG

Mass movements in Belo Horizonte, MG

Resumo

O estudo investiga os movimentos de massa em taludes da região de Belo Horizonte, representativos de áreas de grande instabilidade. Na região ocorrem variados tipos de movimentos de massa particulares de três grupos de materiais geológicos distintos. No primeiro grupo, representado por filitos e xistos, o desencadeamento dos processos dependem da disposição, situação de confinamento e intensidade das descontinuidades e do grau de alteração dos maciços rochosos. Mecanismos como alívio de tensão e a ação conjunta da água no interior dos maciços contribuem para o aumento da predisposição dos taludes à rupturas. No segundo grupo, representado pelos solos residuais de gnaisses, as rupturas ocorrem no interior de feições erosivas já instaladas condicionadas por estruturas reliquias da rocha mãe. No terceiro grupo, representado por talus, as rupturas mais comuns ocorrem estimuladas por cortes na base dos taludes. Os movimentos gravitacionais são do tipo fluxo de detritos, escorregamentos planares rasos, escorregamentos circulares sucessivos e rastejamentos. A maioria dos movimentos de massa observados ocorrem de modo progressivo, dependendo das alterações na geometria dos taludes e do grau de intemperismo.

Palavras-chave: movimentos de massa, processos, Belo Horizonte

Abstract:

The study investigates the mass movements that occur in slopes in the region of Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil, representing areas of great instability. Various types of mass movements in three different groups of geological materials occur in this region. In the first group, represented by phyllites and schists, the triggering of processes depends on the relationship between discontinuity orientations, the weathering conditions of the rock mass. Mechanisms such as stress relief and joint action of the water inside the massive help to increase the susceptibility of slopes to failures. In the second group, represented by residual soils from gneisses, landslides occur inside former erosion features. In the third group, represented by superficial deposits, landslides from talus are common, generally stimulated by the cut of the slope base. The landslide types are debris flow, shallow landslides, successive circular failures and creep. Most of the mass movements observed occur in a progressive manner, depending on changes in the geometry of the slope and the degree of weathering.

Key-words: *landslides, processes, Belo Horizonte*

Maria Giovana Parizzi
Dra, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia

Frederico Garcia Sobreira
Dr, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia

Terezinha Cássia de Brito Galvão
PPHD, Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Geotecnia e Transportes

Paulo Roberto Antunes Aranha
Dr, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia

Marcos Antônio Timbó Elmiro
PPHD, Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Geotecnia e Transportes

Elder Antônio Beirigo
Dr, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia

Recebido 04/2010

Aprovado 07/2010

Agradecimentos
Ao CNPq – pelo suporte financeiro,

Às instituições:
UFOP - Programa de pós-graduação,
UFMG (Departamento de Geologia), e
à Escola de Engenharia da UFMG (Laboratório de Mecânica de solos), pelo apoio logístico.

giece@uaigiga.com.br

sobreira@degeo.ufop.br

aranha@igc.ufmg.br

Introdução

Movimento de massa é o termo usado para descrever os processos relacionados a movimentos descendentes de solos e rochas nas encostas, induzidos pelo campo de tensão gravitacional (Patton & Hendron Jr., 1974). Os escorregamentos e processos correlatos se integram aos movimentos de massa. Pode-se dizer que os escorregamentos constituem-se num dos processos mais importantes associados à dinâmica superficial do território brasileiro (Augusto Filho, 1992).

A região metropolitana de Belo Horizonte possui várias áreas de risco de movimentos de massa com elevado número de ocorrências. Além disso, existem casos de movimentações em áreas não consideradas de risco, cujas edificações possuem médio a elevado padrão construtivo, o que contribui para enfatizar que, além das atividades desordenadas de ocupação, os terrenos também apresentam susceptibilidade natural ao processo.

O território do município de Belo Horizonte exhibe variada constituição geológica. De acordo com Silva et al. (1995), distinguem-se, na área, rochas do domínio do Complexo Belo Horizonte, com rochas gnáissicas do embasamento, as rochas do domínio Metassedimentar e as coberturas e mantos de intemperismo. Os gnaisses são bandados, de cor cinza, granulação fina a grossa, com bandamento composicional definido por alternâncias de bandas milimétricas a centimétricas de cor clara, quartzo-feldspáticas, e bandas finas, escuras, ricas em biotita e/ou anfibólio. Feições de migmatização e milonitização são comuns e podem tornar-se predominantes. Estas rochas apresentam-se, via de regra, saprolitizadas ou muito alteradas e/ou recobertas por manto de intemperismo silto-argiloso de coloração rosa claro a avermelhado. Exposições de rocha são encontradas em algumas regiões, formando lajedos em terrenos elevados ou em talvegues.

Distribuído a sul da calha do ribeirão Arrudas, em extensa faixa de direção geral NE-SW, a seqüência metassedimentar estende-se até os patamares mais elevados da serra do Curral, constituindo cerca de 30% do território de Belo Horizonte. Caracteriza-se pela sucessão de rochas paleoproterozóicas metassedimentares (subordinadamente metavulcânicas), com mergulho preferencial para sudeste, integrantes dos grupos Itabira, Piracicaba e Sabará. (Figura 1). Esta seqüência encontra-se em diferentes graus de alteração conforme as características de resistência das rochas, sendo os filitos e xistos os mais susceptíveis e friáveis e os quartzitos e itabiritos os mais resistentes e coesos. Nesta área ocorre a predominância de litossolos e depósitos de tálus sobre os maciços rochosos. É comum a presença de canga recobrando áreas do Grupo Itabira.

A variedade de condicionantes geológicos, geomorfológicos, e das formas de uso e ocupação presentes na região de Belo Horizonte, associada aos aspectos climáticos, são responsáveis pelo desencadeamento de distintos processos de movimentos de massa, sendo possível a identificação de processos que sejam representativos das diversas situações de instabilidade encontradas. A meta desse estudo foi avaliar os processos de movimentos de massa, atuantes em áreas da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) em função da diversidade geológica, geomorfológica e dos diferentes padrões de ocupação existentes na área analisada. O objetivo principal foi analisar os fatores condicionantes de maior relevância e determinar os mecanismos responsáveis pelo desencadeamento de movimentos de massa nos taludes investigados.

Material e Métodos

A metodologia empregada envolveu as seguintes etapas:

Escolha dos taludes analisados

Para a seleção dos taludes mais representativos das situações de susceptibilidade a movimentos de massa na RMBH, optou-se pela escolha de taludes de diferentes litotipos e localizados em áreas diferenciadas com relação ao grau de risco e padrões de uso e ocupação. Fez-se uma avaliação de informações pré-existentes conforme esquematizado a seguir:

Avaliação dos litotipos caracterizados por possuírem média a elevada predisposição a movimentos de massa, a partir das informações de Silva *et al.* (1995);

Avaliação do número de registros de ocorrências de fenômenos de escorregamentos em vilas e favelas, do município de Belo Horizonte, durante o período de 1994 a 2000, através dos dados do relatório de vistorias de Vilas e Favelas, cedidos pela URBEL (Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte). É importante observar, que neste relatório considerou-se sem distinção, escorregamentos de pequeno, médio ou grande volume de massa e que as áreas vistoriadas caracterizam-se por ocupações desordenadas com edificações mal fundadas e de baixo custo;

Avaliação das áreas com ocupação de padrões construtivos elevados, porém com freqüente ocorrência de movimentos de massa, através de informações cedidas pela SUDECAP –BH (Superintendência de Desenvolvimento de Belo Horizonte) e trabalhos de campo;

Investigação em estradas vicinais que ligam municípios limítrofes à Belo Horizonte para a escolha de taludes.

Inspeção de campo para análise das áreas escolhidas.

A partir das informações do estudo de Silva *et al.* (1995), verificou-se que, no município de Belo Horizonte e suas divisas com Sabará, as seguintes litologias apresentam maior susceptibilidade a movimentos de massa:

Dentro da Seqüência Metassedimentar:

- Filitos medianamente alterados a decompostos pertencentes ao Grupo Sabará e Formações Fecho do Funil e Barreiro, ocasionalmente cobertos por depósitos de tálus e colúvios, localizados em terrenos de topografia acentuada com declividades iguais ou superiores a 30%;
- Intercalações centimétricas a métricas de quartzito e filito da Formação Cercadinho, ocasionalmente recobertas de depósitos de vertente e freqüentemente de terras descartadas, também localizados em terrenos de declividades iguais ou superiores a 30%.
- Dentro do Complexo Belo Horizonte:
- Gnaisses com manto de intemperismo variável ou em perfil bem desenvolvido, localizado em terrenos de superfícies côncavas de elevada declividade (acima de 30%).

O município de Belo Horizonte é administrativamente dividido em nove regionais, como pode ser visto na Fig.1. A partir do relatório de vistorias de ocorrências de escorregamentos da URBEL e as informações cedidas pela SUDECAP, verificou-se que as Regionais Leste, Centro-sul, Oeste e Noroeste apresentaram os números mais elevados de escorregamentos durante os anos de 1994 a 2000, somando uma média anual de 227 ocorrências. As Regionais Leste, Centro Sul e Oeste são

dominadas por litologias pertencentes à Seqüência de Metassedimentares. Inspeções de campo permitiram a escolha de quatro taludes, sendo um na Regional Leste e três na Regional Centro-sul.

Regional Leste: O Talude denominado Taquaril foi escolhido para representar área de padrão construtivo baixo. Localiza-se na Favela do Taquaril, na divisa de Sabará e Belo Horizonte, assentado sobre xistos e filitos do Grupo Sabará. No local há também grande quantidade de aterros e depósitos de vertentes. O Conjunto Taquaril obteve uma média anual de 80 escorregamentos para o período de 1994 a 2000, sendo a maior média de ocorrências de toda região.

Regional Centro-Sul/Oeste: Possui áreas com ocupações de altos e baixos padrões construtivos. A área ocupada abrange vasto espectro da seqüência de metassedimentares, sendo possível uma comparação entre o comportamento de filitos de variadas composições (Formação Fecho do Funil, Barreiro, Cercadinho) e seqüências estratigráficas. Três taludes foram escolhidos:

- O talude, denominado de Patagônia, localiza-se na Rua Patagônia em terreno de filito da Formação Fecho do Funil em contato com as Formações Taboões e Barreiro e coberto por depósitos de vertente. O padrão construtivo nessa rua é médio a elevado.
- O talude denominado Ponteio, localizado na conhecida Curva do Ponteio, na Br 356. O terreno é constituído por quartzitos e filitos intercalados, pertencentes à Formação Cercadinho, parcialmente cobertos por depósitos de vertentes.
- O talude denominado Planetoides, localizado na Rua Planetoides do Bairro Alto Santa Lúcia, também área da Formação Cercadinho, sendo o talude totalmente coberto por depósitos de Vertente.

