

# A APLICAÇÃO DO GPR NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

## The application of GPR in the slope stability analysis

Maria Giovana Parizzi\*

Paulo Roberto Antunes Aranha\*

Frederico Garcia Sobreira\*\*

Terezinha Cássia de Brito Galvão\*\*\*

**RESUMO** – Este trabalho demonstra a aplicabilidade do GPR (Radar de Penetração no Solo) no estudo de estabilidade de três taludes urbanos, localizados na região metropolitana de Belo Horizonte, Brasil. Os taludes foram denominados de Patagônia, Planetóides e Rio Acima, e são constituídos, respectivamente, por filito, depósitos de tálus, e xisto. A cada período chuvoso, todos sofrem sucessivos escorregamentos, responsáveis por graves danos materiais. O uso do GPR permitiu a identificação de estruturas em subsuperfície, tanto dos maciços rochosos quanto dos maciços de solo, e possibilitou a execução da análise das rupturas dos taludes. No Talude Patagônia, os perfis de geofísica possibilitaram a detecção da profundidade e geometria da superfície de ruptura planar do último escorregamento ocorrido no maciço de filito. No Talude Planetóides, foi possível detectar a espessura do depósito de tálus que repousa sobre um maciço de filito, e também a presença de mais de uma superfície de ruptura circular. No Talude Rio Acima, a investigação geofísica possibilitou a detecção da disposição e intensidade das fraturas e da xistosidade em profundidade, condicionantes de rupturas planares no maciço de xisto. A análise dos dados do GPR, juntamente com outros métodos geotécnicos tradicionais de análise de estabilidade, permitiu a identificação dos condicionantes e mecanismos de ruptura dos taludes, comprovando ser a técnica de grande utilidade em análises de estabilidade.

**ABSTRACT** – This study shows the applicability of the GPR (Ground Penetrating Radar) in the stability analysis of three urban slopes, located in the metropolitan region of Belo Horizonte, Brazil. The slopes were named Patagônia, Planetóides, and Rio Acima, and are composed, respectively, of phyllites, talus, and schist. During rainy seasons, successive landslides occur at these slopes, causing casualties. The use of the GPR made possible to identify deeper structures and layers of the soil and rock masses, and also to analyse the slope failure mechanisms. At the Patagônia Slope, the geophysic profiles led to the detection of the depth and geometry of the failure surface of the last planar slide that occurred in the phyllite rock mass. At the Planetóides Slope, it was possible to detect the talus depth that rests on a phyllite rock mass, and also the presence of more than one rotational failure surface. At the Rio Acima Slope, the GPR investigation led to the identification of deeper discontinuities and the schistosity, which are responsible for planar failures. The analysis of the GPR data, together with other traditional slope stability analyses, allowed the identification of the triggering factors and landslide mechanisms that act in the slopes. This study proves that the use of the GPR plays an important part in the slope stability analyses.

**PALAVRAS CHAVE** – geofísica, GPR, escorregamentos, análise de estabilidade.

---

\* Departamento de Geologia – Universidade Federal de Minas Gerais – giece@uai.com.br

\*\* Departamento de Geologia – Universidade Federal de Ouro Preto

\*\*\* Departamento de Geotecnica e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais

## 1 – INTRODUÇÃO

No município de Belo Horizonte e arredores, os escorregamentos têm sido freqüentes, havendo, nos últimos anos, uma média de 300 ocorrências, geralmente com graves conseqüências. Cada vez mais, torna-se necessário o desenvolvimento de planos preventivos de defesa civil, e o uso de técnicas de engenharia adequadas. Para isso, é fundamental realizar investigações sobre os tipos de mecanismos de ruptura existentes na região. Os métodos utilizados em análises de estabilidade de taludes são numerosos, e a escolha daqueles mais adequados para cada caso depende, basicamente, das características gerais dos taludes escolhidos, e das facilidades ou dificuldades para a aplicação de determinados procedimentos.

Este trabalho apresenta a análise de estabilidade de três taludes instáveis, localizados em diferentes locais na região metropolitana de Belo Horizonte. Os taludes, denominados de Patagônia, Planetóides e Rio Acima, são constituídos, respectivamente, por filito, depósito de tálus, e xisto. Os métodos aplicados na investigação dos taludes envolveram desde as tradicionais análises geológicas e geotécnicas dos terrenos até prospecções geofísicas através do uso do Radar de Penetração no Solo, conhecido como GPR. A aplicação do GPR como método de investigação é bastante recente, e ele tem sido utilizado para a detecção da conformação e das estruturas de maciços rochosos, na detecção de contatos entre estratos ou camadas de solo, e na determinação da espessura de solos, dentre outras feições dos maciços. Neste estudo, a exploração dos dados geofísicos, em conjunto com informações das outras investigações geológicas e geotécnicas realizadas, possibilitou a execução da análise, incluindo retroanálises, das rupturas ocorridas nos taludes, contribuindo para a identificação dos principais fatores condicionantes e mecanismos de ruptura atuantes em cada um, o que poderá ajudar na prevenção e mitigação dos escorregamentos na região.

Os três taludes analisados localizam-se nos municípios de Belo Horizonte e Rio Acima, e incorporam litologias do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1). Os Taludes Patagônia e Planetóides estão inseridos no Grupo Piracicaba, e são, respectivamente, compostos por filitos da Formação Fecho do Funil e filitos e quartzitos ferruginosos da Formação Cercadinho. O Talude Rio Acima é constituído por quartzo-sericito-xisto do Grupo Nova Lima.

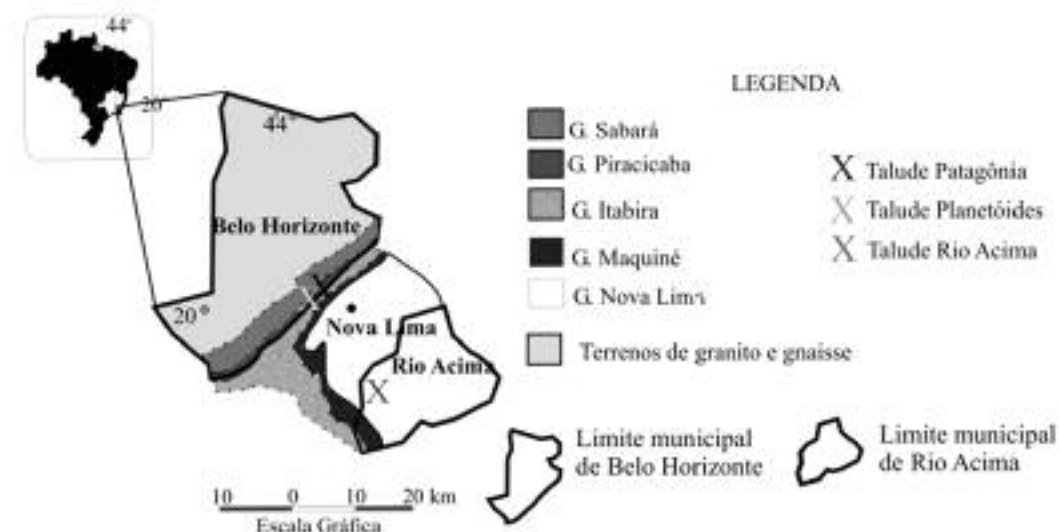


Fig. 1 – Localização dos taludes analisados, e geologia geral da área.

## 2 – MÉTODOS

Os métodos escolhidos para a investigação dos taludes foram empregados de acordo com os seguintes critérios:

### *Investigações geológicas e geotécnicas*

- Execução da topografia dos taludes, para a obtenção das suas características morfológicas.
- Os dados obtidos pelas inspeções geológicas de campo foram tratados através do sistema de classificação dos maciços rochosos RMR, de Bieniawski (1989), e do sistema Q, de Barton *et al.* (1974). Os critérios de Hoek e Brown (1980) para a classificação de maciços rochosos foram usados eventualmente, quando se tornou necessário o refinamento dos dados obtidos pelas classificações RMR e Q. Os critérios de Hoek e Brown (1980), adaptados posteriormente por Hoek *et al.* (2002), utilizam basicamente quatro parâmetros, para a análise da resistência à ruptura do maciço rochoso – GSI (Índice Geológico de Resistência), D (Fator de Perturbação do Maciço), mi (Parâmetro da Rocha Intacta) e sigci (Resistência Não Confinada da Rocha Intacta). Os quatro parâmetros podem ser calculados diretamente pelo programa Roclab, da Rocscience (2002).
- A análise de estabilidade dos maciços rochosos foi executada seguindo-se os critérios da análise cinemática das descontinuidades, com o auxílio de uma projeção estereográfica e da análise de equilíbrio limite de acordo com Hoek e Bray (1981). Para a execução da análise de equilíbrio limite, utilizaram-se os programas “Planar Failure Analysis” e “Wedge Failure Analysis”, desenvolvidos por Kroeger (1999) e Kroeger (2000).
- A análise de estabilidade de equilíbrio limite dos depósitos de vertentes foi executada de acordo com o método das fatias, de Bishop (1955). O programa Xslope, desenvolvido por Balaam (2001), foi utilizado para a execução das análises de estabilidade do depósito de tálus, incluindo retroanálises, executadas conforme procedimentos descritos por Fontoura *et al.* (1984), Duncan (1996) e Abramson *et al.* (2002).
- Caracterização física dos depósitos de tálus existentes nos taludes, através de ensaios de laboratório e de campo, em amostras deformadas e indeformadas da matriz do tálus. Os ensaios incluíram granulometria, limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos, cisalhamento direto com amostras inundadas, e massa específica natural da matriz do tálus. Os ensaios *in situ* da permeabilidade foram executados com o auxílio do permeâmetro Guelph. Para a interpretação da classe textural dos solos analisados, a partir dos resultados dos ensaios de granulometria conjunta, optou-se pelo uso da classificação SUCS, adaptada por Gomes Correia (1988). Para os depósitos de tálus, o critério de classificação SUCS foi aplicado duas vezes. A primeira aplicação considerou a classificação do tálus de modo geral, incluindo a edregulho foi retirada, isso visando enfatizar a textura apenas da matriz dos depósitos. Gomes Correia (1988) adaptou o sistema de classificação SUCS para a descrição de solos naturais, e essa adaptação foi considerada mais adequada para este estudo.
- Durante dois períodos chuvosos consecutivos (Outubro de 2001 a Janeiro de 2002, e Novembro de 2002 a Janeiro de 2003), os taludes foram observados diariamente.

### *Investigações geofísicas*

Nos Taludes Planetóides, Rio Acima e Patagônia, foram realizados ensaios geofísicos com a utilização do GPR (*Ground Penetrating Radar*). O GPR é um equipamento capaz de realizar

investigação indireta rasa do subsolo, utilizando as propriedades das ondas eletromagnéticas (Telford *et al.*, 1990). O GPR consiste na emissão contínua de ondas eletromagnéticas (espectros variando entre 10 e 2.500 MHz), e na recepção dos sinais refletidos nas estruturas ou interfaces em subsuperfície (Souza *et al.*, 1998).

Os sinais são emitidos e recebidos através de antenas dispostas na superfície do terreno. As medidas de tempo de percurso das ondas eletromagnéticas são efetuadas ao longo de uma linha, e, quando justapostas lado a lado, fornecem uma imagem detalhada (de alta resolução) da superfície, ao longo do perfil estudado. A penetração do sinal de radar está condicionada primeiramente pelas propriedades elétricas dos terrenos (condutividade/resistividade elétrica).

A prospecção com o GPR é conduzida ao longo de linhas longitudinais e transversais, na face dos taludes. Antenas de 100 MHz foram utilizadas para a emissão e recepção das ondas eletromagnéticas. Esta frequência permite uma boa penetração das ondas nos maciços, o que possibilita a sua investigação a maiores profundidades (Souza *et al.*, 1998).

A utilização do GPR neste estudo teve a finalidade de identificar contatos entre os depósitos de tálus e os maciços, a espessura dos depósitos, a profundidade e geometria das superfícies de ruptura existentes, e a intensidade e orientação das descontinuidades dos maciços rochosos em profundidade.

### **3 – RESULTADOS**

#### **3.1 – Talude Patagônia**

O Talude Patagônia (Figura 2) localiza-se na Rua Patagônia, em Belo Horizonte. O talude foi executado para a construção de um edifício, que, em 1995, foi abandonado por seus moradores, após um grande escorregamento, responsável pelo lançamento de lama e detritos na garagem, destruição da laje, e outros estragos. O escorregamento deixou no talude uma grande cicatriz de ruptura (Figura 2). Nenhuma obra de contenção foi realizada, e, atualmente, o maciço rochoso desconfinado está instável e sofrendo outras rupturas durante períodos chuvosos.

