

GEOTECHNICAL SLOPE PROPERTIES REVEALED BY SHALE MINERALOGY: ANTONIO PEREIRA STUDY CASE – OURO PRETO – MG – BRAZIL

Mineralogia usada para diferenciar xistos ajudando na interpretação de propriedades geotécnicas de um talude.

Estudo de caso de Antonio Pereira – Ouro Preto – MG – Brasil.

Daniel Molinari.V. Fonseca & Tobias R. Vieira &

ABGE- IAEG - WALM Engenharia, Brasil, Daniel.fonseca@walmengenharia.com.br; tobias.vieira@walmengenharia.com.br
VALE, Brasil - [Adriana Ribeiro, adriana.ribeiro1@vale.com](mailto:Adriana.Ribeiro@vale.com)

ABSTRACT: The work complements the knowledge of the rocks that make up the entire extent of the surroundings of a slope, which underwent significant interventions due to the rainy season. Petrographic thin sections were generated to understand the interactions of the minerals found and their characteristics that may have influences on the geological/geotechnical conditions of the slopes. By analyzing lithotypes using Petrography and Scanning Electron Microscopy (SEM), it was possible to characterize the mineralogical range of the samples. A shear zone can be observed, with rupture in the axis of crenulation, filled with clay minerals. Quartz is very fine and elongated, with grains surrounded by sericite. This fabric may facilitate grain movement within the rock due to unloading. A thin section confirmed the presence (or existence) of an igneous rock source in the region, which may be related to regional/local structures and faults. The combination of very fine grains, foliation intercepted by fracture planes, fluid injection, and unloading can help reduce cohesion. This situation, combined with water ingress, could lead to erosion generating preferential planes, consequently affecting the overall stability of the rock.

RESUMO: O trabalho complementa o conhecimento das rochas das adjacências de um talude, que foi motivo de intervenções devido a estação chuvosa. Foram geradas lâminas petrográficas para entender as interações dos minerais encontrados e suas características que podem ter interferências nas condições geológicas / geotécnicas dos taludes. Com a possibilidade de se analisar os litotipos utilizando a Petrografia e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi possível caracterizar a gama mineralógica das amostras. É possível observar uma zona de cisalhamento, com rompimento no eixo da crenulação, preenchida por argilominerais. O quartzo se encontra muito fino e estirado, com grãos envolvidos por sericite. Essa trama pode propiciar a movimentação entre os grãos na rocha devido ao desconfinamento. Uma lâmina comprovou que existiu (ou existe) uma rocha ígnea fonte na região, podendo ser relacionada às estruturas tectônicas. A combinação de grãos muito finos, foliação interceptada por planos de fraturamento, por injeção de fluidos e desconfinamento, pode ajudar a diminuir a coesão. Essa situação acrescida da entrada de água, pode-se ter a erosão gerando planos preferenciais, e consequentemente ter um reflexo coesão e estabilidade geral da rocha.

KEYWORDS: “Mineralogy”, “shale”, “sericite”, “quartz”, “faults”, “clay minerals”, “MEV”

1 - INTRODUÇÃO.

Ao longo da evolução das obras do extravasor para o descomissionamento de uma barragem foi constatado que existe uma variação na resistência, no grau de alteração e no nível de saturação dos materiais dispostos ao longo do dispositivo extravasor da estrutura. Em virtude da ocorrência de processos instabilizantes no talude foi necessário um estudo para entender a causa desses processos (Figura 1). Sendo assim, foi preciso contextualizar as variações geomecânicas através das descrições dos mapeamentos, correlacionando também a campanha amostral petrográfica que fora realizada ao longo do extravasor, com o propósito de que fosse possível a constatação da presença ou não, de argilominerais que possuem propriedades expansivas. Foi usado também os métodos de Difração de Raio X (DRX) e Microscopia de Eletro Varredura (MEV).

Usando a geofísica de Eletrorresistividade como apoio foi possível identificar uma estrutura planar oblíqua ao corte do talude, o que ocasionou um melhor entendimento dos processos atuantes na instabilidade do talude. Num ponto dos primeiros mapeamentos para a estrada de acesso às obras do extravasor foi constatado uma

situação adversa onde se via solo com características de aluvião envolto pelo material caracterizado como Sericita xisto. Foi identificado em meio a carapaça de canga fragmentos de Goethita em forma de agulhas, forma típica de crescimento por gravidade com passagem de água. Esse foi mais um indício corroborando com a estrutura planar oblíqua ser o conduto para águas que brotavam no pé do talude após as chuvas.

O entendimento da região do talude foi evoluindo de modo que as evidências geradas nos primeiros mapeamentos, acrescidas de informações observadas após a escavação/retaludamento, tornaram possível intervir nos problemas de estabilidade de forma mais eficiente.



Figura 1: Escorregamentos sequenciados no talude após período chuvoso mais intenso do verão de 2021. Foto de Fevereiro de 2022.

1.1 Geologia regional e local

O Quadrilátero Ferrífero (QF), assim chamado em função de sua geometria do relevo, localiza-se na porção sudeste do cráton São Francisco. O QF é composto por núcleos de rochas graníticas e/ou gnáissicas de idade Arqueana a Paleoproterozóica, bordados por cinturões de rocha verde do Arqueano, seqüências supracrustais paleoproterozóicas, mesoproterozóicas e neoproterozóicas (Chemale et al., 1994).

No alto da Figura 2 tem-se um detalhe da geologia regional e o mapa local de 2020. A área de estudo está inserida nesse contexto geológico, de itabiritos e dolomitos da Fm. Gandarela, quartzitos e xistos descritos na Fm. Saramenha, com grau de alteração elevado e características singulares.

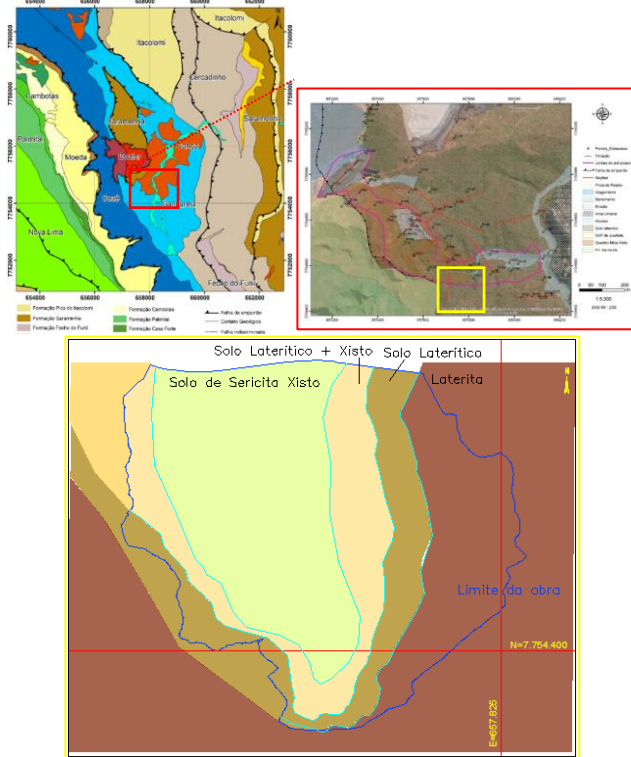


Figura 2: Disposição geológica das rochas que formam esta porção do quadrilátero ferrífero. A geologia local pode ser contextualizada por Grupo Itabira, Grupo Sabará e Grupo Itacolomi. Detalhe do mapa regional mais atual, Endo, 2019. Mapa de 2020, antes das obras do extravasor e mapa de litotipos presentes no talude.