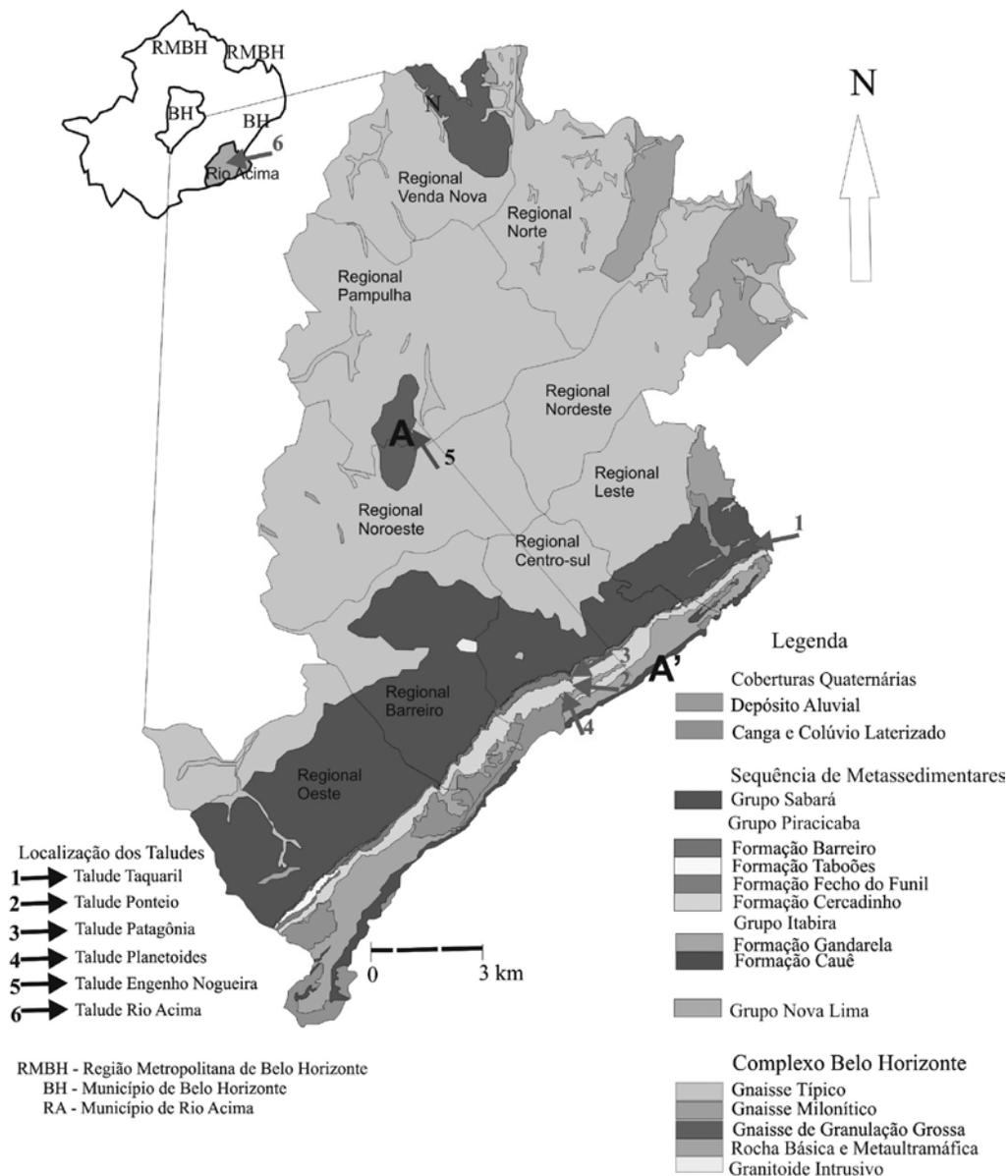
Regional Noroeste: apresenta terrenos caracterizados pelo Complexo Belo Horizonte. As inspeções de campo possibilitaram a escolha de um talude representativo de terrenos com manto de intemperismo bem desenvolvido sobre gnaisses de granulação média a grossa no Bairro Engenho Nogueira. O talude foi denominado Engenho Nogueira e localiza-se em área residencial de baixo padrão construtivo.

Com relação à escolha de taludes em rodovias vicinais, a rodovia que liga os municípios Rio Acima e Nova Lima à Belo Horizonte foi a que apresentou taludes mais representativos para este estudo. Ainda em fase de duplicação, os novos e antigos cortes da estrada têm estimulado muitas movimentações, percebidas em vários pontos. O número cada vez mais crescente de condomínios residenciais nos municípios de Nova Lima e Rio Acima tem intensificado o tráfego nesta via, ainda sem condições de segurança para suportá-lo. Os eventuais movimentos de massa implicam em transtornos e perigo. A geologia presente ao longo da estrada caracteriza-se por xistos e filitos do Supergrupo Rio das Velhas. O talude escolhido nessa estrada foi denominado Rio Acima que se localiza na entrada da cidade de Rio Acima. Esse talude é constituído por um quartzito-mica-xisto do Supergrupo Nova Lima.

A localização dos seis taludes escolhidos está na Figura 1 e a Tabela 1 mostra suas principais características. As figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ilustram, respectivamente, os taludes Taquaril, Ponteio, Patagônia, Planetoides, Engenho Nogueira e Rio Acima.

Figura 1 Mapa e perfil geológico simplificado de Belo Horizonte, modificado de Silva et al. (1995) e localização dos taludes analisados.

a)



b)

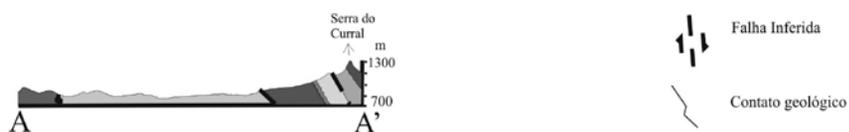


Tabela 1 **Características dos taludes escolhidos para análise**

Talude	Localização	Geologia	Tipo de Ocupação
Taquaril	Divisa BH/Sabará. Regional Leste de Belo Horizonte	Filitos e xistos do Grupo Sabará	Favela
Ponteio	Regional Centro Sul de Belo Horizonte	Intercalação de quartzitos e filitos da Formação Cercadinho	Área Residencial de padrão construtivo médio a elevado.
Patagônia	Regional Centro Sul de Belo Horizonte	Filitos da Formação Fecho do Funil em contato com quartzitos da Formação Taboões e filitos da Formação Barreiro.	Estrada – BR 356
Planetoides	Regional Centro Sul de Belo Horizonte	Depósito superficial originado da Formação Cercadinho	Rua em área residencial de médio a alto padrão construtivo
Engenho Nogueira	Regional Noroeste	Gnaisse de granulação média a grossa com manto de intemperismo variável.	Residencial com baixo padrão construtivo de ocupação.
Rio Acima	Município de Rio Acima	Quartzo sericita xisto do Grupo Nova Lima	Estrada MG 030

Levantamento Topográfico

Execução de levantamentos topográficos dos taludes para a obtenção de suas características morfológicas. Os levantamentos topográficos ocorreram antes e após a ocorrência de movimentos de massa significativos que alteraram a configuração inicial dos taludes. A partir de dois levantamentos topográficos foi possível definir as características de forma e profundidade da superfície de ruptura dos taludes. Com estes dados simula-se o movimento de massa nos programas de estabilidade utilizados.

Figura 2 **Talude Taquaril em 2003**



Figura 3 **Talude Ponteio em 2006**



Figura 4 Talude Patagônia em 2001



Figura 5 Talude Planetóides em 2003



Figura 6 Talude Engenho Nogueira em 2003



Figura 7 Talude Rio Acima em 2003



Caracterização dos maciços rochosos

Caracterização dos maciços rochosos presentes nos taludes por meio de inspeções geológicas de campo, incluindo o mapeamento das camadas litológicas que caracterizam o maciço do local e a medição das descontinuidades, conforme os aspectos de rugosidade, abertura, persistência, preenchimento e condições de umidade. Estas medidas foram executadas de acordo com as instruções da ISRM (1983).

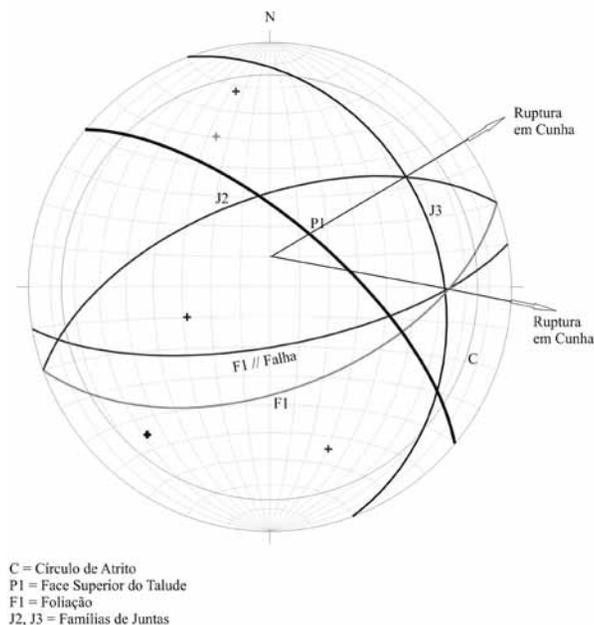
Classificação dos maciços rochosos e obtenção de parâmetros de resistência

Os dados obtidos nas inspeções geológicas de campo sobre as descontinuidades (xistosidade, fraturas, juntas, falhas, etc...) dos maciços de rocha foram tratadas para a obtenção da classificação geomecânica dos maciços analisados utilizando-se do Sistema de Classificação dos Maciços Rochosos, ou RMR, de Bieniawski (1989) e o Sistema Q de Barton *et al.* (1974). As duas classificações foram escolhidas porque, além de serem as classificações mais utilizadas nos estudos geomecânicos, como enfatizam Serra Júnior & Ojima (1998), fornecem não só a classe do maciço, como também as faixas de parâmetros de resistência (coesão e atrito) nas quais, provavelmente, o maciço e as descontinuidades se enquadram.

