

EVOLUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA ENCOSTA DA SERRA GERAL FORMADA POR ROCHAS VULCÂNICAS E SEDIMENTARES NO RIO GRANDE DO SUL

PINHEIRO, R.J.B.¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria, , Av. Roraima 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, 97119-900, Santa Maria-RS, telefone: (55) 32208313, e-mail: rinaldo@ct.ufsm.br

RESUMO

Este trabalho apresentará a caracterização de um maciço rochoso através da identificação das propriedades índices das rochas, da classificação petrográfica com lâminas delgadas, a utilização de microscópio eletrônico de varredura e medidas de descontinuidades do maciço. Tendo como objetivo analisar um processo de instabilidade de grande dimensão na borda do platô basáltico na área rural da cidade de Santa Cruz do Sul, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O processo de instabilidade nessa área teve início há cerca de 20 anos, mas intensificou-se a partir de 1995. Atualmente existe no local uma fossa em rocha na borda da escarpa do platô basáltico com cerca de 30m de profundidade, 40m de largura e mais de 300m de extensão. Os deslocamentos são verificados até o arroio no fundo do vale, onde a massa escorregada (arenitos e siltitos) avança sobre o arroio e por ele sendo erodido. Este movimento expõe a encosta a novos processos de ruptura. Os diversos processos de deslizamento de solos e rochas existentes no local configuram escarpas, encostas, superfícies basculadas e onduladas, depressões úmidas e patamares irregulares. A escarpa basáltica (Formação Serra Geral) apresenta de um modo geral a direção norte/sul, podendo ser individualizados três partes: (a) parte superior muito fraturada (b) parte intermediária – compreende uma camada amigdaloidal com cerca de 5m de espessura e (c) a base formada por uma camada alterada marrom de granulação muito fina. No conjunto a rocha é muito alterada com deslocamentos (esfoliação) com espessura de 2cm a 3cm, revelando certo tempo de exposição ao intemperismo. O desenvolvimento atual da fenda com o acomodamento das rochas imprimiu como resultado uma abertura com vale em forma de U e um basculamento do bloco separado do platô para o leste. Na frente do escorregamento observa-se um acavalamento dos detritos resultantes do cisalhamento e desestruturação das formações geológicas envolvidas, principalmente a Formação Santa Maria. Esse acavalamento está deslocando o arroio para o leste, com conseqüente erosão da base do escorregamento. Amostras obtidas no contato dos siltitos da Formação Santa Maria com os arenitos da Formação Botucatu apresentam uma forte orientação das partículas argilosas verificadas em lâminas delgadas através de microscopia ótica e eletrônica. Os valores de FS obtidos pelos vários métodos considerando superfícies circulares, especificadas e compostas por blocos simularam a ruptura quando foram adotados parâmetros de resistência ao cisalhamento residual para a camada de siltito.

Palavras-chave: encostas, movimentos de massa, caracterização geotécnica.

INTRODUÇÃO

Na divisa entre os municípios de Santa Cruz do Sul e Passo do Sobrado no estado do Rio Grande do Sul, na localidade denominada de Malhada, teve início um estudo sobre os fenômenos que provocaram deslizamentos de rochas e solos. Regionalmente os fenômenos referidos ocorrem na borda sul da escarpa formada na unidade geomorfológica Patamares da Serra Geral. Estes patamares, na região de Santa Cruz, avançam com um alinhamento grosseiramente norte/sul em direção à unidade geomorfológica Depressão Rio Jacuí.

Os estudos iniciaram por um levantamento topográfico, posteriormente complementado por um levantamento geológico e geofísico. Foram realizadas sondagens mistas e instalados piezômetros nos furos destas sondagens. Caracterização dos materiais rochosos através de lâminas delgadas e determinação de índices físicos foram realizadas. Nos perfis de solos foram coletadas amostras e executados ensaios de laboratório (ensaios de caracterização, cisalhamento direto e ring shear). Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica in situ com piezômetros em várias camadas de solo e rocha alterada. A instrumentação da área foi realizada pela instalação de marcos para monitorar os deslocamentos superficiais e inclinômetros para determinar as magnitudes dos deslocamentos de subsuperfície e a profundidade da superfície de ruptura. As poropressões foram monitoradas através de piezômetros de Casagrande. Com os dados obtidos é feita uma tentativa de interpretação destes fenômenos de instabilidade associados aos processos de evolução da escarpa basáltica (Pinheiro, 2000).