Em Janeiro de 2003, quando houve excepcionais índices pluviométricos, ocorreu no talude outro escorregamento expressivo, novamente lançando lama e detritos na garagem do edifício abandonado.

##### **3.1.1 – Análise geológica e geotécnica do Talude Patagônia**

O talude possui uma altura de 30 m, e a sua inclinação é variável, com uma face escarpada no topo, com aproximadamente 60°, suavizando para 35°, a jusante. É constituído por um maciço rochoso alterado, coberto parcialmente por depósito de tálus.

##### **Classificação e análise cinemática do maciço rochoso do Talude Patagônia**

No talude, o maciço rochoso caracteriza-se, em grande parte, por filitos alterados da Formação Fecho do Funil.

A Norte do talude, esta formação está em contato tectônico com quartzitos finos e friáveis da Formação Taboões, que, por sua vez, estão em contato gradual com filitos grafitosos da Formação Barreiro, todos pertencentes ao Grupo Piracicaba. O contato tectônico é marcado por um plano de falha, acompanhado por pequenos dobramentos, responsáveis pela variação do mergulho da foliação, que localmente passa de 20° ou 30° para 55°. A Figura 3 exhibe o mapa topográfico e geológico do Talude Patagônia.



**Fig. 2** – Vista geral do Talude Patagônia.

A trama estrutural do maciço é representada por quatro famílias de descontinuidades (F1, J2, J3, J4), sendo F1 a representante da xistosidade, e J2, J3 e J4 as famílias de fraturas, e pela falha inversa que marca parcialmente o contato entre as formações Fecho do Funil e Taboões (Quadro 1).

**Quadro 1** – Parâmetros de caracterização das descontinuidades do Talude Patagônia, conforme critérios da ISRM (1983).

	Atitude	Abertura	Rugosidade	Espaçamento	Persistência	Resistência
Talude	40/68 (topo) 40/35 (meio e base)					
F1	160/55	1 a 5 mm	Plano/lisa	< 1 cm	> 20 m	Rocha extremamente fraca
J2	340/60	3 a 5 mm	Plano/lisa	8 a 18 cm	1 a 3 m	Rocha extremamente fraca
J3	70/40	3 a 5 mm	Plano/lisa	3 a 25 cm	3 a 10 m	Rocha extremamente fraca
J4	240/90	3 a 5 mm	Plano/lisa	3 a 25 cm	3 a 10 m	Rocha extremamente fraca
Falha	170/70	3 a 5 mm	Plano/lisa		> 20 m	Rocha extremamente fraca

Ao longo do plano de falha, a água percola com facilidade, aprofundando o sulco erosivo na parte central do talude. A feição erosiva, com uma profundidade média de 1 metro, escava o talude ao meio, gerando duas novas faces secundárias, uma com a direção de mergulho voltada para SE,

aproximadamente paralela ao plano da falha e à xistosidade, e a outra paralela à família de fratura J2 (340/60). Embora haja três litologias aflorantes no talude, as notas das classificações RMR e Q para o maciço rochoso não variaram muito.

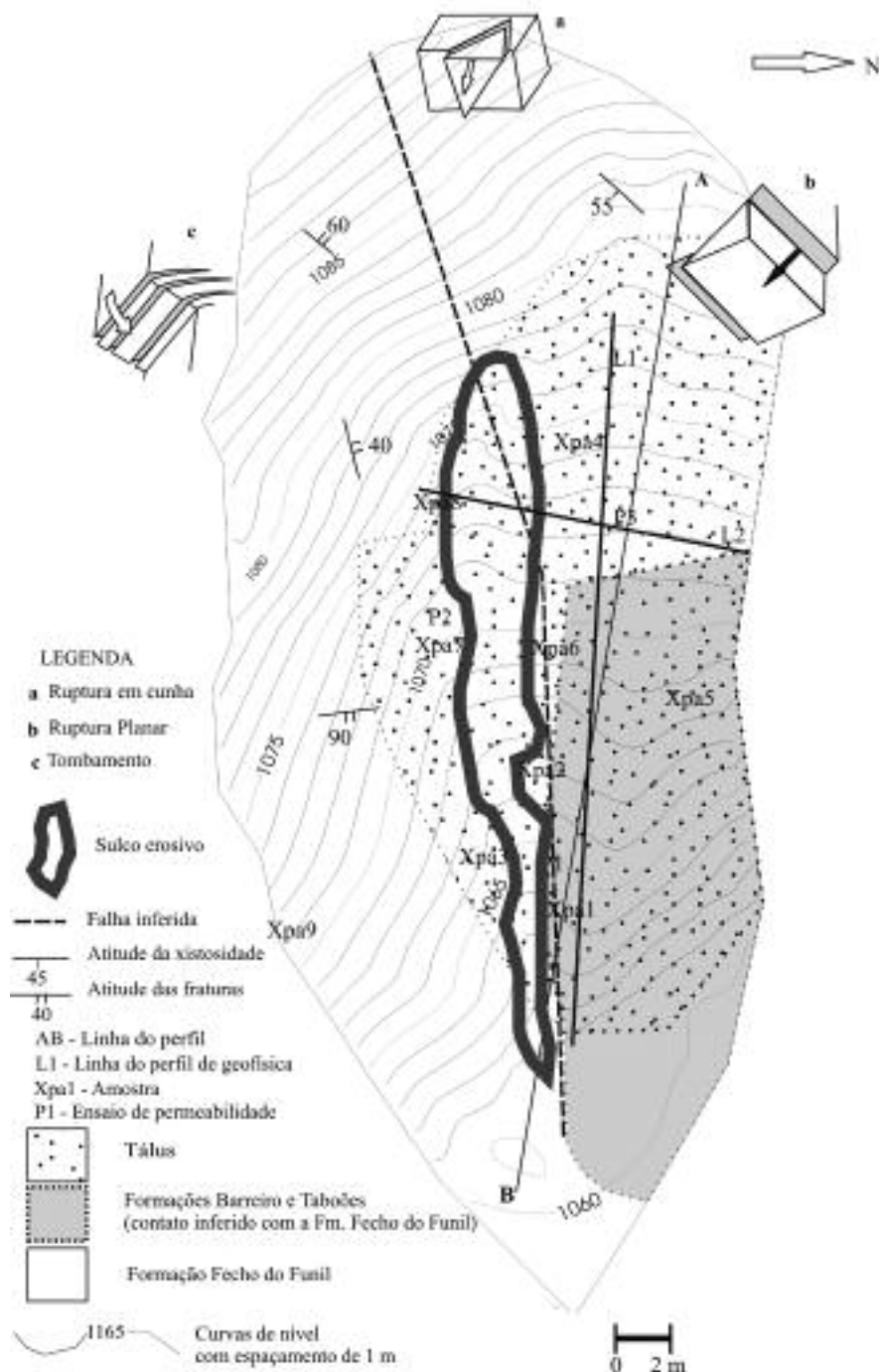


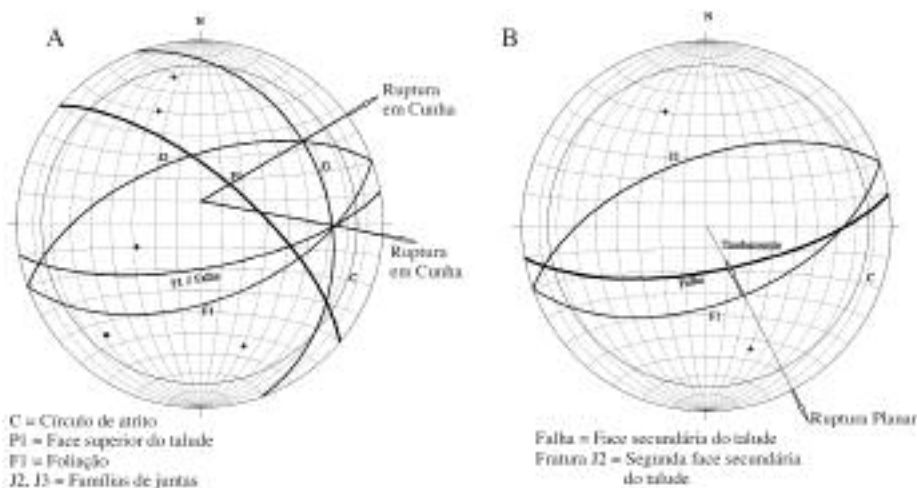
Fig. 3 – Mapa topográfico e geológico do Talude Patagônia.



De acordo com o sistema RMR, a área do talude ocupada pelos filitos alterados da Formação Fecho do Funil obteve uma nota pouco superior à nota obtida pela área ocupada pelos filitos grafitosos e quartzitos friáveis; porém, todas permaneceram na classe de maciço muito ruim, o que significa uma coesão menor que 100 kPa, e um ângulo de atrito menor ou igual a 15°.

O sistema de classificação Q apontou o maciço como extremamente ruim, e forneceu um valor de ângulo de atrito de 14°. Os dados obtidos foram refinados pelo critério de Hoek e Brown, através do uso do programa Roclab. Assim, obteve-se, para o maciço, uma coesão igual a 15 kPa, e um ângulo de atrito igual a 13°.

A análise cinemática foi realizada após a interpretação da projeção estereográfica das famílias de descontinuidades (Figura 4).



**Fig. 4** – Estereograma de Schmidt, e análise cinemática das descontinuidades do Talude Patagônia:

- A) susceptibilidade de rupturas em cunha em relação à face do talude;
- B) susceptibilidade de rupturas planares e tombamentos em relação às faces secundárias no talude, formadas pelos planos de falha e da família de fraturas J2

Os dados obtidos pela análise cinemática (Figura 4) estabelecem a susceptibilidade de ocorrência de rupturas em cunha, rupturas planares, e tombamentos. A cunha seria formada pela interseção das famílias de fraturas J3 e J2, e J3 com F1. A ruptura em cunha seria estimulada pela orientação do corte do talude. Entretanto, recentes inspeções de campo não evidenciaram a ocorrência de rupturas dessa natureza, apenas tombamentos e, em maiores proporções, rupturas planares. Rupturas planares ocorrem ao longo dos planos de foliação (F1), estimuladas pelo desconfinamento dessas estruturas, em todo lado Norte do talude (Figuras 3 e 4), após o processo erosivo. Os tombamentos dos planos de foliação (F1), por sua vez, ocorrem no lado Sul do talude, estimulados pela família de fraturas J2. Em Janeiro de 2003, após uma semana de chuvas intensas, no lado Norte do talude, ocorreu uma ruptura planar significativa, acompanhada por pequenos escorregamentos do depósito de tálus.

### **Caracterização física do depósito de tálus do Talude Patagônia**

No depósito de tálus, foi observada a ocorrência de pequenas rupturas circulares e também de fluxos de detritos, durante períodos chuvosos. Foram recolhidas 9 amostras do depósito, para ex-

cução de ensaios geotécnicos, como a caracterização física da matriz, e ensaios de cisalhamento direto com amostras inundadas. Os locais de coleta das amostras são exibidos na Figura 3, e os resultados dos ensaios estão expostos no Quadro 2. O tálus caracteriza-se por fragmentos maiores (de até 30 cm) de filitos da Formação Fecho do Funil, e quartzitos e filitos grafitosos das Formações Taboões e Barreiro, todos envolvidos por uma matriz mais fina. A espessura desse depósito varia de 70 cm a 1,6 m (valor estimado pela análise do perfil de geofísica).

A classificação para as amostras do tálus variou entre silte arenoso, cascalho siltoso com areia, silte arenoso com cascalho, e silte cascalhento com areia. A classificação da matriz do tálus foi de silte arenoso e de silte com areia (Quadro 2). As amostras Pa - 1 e Pa - 5 foram coletadas nos pontos onde o depósito apresentava maior quantidade de fragmentos do quartzito friável e do filito grafitoso. As amostras praticamente não apresentaram pedregulhos (Quadro 2). Durante os ensaios granulométricos, todas as amostras foram destorroadas, e os fragmentos muito alterados das amostras Pa - 1 e Pa - 5 se desmancharam totalmente. Isso demonstra um maior grau de alteração das rochas das Formações Taboões e Barreiro.

Os ensaios de permeabilidade *in situ* forneceram uma condutividade hidráulica, para o depósito de tálus, da ordem de  $10^{-4}$  cm/s. Este valor está de acordo com os valores encontrados por Terzaghi & Peck (1967), para solos siltosos. Os ensaios de cisalhamento direto com amostras inundadas forneceram uma coesão nula, e um ângulo de atrito da ordem de  $28^{\circ}$ .

