

**ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DOS DEPÓSITOS
CENOZOICOS NO FLANCO LESTE DO SINCLINAL MOEDA,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Silas Salgado ¹; Ana Paula Daher ²; Ledson Sathler ³; Ângelo Oliveira ⁴

Resumo – A identificação de depósitos sedimentares cenozoicos como fundação de estruturas relacionadas à mineração tem sido cada vez mais recorrente ao longo dos últimos anos. Essas unidades correspondem a sedimentos encaixados ao longo de vertentes e talvegues, resultantes de retrabalhamento das rochas proterozoicas e arqueanas adjacentes. O artigo indica as características de fácies sedimentares frequentemente encontradas na região da Serra da Moeda, tomando como referência outros trabalhos que tiveram como alvo esses materiais. Além de descrever aspectos como granulometria e conteúdo mineralógico, identifica características como resistência e estimativa de permeabilidade. Isso contribuirá com o avanço no conhecimento dessas unidades, permitindo que essas informações possam ser tomadas de referência para futuras discussões.

Abstract – The cenozoic sedimentary deposits identified as foundation of mining related structures has been constantly reported in the last years. These units are sediments that fill valleys and slopes, that results from the reworking of proterozoic and archean rocks nearby. This paper will bring the characteristics of sedimentary facies commonly found in Serra da Moeda, using as reference other papers on the same subject. Beyond describe aspects as grain size and mineralogical content, it presented characteristics of strenght and permeability. The present data can be use as a background to advance in the knowledge of the cenozoic deposits.

Palavras-Chave – fácies deposicionais; parâmetros; geotecnia.

¹ Geól., Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 98497287, silasalgado83@gmail.com

² Geól., Mestranda, Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 999237795, anap.daher@gmail.com

³ Geól., Esp. Em Engenharia em Geotecnia, PUC-MG. DF+ ENGENHARIA: Belo Horizonte - MG, (28) 992987083, ledsonsathler@hotmail.com

⁴ Engenheiro Civil, Mestre, Universidade Federal de Viçosa, (31) 996681715, angelo.cruz.oliveira@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero abrange uma área de aproximadamente 12.000 km², na porção central do Estado de Minas Gerais e constitui uma das principais provinciais minerais do país, sendo um importante produtor de minério de ferro e ouro. Em virtude das atividades de lavra, estruturas como barragens e pilhas foram implantadas de forma mais expressiva a partir do século XX ao longo de vales e talvegues cuja fundação, por muitas vezes, não foi objeto de um detalhamento geológico-geotécnico. Nos últimos anos, tem se observado que diversas das fundações de tais estruturas encontram-se posicionadas sobrejacente a depósitos cenozoicos, cuja cartografia foi atualizada e apresentada por Endo *et al.* (2020) no mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero e a gênese foi abordada por Varajão *et al.* (2020). O avanço na identificação dessas unidades sedimentares pode ser atribuído ao avanço nas técnicas de investigação, que permitiu abranger avaliação subterrânea, além da espacialização em superfície. Neste trabalho, será apresentada uma caracterização típica de depósitos cenozoicos existentes no flanco leste do Sinclinal Moeda. Será apresentada descrição das unidades indicando granulometria, conteúdo mineralógico, resistência e permeabilidade das unidades.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

O contexto geológico regional exposto adiante destaca as características dos depósitos cenozoicos já conhecidos na região do Sinclinal Moeda. Com isso, se estabelecerá um histórico de conhecimento a respeito dessas unidades sedimentares que possibilita avançar na compreensão dos tipos de sedimentos e processos de formação. Existem alguns depósitos sedimentares que foram detalhados utilizando estudos de afloramentos e/ou de testemunhos de sondagem, análise faciológica e estratigráfica, análise química e mineralógica e, por vezes, análise bioestratigráfica. Esses depósitos são relacionados em Castro e Varajão (2020) e estão indicados na Figura 1. É perceptível a relação de proximidade, ou mesmo sobreposição dessas unidades com obras ou estruturas de operação da mineração, a exemplo das barragens cadastradas na ANM (consulta em 2022).