Na imagem aérea (Figura 3) está indicado a localização das amostras petrográficas e a localização do mapeamento feito exclusivamente no talude. Este foi realizado a fim de tentar reconhecer a variação dos litotipos em maior detalhe. Foi usado o mapa de detalhe do talude (Figura 2), onde observa-se a capa de canga envolvendo o solo de sericita xisto.



Figura 3: localização das amostras para petrografia.

O talude em questão tem em seu topo a laterita, composta de fragmentos de quartzo, hematita, itabirito, e por vezes, fragmentos de filito. A matriz é argilo siltosa, avermelhada a cinza escuro (quando compacta). Essa laterita contém partes com venulações de hematita e partes silicificadas que geram maior resistência na laterita, edificando o relevo, e também espaços preenchidos parcialmente por goethita botroidal, as vezes euédrica, mas na maioria das vezes, se vê minerais microcristalinos formando uma massa amorfa. Esses interstícios presentes na laterita podem ser a causa da maior permeabilidade, que ocasiona uma saturação no contato entre a laterita/solo laterítico e o solo do Sericita xisto posicionado adjacente. Abaixo da laterita, o solo laterítico bordejado a parte da capa laterítica. Esse tem sua espessura variando, e com porções mais alteradas, outras mais preservadas, com partes de solo de Sericita xisto misturado, mostrando que houve certa movimentação de massas no passado. Esse solo laterítico possui alta porosidade e permeabilidade (solo de matriz silto argilosa e clastos lateríticos espaçados). Essa situação, junto a alta permeabilidade da laterita, propicia a formação de “bolsões” de solo saturados na porção de solo laterítico com contribuição de solo de Sericita xisto se posiciona na interface entre a canga e o solo de sericita xisto. O solo de Sericita xisto se concentra na porção central, envolto por essas camadas transicionais, apenas na porção mais alta do talude. A porção mais baixa do talude expõe esse solo de Sericita xisto, com variações composicionais no bandamento, que estão presentes, ora com mais bandas marrons (carbonatos), ora com bandas cinza (mais sericita). Por vezes é possível observar lentes arenosas amareladas subordinadas.

1.2 Geofísica - eletrorresistividade

Após um estudo geofísico de eletrorresistividade, foi possível identificar a possível estrutura sub verticalizada separando anomalias. Tal feição pode ser fruto da concentração da saturação nessa estrutura. A disposição das surgências em épocas chuvosas mostrou que elas se concentram na interface de solos mais permeáveis, como o solo laterítico, e solos com menor permeabilidade, mas grande porosidade, como o solo de Sericita xisto. A diferença de permeabilidade gera um maior fluxo

concentrado nessa porção. Outras linhas de eletrorresistividade foram geradas, porém a mais representativa é a do topo do talude, onde a estrutura é menos subjetiva e mais perceptível.

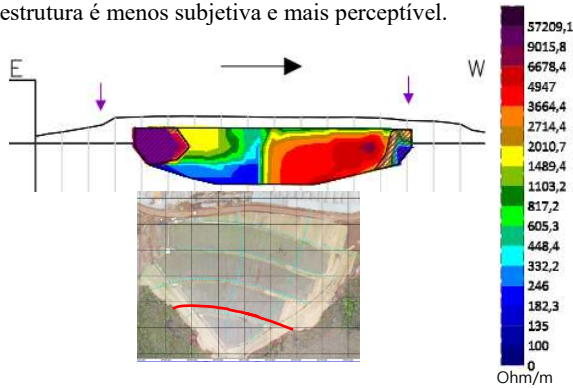


Figura 4: Linha de eletrorresistividade mostrando uma estrutura sub vertical. Na imagem aérea a linha vermelha em destaque indica a localização da seção, no topo do talude.

A anomalia de baixa resistividade pode estar relacionada a uma zona mais saturada, e sua feição verticalizada em contato com uma anomalia de alto resistivo, indica a presença da estrutura condicionando o sistema hídrico no subsolo do talude.

1.3 Evidências

Durante as escavações em Agosto-2022, foi observado níveis erodidos confinados, que só foram expostos devido as obras. A erosão desses níveis não era visível em superfície e nem a porção onde foi depositado. O que indica que pode ser uma estrutura com certo espaço para receber esse sedimento erodido (Figura 6).

Para entender a estrutura foi preciso revisitar os mapeamentos passados, para se achar alguma evidência da estrutura antes da escavação do talude. Um ponto de observação geológica em especial (onde se encontra o pé do atual talude), mostrava uma situação inusitada, onde um material de seixos e grânulos arredondados, junto a areia e alguns fragmentos de rocha, se encontrava em meio ao sericita xisto. Este material foi interpretado como parte de um aluvião sem nenhum sinal de deformação. Porém, o entorno de sericita xisto se encontrava foliado como mostra a Figura 5, que são do local exatamente abaixo de onde a geofísica mostrou a estrutura planar. Podendo ser entendido agora como um possível preenchimento da base dessa estrutura, possível conduto preenchido por sedimento carregado.



Figura 5: Fotos do mapeamento de 2020, onde se vê um aluvião (por definição) em meio a saprolite de rocha foliada.



Figura 6: Níveis erodidos confinados no topo do talude, abertos na escavação em Agosto - 2022.

Esses fatores mostraram a estrutura, porém faltava entender o porquê de o solo do talude se manter saturado e perdendo a estabilidade a cada chuva. Somente a estrutura não seria capaz de gerar perda de coesão quando saturado, causando desagregação como em rochas com presença de minerais expansivos (montmorilonita).

Assim, com o objetivo de identificar minerais e complementar o conhecimento das rochas que compõem toda extensão da obra de descaracterização, foram coletadas dez amostras das principais rochas ao longo do extravasar. As amostras são representativas dentre as variações composicionais que são observadas ao longo da obra toda.