DESCRIÇÃO GERAL DO FENÔMENO

Este fenômeno de ruptura teve início há cerca de 20 anos, mas intensificou-se a partir de 1995. Atualmente existe no local uma fossa em rocha na borda da escarpa do platô basáltico com cerca de 30m de profundidade, 40m de largura e mais de 300m de extensão. Esta escarpa é delimitada por um sistema paralelo de fraturas com direção geral norte/nordeste associados a fraturamentos verticais do derrame superior da escarpa e subsequentes escorregamentos de solos, em forma de leque nos sentidos nordeste a sudeste, oriundos de arenitos, siltitos e colúvios. Os movimentos são verificados até o arroio no fundo do vale, onde a massa escorregada avança, deslocando o leito ou deslocando o material carregado pelo arroio.

De uma maneira didática pode-se dividir os fenômenos de deslizamento de rocha e solo neste local em duas áreas distintas e contíguas. Uma área situa-se na borda do platô basáltico (escarpa oeste da fenda), afetando principalmente as rochas e secundariamente o solo. A outra área em continuidade física com a anterior localiza-se a partir do terço inferior da escarpa, representada por arenitos siltsosos até o contato com os siltitos argilosos, afetando principalmente o solo.

Na primeira área, atualmente existe uma depressão (fossa) entre a escarpa e um bloco de rocha extremamente fraturado. No fundo desta fenda, além dos blocos de rocha basáltica do derrame superior, dispostos de maneira instável, ocorrem restos de solo com alguma vegetação. O bloco de rocha (escarpa leste da fenda) apresenta-se inclinado, com

um basculamento na direção leste. Este basculamento é facilmente verificado pela vegetação no topo do bloco estar levemente inclinada e na compressão que as rochas e o solo estão sofrendo na parte leste deste bloco, abrindo fendas no terreno e decapando as rochas com a formação de escarpas secundárias. As escarpas formadas na fossa (escarpa oeste e leste) estão sem vegetação e mostram cicatrizes de deslizamentos de rocha recentes, evidenciando a continuidade dos processos de regressão das escarpas. Os blocos em ambas as escarpas estão em desequilíbrio físico com o meio e o bloco separado apresenta grande instabilidade.

A escarpa oeste apresenta de um modo geral a direção norte/sul, podendo ser individualizados três partes: (a) parte superior muito fraturada, compreende o derrame 3 (D-3), (b) parte intermediária – compreende uma camada amigdaloidal com cerca de 5m de espessura e (c) a base formada por uma camada alterada marrom de granulação muito fina. A base exposta apresenta cerca de 3m de altura, corresponde ao derrame 2 (D-2). No conjunto a rocha é muito alterada com deslocamentos (esfoliação) com espessura de 2cm a 3cm, revelando certo tempo de exposição ao intemperismo. A parte superior correspondente ao derrame 3 comporta-se como rocha. Os processos de instabilidade neste derrame estão caracterizados pela queda de blocos e rochas, que só ocorrem quando há um escorregamento nos materiais abaixo que constituem o derrame 2. Neste segundo derrame ocorrem solos nas fraturas o que indica uma zona de tração antiga, no mesmo plano das fraturas (coluna de solo e rocha) e na direção geral do escorregamento.

GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A geologia da área é representada por uma seqüência de rochas vulcano-sedimentares com atitudes aproximadamente horizontais, constituídas da base para o topo por litologias da Formação Santa Maria (fácies Alemoa), Formação Botucatu e Formação Serra Geral. A Formação Santa Maria na área é constituída basicamente por siltitos argilosos a arenosos de coloração avermelhada com manchas esbranquiçadas. Apresenta uma estrutura maciça, porém quando expostos se intemperizam formando pequenas pastilhas que recobrem toda a superfície exposta. Ocorrem também camadas argilosas de cor cinza intercaladas no siltito ou acima destes. Os siltitos são os materiais mais comuns nas bordas da cunha do material em escorregamento próximo ao arroio. Nesta área apresenta-se muitas vezes misturados com fragmentos de arenito e basalto formando colúvios.