2.1. Contexto Geológico – Flanco Leste do Sinclinal Moeda

A área de estudo compreende principalmente o flanco leste da megaestrutura Sinclinal Moeda, na região de ocorrência de metassedimentos paleoproterozoicos atribuídos ao grupo Piracicaba (Supergrupo Minas) especificamente as formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. De forma menos expressiva, ocorrem porções em que afloram unidades do Supergrupo Estrada Real (Endo *et al.*, 2020). A megaestrutura é cercada por unidades metavulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, bem como por domos granito gnáissicos que definem o embasamento de caráter tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) da região (Farina, 2016; Figura 1). Recobrimo as unidades mais antigas, são identificadas unidades sedimentares cenozoicas, que são o alvo do atual estudo. Elas foram inicialmente cartografadas por Dorr (1969) e cuja distribuição e definição foi atualizada por Endo *et al.* (2020). São compreendidas de forma generalista como depósitos terrígenos, em sua maioria, resultantes de retrabalhamento de rochas intemperizadas paleoproterozoicas.

Quanto aos aspectos geológico estruturais, à área é compreendida como produto de estágios distintos de processos deformacionais, em que um contexto de deformação dúctil constituiu as grandes estruturas que definem o Quadrilátero Ferrífero (Farina *et al.*, 2016), como é o caso do Sinclinal Moeda. O interior do Sinclinal Moeda apresenta uma série de estruturas sinformes parasíticas, em especial na porção centro norte da megaestrutura. Há um destaque para estruturas resultantes de interferência de dobras regionais, com sinformes e antiformes que apresentam padrão arredondado, com direções de traço morfológico principalmente NE-SW e NW-SE. Processos deformacionais rúpteis são registrados nos sedimentos encontrados na região, de forma que tiveram relação direta de controle de espaço de sedimentação e deformação posterior desses sedimentos.

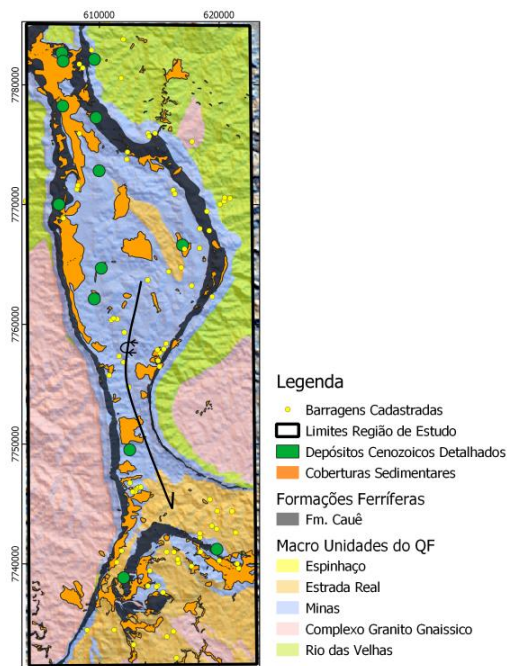


Figura 1 – Contexto geológico da região da Serra da Moeda, destacando as formações ferríferas e os depósitos sedimentares cenozoicos já mapeados e a localização das barragens cadastradas na ANM. Modificado de Endo *et al.* 2019.