### ***Prospecção geofísica do Talude Patagônia***

A investigação geofísica no Talude Patagônia foi realizada após o escorregamento de Janeiro de 2003, objetivando detectar a profundidade e geometria das superfícies de ruptura, tanto do maciço rochoso quanto do tálus. Outro objetivo era obter a espessura do depósito de tálus, e observar a relação entre a orientação das descontinuidades e as superfícies de ruptura. As linhas de geofísica foram traçadas no local do talude onde as movimentações foram mais frequentes, no lado Norte. Uma linha foi longitudinal, na face do talude, e a outra perpendicular, e foram denominadas, respectivamente, de L1 e L2 (Figura 3).

A linha L1 possui 26 m de extensão, e a linha L2 possui 12 m de extensão. Foram utilizadas antenas de 100 MHz durante a prospecção. De acordo com as reflexões obtidas, foi possível visualizar anomalias nas duas linhas.

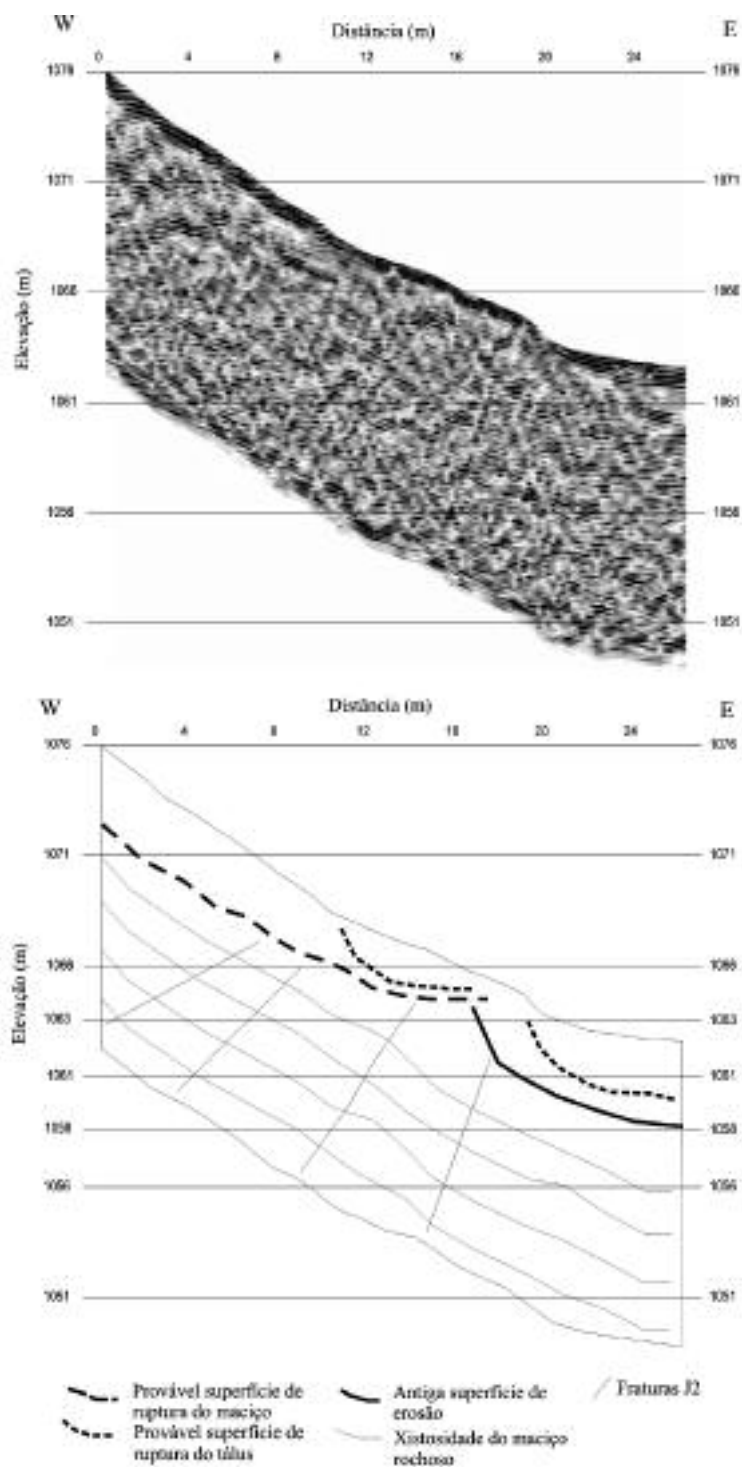
As reflexões mais nítidas da linha L1 refletem as superfícies de ruptura, tanto do tálus quanto do maciço rochoso (Figura 5). As superfícies de ruptura e os contatos se destacam por apresentarem reflexões mais fortes. Foram detectadas três superfícies de ruptura. Duas delas são menos extensas, ocorrem à profundidade média de 1,3 m, e possuem formas circulares. A terceira superfície é mais profunda (profundidade média de 3 m) e extensa. Apresenta uma forma planar, até à sua base, próximo à cota de 1064 m, onde se torna ligeiramente circular. Acredita-se que as duas primeiras sejam superfícies de ruptura do tálus, devido à sua forma circular e profundidade mais rasa, e a terceira seja uma superfície de ruptura planar do maciço de filito, ao longo da xistosidade. As reflexões mais fracas e mais profundas refletem a xistosidade e algumas famílias de fraturas do maciço, sendo possível identificar a xistosidade F1 e a família J2. Outra anomalia, semelhante a uma superfície curva, que ocorre entre as cotas de 1063 m e 1058 m, foi interpretada como um antigo sulco erosivo, preenchido pelo tálus. Esta interpretação foi suportada por observações de campo. A linha L2 permitiu uma visualização das mesmas superfícies de ruptura mencionadas, porém, em corte frontal (Figura 6).



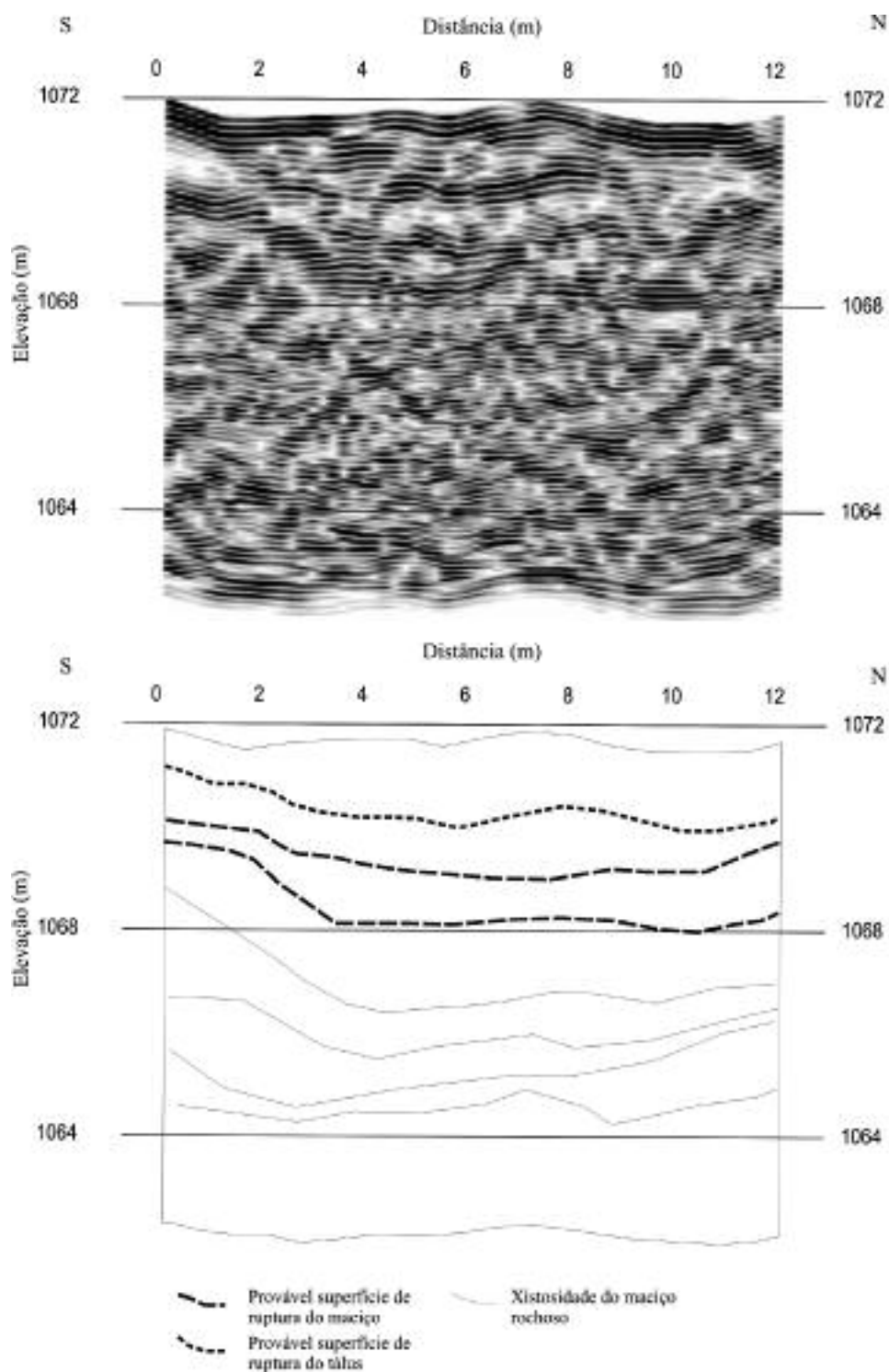
Quadro 2 – Parâmetros geotécnicos das amostras do tálus que cobre o Talude Patagônia.

Amostra	Ponto de coleta da amostra no talude	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	e	n (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Granulometria (%)						Classificações	
											Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho	SUCS	SUCS*
Pa-1	Base	2,86	1,47	1,20	42	NP	1,4	58	1	28	5	62	18	10	3	2	ML Silte arenoso	ML Silte arenoso
Pa-2	Base	2,89	1,87	1,58	38	NP	0,8	44	-	-	7	41	10	4	10	29	GM Cascalho siltoso com areia	ML Silte arenoso
Pa-3	Base	2,76	1,87	1,58	40	NP	0,8	44	-	-	4	38	11	4	6	37	GM Cascalho siltoso com areia	ML Silte arenoso
Pa-4	Meio	2,88	1,87	1,58	40	NP	0,8	44	-	-	9	48	13	5	3	22	ML Silte cascalhento com areia	ML Silte com areia
Pa-5	Meio	2,84	1,94	1,56	34	NP	0,8	44	0	28	2	66	26	4	1	1	ML Silte arenoso	ML Silte arenoso
Pa-6	Meio	2,87	1,94	1,56	39	NP	0,8	44	-	-	4	39	10	5	7	35	GM Cascalho siltoso com areia	ML Silte arenoso
Pa-7	Topo	2,86	1,94	1,56	39	NP	0,8	44	-	-	4	36	10	5	7	38	GM Cascalho siltoso com areia	ML Silte arenoso
Pa-8	Topo	2,89	1,94	1,56	42	NP	0,9	47	-	-	3	53	11	4	6	23	ML Silte cascalhento com areia	ML Silte com areia
Pa-9	Topo	2,92	1,94	1,56	47	NP	0,9	47	-	-	9	57	9	4	3	18	ML Silte cascalhento com areia	ML Silte com areia

$\rho_s$  – massa específica dos grãos;  $\rho_{nat}$  – massa específica natural;  $\rho_d$  – massa específica seca; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; NP = não plástico; e – índice de vazios; n – porosidade; c – coesão;  $\phi$  – ângulo de atrito  
argila: < 0,002 mm; silte: 0,002 - 0,075mm; areia fina: 0,075 - 0,42mm; areia média: 0,42 - 2mm; areia grossa: 2 - 4,8mm; pedregulho: > 4,8mm  
\*apenas da matriz, desprezada a fração pedregulho.



**Fig. 5** – Perfil do GPR, realizado com uma antena de 100MHz, ao longo da linha 1, no Talude Patagônia, seguido de interpretação.



**Fig. 6** – Perfil do GPR, realizado com uma antena de 100MHz, ao longo da linha L2, no Talude Patagônia, seguido de interpretação.

### 3.1.2 – Análise da estabilidade do Talude Patagônia

Após todas as investigações realizadas, foi possível observar que a ruptura planar, condicionada pela xistosidade, é a mais susceptível de ocorrer no talude, e também a que mobiliza maior volume de material talude abaixo, como o escorregamento ocorrido em Janeiro de 2003. Rupturas em cunha são menos freqüentes, assim como os tombamentos. Estas duas rupturas ocorrem, respectivamente, nas partes central e Sul do talude (Figura 3), e ambas causam a liberação de blocos pequenos de rocha, que irão contribuir para a formação do tálus.