A Formação Botucatu apresenta-se constituída por arenitos finos a médios de coloração rósea, muito fraturada e com algumas fraturas preenchidas por argilas. Na encosta em frente ao bloco deslocado o arenito apresenta-se fraturado formando blocos de grandes dimensões (> 15m). A cimentação nos arenitos é muito variável, apresentando-se deste fortemente cimentado por sílica (entre os derrames 2 e 3), medianamente cimentado por sílica, óxidos e argilas, e ocorre também na forma de areia sem nenhuma cimentação. As espessuras variam desde poucos centímetros até aproximadamente 10m.

Na área foram ainda encontrados 3 derrames basálticos pertencentes à Formação Serra Geral. O derrame 1 é constituído por fragmentos de rocha basáltica com camadas argilosas intercaladas. Este derrame inferior está extremamente alterado, assente sobre arenitos e siltitos. O derrame intermediário (derrame 2) apresenta na sua parte superior (contato com o derrame 3) uma textura tipicamente amigdalóide e vesicular. As amígdalas estão preenchidas por zeolitas, calcitas e argilas. O derrame superior (derrame 3) apresenta a estrutura padrão das lavas basálticas. No topo e na base a rocha apresenta disjunção horizontal fina a média (2 a 10cm) e na parte intermediária apresenta uma disjunção vertical com fraturas abertas mas sem preenchimento espaçadas a cada 2m.

Entre os derrames 2 e 3 ocorre uma camada fina de arenito silicificado, da ordem de 20cm. Esta camada de arenito aparece tanto na escarpa oeste da fenda como na escarpa leste do bloco deslocado, porém apresenta um desnível de aproximadamente 5m. Uma camada de arenito cimentado por óxidos e argila de espessura variável, mas na média com 8m, situa-se entre os derrames 2 e 1. Entre o derrame 1 e o siltito vermelho da Formação Santa Maria ocorre outra camada de arenito muito similar ao anterior, porém esta camada não é contínua em toda a área.

LEVANTAMENTOS PRELIMINARES E INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Com o objetivo de determinar as espessuras das camadas constituintes da área de estudo, bem como das prováveis estruturas geológicas foi realizada uma campanha de ensaios geofísicos utilizando métodos geolétrico - GPR e eletrorresistividade (Pinheiro et al., 2004).

Com o auxílio do mapa topográfico procedeu-se o levantamento geológico/geotécnico com a identificação das litologias presentes na área de estudo. Neste levantamento utilizaram-se fotografias aéreas de 1964, nas quais verificou-se um sistema principal de fraturas e fraturas secundárias, porém não existia a fenda atual. Pela análise das fotografias observa-se no platô intenso processo agrícola, contudo as escarpas ainda

preservavam a vegetação nativa. Foi confeccionado um mapa geológico da área, conforme está representado. As litologias encontradas pertencem as Formações Santa Maria, Botucatu e Serra Geral.

A Formação Santa Maria é constituída por siltitos argilosos e arenosos de cor vermelha com manchas brancas. Camadas argilosas de cor cinza ocorrem associadas aos siltitos. Os arenitos de cor rosa compõem a litologia mais comum na área pertencente a Formação Botucatu. Os arenitos variam muito em função do seu grau de cimentação (silicosa, argilosa e óxidos). A Formação Serra Geral é constituída por 3 derrames de lavas vulcânicas separados por arenitos intertraps.

A investigação do subsolo foi realizada com sondagens tipo SPT e rotativa. O estado de alteração da rocha foi obtido mediante a avaliação do índice de recuperação modificado – RQD. As sondagens S-1 a S-4 localizaram-se principalmente na área de ocorrência do derrame 1. Os valores encontrados para o RQD em média foram inferiores a 10%, sendo o material classificado como basalto alterado de cor cinza muito fraturado com a presença de camadas de argila de cor marrom ou preta.