Análise Cinemática

A análise de estabilidade do maciço foi executada de acordo com os critérios da análise cinemática das descontinuidades, com o auxílio de projeção estereográfica, e da análise de equilíbrio limite de acordo com Hoek & Bray (1981). A Análise Cinemática das descontinuidades é amplamente utilizada para a avaliação das possíveis rupturas dos maciços rochosos, condicionadas pelas descontinuidades existentes. Utiliza critérios de Projeção Estereográfica Horizontal, sendo possível efetuar uma correlação espacial entre as descontinuidades dos maciços e o topo e face dos taludes como exemplifica o estereograma realizado para o Talude Patagônia (Figura 8).

Figura 8 **Projeção estereográfica e análise cinemática das descontinuidades e da face do talude Patagônia**



Caracterização física dos solos

Caracterização física dos depósitos superficiais e coberturas por meio de ensaios de laboratório e de campo, em amostras deformadas e indeformadas dos solos do Complexo Belo Horizonte e da matriz de tálus da Seqüência de Metassedimentares. Os ensaios laboratoriais incluem granulometria, limites de liquidez e plasticidade, massa específica natural, massa específica dos grãos e cisalhamento direto com amostras inundadas para obtenção de parâmetros de coesão e atrito. Ensaios em campo da permeabilidade da matriz foram executados com o auxílio do permeâmetro Guelph.

Geofísica

Investigações geofísicas com o GPR (ground penetrating radar) foram realizadas em alguns taludes com a finalidade de identificar os contatos entre os depósitos superficiais e os maciços rochosos, a espessura dos depósitos, as geometrias e profundidades das superfícies de ruptura existentes e a intensidade de fraturamento e persistência das discontinuidades dos maciços de rocha alterada e saprolitos em profundidade.

Monitoramento dos taludes durante períodos chuvosos

Durante dois períodos chuvosos consecutivos (outubro de 2001 a janeiro de 2002 e novembro de 2002 a janeiro de 2003) os taludes foram observados constantemente para descrição de ocorrência de movimentos de massa e sua correlação com as taxas de precipitação. Durante o tempo de vistoria todos os taludes se movimentaram significativamente sendo possível observar claramente os tipos de processos mais comuns.

Cálculo do Fator de segurança do talude e retroanálise

A análise de equilíbrio limite foi escolhida para a representação dos movimentos de massa avaliados e a confirmação dos parâmetros condicionantes destes movimentos. Para a execução da análise de equilíbrio limite utilizou-se os programas “Planar Failure Analysis”, para análise de possíveis escorregamentos planares, e “Wedge Failure Analysis”, para análise de escorregamentos em cunha, desenvolvidos por Kroeger (1999) e Kroeger (2000). O programa X slope (Balaam, 2001) foi utilizado para análise de escorregamentos de solos e de tálus. Os Métodos de Equilíbrio Limite expressam a estabilidade de um talude ou de uma encosta por um Coeficiente ou Fator de Segurança. Estes métodos complementam a Análise Cinemática, porque consideram as características de coesão e atrito das discontinuidades, a altura e inclinação do talude e as condições de saturação dos maciços e estruturas.

Há mais de um método de Equilíbrio Limite, e a escolha do método a ser utilizado para o cálculo dos Fatores de Segurança dos taludes varia conforme as características dos maciços (de rocha ou de solo), a geometria e o tipo do movimento de massa ocorrido ou passível de ocorrer. Para maciços rochosos foram usados os métodos para escorregamentos em cunha e planares. Tombamentos não foram incluídos pelas Análises de Equilíbrio Limite, apenas nas Análises Cinemáticas. Para maciços de solo e de tálus foram definidos métodos para escorregamentos circulares e planares.

A retroanálise permite a reconstituição das condições prevalecentes no talude no momento da ruptura. Os sistemas de classificação RMR e Q, permitem a estimativa dos parâmetros de resistência para as superfícies de ruptura avaliadas nos taludes. Os dados sobre a superfície de ruptura, a geometria do talude e os parâmetros de resistência foram introduzidos no programa *Planar Failure Analysis* para

a execução de Retroanálise, objetivando estabelecer as condições de equilíbrio limite, ou seja, Fator de segurança igual a 1. Neste programa, os valores de porcentagem de preenchimento de água nas descontinuidades podem ser variados, até a obtenção de valores de Fatores de Segurança iguais a 1.

Todos os dados de entrada usados nos programas de estabilidade foram obtidos a partir das análises e métodos descritos nos itens anteriores e estão sumarizados na tabela 2.

Tabela 2 **Dados de entrada solicitados pelos programas utilizados na análise de equilíbrio limite de escorregamentos em cunha e planares**

Dados de entrada, obrigatórios e opcionais, requisitados pelo Programa Wedge Failure Analysis	Dados de entrada, obrigatórios e opcionais, requisitados pelo Programa Plane Failure Analysis
Peso específico da rocha	Peso específico da rocha
Peso específico da água	Peso específico da água
Altura da crista do talude (com relação à descontinuidade 1)	Altura da face inferior do talude
Direção de mergulho e mergulho da descontinuidade 1	Ângulo da face superior do talude
Direção de mergulho e mergulho da descontinuidade 2	Ângulo da face inferior do talude
Direção de mergulho e mergulho da Face inferior do talude	Coesão da superfície de descontinuidade
Direção de mergulho e mergulho da face superior do talude	Ângulo de atrito da superfície de descontinuidade
Coesão e ângulo de atrito das duas descontinuidades	Ângulo da descontinuidade
Presença ou não de fenda de tração – dado opcional	Presença de água na descontinuidade (% de preenchimento de água)
Presença de água nas descontinuidades, ou poro-pressão nas descontinuidades e/ou Fenda de tração.	Presença de Fenda de tração - dado opcional
	Se for o caso, localização da fenda de tração (posição desconhecida, posição conhecida e distância da crista)
	Se for o caso, condição de saturação da fenda de tração (porcentagem de preenchimento)

Resultados

Após a utilização dos programas de estabilidade para simulação dos movimentos de massa, as investigações de campo, monitoramento e descrição dos taludes, classificação dos maciços rochosos e investigações laboratoriais de solos e depósitos superficiais, conforme descrito nos métodos, foi possível estabelecer os tipos movimentos de massa e seus condicionantes atuantes nos diferentes materiais geológicos. Pôde-se observar a existência de processos gravitacionais particulares de três grupos de materiais geológicos distintos, a saber:

- Grupo 1 - Maciços rochosos da seqüência de metassedimentares (Supergrupo Minas) e do xisto (Grupo Nova Lima)
- Grupo 2- Solos residuais de gnaiss (Complexo Belo Horizonte)
- Grupo 3 - Depósitos superficiais

Análise da estabilidade dos maciços rochosos pertencentes ao Grupo 1 – Seqüência de Metassedimentares

Avaliação dos condicionantes

A tabela 3 apresenta os principais resultados das classificações dos maciços rochosos analisados. De uma maneira geral os maciços rochosos estudados, pertencentes à Seqüência das Metassedimentares e do Grupo Nova Lima, foram considerados de qualidade ruim a muito ruim pelas classificações RMR e Q. Assim como as classes da RMR, os parâmetros de resistência (coesão e atrito) também não são muito diferentes. Os maciços das Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Barreiro e Tabões, apresentaram os menores valores de coesão (15 kPa), seguidos pelo xisto do Grupo Nova Lima (24 kPa). Os ângulos de atrito dos maciços variaram entre 13° e 21°. Os menores valores dos parâmetros de resistência são atribuídos aos filitos, independente de seu grupo ou formação.

Tabela 3 **Características dos maciços rochosos estudados**

Unidade Geológica	Seqüência de Metassedimentares			Grupo Nova Lima
	Grupo Sabará	Formação Cercadinho	Formações Fecho do Funil, Barreiro e Tabões	Unidade Mestre Caetano
Talude Representativo	Taquaril	Ponteio	Patagônia	Rio Acima
Maciço Rochoso	Filitos, xistos e grauvacas	Filitos e quartzitos ferruginosos	Filito, filito grafitoso e quartzito Tabões	Quartzo clorita sericita xisto
Número de descontinuidades	3	4	5	4
Classificação RMR	Maciço regular	Pobre a muito pobre	Pobre a muito pobre	Muito pobre
Classificação Barton	Maciço muito ruim	Extremamente ruim	Extremamente ruim	Muito ruim
Atrito	21°	17°	13°	13°
Coesão	38 kPa	15 kPa	15 kPa	24 kPa

As descontinuidades dos maciços rochosos são de extrema importância para o desencadeamento dos escorregamentos observados, devido às suas características de orientação, abertura, espaçamento, rugosidade, preenchimento e estado de alteração das paredes. Essas características são ilustradas na Figura 9 do talude Rio Acima.

A análise dos maciços rochosos conforme os critérios da ISRM (1983) e as investigações de campo definiram o número de famílias de descontinuidades variando entre 3 e 5 para os maciços rochosos estudados, incluindo xistosidade, juntas e falhas. O número de famílias não é grande, entretanto estas famílias são repetitivas nos maciços, podendo, obviamente, variar local e regionalmente de direção e mergulho, devido aos aspectos da geologia estrutural da área de estudo. A Tabela 4 ilustra os resultados da classificação das descontinuidades realizada para o filito do Talude Taquaril.

Figura 9

Detalhes do xisto do talude Rio Acima e suas famílias de fraturas. Observar alguns blocos rompidos delimitados pelo conjunto de fraturas.



Família F1——
Família F2——

Tabela 4

Parâmetros de caracterização das discontinuidades, conforme critérios da ISRM (1983) para o Talude Taquaril

	Atitude (média)	Abertura (mm)	Preenchimento	Rugosidade	Espaçamento	Persistência	Resistência
Talude	320/50						
Xistosidade (F1)	150/65	1 a 5	ausente	Plano/lisa	< 3cm	> 20m	Rocha muito fraca
J2	316/35	3 a 5	Silte/ausente	Plano/rugosa	5 a 17cm	3 a 10m	Rocha muito fraca
J3	40/85	3 a 7	Silte/ausente	Plano/rugosa	8 a 30cm	3 a 10m	Rocha muito fraca

A análise cinemática dos maciços rochosos e o uso dos programas de estabilidade mostraram a importância da relação geométrica entre as descontinuidades presentes e a face do talude (orientação, altura e inclinação), o que irá determinar as partes do maciço que estão livres para deslizar ou cair, conforme enfatizam Hoek e Bray (1981).