1.4 Descrição Petrográfica

Para a descrição petrográfica, apresenta-se os quadros de estimativa modal da mineralogia, (em porcentagem), junto ao nome de cada lâmina, seguido da descrição e fotos.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Argilominerais + Sericita/Muscovita	68	68	72	71	63	56	49	62	58	70	59	63	64
Quartzo	29	30	27	25	35	40	45	34	37	27	38	32	33
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	3	2	1	3	2	4	6	4	5	3	3	5	3
Zircão	<1	<1	0	<1	<1	<1	<1	<1	0	0	0	0	<1
Turmalina	<1	<1	0	<1	0	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Hematita	0	<1	0	1	0	<1	0	<1	<1	0	<1	<1	<1
Carbonato	<1	0	0	0	0	0	<1	0	0	<1	0	0	<1
Feldspato	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<1	0	0	<1

L1:

Esta rocha foi classificada como uma rocha alterada saprolítica, com aspecto inequigranular de granulação fina com 0,4mm de comprimento, formada por argilominerais muito finos, sericita/muscovita e quartzo, apresentando também hematita, turmalina, zircão, feldspato, carbonato e óxidos/hidróxidos de ferro muito finos como minerais acessórios (Figura 7). Ao analisar o MEV (Figura 8), apresenta como característica principal a ocorrência de cristais de quartzo (0,4 mm), turmalina, zircão e hematita (estes três últimos mais escassos e com até 0,1 mm) imersos em uma fina massa inferior a 0,1 mm, tardia, composta principalmente por argilominerais, com uma pequena quantidade de finos óxidos/hidróxidos de ferro mais tardios associados, o que dá uma coloração mais avermelhada a rocha. Os estudos de MEV-EDS foram focados nesta fina massa que engloba os cristais maiores, onde foi comprovada a ocorrência de sericita e argilominerais (classificados como illita), além de menores quantidades de quartzo e hematita. As imagens de MEV mostraram uma certa orientação de grãos invisíveis em lâmina. A presença de turmalina fina e hematita muito fina tabular mostra que a contribuição foi de rochas fontes variadas. O dolomito presente a

alguns quilômetros do local de amostragem tem níveis com turmalina e magnetita, o que mostra que a fonte dessa turmalina pode estar relacionada às do dolomito.

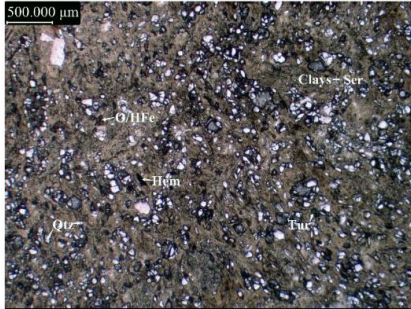


Figura 7: Textura geral da rocha, exibindo os fragmentos de quartzo e hematita no meio de uma massa de argilominerais e sericita/muscovita. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 3,2x

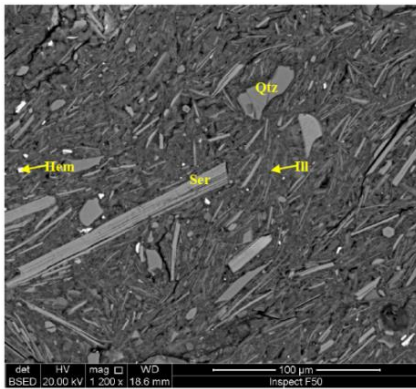


Figura 8: Imagem de elétrons retroespalhados da investigação em MEV-EDS. -- Hem: Hematita; Ill: Illita; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Quartzo	55	50	50	53	54	51	49	47	47	45	50	57	51
Sericita/Muscovita	30	35	40	38	38	40	40	40	40	44	40	35	38
Hematita	10	10	5	5	5	6	8	10	8	8	5	5	7
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	5	5	5	4	3	3	3	3	5	3	5	2	4
Zircão	<1	0	0	<1	0	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Clorita	<1	<1	<1	<1	0	0	0	0	0	0	<1	1	<1
Turmalina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<1	0	0	<1

L2:

Rocha com aspecto textural equigranular de granulação fina (cristais com até cerca de 0,25 mm de comprimento), apresentando a microestrutura granolepidoblástica e formada por cristais xenoblásticos a idioblásticos, com os cristais malformados apresentando contatos interlobados a poligonais entre si. As estruturas podem ser descritas por xistosidade e clivagem de crenulação bem marcadas, além de diferentes domínios composicionais. Fraturas que cortam a rocha em diferentes direções também ocorrem. Rocha apresentando óxidos/hidróxidos de ferro (muito finos para se definir a forma), zircão e turmalina (ambos xenoblásticos a idioblásticos) como fases acessórias. É sabido que planos de clivagem, junto a foliação geram regiões mais propícias a ruptura, ou planos de rupturas, por vezes com

preenchimento de hidróxidos de ferro (Figura 9 e Figura 10). O quartzo se encontra estirado, envolto pela sericita. Essa trama pode propiciar a movimentação entre os grãos devido ao desconfinamento ou saturação.

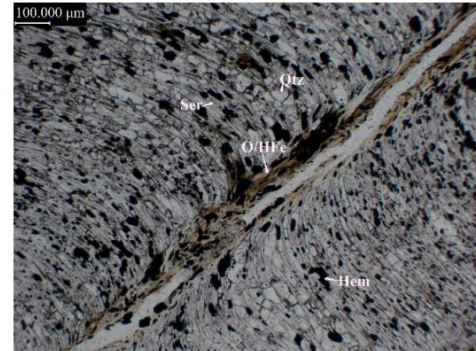


Figura 9: Aspecto de uma fratura preenchida parcialmente por óxidos/hidróxidos de ferro. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x. É possível observar a deformação junto ao plano indicando uma micro zona de cisalhamento, com rompimento no eixo da crenulação

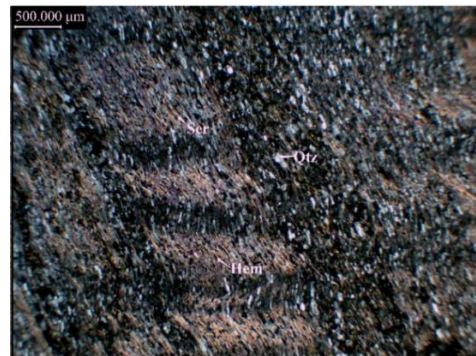


Figura 10: Aspecto geral da rocha, onde é possível observar a xistosidade e a clivagem de crenulação, além do aspecto laminado da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 2,5x.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Média
Sericita/Muscovita	41	59	44	45	54	49	57	44	40	55	41	48
Quartzo	49	33	51	48	37	41	34	47	54	35	49	43
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	6	2	2	2	2	2	2	3	1	2	5	3
Hematita	3	5	3	4	6	6	5	5	4	6	4	5
Fe-Mg Clorita	0	<1	0	<1	<1	1	1	0	<1	1	<1	<1
Argilominerais	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zircão	<1	<1	0	<1	0	0	0	<1	0	0	0	<1

L3:

A amostra da lâmina 3 tem aspecto textural equigranular de granulação fina (0,5 mm), apresentando a microestrutura granolepidoblástica e formada por cristais xenoblásticos a idioblásticos, com os cristais malformados apresentando contatos interlobados a poligonizados entre si, as estruturas observadas em lâmina são descritas por xistosidade e clivagem de crenulação bem marcadas (Figura 11), além de diferentes domínios composicionais. Todas estas estruturas estão dobradas. Rocha constituída predominantemente por quartzo (xenoblástico), sericita/muscovita

(subidioblástica a idioblástica) e hematita (xenoblástica a idioblástica), apresentando óxidos/hidróxidos de ferro muito finos para se definir a forma e zircão (xenoblástico) como minerais acessórios. A foliação na L3 é bem marcada e a variação composicional nas camadas se mostrou evidente em lâmina e amostra de mão. É possível observar que há variação de camadas mais ricas em hematita e camadas mais ricas em quartzo e sericita. A xistosidade e a clivagem de crenulação mostram um estágio avançado de deformação com a crenulação oblíqua a foliação. Os grãos de quartzo se mostram tão estirados como na lâmina L2, mas o tamanho é um pouco maior, e apresentam certo grau de arredondamento (Figura 12), observado em aumento de 20x.

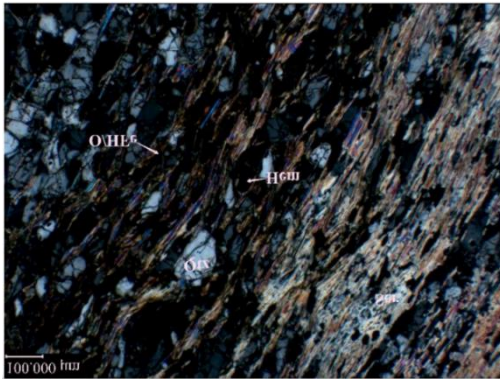


Figura 11: Aspecto das lâminas ricas em sericita e quartzo presentes na rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.

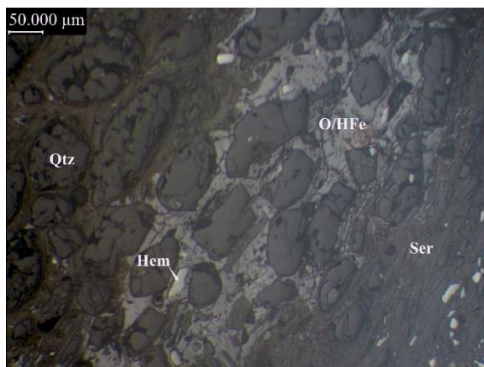


Figura 12:: Agregado de óxidos/hidróxidos de ferro percolados entre cristais de quartzo com cristal de hematita. Imagem em luz refletida polarizada com a objetiva de 20x

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	Média
Argilominerais + Sericita/Muscovita	79	76	73	75	77	58	51	70
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	15	14	20	16	13	35	41	22
Quartzo	5	9	6	7	10	5	6	7
Hematita	1	1	1	1	<1	2	2	1
Zircão	<1	<1	<1	1	0	<1	<1	<1
Turmalina	<1	<1	0	0	0	0	0	<1

L4 :

A amostra L4 tem como característica principal as porções ocre em meio a matriz argilosa vermelha. Esse litotipo aparece no topo do

talude oposto, próximo ao topo do talude e aflora novamente distante mais de 300m (em linha reta). É possível observar nas partes ocre, maclas cúbicas de um mineral já oxidado. A rocha apresenta alto grau de alteração, podendo ser classificada como um saprólito, apresentando aspecto textural a inequigranular de granulação fina (0,7 mm de comprimento), constituída predominantemente por argilominerais, sericita/muscovita, óxidos/hidróxidos de ferro muito finos e quartzo, enquanto a hematita (bem formadas), zircão e a turmalina (malformados) são as fases acessórias (Figura 13). A amostra L4 não apresenta foliação, nem características estruturais visíveis e preservadas, mas zonas distintas de cor diferente (Figura 14). A coloração se deve a fases mais alteradas, com argilominerais predominantes e fase menos alterada de cor ocre, com minerais menos alterados. O estudo em MEV-EDS foi feito em uma região mais rica em argilominerais e sericita (Figura 15) e comprovou que a porção de granulação mais fina é composta principalmente por sericita e argilominerais (classificados como illita), com a ocorrência de goethita e hematita associadas, além de comprovar a ocorrência de goethita nos aglomerados circulares.

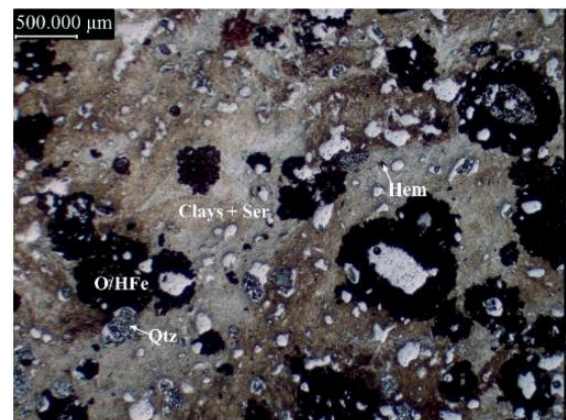


Figura 13: Textura geral da região com predomínio de argilominerais e sericita/muscovita, com buracos na lâmina bordejados por óxidos/hidróxidos de ferro. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 3,2x

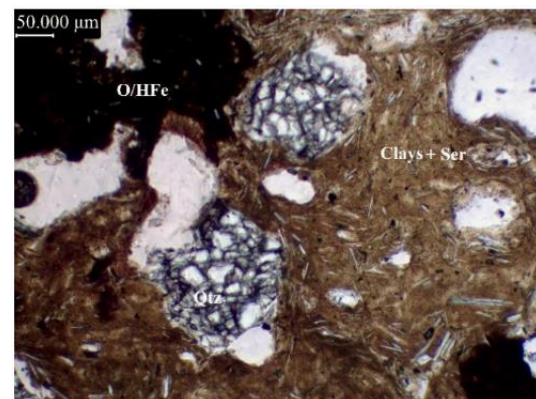


Figura 14: Textura geral da região que predomina argilominerais e sericita/muscovita, destacando a cor em tons de marrom. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 20x