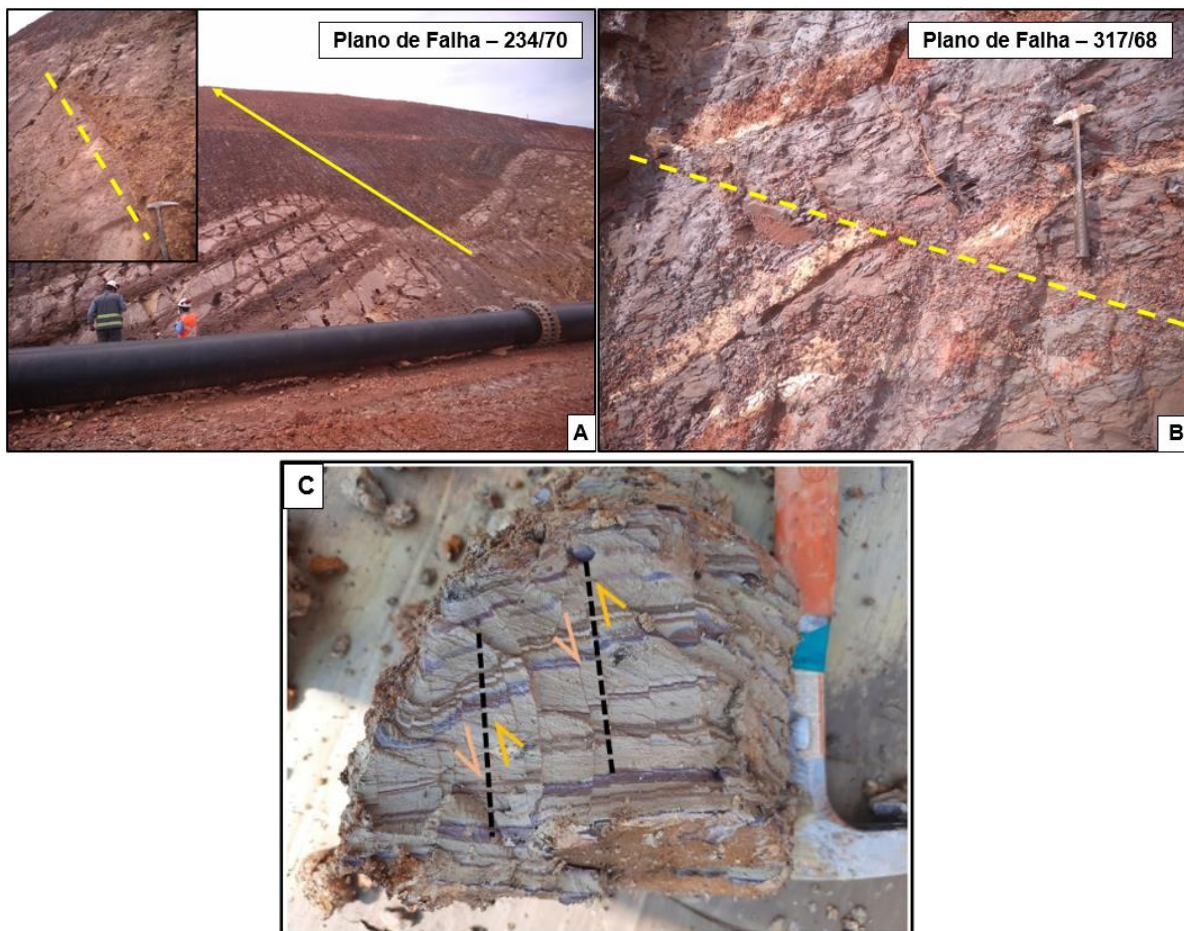


Figura 2 – A) e B) Planos de falha normal de direção NW-SE e NE-SW presentes em escala de afloramento na área de estudo; C) amostra de mão com planos de falha normal escalonadas.

Os levantamentos geológico-estruturais realizado em regiões específicas da área de trabalho permitiram o reconhecimento de duas famílias de fraturas correlatas aos principais planos de falha normal (NE-SW e NW-SE) conforme exposto na Figura 3.

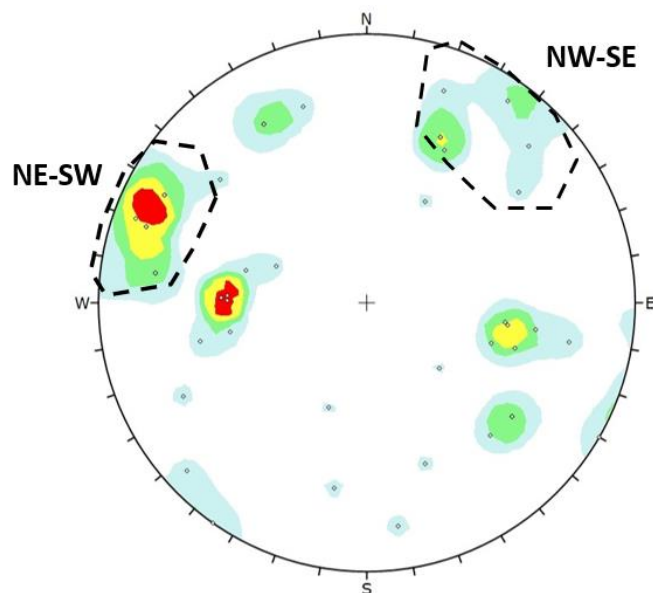


Figura 3 – Estereograma representando as famílias de fraturas de trend NE-SW e NW-SE, correlacionadas ao sistema de falhas normais de mesma orientação (n – 46 medidas).

As falhas normais (NW-SE e NE-SW) configuram um sistema de *horsts* e *grabens*, onde os *grabens* representam calhas profundas que foram preenchidas por sedimentos de até 100 m de espessura vinculados ao depósito cenozoico. A variação faciológica observada nestes sedimentos indica que sua deposição provavelmente tenha ocorrido durante diferentes pulsos de reativação destas discontinuidades, incluindo etapas de exposição à superfície freática, como sugerido pela presença de níveis laterizados observados a profundidades de até 80 m (Figura 4). As principais fácies deposicionais seguem detalhas a seguir.