As formas originais das encostas têm grande influência na concentração ou dispersão das águas pluviais Vieira *et al.* (1999) enfatizam que a morfologia das encostas assume um importante papel na distribuição dos fluxos de água dentro dos solos, alterando as condições de poro-pressões, que podem levar a instabilidade das encostas. Reneu & Dietrich (1987, apud Viera *et al.*, op.cit.) afirmam que os *hollows*, topografia convergente na paisagem, são áreas mais susceptíveis a deslizamentos, uma vez que tendem a concentrar fluxos de água, principalmente em períodos chuvosos.

Nos maciços rochosos da seqüência de rochas metassedimentares as formas côncavas ocorrem em cicatrizes de escorregamentos, feições erosivas, em depressões formadas pela erosão diferencial, principalmente, entre os filitos e quartzitos da Formação Cercadinho (Talude Ponteio) e nos contatos litológicos e nas falhas (Talude Patagônia). Além disso, a declividade acentuada dos taludes estimula os processos erosivos e de movimentos de massa.

Fiori e Carmignani (2002) enfatizam que a água tem grande influência no estado de alteração dos maciços atuando em aspectos fundamentais, tais como:

- Na decomposição dos minerais, principalmente os micáceos, abundantes em todos os maciços, ocasionando a perda da resistência das paredes das descontinuidades.

- Na criação de poro-pressões nas descontinuidades. As análises de estabilidade comprovaram que é necessário um preenchimento parcial ou total por água nas descontinuidades para que rupturas ocorram nos taludes. Em quase todas as análises de estabilidade, quando se considerou que as descontinuidades estavam secas, os fatores de segurança foram maiores do que 1,3, indicando situação relativamente estável, conforme a Tabela 5 para o talude Taquaril. Com o aumento da porcentagem de água dentro das descontinuidades e das fendas de tração, os fatores de segurança decresceram para valores iguais ou menores do que 1, situações, respectivamente, no equilíbrio limite ou instáveis. Para que o equilíbrio limite seja alcançado, foi observado que as porcentagens de preenchimento de água dentro das descontinuidades devem ser iguais ou superiores a 80% .

- Outro modo da influência da água nas rupturas dos maciços rochosos está na diminuição quase completa da coesão entre os planos de descontinuidade, ou seja, os blocos se deslocam por alívio de tensão e, após sucessivos eventos chuvosos e secos, escorregam facilmente ao longo dos outros planos lisos e umedecidos. Este fenômeno se assemelha ao processo de empastilhamento descrito por Frazão *et al.* (1976), DER, (1991) e Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998).

Com relação às ações antrópicas, a execução dos cortes dos taludes, geralmente muito inclinados, que estimulam os processos erosivos, ou orientados de maneira a desconfinar estruturas dos maciços rochosos, são os principais condicionantes antrópicos que desencadeiam escorregamentos nas áreas de ocorrência das Seqüências Metassedimentares. Outro fator importante, observado por Parizzi (2004), é a execução de obras de estabilização que não levam em consideração os reais mecanismos de ruptura atuantes neste grupo, como sucessivas obras executadas no Talude Ponteio (retaludamento, cobertura com concreto jateado, grampeamento pouco profundo, etc.). Até o ano de 2010, todas as medidas implantadas neste talude para sua estabilização não obtiveram pleno êxito.

Tabela 5 **Dados de entrada para cálculo do FS do Talude Taquaril – Rupturas em cunha e planar**

Dados	Valores	
	Ruptura em Cunha	Ruptura Planar
• Ângulo de atrito (graus)	21°	210
• Coesão	38 kPa	38 kPa
• Altura do talude	25m	15m
• Peso específico da rocha intacta*1	21kN/m ³	21kN/m ³
• Peso específico da água	9,8 kN/m ³	9,8 kN/m ³
• Atitude das descontinuidades J2 e J3	316/35 e 40/85	316/35
• Orientação da face inferior do talude	320/50	320/50
• Orientação da face superior do talude	320/33	320/33
FATORES DE SEGURANÇA OBTIDOS:		
• Descontinuidades preenchidas por água	0	0,7
• Descontinuidades secas	1,4	1,5

*1 Fonte do dado: Fernandes (2000)

Avaliação dos tipos de processos

Os taludes em áreas de substrato rochosos constituídos por filitos da Formação Fecho do Funil, Barreiro, xistos e filitos do grupo Sabará e Nova Lima e filitos alternados por quartzitos da Formação Cercadinho se movimentam e se rompem a partir de mecanismos que podem ser diferenciados de acordo com a relação geométrica entre corte dos taludes e as descontinuidades dos maciços. É possível distinguir três modelos de ruptura para essa região:

Modelo 1 - Cortes de taludes com direções não paralelas às direções das foliações:

O modelo de movimento a ser apresentado é muito freqüente na região metropolitana de Belo Horizonte. Geralmente, os cortes não possuem direções paralelas às direções das foliações, sendo, muitas vezes, até perpendiculares a elas. Nestes casos, o processo de escorregamento é estimulado a partir de um sulco erosivo ou por escorregamentos em cunha que evoluem na face do talude (Figura 10).

Figura 10 Seqüência de movimentos de massa em talude de filito da Formação Cercadinho

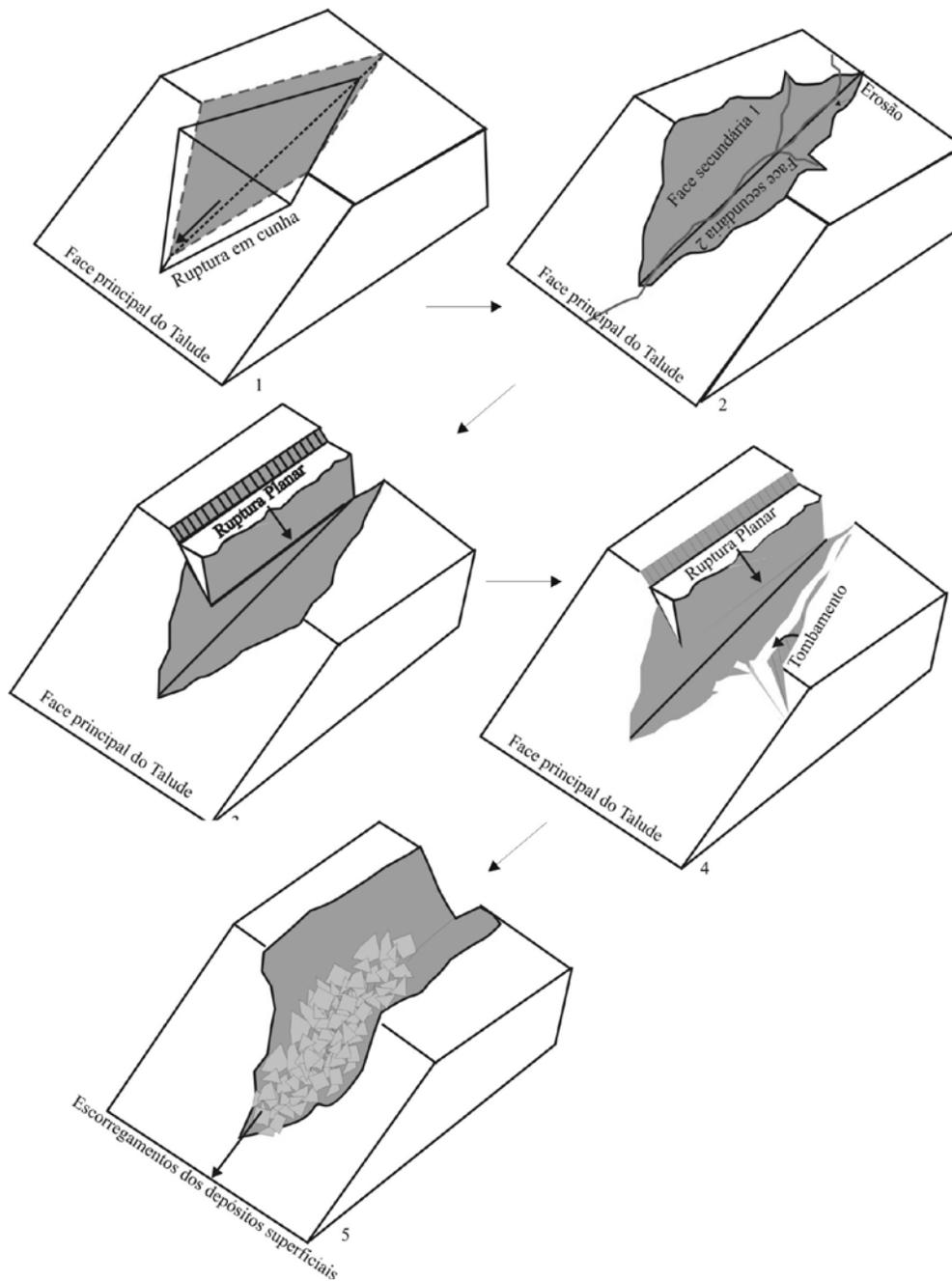


Devido à presença regular de mais de uma família de descontinuidades e ao avançado estado de alteração dos maciços, a susceptibilidade a escorregamentos em cunha se torna elevada.

Interseções entre duas famílias parecem ser comuns e os escorregamentos em cunha ocorrem nos primeiros estágios de instabilização dos maciços (Figura 10). A ocorrência conjunta de erosão e escorregamento em cunha contribui para a mudança da geometria inicial dos taludes, geralmente com a criação de novas faces planas, que irão desconfinar as outras descontinuidades do maciço, geralmente a xistosidade (Figura.11a e b). A partir da nova geometria estabelecida e a exposição de novos planos, tombamentos e escorregamentos planares passam a ocorrer (Figura 11 c e d). Esses processos foram evidenciados nos taludes Ponteio, Patagônia e em outros taludes constituídos por filitos das formações Fecho do Funil, Barreiro e Cercadinho.

A água infiltrada no maciço reduz a coesão, fazendo com que os blocos se desloquem e escorreguem. Embora os quartzitos da Formação Cercadinho sejam considerados mais resistentes, devido ao atrito, quando alterados e fraturados se rompem com facilidade, sendo possível que ocorram tombamentos e outras quedas.