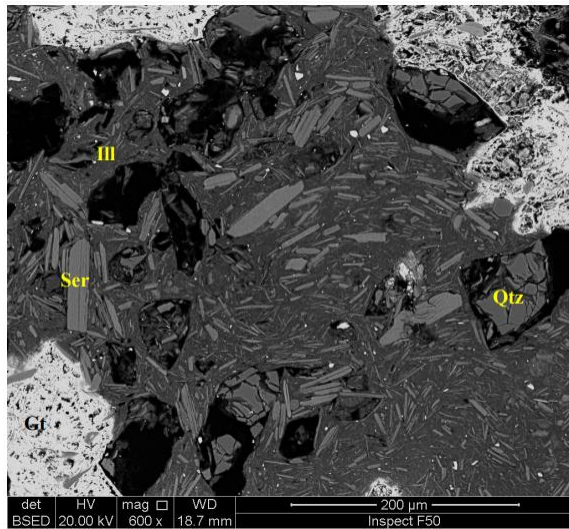


Figura 15:: Imagem de elétrons retroespalhados para investigação MEV-EDS. Legenda: Ill: Illita; Gt: Goethita; Qtz: Quartz; Ser: Sericita

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Quartzo	79	45	30	25	45	74	72	31	40	45	49	70	50
Sericita/Muscovita	8	44	67	63	38	11	14	48	45	41	41	17	36
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	9	9	8	9	10	10	9	13	9	7	3	4	8
Hematita	4	3	3	3	4	5	5	5	4	3	3	4	4
Argilominerais	<1	1	2	<1	3	<1	0	3	2	4	3	1	2
Fe-Mg Clorita	0	1	<1	<1	<1	<1	<1	0	<1	1	2	<1	<1
Zircão	0	<1	0	<1	0	0	0	0	<1	0	<1	0	<1

L5:

Rocha de aspecto textural complexo equigranular de granulação fina com diferentes níveis texturais, estruturas representadas dois domínios estruturais diferentes, sendo um domínio caracterizado por estruturas como xistosidade, clivagem de crenulação, uma laminação milimétrica e dobras bem marcadas; e outro domínio que não apresenta nenhuma estrutura bem marcada (Figura 16). Rocha constituída predominantemente por quartzo (xenoblástico a subidioblástico), sericita/muscovita (subidioblásticas a idioblásticas) e óxidos/hidróxidos de ferro (muito finos para se definir a forma), apresentando hematita (xenoblástica a idioblástica) e zircão (xenoblástico) como minerais acessórios.

A amostra L5 se encontra bem próximo a L4. Esse litotipo aparece como uma variação do Sericita xisto, porém, nessa porção, lentes brancas e lentes avermelhadas aparecem em maior proporção que as lentes ocre. Essa variação do Sericita xisto aparece em porções restritas ao longo do extravasor. A alteração dessa porção gera um solo de cor rosa, diferente dos outros solos gerados na região.

Os finos óxidos/hidróxidos de ferro ocorrem percolando por ambos domínios da rocha de maneira mais tardia e possivelmente grande parte destas fases foram perdidas durante a confecção da lâmina. A região abordada investigada pelos estudos de MEV-EDS foi a região mais rica em estruturas da rocha, onde se constatou que a ocorrência de argilominerais (classificados como caulinita) e confirmou a ocorrência de quartzo, hematita, sericita e goethita (Figura 17).

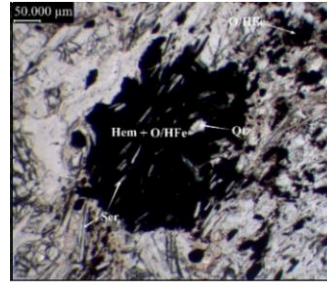


Figura 16 : Óxidos/hidróxidos de ferro assimilando cristais de hematita (possivelmente substituindo), quartzo e sericita/muscovita. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 20x.

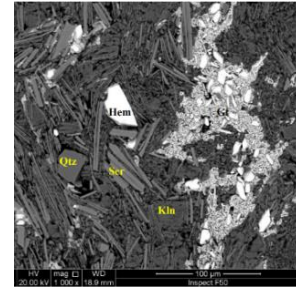


Figura 17: Imagem de elétrons retroespalhados para investigação em MEV-EDS. Legenda: Gt: Goethita; Hem: Hematita; Kln: Caulinita; Qtz: Quartz; Ser: Sericita.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Quartzo	30	40	45	47	43	40	49	48	45	30	51	52	43
Sericita/Muscovita	33	37	30	30	30	30	30	30	25	34	30	30	31
Hematita	5	5	3	5	7	5	3	4	6	20	4	5	6
Magnetita	1	<1	0	0	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1
Argilominerais	5	3	10	3	5	10	10	10	10	5	5	5	7
Zircão	<1	0	<1	0	0	0	0	<1	0	<1	<1	<1	<1
Carbonato	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	25	15	12	15	15	15	8	8	10	10	10	8	<1
Óxidos/Hidróxidos de Alumínio	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Cloritas	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Turmalina	0	0	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	<1
Microclina	0	0	0	0	0	0	0	0	3	<1	0	0	<1
Plagioclásio	0	0	0	0	0	0	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1
Hornblenda	0	0	<1	0	<1	<1	0	0	<1	<1	0	<1	<1
Biotita	0	0	0	0	0	<1	0	0	0	0	0	0	<1

L6:

Esta lâmina foi executada através de uma rocha saprolítica com aspecto textural inequigranular com fragmentos de granulação fina a grossa (0,1 a 8 mm de comprimento) imersos em uma matriz de granulação fina inferior a 0,3 mm, com ambas porções formadas por cristais de quartzo, sericita/muscovita, hematita, argilominerais e óxidos/hidróxidos de ferro, enquanto magnetita, zircão, carbonato, turmalina, microclina, plagioclásio, hornblenda e biotita (moderadamente bem formados) são as fases acessórias identificadas (Figura 18).

A amostra L6 está distante apenas alguns metros das L4 e L5. Esta aflora no topo do talude oposto e tem ocorrência restrita apenas nesse ponto. É possível observar clastos arredondados e angulosos em uma matriz micácea (cor marrom), diferente dos outros litotipos encontrados na área. A presença de minerais diferenciados nessa lâmina evidencia que se trata de saprólito que recebeu aporte de xistos/filitos e de uma outra rocha com contribuição ígnea, devido a ocorrência de microclina e hornblenda (Figura 19).

Em campo se observa clastos arredondados esparsos, em meio a uma matriz de cor marrom. Em MEV foi possível ver o anatásio (não observado na petrografia) imerso em uma fina massa composta por um interescorcimento submicroscópico de caulinita, gibbsita e goethite (Figura 20).

Os fragmentos presentes variam desde pedaços de rocha a fragmentos de minerais, que em geral mostram uma baixa esfericidade e variam de arredondados a angulosos. Estes clastos/fragmentos estão imersos em uma fina matriz composta principalmente por argilominerais, sericita e finos óxidos/hidróxidos de ferro mais tardios, que dão uma coloração

avermelhada a amostra. Um clasto de uma rocha intemperizada e parte da porção mais fina da rocha (chamada de matriz) foram investigadas por MEV-EDS, onde se constatou que parte destes clastos são compostos por quartzo, hematita e anatásio, imersos em uma fina massa composta por um intercrescimento submicroscópico de caulinita, gibbsita e goethita, enquanto na porção mais fina da rocha foi confirmada a presença de sericita e hematite (Figura 21).