As sondagens S-5 e S-7 foram executadas sobre rochas sedimentares, sendo que a sondagem S-5 próxima à área de ruptura atravessou o contato da camada de arenito Botucatu com o siltito da Formação Santa Maria. Já a sondagem S-7 foi realizada nas cotas mais baixas da área em sedimentos argilosos e arenosos da Formação Santa Maria. A sondagem S-6 atravessou toda a camada do derrame 1 extremamente alterado.

Para melhor identificar as litologias e interpretar os fenômenos de instabilidade, com os dados dos levantamentos topográficos, geológicos, geofísicos e trabalhos de campo foram desenhadas seções transversais e longitudinais com a disposição das camadas em toda a área de estudo. A seção transversal representativa da área apresenta uma direção geral oeste/leste que se estendem deste o platô basáltico até o arroio no fundo do vale (cota variando de 215m a 100m). A figura 1 apresenta duas seções típicas da área de instabilidade.

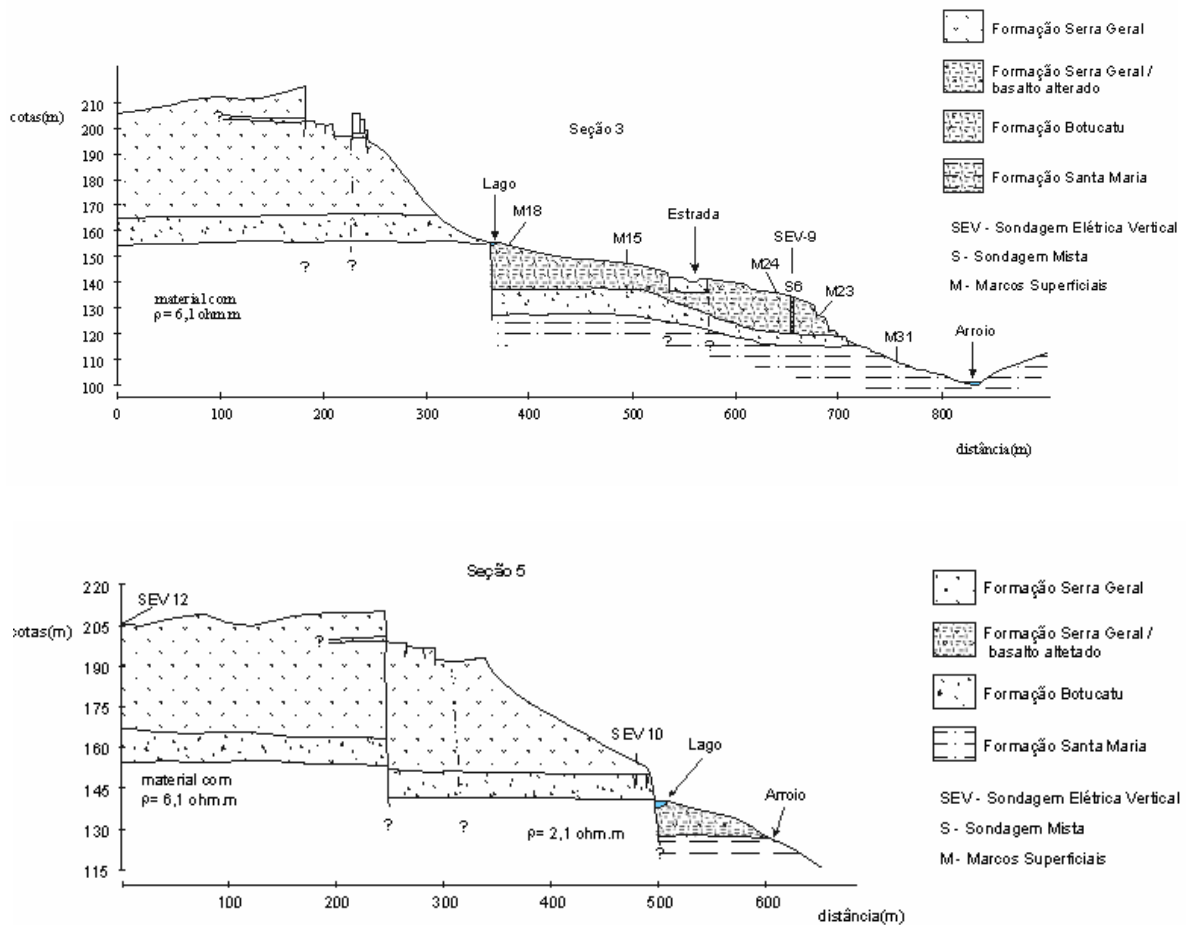


Figura 1. Seções transversais com a estratigrafia na área de instabilidade.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item será feita a descrição das amostras coletadas para os ensaios de laboratório, sempre buscando identificá-las em relação à seqüência litológica encontrada na área de estudo. As amostras de rocha foram descritas usando lâminas delgadas e determinadas as suas propriedades através de fragmentos coletados nos afloramentos ou testemunhos de sondagem. Nas camadas de rocha, principalmente na escarpa oeste e leste da fenda, foi realizado um levantamento das principais discontinuidades.

PROPRIEDADES ÍNDICE DAS ROCHAS

A determinação das propriedades físicas é muito importante para a caracterização de rochas e representa uma grande contribuição para o entendimento do comportamento geotécnico deste material. A rocha, como o solo, é formada por minerais sólidos, poros e água e/ou ar. Vários parâmetros descrevem a relação entre estas 3 fases, tais como, a