Com base no modelo das superfícies de ruptura visualizadas pelo GPR, e utilizando-se o programa *Plane Failure Analysis*, elaborou-se um modelo para o bloco rochoso que sofre a ruptura planar (Figura 7). Como a resistência do maciço é muito baixa, principalmente das Formações Barreiro e Taboões, o bloco, em forma de uma lasca fina, adquire uma forma mais circular na base, devido ao cisalhamento desse material, provocado pela pressão do maciço deslocado acima.



**Fig. 7** – Simulação do bloco de ruptura planar do maciço rochoso, e rupturas do tálus.

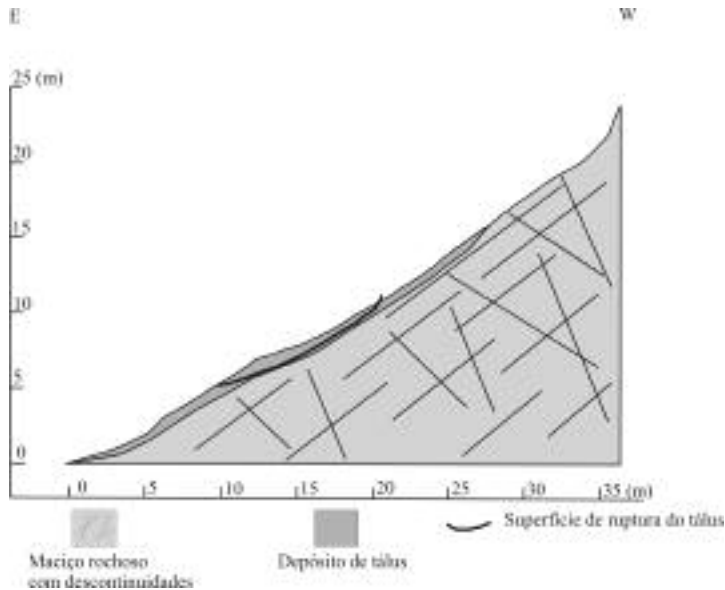
Os dados de entrada usados no programa, e os fatores de segurança resultantes estão expostos no Quadro 3. Os valores de coesão e ângulo de atrito foram os valores adquiridos pela classificação do maciço. A altura de 2 m corresponde à altura da base do bloco de ruptura entre as cotas de 1065 e 1063 m, obtida através da análise do perfil de geofísica L1. Somente com essa altura é que se pode simular, no programa, um bloco, semelhante a uma lasca fina e extensa, coerente com o escorregamento ocorrido no talude. Para a simulação do bloco, outras condições tiveram que ser adotadas, tais como: a posição da crista deve ser no topo da base do bloco, a face inferior do talude terá a inclinação da face inferior do bloco ( $70^\circ$ ), e a face superior terá uma inclinação ligeiramente inferior à da xistosidade ( $34,999^\circ$ ), isso para atender às condições de Hoek e Bray (1981) pré-estabelecidas para rupturas planares.

O programa *Plane Failure Analysis* possibilitou a simulação da porcentagem de preenchimento de água ao longo da xistosidade, necessária para que o fator de segurança indique a condição limite, ou seja, igual a 1. A porcentagem foi de 80 %, considerando a presença de uma fenda de tração seca. Para a xistosidade totalmente preenchida por água, e totalmente seca, os valores de fator de segurança foram, respectivamente, 0,7 e 1,3. A ruptura planar estimulou a movimentação simultânea do depósito de tálus pré-existente no talude, acrescido de novas camadas que se formaram durante esse período.

**Quadro 3** – Dados de entrada para o cálculo do FS da ruptura planar do Talude Patagônia.

Dados de Entrada		Ruptura Planar
Ângulo de atrito		13°
Coesão		15 kPa
Altura da face do talude considerada (face secundária)		2 m
Distância da fenda de tração à crista		20 m
Peso específico da rocha intacta*		21,32 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da água		9,8 kN/m <sup>3</sup>
Atitude da xistosidade		160/35
Ângulo da face superior do talude		34,999°
Ângulo da face inferior do talude		70°
FATORES DE SEGURANÇA:		
	Xistosidade 100% preenchida por água	0,669
	Xistosidade parcialmente preenchida por água (80%)	1
	Talude seco	1,300
*Fonte do dado: Fernandes (2000)		

Foi executada uma retroanálise do escorregamento do tálus, com o auxílio do programa Xslope, visando reconstituir as condições geotécnicas e geométricas existentes no talude, no momento da ruptura (Figura 8).



**Fig. 8** – Perfil simulando a superfície de ruptura do tálus do Talude Patagônia.

Os parâmetros utilizados para a execução da retroanálise incluíram os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, com amostras inundadas, da matriz do depósito, e a geometria da superfície de ruptura obtida pela prospecção geofísica. Os valores de poro-pressões foram simulados com o auxílio do coeficiente  $r_u$ , desenvolvido por Bishop e Morgenstern (1960), que corresponde à taxa:

$$r_u = \frac{u}{\gamma h}, \text{ onde:} \tag{1}$$

- u = poro-pressão da água;
- $\gamma$  = peso específico do solo
- h = profundidade da superfície de ruptura.

O Quadro 4 exhibe os dados de entrada da análise e o fator de segurança obtido.

**Quadro 4** – Parâmetros utilizados para a retroanálise da ruptura do tálus, e resultados obtidos.

Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	$r_u$	$\gamma$ (kN/m³)	Profundidade (m)	Poro pressão (kPa)	FS
tálus	0	28	0,51	18	1,3	12	0,87

A poro-pressão de 12 kPa, ao longo da superfície de ruptura, foi considerada alta, entretanto, no período do escorregamento, os índices pluviométricos foram excepcionais, alcançando valores diários de 217 mm, e acumulados em 4 dias de 282 mm. A pequena espessura do depósito sobre o maciço rochoso mais impermeável e sua condutividade hidráulica ( $10^{-4}$  cm/s) são fatores que também justificam a facilidade de saturação do depósito, e a criação de poro-pressões.

### 3.2 – Talude Planetóides

O Talude Planetóides (Figura 9), com uma inclinação média de 30° e uma altura de 40 m, localiza-se entre a Br-356 (topo) e a Rua Planetóides (base). O maciço rochoso está totalmente coberto por depósito de tálus, com fragmentos de rochas da Formação Cercadinho. Esse talude vem se movimentando durante quase todos os períodos chuvosos. Os prejuízos decorrentes das movimentações configuram na interdição do tráfego da rua e prejuízos econômicos, pois, regularmente, máquinas retiram o material escorregado e executam cortes verticais na base do tálus.

O tálus possui fragmentos de filito e quartzito, geralmente muito ferruginosos, o que resulta em uma coloração cinza escura a preta, para a matriz do depósito. Neste depósito, é nítido o suporte dos fragmentos pela matriz mais abundante. Amostras deformadas da matriz do tálus foram retiradas do talude para análise de caracterização e resistência. Os resultados das análises estão expostos no Quadro 5, e a posição de coleta das amostras está exibida na Figura 10.

A matriz do tálus constitui-se por material silto-arenoso, com exceção das amostras PL-base 2 e PL-base 3, que foram consideradas areno-siltosas. Incluindo a fração pedregulho, o depósito possui uma textura de cascalho siltoso com areia, e areia siltosa com cascalho (Quadro 5). Os ensaios de cisalhamento direto forneceram ângulos de atrito entre 30° e 28° e coesões entre 0 e 10 kPa. A condutividade hidráulica, obtida através dos ensaios de permeabilidade *in situ*, foi da ordem de  $10^{-4}$ cm/s para os ensaios no topo do talude e de  $10^{-5}$ cm/s, para o ensaio realizado na base do talude. Estes valores estão de acordo com aqueles obtidos por Terzaghi e Peck (1967), para solos silto-arenosos e siltosos. De acordo com esses autores, solos com altos índices de vazios podem possuir baixos valores de condutividade hidráulica, quando constituídos por minerais micáceos, que é o caso da matriz do tálus.





**Fig. 9** – Vista geral do Talude Planetóides, exibindo cicatrizes de ruptura, e material escorregado na base, invadindo a rua.

### ***3.2.1 – Investigações geofísicas do Talude Planetóides***

As investigações geofísicas no Talude Planetóides foram executadas com o objetivo de investigar a espessura do tálus, caracterizar a geometria das superfícies de ruptura existentes e definir o contato entre o depósito e o maciço. Foram executadas 4 linhas, sendo 3 transversais e uma longitudinal, na face do talude, como exibido na Figura 10. A extensão da linha 1 (L1) foi de 78 m, e das linhas 2 (L2), 3 (L3) e 4 (L4) foi, respectivamente, de 17, 22 e 21 m.

A prospecção longitudinal, ao longo da linha L1, detectou a presença do depósito de tálus sobre o maciço rochoso, através de dois tipos de reflexões de onda, a saber:

- as reflexões do tálus geram ondas fortes e contínuas; e
- as reflexões do maciço rochoso geram linhas mais fracas e dispersas.

Também foi possível a visualização da geometria de duas superfícies de ruptura no tálus, representadas por reflexões fortes e paralelas ao contato tálus/macico rochoso, e da foliação do maciço da Formação Cercadinho, representada por reflexões mais profundas (Figura 11), mergulhando para Sul, com um ângulo aproximado de 30°.

Os perfis transversais (Figuras 12 e 13) permitiram a detecção dos mesmos tipos de reflexões. O contato do depósito de tálus com o maciço rochoso está nítido, e foi possível observar que a espessura média para o tálus é de 3 m, variando ligeiramente em função do relevo local. Nestes perfis, também foi possível visualizar a ocorrência de mais de uma superfície de ruptura no tálus, o que demonstra a ocorrência de escorregamentos sucessivos. Algumas delas são pouco profundas (1 a 2 m), e outras são mais profundas, próximas ao contato tálus/macico (3 m). Estas superfícies estão representadas por reflexões mais fortes, que se destacam como linhas, geralmente contínuas e semi-circulares, no depósito de tálus.

### ***3.2.2 – Correlação entre os escorregamentos do Talude Planetóides e as taxas de precipitação***

Como já foi mencionado anteriormente, o talude vem sofrendo movimentações, desde a abertura da Rua Planetóides. Essas movimentações foram acompanhadas, durante dois períodos chuvo-

sos consecutivos, entre Outubro e Janeiro dos anos de 2001 e 2002, e entre Outubro e Janeiro de 2002 e 2003 (Quadro 6). As movimentações de 2001 foram mais lentas, do tipo rastejo. As movimentações ocorridas em Dezembro de 2002 e Janeiro de 2003, foram escorregamentos mais rápidos e volumosos, ocorrendo de um dia para o outro, e provocaram a total interdição da Rua Planetóides. As taxas de precipitação que condicionaram os dois últimos escorregamentos, foram as mais altas em todas as categorias, ou seja, diárias e acumuladas em quatro dias (Quadro 6). Percebe-se, no entanto, que valores acumulados acima de 60 mm são suficientes para estimularem um rastejo.

### **3.2.3 – Retroanálise dos escorregamentos do Talude Planetóides**

Os dados obtidos pelas investigações permitiram a execução de uma retroanálise das últimas rupturas ocorridas no Talude Planetóides. Os parâmetros utilizados incluíram as faixas de valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios laboratoriais, a topografia do talude (inclinação e altura), e a geometria das superfícies de ruptura, obtida através das prospecções geofísicas. As poro-pressões atuantes no momento da ruptura foram estimadas através do coeficiente de poro-pressão  $r_u$ , descrito por Bishop & Morgenstern (1960). Vários valores de  $r_u$  foram introduzidos na análise, começando-se pelo valor 0, seguido por valores mais elevados, até ser obtido o fator de segurança unitário para as superfícies de ruptura conhecidas. Obviamente, com as altas taxas de precipitação ocorridas no período, valores de  $r_u$  mais elevados já eram esperados. O programa Xslope foi utilizado para a execução da retroanálise. O Quadro 7 exhibe os parâmetros utilizados e os resultados obtidos, considerando o fator de segurança unitário. A Figura 14 mostra o perfil do Talude Planetóides e o modelo de ruptura elaborado durante a retroanálise.