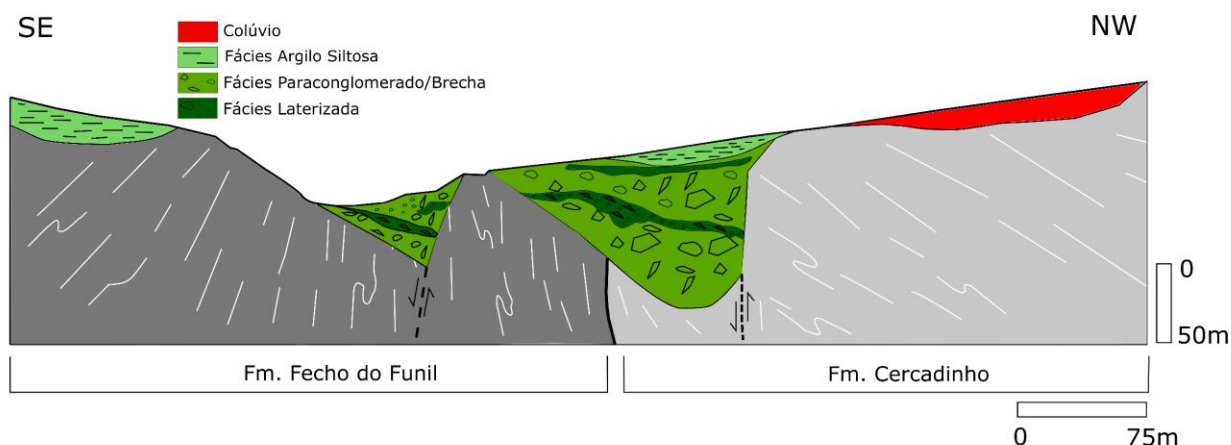


Figura 4 – Perfil esquemático da área de estudo com o encaixe do depósito cenozoico nas formações Fecho do Funil e Cercadinho. Destaque para as fácies Argilo-Siltosa, Paraconglomerado/Brecha e laterizada.

2.2. Fácies Depositionais Cenozoicas e Suas Características Geotécnicas

As fácies deposicionais cenozoicas presentes ao longo da área de estudo foram individualizadas, da base para o topo, em I) fácies Paraconglomerado/Brecha; II) fácies Laterizada e; III) fácies Silto-Argilosa.

I) Fácies Paraconglomerado/Brecha

A fácies paraconglomerado/brecha preenche um espaço que possui direção NNE-SSW e encontra-se encaixada em meio a filitos e quartzitos da Formação Cercadinho. É caracterizada pela presença de seixos, blocos e matacões de quartzito e filito (Formação Cercadinho) sub-angulosos a angulosos, imersos em uma matriz argilo-arenosa e, ocasionalmente, siltosa. A Figura 5A apresenta paraconglomerado com matacões de quartzito ferruginoso associado a matriz areno-siltosa, enquanto Figura 5B apresenta uma brecha com clastos angulosos associada a matriz silto-arenosa. As Figura 5C e Figura 5D indicam essencialmente a matriz argilo-siltosa e siltosa em paraconglomerados. Destaca-se que bolsões compostos predominantemente por uma matriz argilo-arenosa. Variações modais na relação entre a fração matriz e a fração cascalho (e.g. seixos, blocos) ocorrem de forma expressiva sugerem porções proximais e distais de fluxos de massa ao longo de encostas.