porosidade, a densidade relativa, o peso específico, teor de umidade, etc. As propriedades índices de rochas são consideradas propriedades relativamente fáceis de serem medidas, e que refletem a composição, a fábrica e o comportamento mecânico do material. Estes índices foram medidos em pequenos fragmentos de rocha intacta e, apesar destas medidas poderem não ser indicativa das propriedades de todo o maciço rochoso, podem fornecer uma boa estimativa do comportamento deste. Foram coletados 6 amostras dos derrames vulcânicos, 3 amostras de arenito e 1 amostra de siltito. Cada amostra foi dividida em 6 fragmentos e determinados as propriedades índices para cada um deles (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades índices das rochas

Amostras		γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	G_s	ω (%)	η (%)	e	Descrição dos fragmentos
Derrame 3		26,5	26,8	2,85	1,4	3,5	0,04	Rocha pouco alterada
Derrame 2	3	20,5	22,1	1,92	3,4	16,4	0,20	Rocha amigdalóide
	2	21,5	23,7	2,32	5,3	22,1	0,28	Rocha amigdalóide
	1	20,7	22,1	2,56	5,4	15,1	0,18	Rocha amigdalóide
Derrame 1	2	26,3	26,6	2,81	1,1	3,5	0,04	Rocha pouco alterada
	1	17,6	23,3	2,81	8,7	57,5	1,45	Alteração – matriz
Arenito	3	21,6	22,6	2,66	1,4	10,3	0,11	Arenito silicificado
	2	17,6	19,5	2,65	2,9	19,5	0,25	Arenito escarpa
	1	18,0	19,7	2,65	0,5	16,7	0,20	Arenito – furo S-5
Siltito		18,7	20,5	2,73	6,5	18,6	0,23	Siltito – furo S-5

γ_d = peso específico seco, γ_{sat} = peso específico saturado, G_s = densidade relativa dos grãos – determinado por contagem das lâminas delgadas ou por trituração das amostras, ω = teor de umidade, η = porosidade, e = índice de vazios

O volume dos fragmentos de rocha foi determinado por submersão em mercúrio, técnica indicada para amostras de geometria irregular. A determinação da porosidade das rochas foi realizada através da medida direta do volume de vazios. Para tal, utilizou-se a técnica de saturação da amostra por imersão em água e aplicação de vácuo. Após a saturação, determina-se o peso saturado, em seguida a amostra é seca em estufa por um período de no mínimo 24 horas, e obtêm-se o peso seco. A ISRM (1981) descreve este método como vários outros para determinação da porosidade. A densidade relativa (G_s) foi determinada através de lâminas delgadas da rocha em microscópio permitindo a avaliação da constituição mineralógica da rocha e a proporção do volume ocupado por cada tipo de mineral. Nos materiais mais brandos a determinação de G_s foi obtida através da trituração da amostra e adotado o ensaio padrão para amostras de solos.