Evolução dos movimentos de massa em taludes de filito e xisto cujas direções das faces dos taludes não são paralelas às direções de mergulho das foliações. a) escorregamento em cunha e alteração da geometria do talude, b) erosão e formação de duas faces secundárias, c) escorregamento planar na face secundária 1, d) tombamento e quedas de blocos na face secundária 2, e) criação de depósito de tálus na face do talude seguido de corrida de detritos.



Movimentos gravitacionais dos maciços de filitos e xistos da região do Taquaril sejam escorregamentos em cunha, planares ou tombamentos, ocorrem em áreas em que há exposição do maciço (Parizzi *et al.* 2002a), ou seja, desprovidas de cobertura superficial, tornando-o passível à saturação e intensificação do grau de alteração. Maciços rochosos do Grupo Sabará, quando muito alterados tornam-se pulverulentos e podem escorregar como solos quando saturados, como observado em outros taludes próximos ao Talude Taquaril. O Talude Taquaril representa grande parte dos taludes da área, pois está coberto por depósitos de vertentes. Essa cobertura, associada à baixa permeabilidade do maciço, retarda a saturação das discontinuidades, o que mantém o maciço rochoso estável por mais tempo.

As novas configurações dos taludes, obtidas após os primeiros escorregamentos e processos erosivos, são geralmente côncavas com topos escarpados e rampas com inclinação em torno de 30°, o que favorece a acumulação dos depósitos de vertentes (rampa de detritos, conforme modelo clássico de King (1953) e a concentração das águas pluviais. Os depósitos passam a se movimentar sob a forma de rastejos, fluxos de detritos e escorregamentos circulares ou planares próximos ao contato depósito/macizo rochoso (Figura 11e).

Embora os tombamentos não sejam os movimentos predominantes nos taludes estudados, observa-se que na região, alguns taludes de quartzitos, filitos e xistos, quando os cortes não desconfinam a xistosidade, esses serão os principais tipos de movimentos.

Geralmente as discontinuidades contra a face livre mergulham em ângulos mais baixos do que as discontinuidades a favor da face livre (Figura 12-1). Há Indícios, principalmente após as vistorias de campo e classificação dos maciços, que os tombamentos da região ocorram estimulados pela progressiva perda de resistência das discontinuidades que se inter cruzam, como descrevem Yang & Chuang (1997), e das outras discontinuidades presentes nos maciços alterados responsáveis pela delimitação de blocos instáveis.

Figura 12 **Modo de ocorrência dos tombamentos e quedas de blocos de quartzitos, filitos e xistos na área de estudo.**
1- Ação da água nas discontinuidades. 2- Quedas e tombamentos.

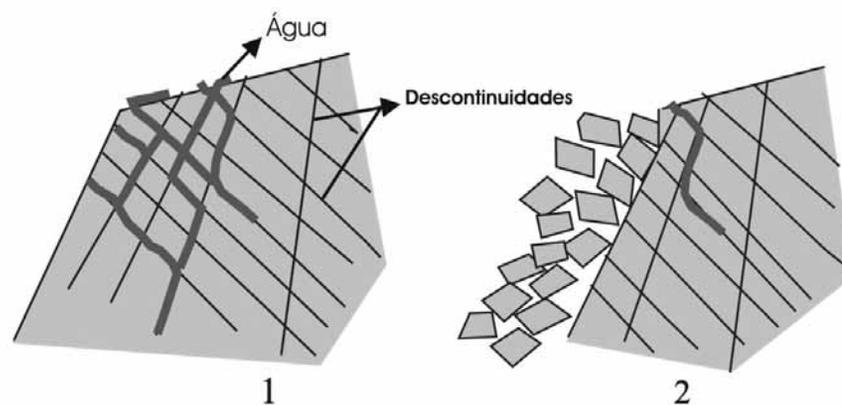


Figura 13 Modelos de escorregamento em taludes de xistos e filitos com cortes Paralelos à Xistosidade

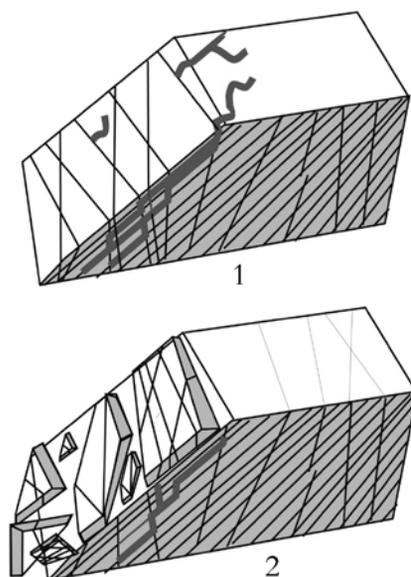


Figura 14 Investigação geofísica com o GPR exibindo perfil de talude de xisto com ruptura planar por alívio de pressão e alto grau de fraturamento, seguido de desenho explicativo.

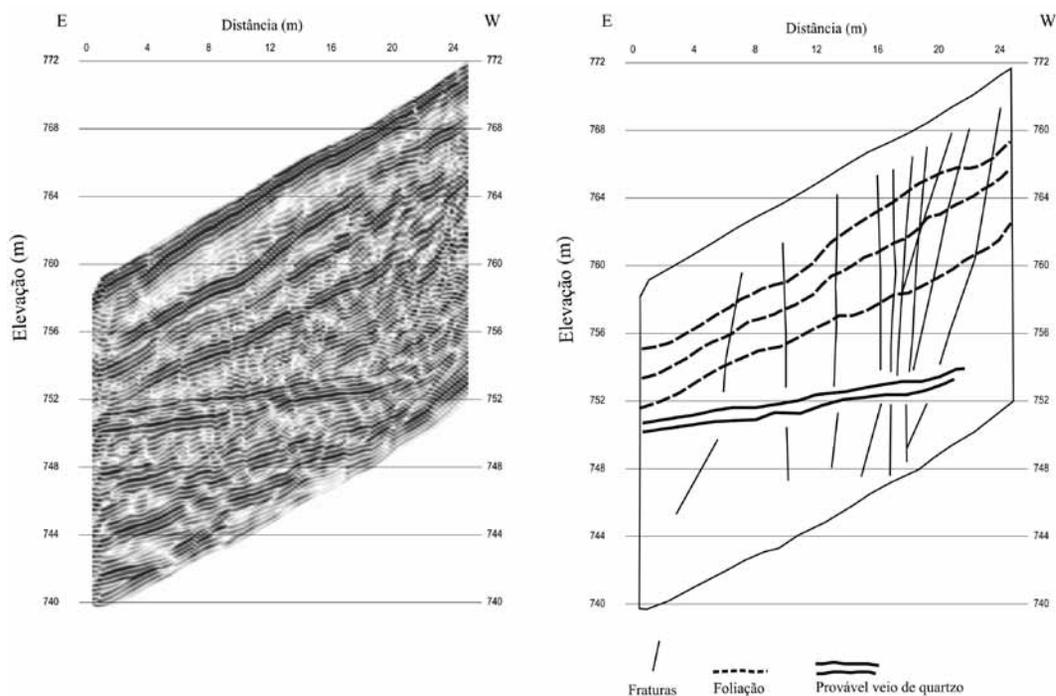


Figura 15 Escorregamento planar de filito da Formação Batatal – Nova Lima, MG



Figura 16 – Blocos de xisto susceptíveis a escorregamento planar - Talude Rio acima .



Condicionantes e mecanismos de ruptura dos solos residuais de gnaise, pertencentes ao Grupo 2

Avaliação dos Condicionantes

Os solos residuais desenvolvidos a partir dessas litologias contêm os Horizontes A, B, o C saprolítico e o saprolitos da rocha original. Os dois primeiros possuem espessuras variadas, dependendo do relevo local e possuem textura de argila magra arenosa e coesão mais alta que os horizontes sotopostos, da ordem de 20 kPa. Viana (2000) encontrou menores valores de erodibilidade para os horizontes A e B em relação ao horizonte C. Os horizontes superiores (A e B) horizontes apresentam maior resistência à ruptura, formando uma camada protetora dos movimentos de massa e erosão dos horizontes inferiores. O Horizonte C, ou solos saprolíticos

e saprolitos aflorantes apresentam coesão nula ou baixa, na ordem de 10 kPa, e ainda possuem estruturas reliquias da rocha de origem como famílias de fraturas e a foliação gnáissica.

De uma maneira geral, todos os horizontes de solo descritos possuem índices de vazios e porosidades muito altas. Os ensaios de permeabilidade realizados *in situ* em cada horizonte também forneceram resultados bem semelhantes, com valores de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-4} cm/seg, considerados médios, de acordo com Terzaghi & Peck (1967). No horizonte B, o plasma pode ser responsável pela obstrução das conexões entre os poros presentes, entretanto, as fissuras desenvolvidas próximas ao contato com o horizonte C indicam a existência de infiltração e percolação preferencial da água ao longo dos contatos entre os horizontes B e C (Santos, 2004). No horizonte C, a água encontra maiores dificuldades de percolação devido às conexões reduzidas entre os poros, o que justifica a permeabilidade média dos materiais analisados. Os resultados das análises texturais e classificação dos horizontes de solos do talude Engenho Nogueira são exibidos na Tabela 7.

Tabela 6 Parâmetros obtidos a partir da retroanálise do escorregamento do Talude Engenho Nogueira

Camada de solo	Coesão (kPa)	ϕ (°)	ρ_{nat} (kN/m ³)	r_u (para FS =1)	Poro-pressão (kPa)
Horizonte A	22	25	14	0.15	4
Horizonte B	20	31	14	0.15	
Solo saprolítico	10	32	14	0.15	
Saprolito de gnaise	0	33	12	0.15	

Tabela 7 Parâmetros texturais e índices físicos dos horizontes de solo do Talude Engenho Nogueira

amostra		ρ_s	ρ_{nat}	ρ_d	LL	LP	e	n	Granulometria (%)					Classe	
		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	%	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	SUCS
1	saprolito	2.63	1.23	1.2	36	NP	1.2	54	9	31	28	30	2	0	Areia siltosa
2	saprolito	2.60	1.23	1.2	31	NP	1.2	54	6	29	35	29	1	0	Areia siltosa
3	saprolito	2.63	1.23	1.2	30	NP	1.2	54	5	25	37	33	0	0	Areia siltosa
4	Saprolito de dique	2.78	1.65	1.31	48	18	1.1	53	15	50	19	12	2	2	Argila magra arenosa
5	Horizonte B	2.70	1.37	1.20	50	29	1.3	56	32	27	21	18	2	0	Argila magra arenosa
6	Solo saprolítico	2.67	1.45	1.29	34	NP	1.1	52	9	35	37	19	0	0	Areia siltosa
7	colúvio	2.67	1.37	1.20	32	12	1.2	55	11	31	32	25	1	0	Areia argilosa
8	Solo saprolítico	2.60	1.45	1.29	29	NP	1.0	50	5	24	31	37	2	0	Areia siltosa
9	Horizonte A	2.64	1.37	1.20	46	32	1.2	55	46	16	19	15	3	1	Argila magra arenosa

ρ_s – massa específica dos grãos; ρ_{nat} – massa específica natural; ρ_d – massa específica seca; LL – limite de liquidez ; LP – limite de Plasticidade; NP – não Plástico ; e – índice de vazios; n – porosidade; c – coesão (kPa); f - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica.