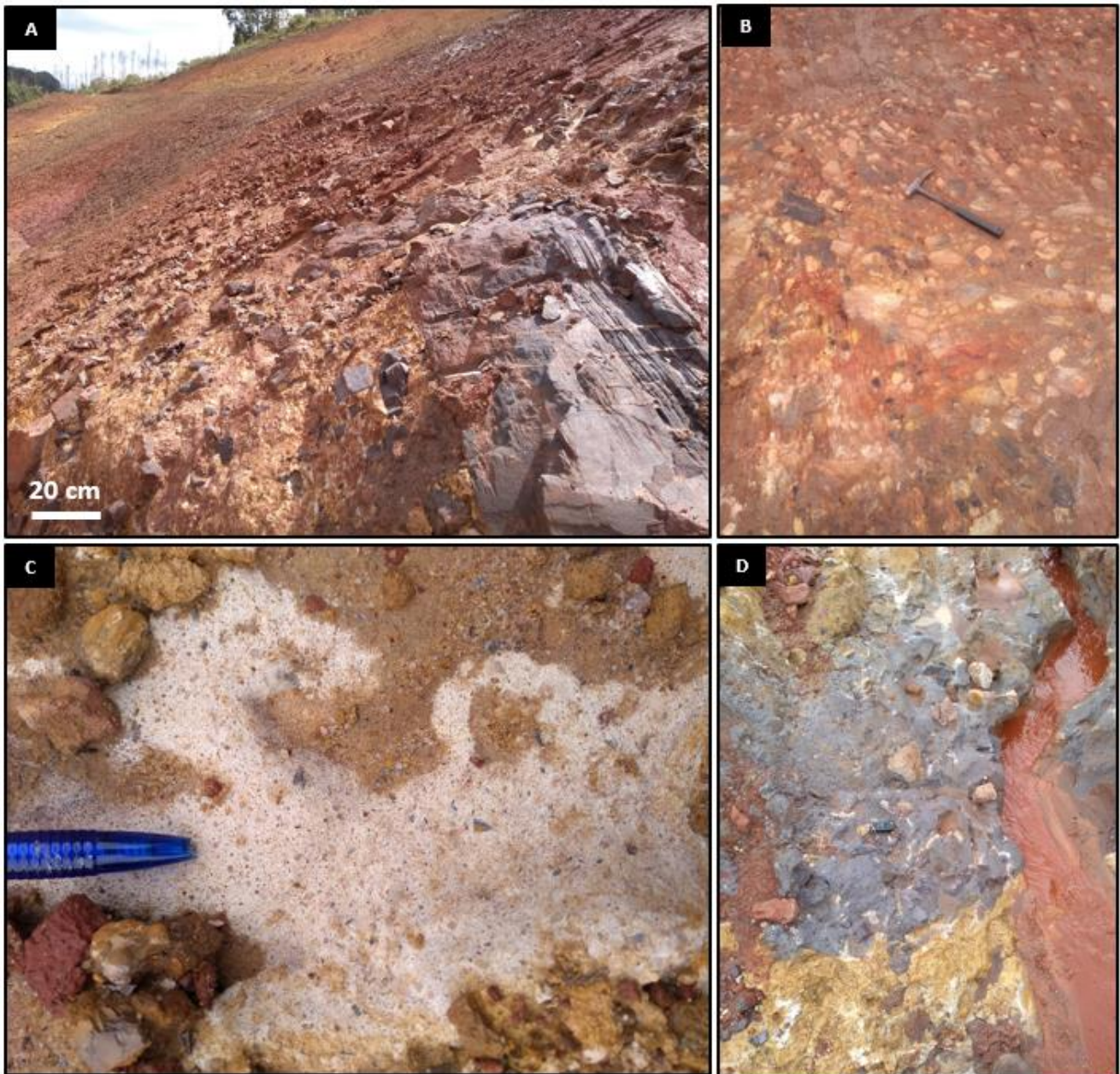


Figura 5 – A) Paraconglomerado com Matação e blocos de quartzito ferruginoso associado à matriz areno-siltosa; B) Brecha formada por clastos (seixos e blocos) angulosos de quartzito imersos em matriz silto-arenosa; C) grânulos e seixos de filito e quartzito imersos em matriz argilo-arenosa; D) grânulos e seixos de filito e quartzito imersos em matriz siltosa.

No que tange os principais aspectos geotécnicos, esta fácies é caracterizada por valores de N_{spt} normalmente superiores à 25 golpes, mas de significativa variação em função da presença de seixos, blocos e matações. Apresenta permeabilidades entre 10^{-5} cm/s e 10^{-6} cm/s. Consiste em um material de 1º categoria de escavação e devido a presença de blocos e matações, constitui superfícies escavadas irregulares que podem ser regularizadas via concreto dental. A obtenção de parâmetros geotécnicos representativos desta unidade é complexa devido a sua ampla heterogeneidade, contudo, a Tabela 1 sintetiza alguns índices físicos que podem ser utilizados como referência.

Tabela 1 - Resumos dos resultados de caracterização física de amostras da Fácies Brechada do Depósito Cenozoico.