A retroanálise permitiu a obtenção dos valores de  $r_u$ , considerando o fator de segurança unitário. A coesão de 2 kPa e o ângulo de atrito de 28° foram os valores que possibilitaram ao programa XSlope o traçado das superfícies de ruptura (Figura 7) que mais se assemelharam às superfícies detectadas pela prospecção geofísica. A profundidade da superfície de ruptura considerada foi de 2,5 m. O cálculo das poro-pressões forneceu valores de 10 kPa e 5,4 kPa, respectivamente, para as superfícies 1 e 2. A retroanálise indicou os parâmetros responsáveis pela condição de equilíbrio limite do talude. Possivelmente, quando prevalecem poro-pressões menores ocorre o rastejo no talude, e, quando as precipitações se elevam o suficiente para aumentarem o valor de  $r_u$ , o rastejo evolui para um escorregamento. De acordo com as altas taxas de precipitação que induziram o escorregamento de 8 de Janeiro de 2003, e com a velocidade do movimento, acredita-se que os valores de  $r_u$ , atuantes no tálus no momento da ruptura, estavam mais elevados que os valores encontrados na retroanálise, o que implica fatores de segurança menores que 1.

### **3.3 – Talude Rio Acima**

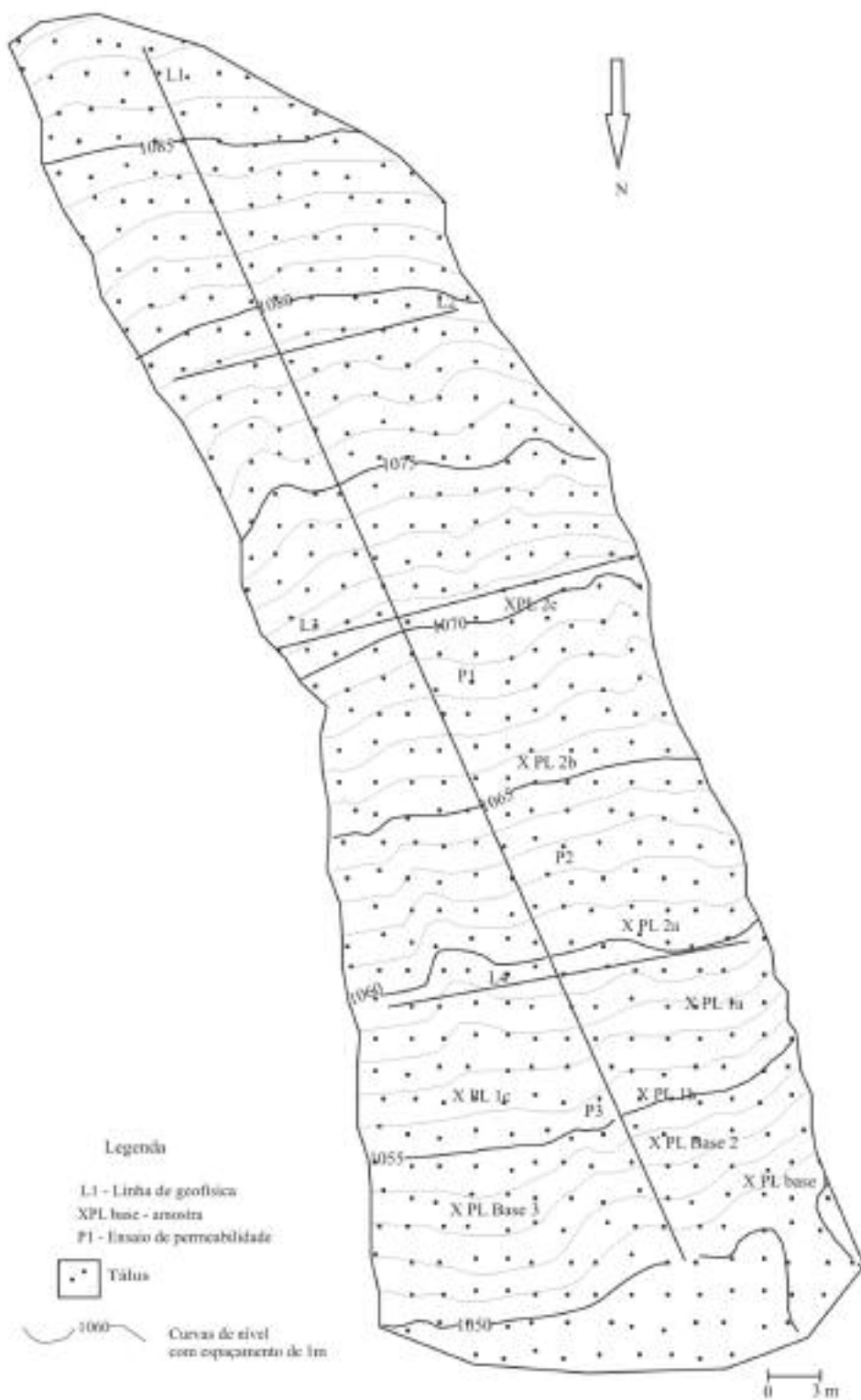
O Talude Rio Acima localiza-se na entrada da cidade de Rio Acima, 40 km a Sul de Belo Horizonte, precisamente na estrada MG-030, que liga Belo Horizonte aos municípios de Nova Lima e Rio Acima. A estrada MG-030 apresenta muitos problemas relacionados com escorregamentos de taludes. Ainda em fase de duplicação, escorregamentos têm ocorrido em cortes da estrada, implicando perigo, o que parece justificar investimentos em obras de estabilização.

O talude analisado é constituído por um maciço rochoso pertencente à Unidade Mestre Caetano, do Supergrupo Nova Lima (CPRM, 1996), unidade que ocupa grande parte do trecho da MG-030, entre Nova Lima e Rio Acima (Figura 15). Apresenta uma altura de 35 m e uma inclinação geral de 30°. Durante os meses chuvosos, blocos rochosos se rompem do maciço, e, quando não caem diretamente na estrada, geram um depósito de tálus de pequena espessura, muitas vezes instável, ao longo da face do talude.

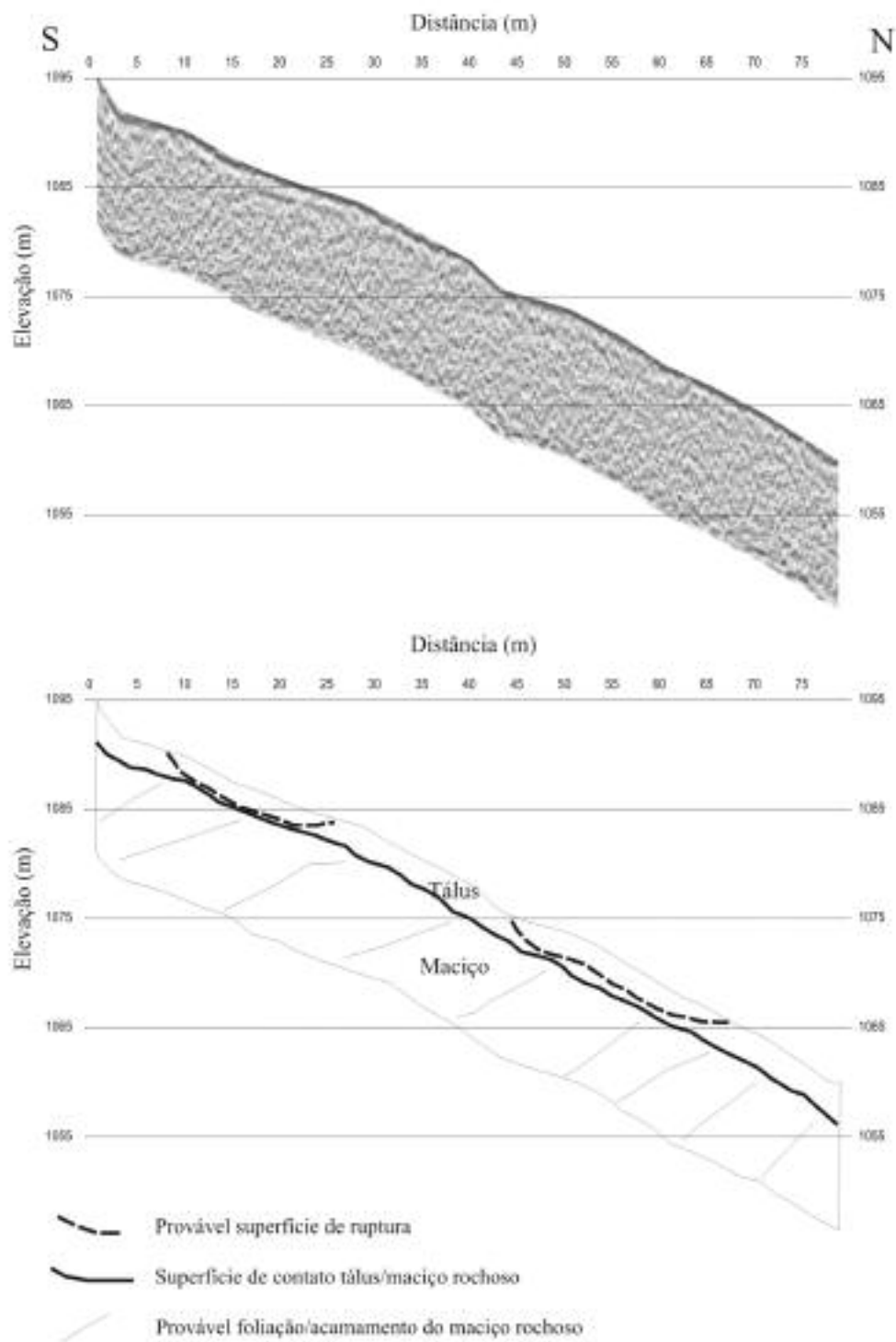
**Quadro 5** – Parâmetros geotécnicos das amostras do tálus que cobre o Talude Planetóides.

Amostra	Ponto de coleta da amostra no talude	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	e	n (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Granulometria (%)					Classificações	
											Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho	SUCS*
PL-base	Base	2,99	2,02	1,65	38	NP	0,8	44	–	–	3	34	13	9	8	33	GM Cascalho silteoso arenoso com areia
PL-base 2	Base	3,06	2,02	1,65	34	NP	0,9	47	–	–	2	22	5	6	2	63	SM Cascalho Areia silteosa com areia
PL-base 3	Base	3,03	2,02	1,65	29	NP	0,8	44	–	–	3	19	13	15	6	44	GM Cascalho Areia silteosa com areia
PL-1a	Meio	3,04	1,87	1,64	38	NP	0,9	47	–	–	3	35	14	9	6	33	GM Cascalho silteoso arenoso com areia
PL-1b	Meio	3,08	1,87	1,64	35	NP	0,9	47	0	30	2	49	11	8	4	26	GM Cascalho silteoso arenoso com areia
PL-1c	Meio	2,95	1,87	1,64	36	NP	0,8	44	–	–	12	21	9	7	5	46	GM Cascalho silteoso arenoso com areia
PL-2a	Topo	3,04	1,87	1,64	34	NP	0,9	47	–	–	3	33	16	12	7	29	ML Areia silteosa com arenoso cascalho
PL-2b	Topo	3,02	1,87	1,64	37	NP	0,8	44	10	28	4	33	13	9	6	35	GM Cascalho silteoso arenoso com areia
PL-2c	Topo	3,01	1,87	1,64	34	NP	0,8	44	–	–	3	36	17	11	5	28	SM Areia silteosa com arenoso cascalho