Processos erosivos, geralmente desenvolvidos nos horizontes de solo saprolíticos e sobre os saprolitos, são responsáveis pela alteração na morfologia das encostas, criando sulcos com paredes íngremes que facilitam o desencadeamento de escorregamentos dos solos pouco coesivos. A erosão também contribui para retirada dos horizontes A e B, permitindo a exposição dos horizontes sotopostos, caracterizados por maior erodibilidade e susceptibilidade a escorregamentos (Figura 17).

Figura 18 **Erosão desenvolvida em solo saprolítico de gnaise do Talude Engenho Nogueira em 1999. Em 2003 o mesmo local sofreu escorregamentos circulares (Figura 6)**



A água pluvial nas estruturas reliquias da rocha original e nos poros, além de ser responsável pela alteração dos constituintes minerais dos solos, estimula a criação de poro-pressões nos maciços de solo residual (Fiori & Carmignani, 2002; Wolle & Hachich (1989), Attewell & Farmer, 1982; Morgenstern & Mattos (1975). Devido à permeabilidade média a baixa dos solos saprolíticos e saprolitos, a água penetra, preferencialmente, pelas estruturas reliquias presentes, representadas por fraturas sub-verticais (ex. Talude Engenho Nogueira). À medida que a quantidade de água infiltrada aumenta, ela passa a ocupar os poros, o que ocorre em períodos de chuva mais prolongada e intensa. Esse fato induz ao aumento de poro-pressões nos poros e conseqüentes escorregamentos.

Grande parte das ações antrópicas desencadeadoras de escorregamentos nas áreas de solos residuais de gnaise estão relacionadas ao desmatamento e à retirada dos horizontes A e B dos maciços de solo. Essas ações estimulam erosões e exposição do horizonte C e saprolitos mais susceptíveis aos escorregamentos.

Modelos de movimentos de massa

A avaliação da estabilidade do Talude Engenho Nogueira permitiu a representação dos movimentos de massa dos solos residuais de gnaise em Belo Horizonte. Como já mencionado, a retirada dos horizontes superiores dos solos e os processos erosivos expõem os solos saprolíticos e saprolitos, susceptíveis aos escorregamentos. Dependendo da intensidade das chuvas observam-se dois tipos de movimentos:

- Durante períodos de chuvas menos intensas, as estruturas reliquiárias da rocha de origem e a baixa coesão do material condicionam escorregamentos planares em paredes íngremes de ravinas e voçorocas já instaladas ou ao longo das faces dos taludes (Figura 19 e Figura 20.1).

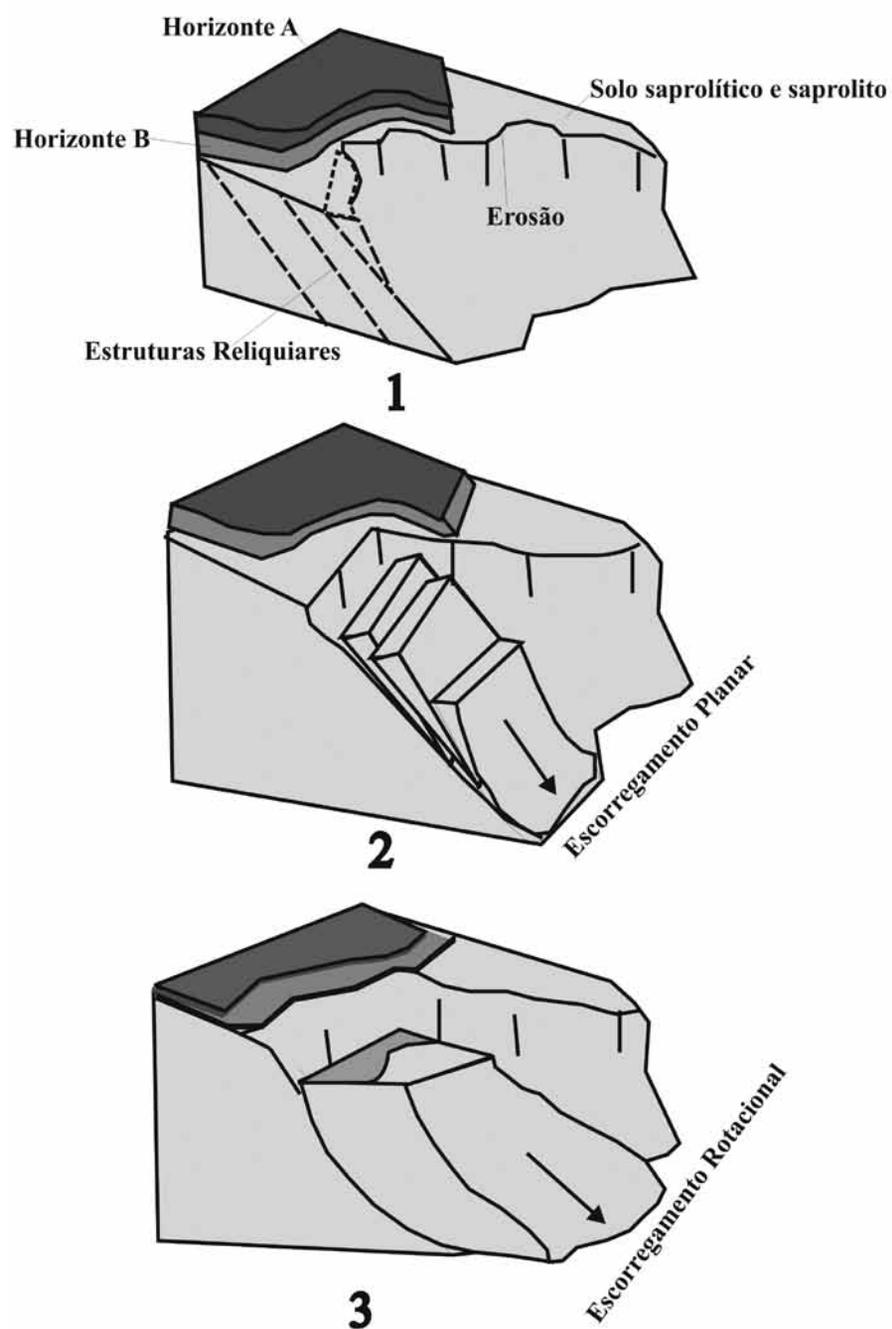
Figura 19 Estruturas reliquiárias condicionando escorregamentos planares no solo saprolítico de gnaise



A forma dos taludes vai se modificando a partir dos sucessivos escorregamentos planares (Figura 20.2), erosão concentrada, *piping* e solapamento de base, e as paredes dos taludes ficam com inclinações superiores a 45%. Quando a exposição do horizonte C é bem maior que dos outros horizontes, esta camada passa a governar as forças de resistência dos taludes. Chuvas mais intensas podem induzir escorregamentos circulares de maior porte, envolvendo todas as camadas presentes (Figura 20.3). Pequenos valores de poro-pressões (3 a 4 kPa) são suficientes para vencerem as forças resistentes nos talude muito inclinados e pode-se considerar que estes solos ainda não estão saturados no momento da ruptura.

Modelo evolutivo dos movimentos de massa dos solos residuais de gnaiss.

- 1) erosão e verticalização dos taludes, 2) ruptura planar através de estruturas reliquias em períodos de chuvas menos intensos,
- 3) ruptura circular em períodos de chuvas intensas



Condicionantes e mecanismos de rupturas dos depósitos de vertentes do Grupo 3

Avaliação dos Condicionantes

Os taludes Taquaril, Ponteio, Patagônia, Rio Acima e Planetoides apresentam depósitos de vertentes em situação de instabilidade, caso comum a muitos taludes da região estudada. As análises geotécnicas e investigações de campo realizadas nesses depósitos permitiram observar que, de uma maneira geral, esses materiais apresentam características bem semelhantes entre si, apesar de terem se originado de litologias diferentes. As principais características observadas estão esquematizadas a seguir:

- Grande parte dos depósitos encontrados foi denominada de tálus, devido a sua granulometria, constituída por fragmentos grosseiros, envolvidos por matriz mais fina (Tabela 8).
- Os depósitos são originados de escorregamentos e queda de fragmentos dos maciços rochosos que se depositam ao longo das faces dos taludes. Entretanto, alguns depósitos são originados pela ação antrópica, como por exemplo, nos taludes Taquaril, Ponteio e Planetoides, devido ao lançamento de material remobilizado nas encostas durante cortes de taludes e outras obras de engenharia.
- Devido ao acelerado grau de alteração física e pequeno espaçamento entre as descontinuidades dos maciços rochosos, os fragmentos dos depósitos de tálus possuem dimensões que, geralmente, não ultrapassam o comprimento de 30 cm. Com o passar do tempo, os frágeis fragmentos posicionados na base dos depósitos vão sendo cominuídos devido ao peso provocado pelas camadas superiores. A água que circula e a erosão também carregam materiais mais finos (silte e areia fina), que se depositam entre os fragmentos e passam constituir a matriz do tálus.
- De acordo com a classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), a maioria das amostras de matriz são ricas em silte e areia. Os materiais silto-arenosos e areno-siltosos não são plásticos e possuem limites de liquidez que variam entre 33 a 40% nos taludes estudados. As argilas arenosas têm plasticidade variando entre 13 a 26% e índices de plasticidade maiores do que 7. A classificação SUCS, considerando a presença de pedregulhos, apresentou maior variabilidade de resultados, mostrando a heterogeneidade granulométrica dos depósitos de tálus. Com base nessa classificação, as amostras, de um modo geral, foram classificadas como silte arenoso com cascalho e cascalho siltoso com areia (Tabela 8).