IDENTIFICAÇÃO	γ_{nat} (kN/m ³)	Gs	GRANULOMETRIA (%)					LIMITES DE ATTERBERG (%)			
			Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedreg.	LL	LP	IP
Amostra 1	19,64	2,691	11,19	15,91	20,62	34,46	17,63	0,18	NL	NP	NP
Amostra 2	22,21	3,036	14,00	33,00	2,00	8,00	8,00	35,00	NL	NP	NP

II) Fácies Laterizadas

A fácies Laterizada foi identificada de forma restrita especificamente ao longo da zona do talvegue e alcança profundidades que podem ultrapassar 90 m. Possui uma matriz de composição variável, variando entre argilo-siltosa, arenosa e areno-siltosa. A matriz é fortemente cimentada por óxidos de ferro e manganês (cor vermelha e preta; Figura 6), que culmina em um material impenetrável à sondagem percussiva e com resistência entre R2 e R3. Pode conter grânulos, seixos e blocos de filito, quartzito e quartzo o que sugere que pelo menos em parte, esta unidade trata-se de processos de laterização impressos na fácies paraconglomerado/brecha.



Figura 6 – A) detalhe para fácies laterizada com matriz rica em óxidos de ferro e manganês associada a material argiloso de cor ocre; B) furo de sondagem rotativa com faixas escuradas

laterizadas entre 41m e 44 m ricas em óxidos de ferro e manganês. O intervalo entre 38 m e 41 m é marcado pela presença de material argilo-siltoso parcialmente cimentado por óxido de ferro.

III) Fácies Silto-Argilosa

Dentre as litofácies individualizadas do depósito cenozoico, esta unidade é a de maior expressão na área de estudo e estende-se pelas encostas segundo as direções NE-SW e NW-SE. Pode alcançar profundidades superiores a 100 m.

É caracterizada por textura argilo-siltosa (areia subordinada) e por pintalgados de tons vermelho, laranja e amarelo, como apresentado na Figura 7. Recobre as formações paleoproterozoicas via contatos erosivos. Suas características geomecânicas assemelham-se a um maciço rochoso alterado, tendo sido constatados valores de resistência entre R2 e R1 para esta unidade. Os valores de N_{spt} variam em torno de 25 e 40 golpes (impenetrável).

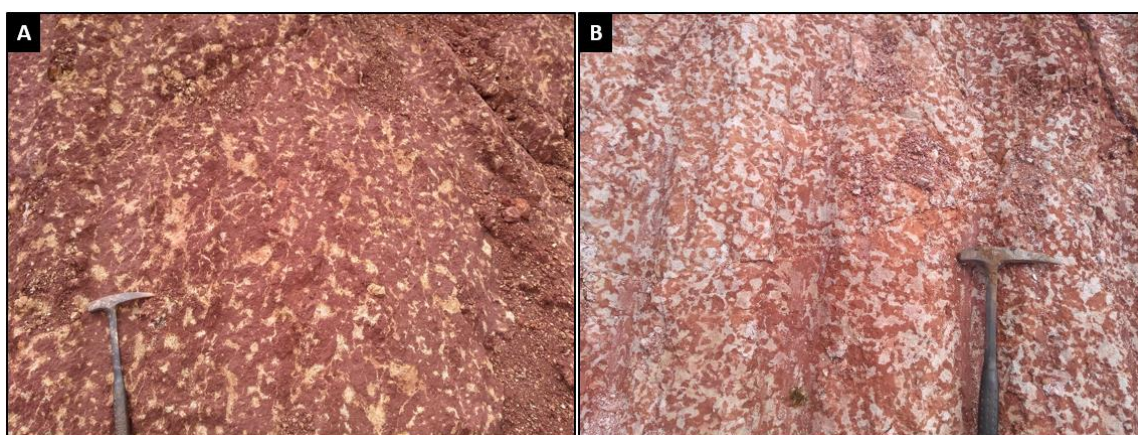


Figura 7 – A) e B) Típica textura argilo-siltosa pintalgada observada na fácies Argilo-Siltosa (depósito cenozoico). Ressalta-se a elevada resistência do material apresentado na figura B (R1-R2) e da presença de discontinuidades.

A principal condicionante geotécnica dos depósitos cenozoicos é a extrema irregularidade das superfícies finais de escavação, resultante do alto grau de fraturamento e resistência do material, o que não permite que os equipamentos de escavação produzam superfícies lisas/regulares. Concreto dental para a regularização da fundação pode ser utilizado nesse litotipo. Destaca-se que em pontos no limite norte do reservatório do barramento foi observada a presença de horizontes caoliníticos em meio esta unidade. Apresenta valores de N_{SPT} 30 golpes e permeabilidades em torno de 10^{-6} cm/s. A obtenção de parâmetros geotécnicos representativos desta unidade é complexa devido a sua ampla heterogeneidade, contudo, a Tabela 2 sintetiza alguns índices físicos que podem ser utilizados como referência.