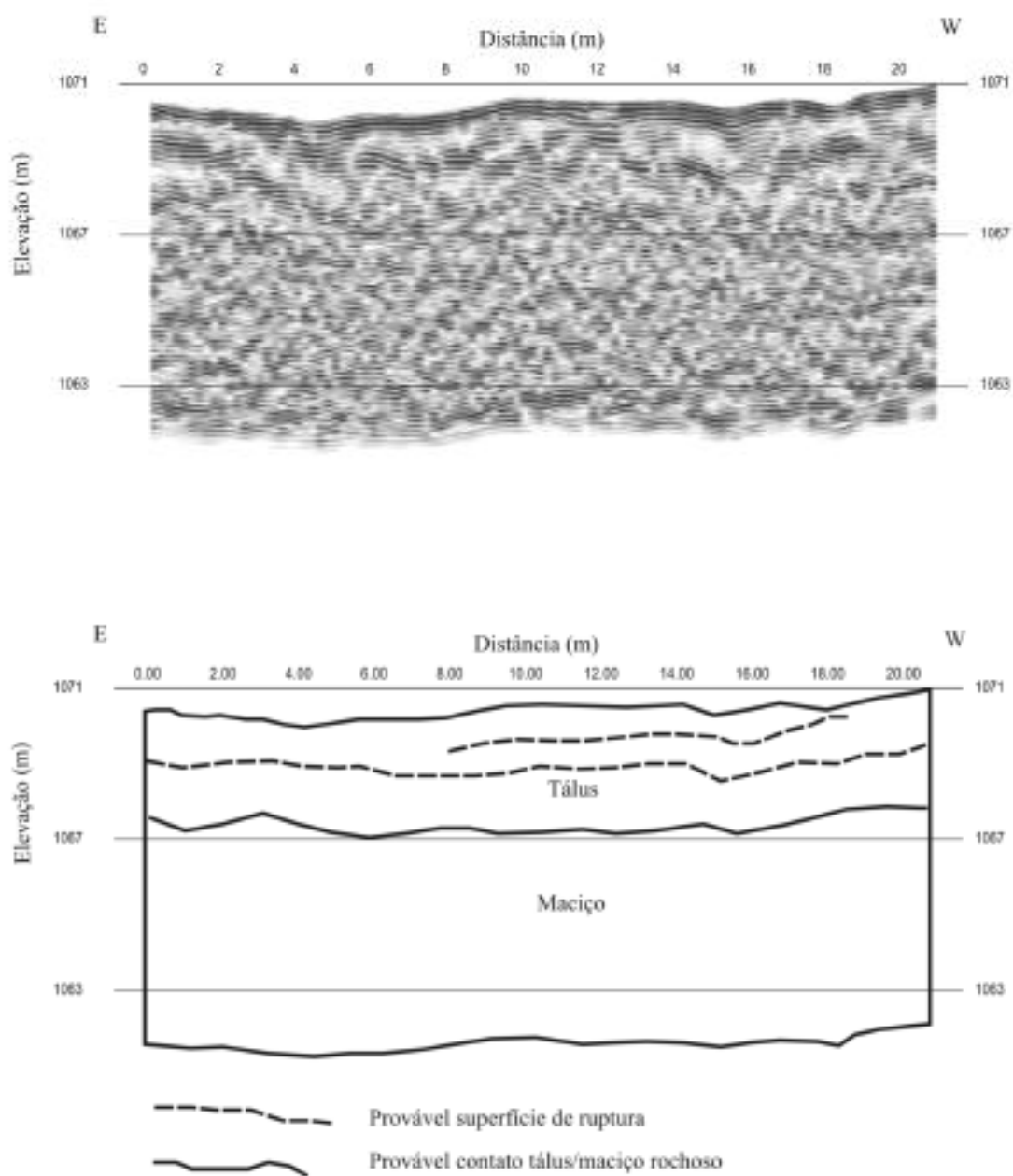
$\rho_s$  – massa específica dos grãos;  $\rho_{nat}$  – massa específica natural;  $\rho_d$  – massa específica seca; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; NP = não plástico; e – índice de vazios; n – porosidade; c – coesão;  $\phi$  – ângulo de atrito  
argila: < 0,002 mm; silte: 0,002 - 0,075mm; areia fina: 0,075 - 0,42mm; areia média: 0,42 - 2mm; areia grossa: 2 - 4,8mm; pedregulho: > 4,8mm  
\*apenas da matriz, desprezada a fração pedregulho.



**Fig. 10** – Mapa topográfico e geológico do Talude Planetóides.

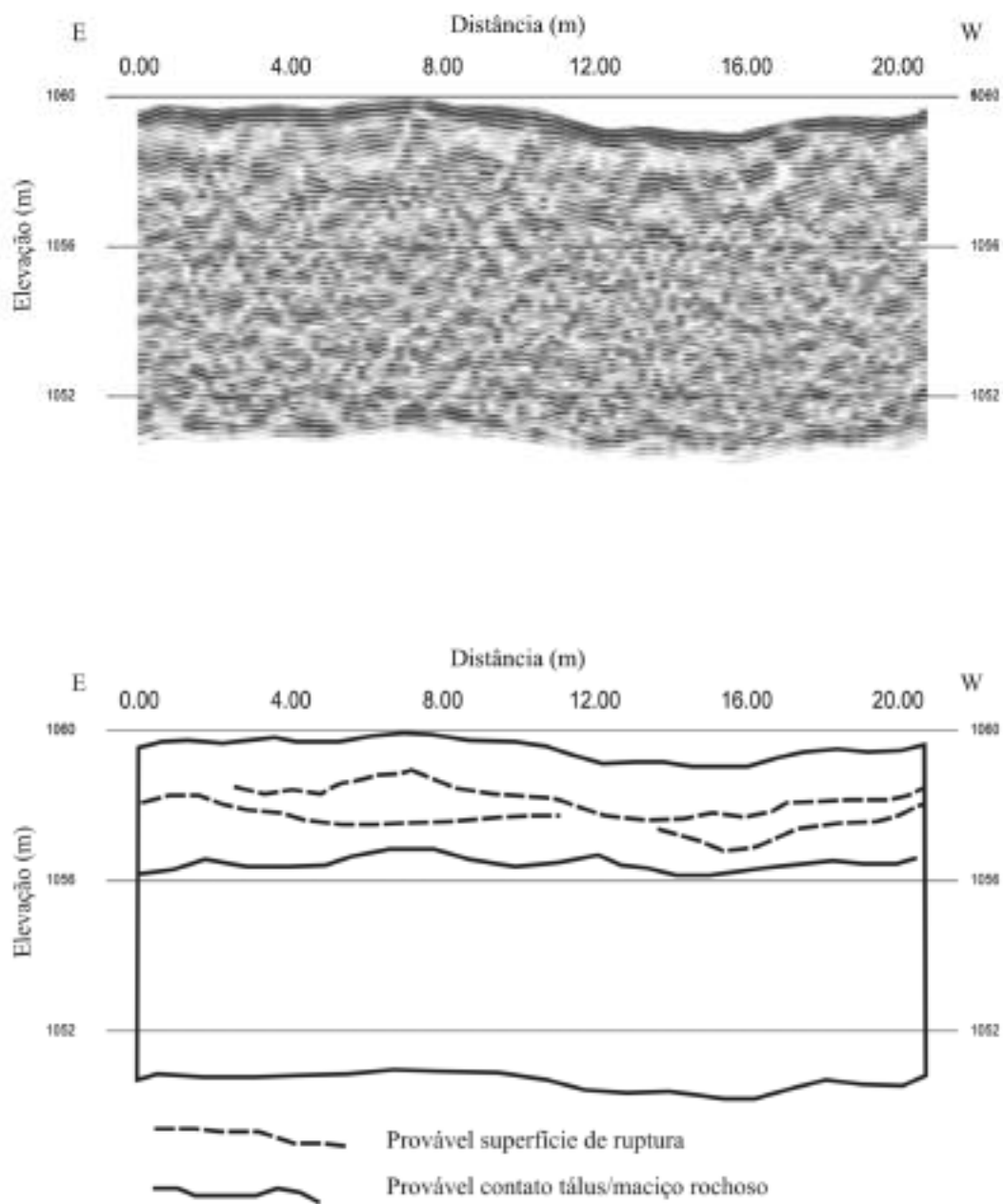


**Fig. 11** – Perfil do GPR, realizado com uma antena de 100 MHz, ao longo da linha L1, no Talude Planetóides, seguido de interpretação



**Fig. 12** – Perfil do GPR, realizado com uma antena de 100 MHz, ao longo da linha L3, no Talude Planetóides, seguido de interpretação





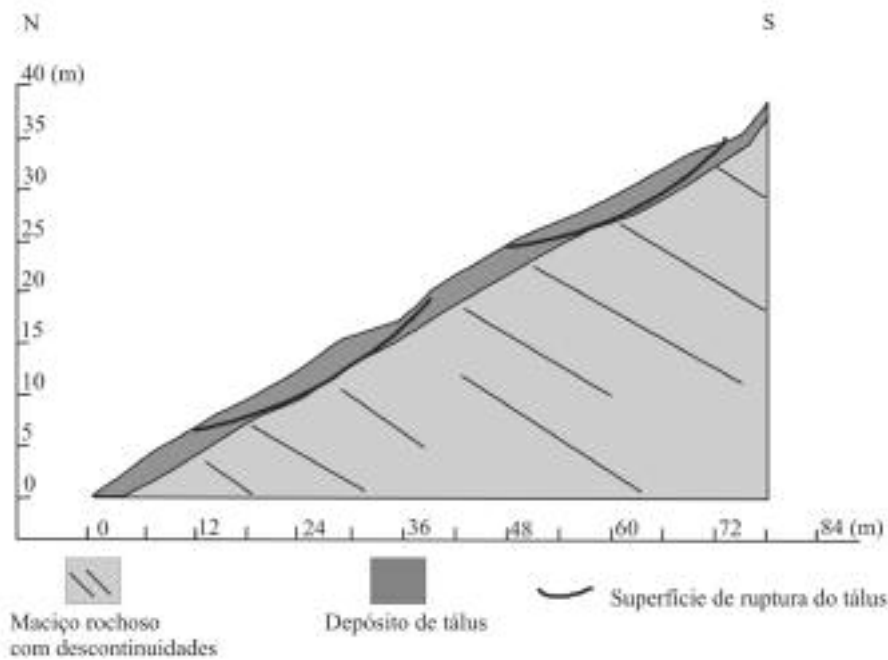
**Fig. 13** – Perfil do GPR, realizado com uma antena de 100 MHz, ao longo da linha L4, no Talude Planetóides, seguido de interpretação

**Quadro 6** – Relação entre os escorregamentos ocorridos no Talude Planetóides e as taxas de precipitação.

Dia da movimentação	mm de chuva/dia	mm de chuva acumulados nos 3 dias anteriores	mm de chuva acumulados durante 4 dias
14/11/2001	28,7	31,4	60,1
18/11/2001	63,7	26,6	90,3
17/12/2001	63,4	27,8	91,2
13/12/2002	102,5	78,6	181,1
08/01/2003	83,5	82,4	165,9

**Quadro 7** – Parâmetros obtidos a partir da retroanálise dos escorregamentos do Talude Planetóides.

Camada de solo	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito(°)	$\rho_{nat}$ (kN/m³)	$r_u$ (FS =1)	Poro-pressão (kPa)
Superfície 1	2	28	18	0,23	10
Superfície 2	2	28	18	0,12	5,4



**Fig. 14** – Perfil do Talude Planetóides, simulando duas superfícies de ruptura visualizadas pela prospecção geofísica (linha L1).

Em cada ano, a Prefeitura de Rio Acima enfrenta os transtornos advindos dos escorregamentos do talude. Um pequeno muro de concreto, de 1,3 m de altura, foi construído na base, porém, o depósito de tálus e os blocos rochosos, quando se movimentam, transpõem o muro, atingindo a estrada.

### 3.3.1 – Análise geológica e geotécnica do Talude Rio Acima

O maciço rochoso do Talude Rio Acima foi classificado como um quartzo-sericito-clorito-xisto da Unidade Mestre Caetano, assim denominada por CPRM (1996). As micas de granulometria média são abundantes e, por vezes, aparecem contornando grãos de quartzo, configurando uma textura lepidoblástica à rocha.

#### *Classificação e análise cinemática do maciço rochoso do Talude Rio Acima*

No maciço analisado, foi possível observar uma xistosidade bem pronunciada, com uma direção e mergulho geral de 60/30, que, localmente, muda para 335/30, devido à presença de um dobramento suave e aberto, com o eixo 15/23. Além da xistosidade, 3 famílias de fraturas sub-verticais, persistentes e com um espaçamento médio de 90 cm, foram identificadas (Quadro 8), sendo responsáveis pela delimitação dos blocos que se rompem do xisto.



**Fig. 15** – Vista geral do Talude Rio Acima, onde é possível visualizar o maciço e os depósitos de tálus.

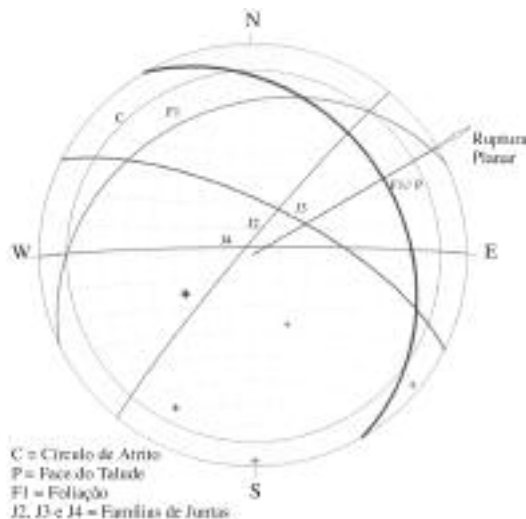
As classificações RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Barton *et al.*, 1974) do maciço foram realizadas, para a obtenção de valores aproximados dos parâmetros de resistência. A classificação do maciço conforme o critério RMR foi a classe V (nota = 7), ou seja, maciço muito ruim, com valores prováveis de ângulo de atrito menores ou iguais a 15° e coesão menor que 100 kPa.