As amostras de rocha do derrame 3 e dos fragmentos do derrame 1 apresentaram índices característicos de rocha sã ou pouco alterada, tais como, γ_d da ordem de 26,5kN/m³ e porosidade de 3,5%. As amostras correspondentes ao derrame 2, que apresentam uma

estrutura amigdalóide e vesicular apresentam γ_d inferior a 21,5kN/m³ e a porosidade entre 15% e 22%. A matriz do derrame 1, que é constituída por um solo com fragmentos de rochas apresentou valores de porosidade elevados.

Das amostras de arenito, a amostra de arenito 3, foi a que apresentou o γ_d mais elevado e a menor porosidade. Esta camada de arenito, situada entre os derrames 2 e 3 apresenta uma cimentação silicosa. Já as amostras de arenito 1 e 2, que constituem camadas bem mais espessas em relação ao anterior, a cimentação é formada basicamente por óxidos, argila e também por sílica. Estas camadas apresentam um γ_d mais baixo e uma porosidade mais alta. Os valores obtidos de porosidade para as amostras do derrame 2 e para os arenitos foram muito similares, que confirma as condições de campo, onde a camada superior do derrame 2 apresentava-se praticamente saturada.

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Foram confeccionadas lâminas delgadas, com espessura da ordem de 0,03mm, para visualização em microscópio ótico. Estas lâminas estão relacionadas com as amostras que foram utilizadas para determinação das propriedades índice, conforme apresentado na tabela 1. A figura 2a apresenta a microfotografia em luz polarizada (ampliação de 2,5x) de uma das lâminas com a identificação dos principais minerais obtidos do derrame vulcânico 3. A figura 2b apresenta uma microfotografia da camada vesicular amigdaloidal do derrame 2. A figura 2c corresponde a matriz argilosa do derrame 1 - basalto extremamente alterado - recortada por vênulas preenchidas nas bordas por óxidos de ferro e argila.

Nos derrames vulcânicos classificados com basaltos pouco alterados a porcentagem de plagioclásio foi superior a 35%, com 10 a 15% de minerais ferro-magnesianos (piroxênios e anfibólios). Verificou-se uma porcentagem muito grande, em torno de 30%, de uma matriz recristalizada e valor médio de 15% de opacos, que não puderam ser identificados. Nos derrames mais alterados verificou-se uma porcentagem de vesículas e amígdalas que variam entre 16 e 30%. Nas lâminas do derrame 2 encontrou-se até 8% de argilominerais. Na matriz do derrame 1 estes valores chegaram a ser superiores a 40%. As microfotografias das rochas sedimentares, com uma ampliação de 2,5x e com a identificação dos principais minerais estão apresentadas nas figuras 2d, 2e e 2f. A figura 2d apresenta imagem da camada pertencente à Formação Botucatu. Esta camada de arenito intertrap situa-se entre os derrames 3 e 2. Petrograficamente foram classificadas como subarcósios a sublarenitos. A distinção se dá principalmente pela relação entre a

quantidade de feldspatos e fragmentos de rocha presentes na amostra. A cimentação é basicamente silicosa e constituída por óxidos de ferro e um cimento silicoso incipiente.