Tabela 2 – Resumos dos resultados de caracterização física de amostras da Fácies Argilo-Silto-Arenosa do Depósito Cenozoico.

IDENTIFICAÇÃO	γ_{nat} (kN/m ³)	Gs	GRANULOMETRIA (%)					LIMITES DE ATTERBERG (%)			
			Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedreg.	LL	LP	IP
Amostra 1	19,64	2,746	41,00	29,00	10,00	11,00	8,00	0,00	42	17	25
Amostra 2	19,45	2,872	6,10	87,40	4,26	0,62	0,02	1,60	NL	NP	NP
Amostra 3	19,45	2,818	7,90	80,0	4,80	3,90	1,20	2,20	26	16	10

Os parâmetros de resistência foram determinados por ensaios de compressão triaxial do tipo CIUsat (adensamento isotrópico e cisalhamento por compressão triaxial não drenada) executados em amostras indeformadas. Para essas amostras, adotou-se intercepto coesivo de 20 kPa e ângulo de atrito igual a 36°.

2.3. Tectônica Extensional Cenozoica – Horst e Grabens

A morfologia do terreno do Sinclinal Moeda é registro da própria megaestrutura. Lineamentos morfológicos de maior persistência definem seus limites, como indica a Figura 8. Numerosos lineamentos NW-SE e NE-SW controlam o padrão de drenagem local, representando a grande maioria das estruturas morfológicas, embora com persistência menor. Esses lineamentos são consistentes com sistemas de falhas normais (*horst* e *graben*) onde se alojam depósitos sedimentares cenozoicos. Isso pode indicar que o espaço de acomodação desses sedimentos foi gerado a partir dessa tectônica extensional que possivelmente reativa estruturas já existentes no embasamento dessas bacias sedimentares, que são as rochas do Supergrupo Minas, principalmente. A reativação das falhas controla os ciclos de deposição, desta forma, entende-se as fácies deposicionais, pelo menos em parte, como diacrônicas. É comum a identificação do sistema de falhas regional em escala de afloramento (Figura 2A e Figura 2B) e em escala de amostra de mão (Figura 2C).