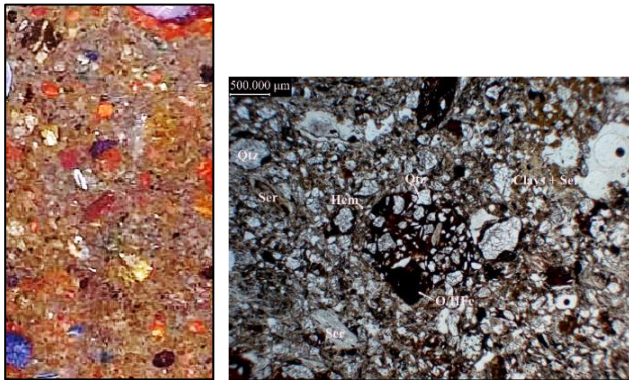


Figura 18: Textura macroscópica da rocha e; Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 2,5x

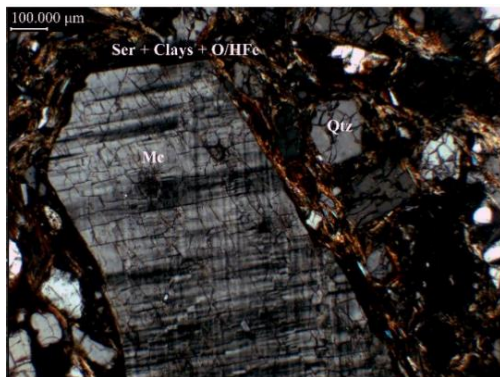


Figura 19: Aspecto de um fragmento de microclina. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.

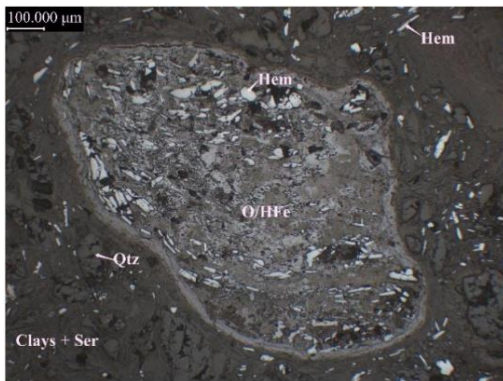


Figura 20: Aspecto de um fragmento composto quase inteiramente por hematita e óxidos/hidróxidos de ferro. Imagem em luz refletida polarizada com a objetiva de 10x.

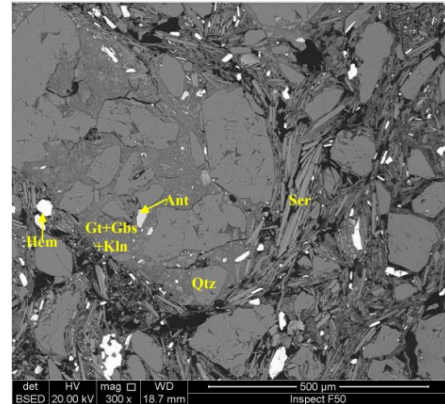


Figura 21: Imagem de elétrons retroespalhados da região selecionada para investigação em MEV - EDS. Legenda: Ant: Anatásio; Gbs: Gibbsita; Gt: Goethita; Hem: Hematita; Kln: Caulinita; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita

As lamina L7 e L8 foram retiradas de amostras diretamente no talude. Uma na base e outra no topo (Figura 22), para tentar entender se havia alguma variação dentro do pacote de sericita xisto do talude.



Figura 22: Localização das lamina no talude.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Quartzo	35	35	40	52	50	50	47	45	50	41	45	49	45
Sericita/Muscovita	55	47	50	38	40	40	40	40	40	41	40	40	42
Hematita	7	8	5	5	5	6	5	5	5	8	5	5	6
Cloritas	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	3	10	5	5	5	5	7	10	5	10	10	6	7
Turmalina	0	0	0	<1	0	0	0	0	0	0	0	0	<1
Zircão	0	0	0	0	0	0	<1	0	<1	<1	0	0	<1

L7:

Amostra retirada no pé do talude tema deste estudo, onde se observa uma quantidade maior de lentes de cor marrom. Nesta amostra foi possível constatar que se trata de uma rocha, com aspecto textural equigranular de granulação fina (0,4 mm de comprimento), apresentando a microestrutura granolepidoblástica e formada por cristais xenoblásticos a idioblásticos, com os cristais apresentando contatos interlobados a poligonais (Figura 23). Seu arranjo estrutural pode ser contextualizado por xistosidade e clivagem de crenulação, além de diferentes domínios composicionais (possível laminação). Venulações cortam a rocha no sentido da xistosidade, que ocorrem dobradas assim como as outras estruturas da rocha (Figura 24). Aparentes fraturas ocorrem, com algumas preenchidas por minerais (Figura 25). Na região abordada para os estudos de MEV-EDS foi confirmada a ocorrência de sericita, quartzo, hematita e goethita e identificado finos argilominerais (classificados como caulinita), que não

havam sido identificados na análise petrográfica (Figura 26). A localização dessa amostra, junto ao pé do talude, a torna um pouco mais especial, pois mostra a injeção de fluidos tardios, percolação de hidróxidos de ferro, preenchimento de venulações com gibsita e hidróxido de ferro. Essa combinação de grãos muito finos, foliação interceptada por planos de fraturamento por injeção de fluidos e desconfinamento, pode ajudar a diminuir a coesão numa visão mais geral. Com essa situação acrescida da entrada de água, podemos ter a erosão dessas pequenas venulações, gerando planos preferencias de passagem de água, aumentando a erosão interna e consequentemente ter um reflexo na estabilidade geral da rocha. Esses fatores não são os fatores determinantes da instabilidade, porém a contribuição em períodos chuvosos pode ser significativa, devido a percolação da água.

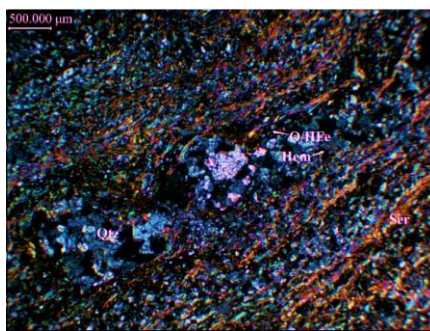


Figura 23: Aspecto das venulações que cortam a rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 2,5x.

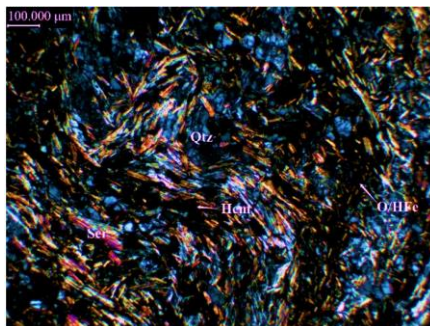


Figura 24: Aspecto das dobras que ocorrem na rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.