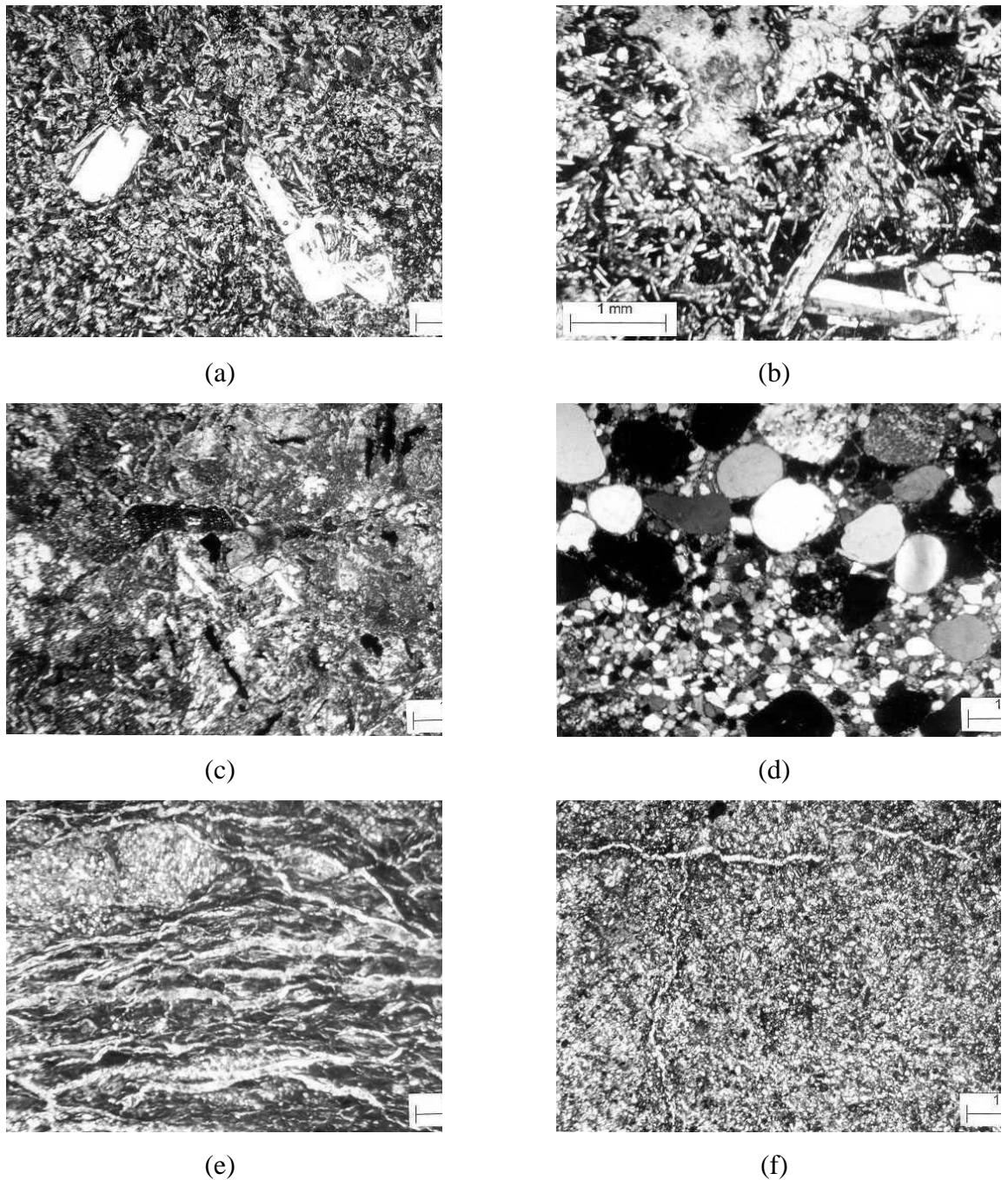


Figura 2. Microfotografias em luz polarizada (ampliação de 2,5x) de lâminas com a identificação dos principais minerais da escarpa em estudo.

As rochas pertencentes à Formação Santa Maria foram classificadas petrograficamente como siltitos argilosos (lamitos) e siltitos argilo-arenosos. A figura 2e apresenta a amostra que foi coletada no contato entre a camada de arenito e siltito obtida do testemunho de sondagem S-5, apresenta uma forte orientação da massa argilosa. A

amostra apresenta nuvens silticas deformadas, identificando uma zona de intenso cisalhamento e orientação de partículas (estrutura de deformação). A figura 2f apresenta uma amostra semelhante à a anterior, diferindo fundamentalmente por não apresentarem nenhuma orientação preferencial dos cristais. Os cristais de quartzo angulosos e translúcidos estão dispersos na matriz argilosa pigmentada por óxidos de ferro.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Na amostra retirada da superfície de ruptura, no contato entre a camada de arenito e siltito no furo de sondagem S5, foi realizada também uma microscopia eletrônica de varredura (MEV). A lâmina apresentada na figura 2e foi retirada no mesmo local. A imagem obtida pelo MEV apresentada na figura 3 demonstra claramente a superfície de ruptura com a orientação das partículas argilosas. Esta evidência comprova o que estava aparentemente evidente na figura 2e. Portanto no contato da camada de arenito com a camada de base da encosta que é formada por siltitos vermelhos da Formação Santa Maria ocorre uma orientação das partículas argilosas devido ao processo de escorregamento. Resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento realizados neste material apresentaram um ângulo de atrito residual obtido no ensaio ring shear de $12,9^\circ$ (Pinheiro, 2000).