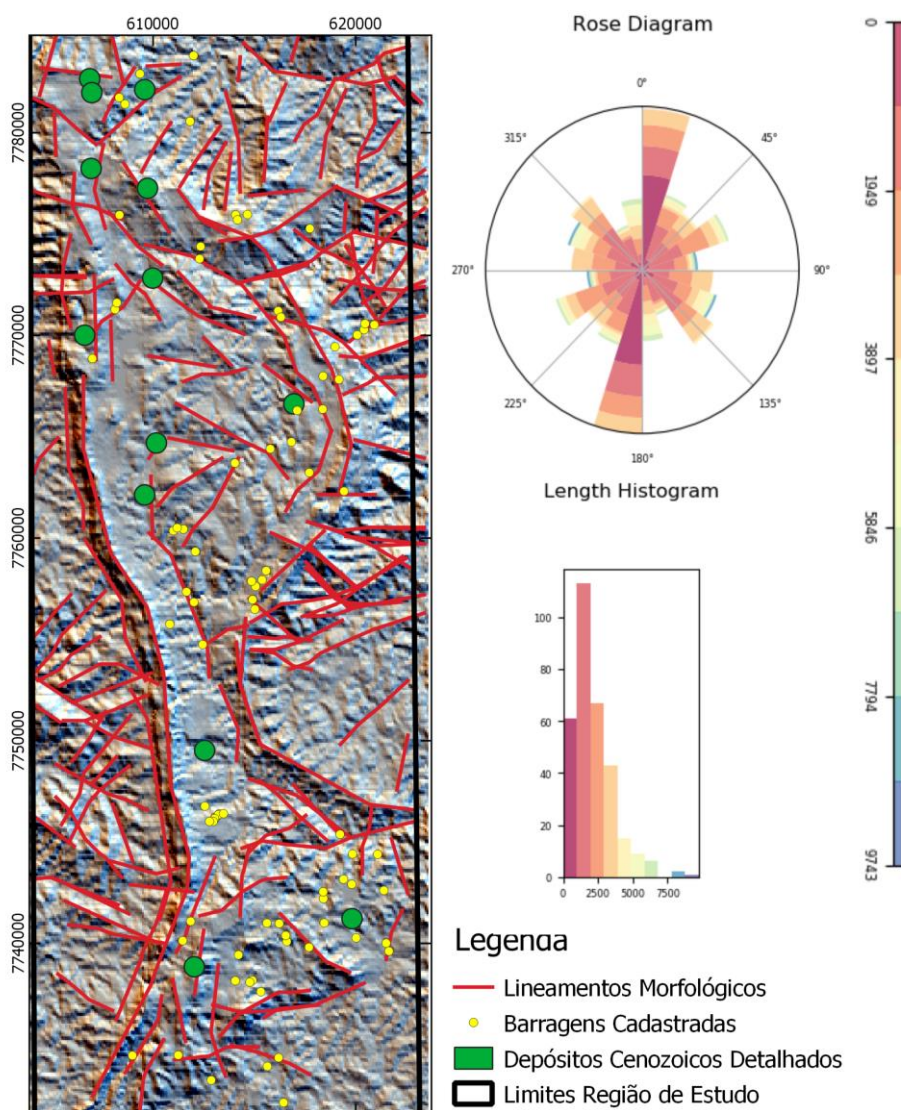


Figura 8 – Lineamentos de direção NW-SE e NE-SW consistem em uma expressão fisiográfica do sistema de falhas normais estabelecidos na região da Serra da Moeda.

3. CONCLUSÕES

A análise dos dados geológico estruturais, sedimentológicos e geotécnicos dos depósitos cenozoicos presentes no flanco leste do sinclinal moeda permitiu traçar um panorama geral para este domínio, no que se refere à sua gênese e suas características geotécnicas. Em síntese, os depósitos cenozoicos são controlados por sistema de falhas normais com orientação NW-SE e NE-SW no qual se depositaram três fácies sedimentares, à saber: fácies paraconglomerado/brecha; fácies laterizada e fácies argilo-siltosa. Tais fácies estão relacionadas a ciclos deposicionais distintos e tiveram suas principais características geotécnicas delineadas, de forma que estas informações poderão ser empregadas como referência para futuros trabalhos realizados no âmbito do Quadrilátero Ferrífero.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa DF+ pelo apoio dado no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

CASTRO, P.T.A., VARAJÃO, A.F.D.C. 2020. “O Cenozoico no Quadrilátero Ferrífero” in *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Organizado por Paulo de Tarso Amorim Castro, Issamu Endo, Antonio Luciano Gandini. 3ª Editora, Belo Horizonte. p.166-193.

DORR J. VAN N. II. 2nd. (1969) *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. In: Professional Paper, Washington, USGS/DNPM, 641-A: 110.

ENDO, I., MACHADO, R., GALBIATTI, H.F., ROSSI, D.Q., ZAPPAROLI, A.C., DELGADO, C.E.R., CASTRO, P.T.A., OLIVEIRA, M.M.F. (2020) “Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais” in *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Organizado por Paulo de Tarso Amorim Castro, Issamu Endo, Antonio Luciano Gandini. 3ª Editora, Belo Horizonte. p.70-113.

ENDO I., GALBIATTI, H. F., DELGADO C. E. R., OLIVEIRA M. M. F. DE, ZAPPAROLI, A. C., MOURA L., G. B. DE, PERES, G., OLIVEIRA A. H. DE, ZAVAGLIA G., DANDERFER F. A., GOMES, J. S., CARNEIRO M. A., NALINI, R. H. A., CASTRO P. DE T. A., S. UITA M. T. DE F., S. EIXAS, A. R., TAZAVA E., LANA C. DE C., MARTINS-NETO M. A., MARTINS, M. DE S., FERREIRA F. A., FRANCO A. P., ALMEIDA L. G., ROSSI, D. Q., ANGELIG., MADEIRA T. J. A., PIASSA L. R. A., MARIANO D. F., CARLOS, D. U. (2019) “*Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969)*” Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br

FARINA, F., ALBERT, C., DOPICO, C.I., GIL, C.A., MOREIRA, H.S., HIPPERTT, J.P., CUTTS, K.A., ALKIMIM, F.F., LANA, C.D. (2016) *The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brasil: current models and open questions*. Journal of South American Earth Sciences, v. 68, p. 4-21.

VARAJÃO, A.F.D.C. (2020) *The Cenozoic deposits of the ancient landscapes of Quadrilátero Ferrífero highlands, Southeastern Brazil: Sedimentation, pedogenesis and landscape evolution*.

Catena 195, 15p. DOI 104813.