Tabela 8 **Parâmetros texturais e índices físicos dos depósitos de tálus dos taludes Taquaril, Ponteio, Planetoides, Patagônia e Rio Acima**

amostra	rs	rnat	rd	LL	LP	e	n	Granulometria (%)					Classe	
	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%		%	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	SUCS
1 Taquaril	2.75	1.48	1.33	33	NP	1.1	52	4	25	13	7	4	47	Cascalho siltoso com areia
2 Ponteio	2.94	1.5	1.34	41	NP	1.2	57	2	48	11	4	6	29	Cascalho siltoso com areia
3 Planetoides	3.04	1.87	1.64	38	NP	0.9	47	3	35	14	9	6	33	Cascalho siltoso com areia
4 Patagônia	2.87	1.94	1.56	39	NP	0.8	44	4	39	10	5	7	35	Cascalho siltoso com areia
5 Rio Acima	2.72	1.48	1.23	40	NP	1.2	55	12	46	14	4	5	19	Silte arenoso com cascalho

ps – massa específica dos grãos; ρ_{nat} – massa específica natural; ρ_d – massa específica seca; LL – limite de liquidez ; LP – limite de Plasticidade; NP - não Plástico ; e – índice de vazios; n – porosidade; c – coesão (kPa); ϕ - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica.

Através destas análises, foi possível constatar que o silte e a areia fina e média são os constituintes dominantes dos depósitos de vertentes estudadas e, por isso, influenciam muito o comportamento desses materiais, principalmente da matriz do tálus.

Como consequência da constituição silto-arenosa da matriz, todos os depósitos possuem condutividade hidráulica da ordem de 10^{-4} cm/seg, considerada uma permeabilidade entre boa a pobre, típicos de solos dessa natureza, de acordo com Terzaghi & Peck (1967). Os índices de vazios e a porosidade das amostras foram todos altos a muito altos. A justificativa para um solo possuir alta porosidade e permeabilidade mediana está na sua constituição e estrutura. De acordo com as análises micromorfológicas de Santos (2004), embora os solos sejam porosos, não existe uma conexão eficiente entre os seus poros devido a presença de plasma e fração coloidal obstruindo os canalículos de ligação interporos, o que dificulta a drenagem.

- Os ensaios de cisalhamento direto com amostras inundadas da matriz do tálus forneceram valores bem aproximados para a coesão e atrito dos materiais silto-arenosos e areno-siltosos. A coesão variou entre 0 a 6 kPa e o ângulo de atrito variou entre 28 e 33°. A reduzida porcentagem da fração argilosa justifica a baixa coesão dos solos estudados e os valores de atrito refletem a proporção de areia, ou seja, quanto mais arenosos os solos maiores os seus ângulos de atrito (Terzaghi & Peck, 1967).
- A forma e inclinação das encostas podem influenciar no acúmulo e na movimentação dos depósitos de vertente. Formas côncavas em encostas medianamente inclinadas favorecem o acúmulo de depósitos mais espessos, como é o caso do Talude Planetoides, todo coberto pelo tálus.

As encostas de tálus refletem o ângulo natural de repouso do material *talino* e, geralmente, em vertentes mais inclinadas que o ângulo de atrito, causam movimentações mais frequentes desse material, o que justifica a maior espessura dos depósitos. Entretanto, é possível encontrar encostas pouco inclinadas cobertas por depósitos de pequena espessura (ex. Talude Ponteio). Nestes casos, leva-se em consideração a relação de contato entre o solo e a rocha e a influência da água no movimento de massa. O início e estilo das movimentações de colúvio em encostas refletem a espessura do colúvio, como observado por Deere & Patton (1971), Augusto Filho (1992), Turner (1996), Fernandes & Amaral (2000), GeoRio (2000). Movimentos envolvendo espessos depósitos são geralmente relacionados com escorregamentos circulares lentos e, raramente, exibem subsequente desagregação e fluxo. Em contraste, movimentações em encostas com finas espessuras de colúvios exibem um movimento inicial translacional, que pela, e subsequente desagregação do material, transiciona para um fluxo de detrito.

A ação da água infiltrada nos depósitos de vertente é essencial para o desencadeamento dos movimentos de massa através da criação da frente de saturação, responsável pelo aparecimento de poro-pressões e a eliminação da sucção pré-existente. Quanto mais úmido o solo, mais rapidamente ocorre a saturação em superfície e com maior velocidade a frente de saturação pode avançar através do solo. Ao contrário, quanto mais seco o solo, mais difícil será a ocorrência das condições que podem deflagrar um movimento de massa. Possivelmente as características estruturais (tipo de porosidade) e de permeabilidade dos depósitos inibem o rápido avanço da frente de saturação (tanto horizontalmente quanto verticalmente) causando rupturas mais rasas.

As retroanálises realizadas para os escorregamentos dos depósitos estudados revelaram que nas encostas mais inclinadas, as poro-pressões necessárias para a condição de equilíbrio limite dos depósitos são de 5 e 6 kPa (ex. rupturas na base dos taludes Taquaril e Planetoides) e em encostas menos inclinadas,

as poro-pressões são de 10 a 12 kPa (Taludes Patagônia e topo dos taludes Planetoides e Taquaril).

A execução de cortes íngremes na base dos depósitos é a grande responsável pela instabilização dos mesmos. Geralmente estes cortes possuem ângulos mais elevados que o ângulo de repouso do material. Estes cortes causam a movimentação do tálus até a base (Figuras 21 e 22)

Figura 21 Corte vertical do tálus do Talude Planetóide antes do escorregamento (2003)



Figura 22 Tálus do talude planetóides após escorregamento (2003)



Modelos de movimentos de massa

A partir da comparação entre os mecanismos de ruptura de tálus ocorridos nos taludes Planetoides, Taquaril, Ponteio e Rio Acima foi possível observar que a espessura do depósito, a granulometria, o tipo de contato entre tálus e maciço, a inclinação dos taludes e a ação da água são fatores determinantes do tipo de movimentos dos depósitos de vertentes como já descrito por autores como Deere & Patton, 1971; Augusto Filho, 1992; Turner, 1996; Fernandes & Amaral, 2000; GeoRio, 2000).

Fluxos de detritos são comuns em depósitos pouco espessos (Talude Ponteio), no qual a forma da vertente favorece a concentração de água (Fig.11).

Rastejamentos e escorregamentos rotacionais com sucessivas superfícies de ruptura, ora mais rasas, ora mais profundas, são mais comuns em depósitos mais espessos e em taludes menos inclinados (Fig. 12 e Fig. 13), como o tálus do Talude Planetoides. Neste caso, o corte íngreme na base do talude é o grande responsável pelas movimentações durante os períodos chuvosos. Em depósitos mais espessos, a frente de saturação pode ou não atingir maiores profundidades, dependendo das condições de porosidade e estrutura do tálus. Porosidades com poucas conexões estimulam aumento de poro-pressões que condicionam superfícies de rupturas mais rasas. A quantidade de água infiltrada determina a velocidade do movimento entre rastejo e escorregamento (Cruden & Varnes 1996).

Os escorregamentos foram aqui definidos como circulares e correspondem aos escorregamentos combinados ou rotacionais modificados descritos, respectivamente, por Cruden & Varnes (1996) e Attewell & Farmer (1976). Nesse caso, a frente de saturação atinge mais rapidamente o ponto de fluência do material e a ruptura acontece. Existe grande influência da aproximação do contato solo/rocha na determinação da geometria e profundidade da superfície de ruptura, geralmente circular no topo tornando-se mais aplainada com a profundidade e voltando a ser circular na base.

Depósitos pequenos e acumulados na base do talude geralmente se movimentam lentamente, em função da menor inclinação dessas áreas (ex. Talude Rio Acima). No Talude Rio Acima existem alguns depósitos de tálus suportados pelos blocos. Estes depósitos são mais estáveis, provavelmente em função da menor inclinação do talude (30°) e da pequena espessura do depósito. Certamente, quanto mais grosseiro o material do depósito, maior seu ângulo de atrito, o que o torna mais estável em vertentes suaves. Não foram observados na região casos de depósitos de tálus inclinados e espessos, suportados pelos blocos, e instáveis.

Figura 23 **Modo de ocorrência de fluxo de detritos do tálus na área de estudo.**
 1- Depósitos pouco espessos em área de concentração de água.
 2- Fluxo de detritos.

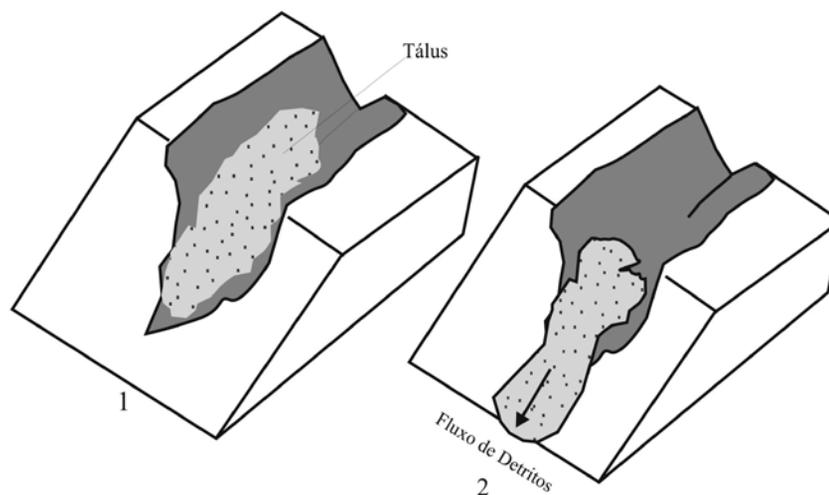
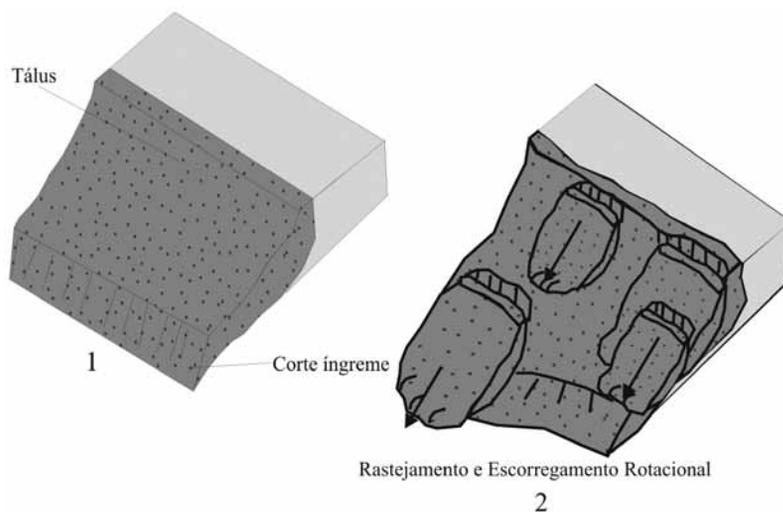


Figura 24 **Modo de ocorrência de rastejamento e escorregamentos circulares do tálus.** 1- Depósito espesso e corte íngreme na base do talude.
 2- Escorregamentos circulares pouco profundos e mais profundos.