Figura 25: Aspecto dos óxidos/hidróxidos de ferro que percolam tardiamente pela rocha. Imagem em luz refletida polarizada com a objetiva de 20x.

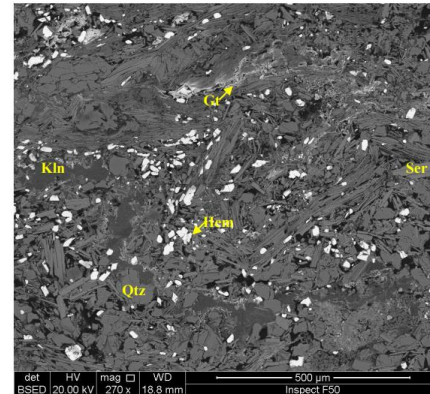


Figura 26: Imagem de elétrons retroespalhados da região selecionada para investigação em MEVEDS. Legenda: Gt: Goethita; Hem: Hematita; Kln: Caulinita; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉDIA
Argilominerais + Sericita/Muscovita	69	70	70	75	71	71	76	78	75	82	73
Quartzo	22	18	16	10	15	17	12	13	16	10	15
Oxidos/Hidróxidos de Ferro	5	7	8	10	9	8	6	4	5	4	7
Hematita	4	5	6	5	5	4	5	5	4	4	5
Fe-Mg Clorita	<1	<1	0	0	0	0	1	0	0	0	<1
Zircão	<1	0	0	0	0	<1	0	0	0	0	<1
Carbonato	0	<1	0	<1	<1	0	0	<1	0	0	<1

L8:

Rocha com aspecto textural inequigranular de granulação fina (1 mm de comprimento), apresentando microestrutura localmente lepidoblástica e formada por cristais xenoblásticos a idioblásticos, cujos cristais malformados apresentam contatos retos a interlobados (Figura 27). Estruturalmente apresenta xistosidade e clivagem de crenulação, sendo também observados diferentes domínios composicionais, onde todas estas estruturas são sobrepostas por dobras sutis (Figura 28). Rocha constituída predominantemente por argilominerais (Figura 29), sericita/muscovita, quartzo, hematita e óxidos/hidróxidos de ferro, apresentando zircão e carbonato (ambos xenoblásticos) como fases acessórias. A região selecionada para os estudos de MEV-EDS foi uma região moderadamente intemperizada da rocha, onde ser confirmou a presença de quartzo, sericita e hematita, além da ocorrência dos argilominerais (classificados como caulinita) (Figura 31). Amostra retirada na berm do talude, onde se observa uma “desorganização” nas lentes. Tanto na parte estrutural, quanto na composição das lentes. As venulações preenchidas podem ser erodidas gerando menor coesão (Figura 30)

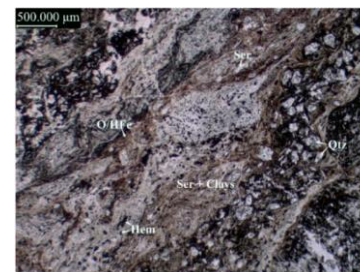


Figura 27: Textura geral da rocha, exibindo a xistosidade, clivagem de crenulação e a variação composicional da amostra. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 3,2x.

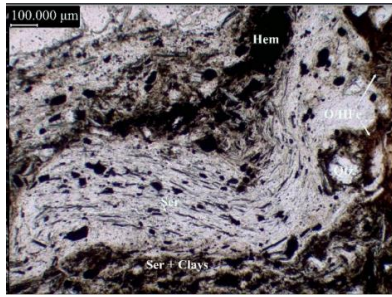


Figura 28: Detalhe de uma dobra presente na rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x.

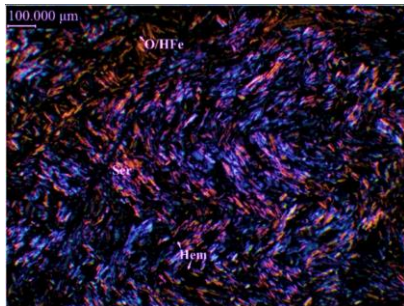


Figura 29: Detalhe da textura geral da rocha exibindo a xistoidade e clivagem de crenulação. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.

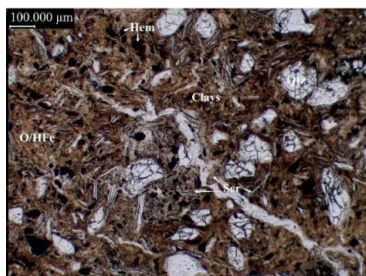


Figura 30: Região alterada com percolação de óxidos/hidróxidos de ferro, onde a sericita/muscovita está decusada e associada a finos argilominerais. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x

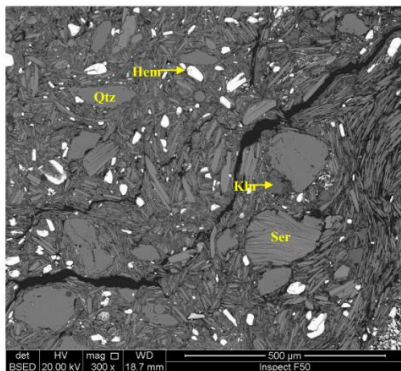


Figura 31: Imagem de elétrons retroespalhados da região selecionada para investigação em MEV/EDS. Legenda: Gt: Goethita; Hem: Hematita; Kln: Caulinita; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita.

As amostras L9 e L10 foram retiradas nas proximidades do emboque do extravasor, onde aparecem litotipos diferentes dos Sericita xisto

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Média
Mineral										
Quartzo	30	35	30	30	25	30	25	28	30	29
Sericita/Muscovita	3	4	4	4	4	3	3	2	3	3
Hematita	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
Argilominerais	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Carbonato	0	<1	0	0	0	0	0	0	0	<1
Óxidos/Hidróxidos de Ferro e Manganês	62	58	61	61	66	62	67	65	62	63

L9 :

A amostra L9 foi retirada num afloramento de “xisto manganífero” onde se observa preenchimento de material ocre, mais rígido e resistente a erosão (Figura 32), nas fraturas, próximo ao emboque do extravasor. Os cristais de quartzo em lâmina apresentam uma típica extinção ondulante, ocasionais inclusões de carbonato e hematita, um formato granular e muitas fraturas (Figura 33)



Figura 32: Veios E-W de maior resistência a erosão; e nódulos de manganês próximos ao local da L9 indicam uma laterita diferenciada com maior permeabilidade.

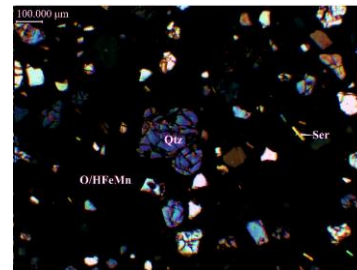


Figura 33: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.