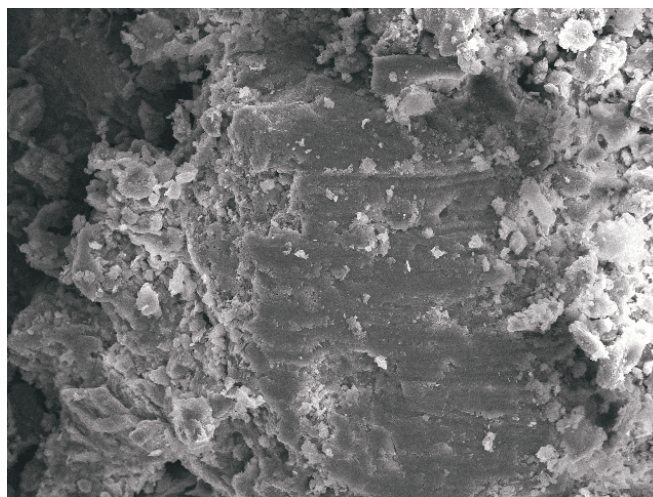


Figura 3. Imagem da superfície de ruptura obtida no MEV – ampliação de 500x

CONCLUSÕES

A interpretação para o fenômeno pode ser explicada em 3 estágios de evolução do relevo que foi sendo lenta e progressivamente modelado. O primeiro estágio, representa a escarpa íntegra, comprovada por fotografias áreas de 1964, nas quais é possível notar o sistema principal de fraturas e fraturas secundárias. No segundo estágio os deslocamentos

do maciço resultaram na abertura da fenda, influenciados pelos processos de infiltração de água nas rochas fraturadas. Além do fraturamento imposto pelo tectonismo, também atuaram no processo as descontinuidades da zona de disjunção vertical do derrame 3 e a zona vesicular e amigdalóide do derrame 2. As fraturas situadas na área próxima a fossa e na fossa mostram um padrão tipo graben. O estado de tensões gerado quando da abertura da fenda teria provocado um deslocamento do bloco (escapa leste) no sentido SE, pois este lado é topograficamente mais baixo. Os escorregamentos têm uma direção de deslocamento norte/sul e uma componente vertical. Estes movimentos geram uma grande fenda (fossa) com blocos elevados de ambos os lados. Seguiu-se a esse evento um fraturamento secundário no estilo graben-horst. Os sedimentos pertencentes à Formação Santa Maria abaixo dos arenitos da Formação Botucatu apresentam-se como uma camada praticamente impermeável que condiciona o fluxo de água em toda a encosta. Apesar da rocha do derrame 3 apresentar uma baixa porosidade, este derrame está extremamente fraturado (fraturas verticais sem preenchimento) com o fluxo ao longo destas fraturas alimentando a camada amigdaloidal e vesicular do derrame 2 e os arenitos abaixo. O terceiro estágio, representado pelo desenvolvimento atual da fenda, o acomodamento das rochas imprimiu como resultado uma abertura com vale em forma de U e um basculamento do bloco separado do platô para o leste. Na frente do escorregamento observa-se um acavalamento dos detritos resultantes do cisalhamento e desestruturação das formações geológicas envolvidas, principalmente a Formação Santa Maria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- PINHEIRO, R. J.B. (2000). Estudos de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul.
- PINHEIRO, R.J.B., BICA, A.V.D., BRESSANI, L.A., STRIEDER, A. (2004). The use of geophysical surveying for the investigation of slope failures in southern Brazil. 2nd International Conference on Geotechnical Site Characterization, Porto.
- ISRM (1981). Roch characterization testing and monitoring, suggested methods. Ed. Pergamon Press, Oxford, 211p.