Pelo critério Q, o ângulo de atrito encontrado foi de 14°, valor próximo ao encontrado pela classificação RMR. O Sistema Q não oferece valores de coesão, e o valor de coesão menor que 100 kPa pode ser muito variável. Assim, utilizou-se o programa Roclab para o refinamento desses valores, através dos critérios de Hoek e Brown (1980). Os resultados obtidos foram 26 kPa, para a coesão, e 13°, para o ângulo de atrito.

**Quadro 8** – Parâmetros de caracterização das descontinuidades do Talude Rio Acima, conforme critérios da ISRM (1983).

	Atitude (média)	Abertura	Preenchimento	Rugosidade	Espaçamento	Persistência	Resistência
Talude	60/30						
F1	60/30 (335/30)	1 a 6 cm	ausente	ondulado/ estriada	< 1cm	> 20 m	rocha extremamente fraca
J2	310/86	1 a 5 cm	escamas de xisto/silte	plano/rugosa	90 cm	> 20 m	rocha extremamente fraca
J3	27/70	1 a 5cm	escamas de xisto/ausente	plano/rugosa	1,30 m	> 20 m	rocha extremamente fraca
J4	0/87	1 a 5 cm	escamas de xisto/ausente	plano/rugosa	1 m	3 a 10 m	rocha extremamente fraca

A análise cinemática das descontinuidades permitiu a comprovação de que o maciço rochoso é apenas susceptível a rupturas planares (Figura 16). As superfícies de ruptura são paralelas aos planos de xistosidade, que, por sua vez, são paralelos ao plano do talude.



**Fig. 16** – Diagrama estereográfico exibindo a análise cinemática das descontinuidades do Talude Rio Acima.

### 3.3.2 – Investigações geofísicas do Talude Rio Acima

A análise geofísica com o Radargrama (GPR) foi realizada na face do talude, ao longo das linhas L1 e L2 (Figura 17), objetivando caracterizar melhor o sistema de descontinuidades do maciço, e outras estruturas presentes. A primeira linha (L1) foi executada, a partir da cota 760 m até à cota 774 m do talude, paralela ao mergulho da xistosidade. A segunda linha (L2) foi transversal à L1, na cota 764 m. O perfil realizado ao longo de L1, permitiu a detecção clara dos planos de xistosidade, ligeiramente ondulosos, e das descontinuidades sub-verticais, principalmente das famílias J3 e J4 (Figura 18).

Foi possível verificar que as descontinuidades sub-verticais são persistentes, e atingem a profundidade de 20 m (cota 748 m, alcançada pelas ondas do GPR). Entretanto, a continuidade de algumas fraturas é interrompida por uma anomalia no perfil, interpretada como um possível veio de quartzo, à profundidade de 752,70 m. No final da linha L1, em direção ao topo do talude, as reflexões das descontinuidades estão mais nítidas e numerosas, o que permite supor maior abertura das fraturas. Neste ponto, também se podem observar blocos limitados pelas descontinuidades. À medida que se deslocam, os blocos rompidos comprimem uns aos outros, provocando imbricação e desenvolvimento de trincas.

O Perfil L2 permite a visualização do dobramento aberto dos planos de xistosidade, das famílias de fratura J2 e J4, e do possível veio de quartzo, cortando as camadas em profundidade (cota 752,70 m - Figura 19).

### 3.3.3 – Análise da estabilidade do Talude Rio Acima

As investigações anteriores permitiram observar que o Talude Rio Acima sofre rupturas planares, segundo blocos pouco espessos, paralelos aos planos de xistosidade. De um modo geral, o comprimento desses blocos é determinado pelo espaçamento entre as fraturas sub-verticais, e a espessura é determinada pelo espaçamento entre as fraturas paralelas à xistosidade, que não ultrapassa 50 cm. As aberturas maiores que 3 cm, observadas nas famílias de fraturas sub-verticais, são indicadores de deslocamento dos blocos. As fraturas paralelas à xistosidade são, provavelmente, desenvolvidas por alívio de tensão, estimulado pela saída dos blocos sotopostos, após escorregamentos, e pela percolação da água nas descontinuidades. Utilizando-se os parâmetros obtidos na classificação do maciço e na análise cinemática, fez-se uma análise da estabilidade do talude, com relação à ruptura planar, com a utilização do programa *Plane Failure Analysis*.

Os dados de entrada (Quadro 9) incluem os valores de resistência do maciço obtidos pelas classificações adotadas. Entretanto, durante a análise, o valor da coesão foi ligeiramente reduzido, de 26 para 21,4 kPa, para possibilitar que fatores de segurança menores ou iguais a 1 fossem alcançados.

**Quadro 9** – Dados de entrada para cálculo do FS da ruptura planar

Dados de Entrada	Ruptura Planar
Ângulo de atrito	13°
Coesão	21,4 kPa
Altura da face do talude considerada	1,3 m
Distância da fenda de tração à Crista	49 m
Peso específico da rocha intacta*	21 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da água	9,8 kN/m <sup>3</sup>
Atitude da xistosidade	60/30
Ângulo da face superior do talude	29,9999°
Ângulo da face inferior do talude	90°
FATORES DE SEGURANÇA OBTIDOS	
Fraturas preenchidas por água	0,973
Fraturas secas	2,7

\* Fonte do dado: Fernandes (2000)

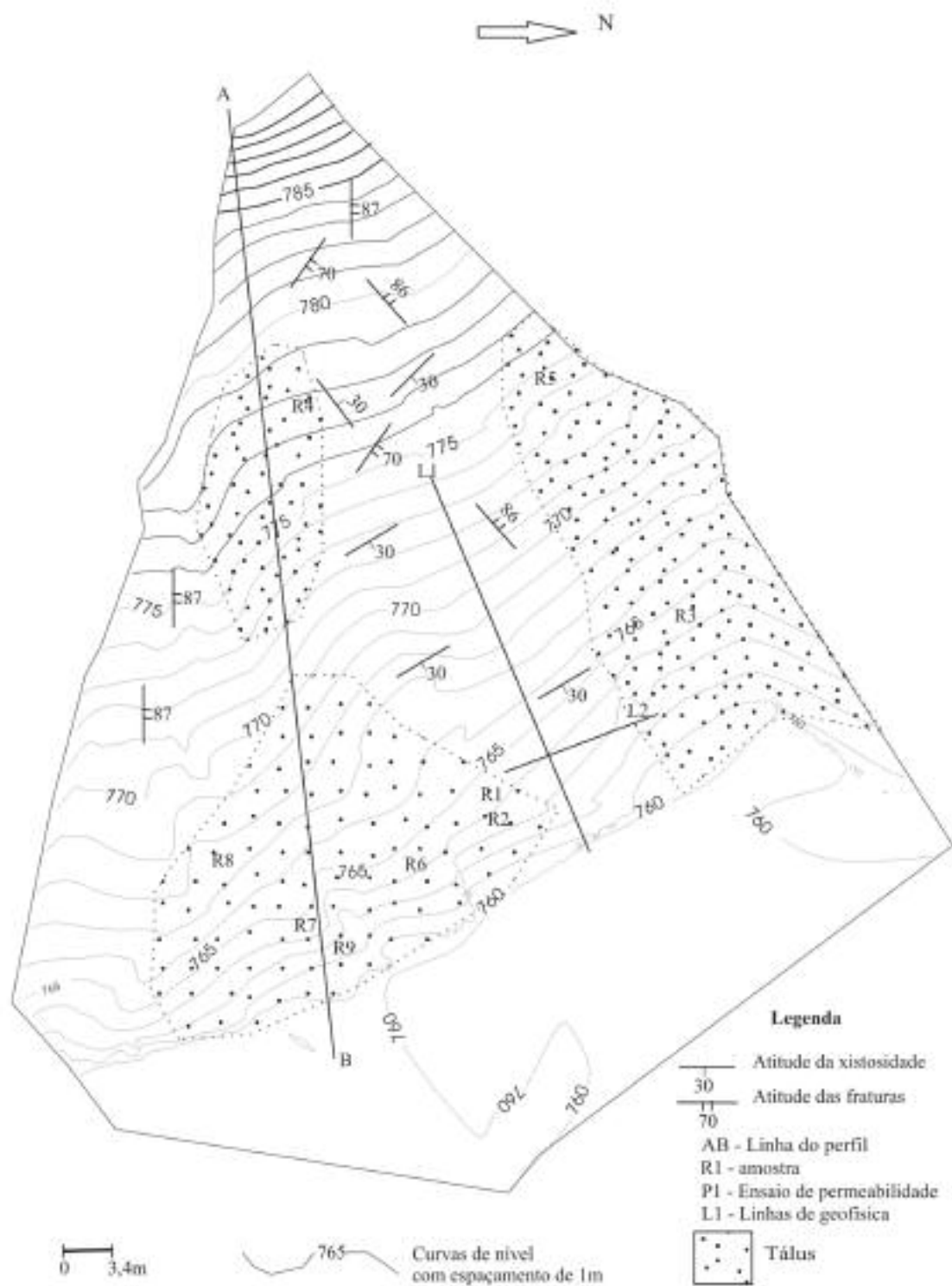
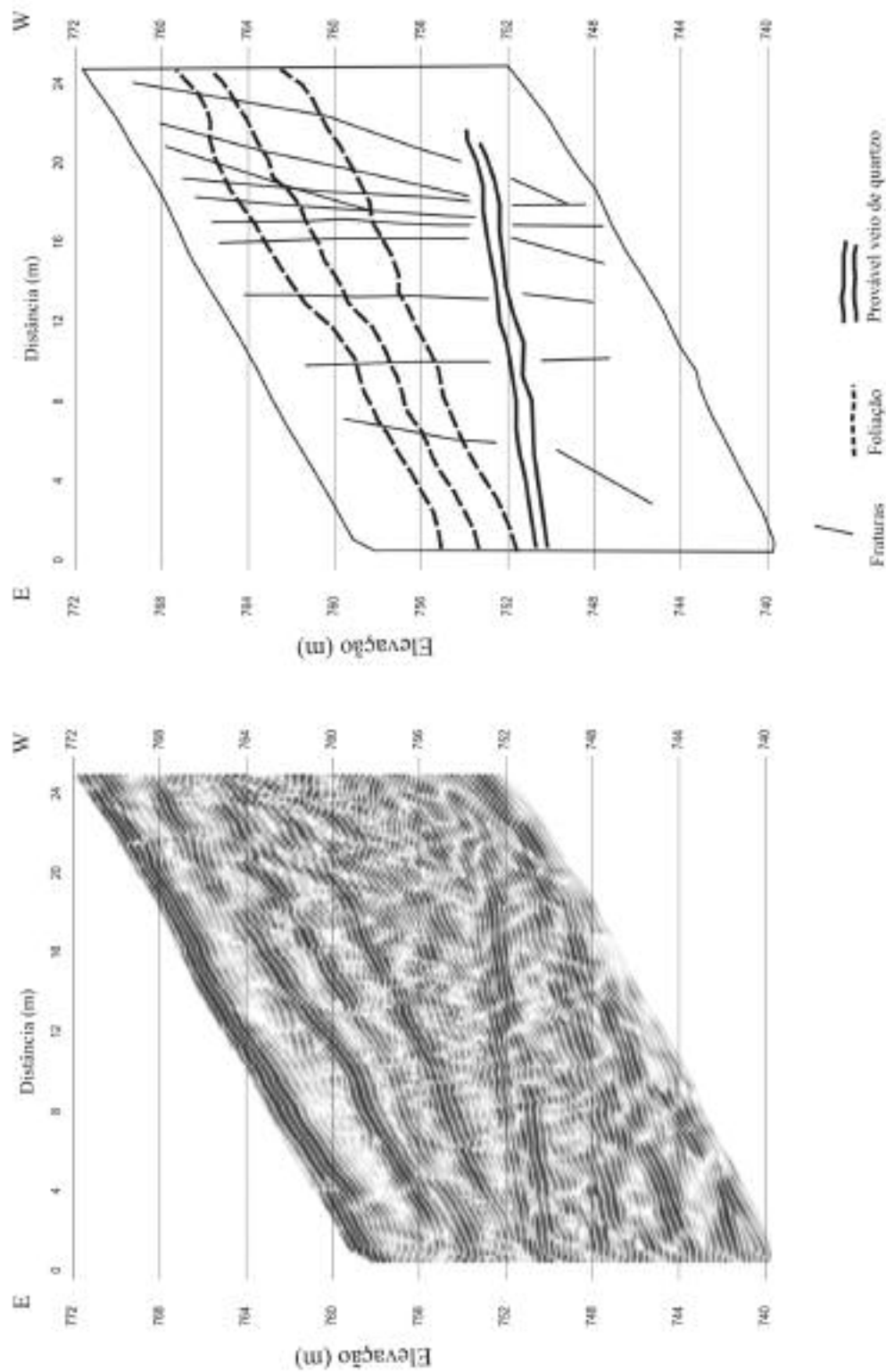
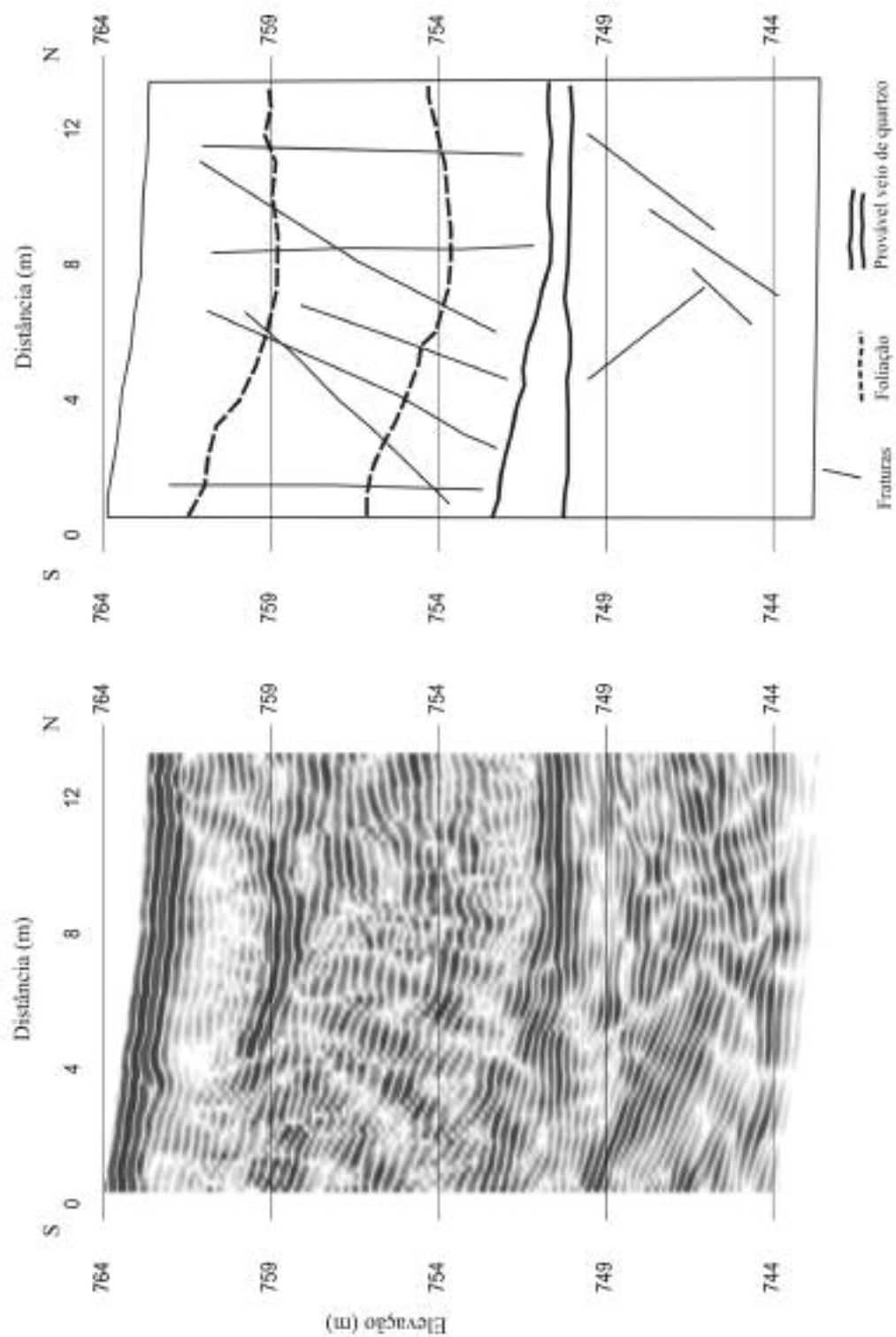