Conclusões

A região metropolitana de Belo Horizonte apresenta geologia variada constituída desde rochas muito alteradas a solos residuais, altamente susceptíveis a movimentações de massa. Destacam-se filitos e xistos com alto grau de intemperismo, solos residuais de gnaiss e depósitos de tálus. Cada grupo se distingue pelo modo de ocorrência da movimentação.

Em filitos e xistos, é comum rupturas em cunha que estimulam a alteração da forma original do talude e, conseqüentemente, induzem a ocorrência de outros tipos de ruptura tais como as planar, tombamentos e, por fim, fluxo dos detritos gerados pelos processos anteriores. Quedas de blocos podem ocorrer em rochas um pouco mais resistentes porem muito fraturadas, como os quartzitos e itabiritos e gnaisses são.

Em solos residuais de gnaisses, o horizonte C se apresenta com pouca coesão e altamente susceptível a erosão, seguida de escorregamentos planares e circulares. Os depósitos de tálus são constituídos por material areno-siltoso derivados da fragmentação de filitos e xistos e se movimentam com muita facilidade quando o grau de saturação se torna elevado durante períodos chuvosos, geralmente desencadeando fluxos e rastejamentos.

As chuvas são importantes desencadeadores dos movimentos e, tanto chuvas acumuladas em poucos dias, como chuvas de grande intensidade em poucas horas, podem desencadear escorregamentos.

Os estudos revelaram que a maior parte dos movimentos de massa ocorre de maneira progressiva e não instantânea, dependendo das mudanças geométricas dos taludes e da alteração sofrida pelos materiais geológicos ao longo do tempo. Em todos os casos analisados, a instabilização dos taludes foi acelerada por atividades humanas, ou seja, os movimentos de massa geralmente ocorrem após alguns anos de execução das intervenções, que induzem os maciços de rochas alteradas à busca de novas formas de equilíbrio, através do desencadeamento de processos como erosão e movimentos de massa.

Os tipos de movimentos identificados para cada grupo geológico estudado podem ser alterados ao longo do tempo ou até deixarem de ocorrer, caso as condições de equilíbrio sejam estabelecidas de modo natural ou com a ajuda de medidas reparadoras. Dessa forma, o estabelecimento de medidas preventivas contra movimentos de massa e reparadoras dos taludes escorregados deve levar em consideração todos os fatores condicionantes e os tipos de movimentações característicos de cada situação descrita, evitando-se, assim, a padronização de soluções.

Referências Bibliográficas

- ATTEWELL, P. B., FARMER, I. W. 1976. *Principles of Engineering Geology*. London-NewYork, Chapman and Hall.1045p.
- AUGUSTO FILHO, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de encostas, 1a COBRAE, Rio de Janeiro. Anais, II:721 – 733.
- BALAAM, N. P. 2001 – *Slope Stability Analysis – User's Manual for Program XSlope for Windows*. Centre for Geotechnical Research – University of Sydney, 98p.
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses. *Rock Mechanics*. 6 (4): 189 – 236.
- BIENIAWSKI, Z. T.1989. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley. 215p.
- BISHOP, A.W. 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes, *Geotechnique*, (5): 7-17.
- BISHOP, A.W., MORGENSTERN, N. 1960. Stability Coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10 (4): 129-147.
- CRUDEN, D. M., VARNES, D. J. 1996. Landslides Types and Process. In: Turner, A. K & Schuster (ed.) *Landslides – Investigation and Mitigation, Special Report 247*, Washington, D.C., R.L.National Academy Press, 36 - 75.
- DEERE, D. U., Patton, F. D. 1971. Slope Stability in Residual Soils. State of the art paper. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4, San Juan. *Proceedings*, 1: 87 – 170.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER) 1991. Taludes de Rodovias, Orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo, 388p.
- FERNANDES, G. 2000. *Caracterização Geológico-Geotécnica e propostas de Estabilização da Encosta do Morro do Curral-Centro de Ouro Preto*. Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 136p.
- FERNANDES, C. P., Amaral, C. P. 2000. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: A. J. T. Guerra; S. B. Cunha (ed.) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 123-186.
- FIORI, A., P., Carmignani, L. 2001. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes. Ed. UFPR. 548p.
- FRAZÃO, E. B., MIOTO, J. A., SANTOS, A. R. 1976. O fenômeno de desagregação superficial em rochas argilosas – sua implicação na estabilidade de taludes viários. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1, Rio de Janeiro, *Anais*, 1:211-228.
- GEORIO 2000. *Manual Técnico de Encostas. Análise e Investigação*, Rio de Janeiro, GeoRio, 253p.
- GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M 1976. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda & Universidade de São Paulo, 170p.
- GOMES CORREIA, A. 1988. Revisão da classificação de solos para propósitos de engenharia. *Geotecnia, Lisboa*. 52: 75-90.
- HOEK, E., BRAY, J. 1981. *Rock Slope Engineering*. London, Institution of Min. Metall & Elsevier Applied Science. 358p
- INFANTI JR., N., Filho, F. N. 1998. Processos de dinâmica superficial - In: A. M. S. Oliveira & S. N. A Brito (ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, 131 – 152
- INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM). 1983. *Métodos Para a Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos*. São Paulo, ABGE e Comitê Bras. de Mec. das Rochas. 132p. (Tradução nº12.).
- KING, L. C. 1953. Canons of Landscape Evolution. *Bull. Geolog. Society of America*, Washington, v. 64, n. 7, p. 721-732.
- KROEGER, E. B. 1999. Slope Stability Software, 1: 1-3, <http://www.engr.siu.edu/mining/kroeger>
- KROEGER, E. B. 2000a. Analysis of plane failures in compound slopes. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 14: 215-222.

- KROEGER, E. B. 2000b. The effects of water on Planar Features in Compound Slopes. *Environmental & Engineering Geoscience*, VI (4): 347-351.
- MORGENSTERN, N. R., MATOS, M. M., 1975 – Stability of slopes in residual soil. In: Pan American Conference on Soil Mech. and Found. Eng., V, Buenos Aires, *Proceedings*, III: 367-383.
- PARIZZI, M.G. 2004. Condicionantes e Mecanismos de ruptura de taludes da região metropolitana de Belo Horizonte. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, tese de doutorado, 213 p.
- PARIZZI, MG, SOBREIRA, F.G., GALVÃO, T.C.B., 200, ELMIRO, M.A.T., 2004. Processos e mecanismos de escorregamentos em filitos alterados e tálus: o caso do Talude Ponteio em Belo Horizonte, Brasil. Solos e Rochas-Revista Brasileira de Geotécnica, São Paulo, v27, n1.15-24.
- PARIZZI, M.G. SANTOS, R.M., ARANHA, P.R.A., SOBREIRA, F.G., GALVÃO, T.C.B., OLIVEIRA, C.V., BEIRIGO, E.A. 2005. Micromorfologia de solos e estudos geofísicos aplicados à análise de estabilidade de talude do município de Rio Acima, MG. 11 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Florianópolis, ABGE 2005. – CD rom
- PARIZZI, M.G.; ARANHA, P.R.A. ; SOBREIRA, F. G. ; GALVÃO, T. C. B. 2006 A aplicação do GPR na análise de estabilidade de taludes. Geotecnia - Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa Portugal, v. 106, p. 23-53.
- PATTON, F.D., HENDRON JR., A. J. 1974. General Report on “Mass Movements”. International Congress of the International Association of Engineering Geology, 2, São Paulo, Brazil, *Proceedings*, 2:V-GR.1–V-GR. 57.
- PITEAU, D. R., MARTIN, D. C. 1982. Mechanics of Rock Slope Failure. In: C. O. Brawner (ed.) *Stability in Surface Mining*. Michigan, Edward Brothers Inc., 113-170.
- SANTOS, R. M. 2004. *Caracterização Micromorfológica de Materiais Originados de Diferentes Litologias, em Áreas com Ocorrência de Movimentos de Massa na Região de Belo Horizonte e Rio Acima*. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 119p.
- SERRA JÚNIOR, E., OJIMA, L. M. 1998. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: A. M. S. Oliveira & S. N. A Brito (ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, 211 – 226.
- SILVA, A. S., CARVALHO, E. T, FANTINEL, L. M., ROMANO, A. W., VIANA, C. S. 1995. *Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte*. Convênio: PMBH, SMP, FUNDEP/ UFMG. 490p. (Relatório Final).
- VIANA, C. S. 2000. Caracterização dos Processos Erosivos no Município de Belo Horizonte – Uma Contribuição à Gestão Ambiental e ao Planejamento Urbano. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Sanitária, Ambiental, Hidráulica e Recursos Hídricos - DESA/ UFMG. 217p.
- VIEIRA, B. C., FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T. 1999. Análise qualitativa de fatores condicionantes de escorregamentos rasos a partir de um modelo de previsão de áreas de risco. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9, São Paulo, *Anais*, CDrom, 15p.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B. 1967. *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. 659p.
- TURNER, A. K. 1996. Colluvium and Talus. In: TURNER, A. K & SCHUSTER, R. L. (ed.) *Landslides – Investigation and Mitigation, Special Report 247*. Washington D. C., National Academy Press, 525 - 554.
- WOLLE, C. M., HACHICH, W. 1989. Rain-induced landslides in southeastern Brazil. In: Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, Rio de Janeiro, *Proceedings*, 3:1639 – 1642
- YANG, Z. Y., CHUANG, C. C. 1997. A theoretical study on the progressive landslide of blocky slopes. In: Marinou, Koukis, Tsiambaos & Stoumaras (ed.). *Engineering Geology and the Environment*. Rotterdam, 1143 -1147.