Estimativa modal da mineralogia da lâmina (%):

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Mineral													
Quartzo	78	83	86	78	78	80	82	76	80	86	83	78	81
Sericita/Muscovita	20	15	12	20	20	18	16	22	18	12	15	20	17
Hematita	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Óxidos/Hidróxidos de Ferro	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zircão	0	<1	0	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0	<1	<1
Carbonato	0	0	0	<1	<1	0	0	0	<1	<1	<1	<1	<1
Turmalina	0	0	0	0	0	0	<1	<1	0	0	0	0	<1

L10 :

Quartzito micáceo, que pode ser a rocha fonte de alguns minerais presentes em alguma lâmina do estudo. Este quartzito aparece apenas na porção do emboque do extravasor. Seguindo para jusante do extravasor, se encontra somente o sericita xisto. Ocorrem uma intercalação de lamina milimétricas de quartzo, onde a foliação é incipiente, e sericita/muscovite, onde a foliação é bem marcada (Figura 34)

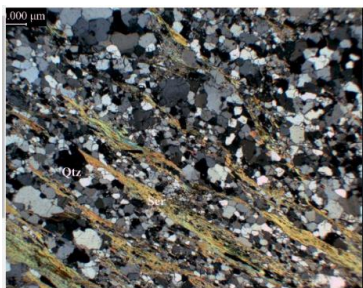


Figura 34: Aspecto geral da rocha, onde é possível observar a xistossidade e a intercalação de lâminas presentes na rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 2,5x.

2 - DISCUSSÃO



Figura 35: Bandamentos verticalizados com estiramento de algumas camadas. Visto em liberação de fundação na região no pé do talude.

Na Figura 35 se observa o bandamento verticalizado, onde o local da foto é exatamente junto ao pé do talude. As camadas de laterita em algumas porções podem chegar até 15m, com uma alta coesão em porções mais rasas, porém, alta permeabilidade em subsolo raso. Espessa camada de laterita, com uma matriz muito fina e aluminoferruginosa pode ter alguma contribuição de sedimentos da erosão de uma rocha vulcânica, dada a matriz tão fina e ampla distribuição. A presença dos minerais: Microclina, Hornblenda, Plagioclásio e Clorita, como visto na L6, indica que alguma rocha vulcânica esteve edificada nas proximidades e que a sua erosão gerou solos com esses minerais, podendo ser também a fonte primária para os argilominerais secundários do sericita xisto estudado.

A predominância de sericita microcristalina / argilominerais nas lâminas demonstra que características de coesão e saturação são diferentes de outros xistos com maior granulação, exigindo um cuidado maior na obtenção e uso dos parâmetros geotécnicos.

Visto em lâmina, que as rochas são compostas por grãos muito finos, heterogêneos, estruturados, e que se saturaram facilmente, entendeu-se que seria preciso diminuir a saturação no solo para melhorar a condição de estabilidade.

Como medida para a diminuição do nível d'água, foi inserido mais DHPs no entorno dessa região saturada do talude. Alguns DHPs nas bordas do talude foram suprimidos e/ou realocados. Foram instalados 74 drenos com profundidades variando de 24,00 a 50,00m (numa média de 46,00m), totalizando 3643,00m perfurados. Essa medida garantiu que qualquer água que infiltre no talude pelo subsolo seja drenada antes de chegar a face. Foi realizado também o jateamento de concreto projetado no talude em todas as bermas garantindo que águas superficiais não infiltrem no talude (Figura 36). Drenagens superficiais mais eficientes foram instaladas com dispositivos de escada d'água, e manutenções

intensivas eliminando qualquer obstáculo no escoamento d'água.

3 - CONCLUSÕES

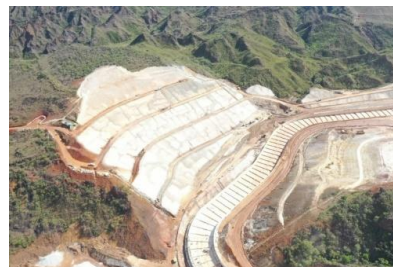


Figura 36: Imagem registra o avanço das obras, com o jateamento concluído – 25/01/24.

O estudo mostrou que a diferença de composição entre os níveis mais quartzosos intercalados a níveis argilosos, sugere uma absorção de água diferenciada. Foi constatado a partir das lâminas, que situações intersticiais de preenchimento por hidróxidos, tem maior absorção de água, armazenando a água em planos de clivagem com charneiras de micro-dobras preenchidas por quartzo fraturado e interstícios entre os grãos. Quando saturado, torna-se altamente desagregável, tendo a contribuição de níveis de diferentes granulações, para aumentar a permeabilidade entre as camadas. Características que combinadas levam a diminuição da coesão entre os grãos e consequentemente, da condição geral de estabilidade.

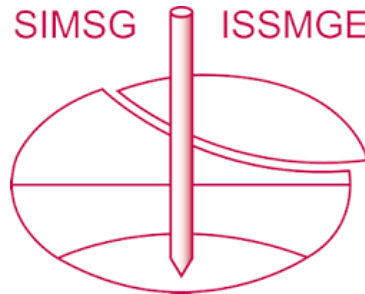
4 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos a direção da WALM Engenharia e a VALE, pela oportunidade desse estudo. Agradecemos a Fábio Magalhães e Ricardo Diniz, pelo apoio na revisão, aos colaboradores, Yan Santos, Bruno Gouveia, João Tribino, Matheus Pereira, Diego Pereira, Vinicius Menezes e a todos outros que nos deram apoio de alguma forma. Ao Felipe Guerra, Frank Pereira e Frederico Chagas da VALE por todo apoio e confiança. Às equipes de campo que nos acompanharam e aos garimpeiros de Antônio Pereira. Um agradecimento especial a Mirella Dalvi e Thiago Pedrosa.

5 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research* 65: 25-54.
- ENDO, I., Galbia H.F., Delgado C.E.R., Oliveira, M.M.F., Zapparoli, A. de C., Moura, L.G.B de, Peres, G.G., Oliveira A.H. de, Zavaglia, G., Danderfer, F.A., Gomes, C.J.S., Carneiro, M.A., Nalini, Jr.H.A., Castro, P. de T.A., Suita, M.T. de F., Seixas L.A.R., Tavaza, E., Lana, C. de C., Marns-Neto, M.A., Marns, M. de S., Ferreira, F.F.A., Franco, A.P., Almeida, L.G., Rossi, D.Q., Angeli, G., Madeira, T.J.A., Piassa, L.R.A, Mariano, D.F., Mariano, D.F., Carlos, D.U. 2019. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:50.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br
- Terzaghi K. 1936. The shearing resistance of saturated soils. *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, Cambridge, Mass., 1, 54-56.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.