Fig. 17 – Mapa topográfico e geológico do Talude Rio Acima.





**Fig. 18** – Perfil do GPR, realizado com antena de 100 MHz, ao longo da linha L1, no Talude Rio Acima, seguido da interpretação.



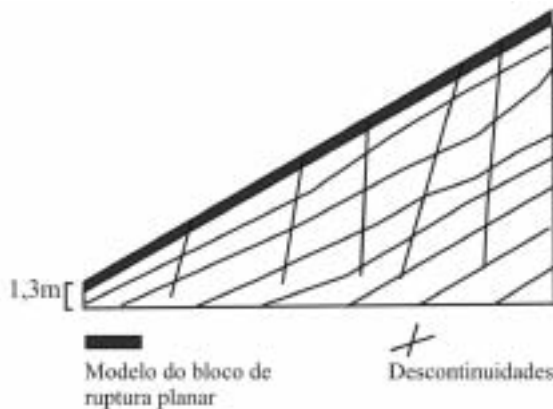
**Fig. 19** – Perfil do GPR, realizado com antena de 100 MHz, ao longo da linha L2, no Talude Rio Acima, seguido de interpretação.

Os resultados da investigação geofísica permitiram a simulação dos blocos de ruptura, considerando blocos pouco espessos, retangulares e limitados pelas famílias de discontinuidades (Figura 20). As seguintes características foram estabelecidas para a configuração do bloco de ruptura:

- a face inferior do bloco corresponde ao corte realizado na base do talude, que possui uma altura de 1,30 m, direção paralela à xistosidade e mergulho de  $90^\circ$ .
- a face superior do bloco corresponde à face do talude, com uma direção e mergulho paralelo ao da xistosidade. Entretanto, o valor do mergulho foi de  $29,999^\circ$  e não de  $30^\circ$ , isso para atender às condições de análise de ruptura planar de Hoek e Bray (1981) e Kroegeer (2000), que, dentre outras, determinam que a inclinação da face superior do talude deve ser menor que a inclinação do plano de ruptura.

As condições de saturação adotadas consideraram as discontinuidades secas e preenchidas por água. Quando os planos de xistosidade estão preenchidos por água, o fator de segurança é de 0,973, e, quando a xistosidade está seca, o fator de segurança se eleva para 2,7.

De acordo com o resultado obtido, pode-se responsabilizar a água presente nas discontinuidades como o fator condicionante mais importante da ruptura, obviamente considerando o estado prévio de alteração do maciço. As famílias de fraturas sub-verticais, que delimitam os blocos, geram possíveis fendas de tração, e são caminhos de percolação da água até os planos de xistosidade. Neste caso, estas fraturas implicariam em fendas de tração profundas, e cada plano de xistosidade seria uma possível superfície de ruptura.



**Fig. 20** – Simulação do bloco de ruptura do Talude Rio Acima.

#### 4 – CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu a distinção dos condicionantes e dos mecanismos de ruptura atuantes nos taludes investigados. Os métodos geotécnicos empregados foram essenciais para a obtenção dos dados utilizados nas análises de estabilidade. Os estudos geotécnicos prévios nortearam o trabalho da prospecção geofísica, pois definiram qual o tipo de estrutura e material a ser investigado, e qual a posição e traçado das linhas de prospecção. As investigações geofísicas permitiram a determinação de parâmetros, tais como:

- geometria e localização das superfícies de rupturas, possibilitando a detecção de superfícies planares ou circulares nos depósitos de tálus e maciços rochosos;

- detecção da espessura dos depósitos superficiais, e o traçado da superfície de contato depósito/maciço rochoso;
- observação da intensidade e profundidade de fraturamento dos maciços rochosos, importante aspecto para a análise do estado geral de degradação do maciço rochoso, para a verificação da influência das descontinuidades na percolação da água, e definição da geometria dos blocos que se rompem.

Os parâmetros detectados pela investigação geofísica foram considerados essenciais para a execução das retroanálises e outros estudos de estabilidade. Os dados obtidos pelas retroanálises podem contribuir para o desenvolvimento de planos de defesa civil que visem o monitoramento nos taludes. As poro-pressões desenvolvidas nos taludes, durante períodos de chuva acumulada, podem ser monitoradas através da instalação de piezômetros nas encostas. Diante dos resultados, foi possível estabelecer os mecanismos de ruptura dos três taludes.

No Talude Patagônia, ocorrem duas rupturas, uma planar, ao longo do maciço de filito, e outra circular rasa, no depósito de tálus.

No Talude Planetóides, rupturas do tipo rastejamento, e escorregamentos circulares ocorrem no tálus, com uma espessura de 3 metros. As superfícies de ruptura não alcançam necessariamente o contato solo/maciço, demonstrando que a frente de saturação provoca tensões que alcançam as tensões de fluência do material, antes de ser atingido o contato.

Em taludes com cortes paralelos à xistosidade, como o Talude Rio Acima, geralmente predomina o escorregamento planar. Nestes taludes, o processo de alívio de tensão contribui para a total perda de resistência coesiva dos planos de xistosidade. Os blocos limitados pelas outras famílias de descontinuidades ficam, praticamente, sustentados pelo atrito, até que, durante a estação chuvosa, a água infiltrada desencadeia as movimentações.

Todas as análises de estabilidade dos maciços rochosos, para as rupturas em cunha e planar, revelaram que, independentemente da posição das descontinuidades nos taludes, as movimentações somente irão ocorrer quando as descontinuidades estiverem preenchidas por água. Os fatores de segurança calculados passam de valores maiores do que 1, quando os maciços estão secos, para valores menores do que 1, quando as descontinuidades contêm água.

Medidas preventivas e corretivas dos escorregamentos devem considerar os mecanismos e modelos de ruptura determinados, e soluções padrões devem ser evitadas. 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 mecanismos de ruptura característicos de cada situação descrita. De acordo com Santos (2002): “Para que o comando da natureza seja coroado de êxito, deve incorporar (obedecer) as leis que regem as características dos materiais e dos processos geológicos naturais afetados.”

## 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M. 2001. *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York, John Wiley (2 ed.). 712 p.
- Balaam, N. P. 2001. *Slope Stability Analysis – User’s Manual for Program XSlope for Windows*. Centre for Geotechnical Research – University of Sydney, Sydney. 98 p.
- 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. 215 p.
- 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.
- CPRM, 1996. *Projeto Rio das Velhas*. Belo Horizonte, CPRM. 203 p. (Texto, Vol. 1).
- Duncan, J. M. 1996. Soil Slope Stability Analysis. In: Turner, A. K, Schuster, R.L. (ed.). *Landslides -Investigation and Mitigation*, Special Report 247. Washington, National Academy Press. 337-371.
- Fernandes, G. 2000. *Caracterização Geológico-Geotécnica e Propostas de Estabilização da Encosta do Morro do Curral-Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto*. Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 136 p.
- Fontoura, S. A. B., Campos, L. E. P., Filho, L. M. C. 1984. A Reanalysis of Some Slides in Gneissic Residual Soils. In: *Proceedings of IV International Symposium on Landslides*, Toronto, **1**: 625-629.
- Gomes Correia, A. 1988. Revisão da Classificação de Solos para Propósitos de Engenharia. *Geotecnia*. **52**: 75-90.
- Hoek, E., Bray, J. 1981. *Rock Slope Engineering*. London, IMM & Elsevier Applied Science. 527 p.
- Hoek, E., Brown, E. T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. London, Institution of Min. Metall., 527 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., Corkum, B. 2002. Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition. In: *Proc. North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto, 1-7.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics. 1983. *Métodos para a Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos*. São Paulo, ABGE e Comitê Bras. de Mec. das Rochas. 132 p. (Tradução n.º 12).
- Kroeger, E. B. 1999. *Slope Stability Software*. **1**: 1-3, <<http://www.engr.siu.edu/mining/kroeger>>
- Kroeger, E. B, 2000. Analysis of Plane Failures in Compound Slopes. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. **14**: 215-222.
- Rocscience Inc. 2002. *Roclab-Rock Mass Strength Analysis Using the Hoek-Brown Failure Criterion – User's Guide*. Toronto, Rocscience. 25 p.
- Santos, A. R. 2002. *Geologia de Engenharia – Conceitos, Métodos e Prática*. São Paulo, ABGE-IPT. 219 p.
- Souza, L. A. P., Silva, R. F., Iyomasa, W. S. 1998. Métodos de Investigação. In: Oliveira A. M. S., Brito S. N. A (ed.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE. 163-196.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge, University Press. 770 p.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York, John Wiley. 659 p.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pelo financiamento deste projeto.