

# Caracterização Geotécnica e Petrográfica de Filitos dos Grupos Sabará e Piracicaba no Quadrilátero Ferrífero: Implicações para a Estabilidade de Taludes

Letícia Faria Oliveira

Geóloga, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, [leticiafariaoliveira@gmail.com](mailto:leticiafariaoliveira@gmail.com)

Talita Caroline Miranda

Professora, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, [talita@etg.umg.br](mailto:talita@etg.umg.br)

Jorge Geraldo Roncato Júnior

Professor, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, [roncato@ufmg.br](mailto:roncato@ufmg.br)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a caracterização geológica e geotécnica de filitos dos Grupos Sabará e Piracicaba em um talude localizado no Quadrilátero Ferrífero, MG. O objetivo foi identificar suas propriedades físicas, mecânicas, mineralógicas e químicas ao longo dos perfis de alteração. Foram realizados mapeamento de campo, análises petrográficas (lâminas delgadas e DRX) e ensaios laboratoriais, incluindo análise granulométrica, limites de Atterberg e ensaios de compressão triaxiais. Os resultados indicam que os filitos do Grupo Piracicaba apresentam maior teor de micas (muscovita e paragonita), o que contribui para anisotropia e menor resistência mecânica. Já os filitos da Formação Saramenha, do Grupo Sabará, mostraram maior resistência, influenciada pela presença de hematita e goethita. As diferenças texturais e mineralógicas entre os litotipos impactam diretamente seu comportamento geotécnico, especialmente na estabilidade de taludes. O estudo reforça a importância da caracterização integrada para projetos de engenharia na região.

**PALAVRAS-CHAVE:** Filitos; Quadrilátero Ferrífero; Taludes; Caracterização geotécnica; Propriedades geomecânicas.

**ABSTRACT:** This study presents the geological and geotechnical characterization of phyllites from the Sabará and Piracicaba Groups in a slope located in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. The objective was to identify their physical, mechanical, mineralogical, and chemical properties throughout weathering profiles. Field mapping, petrographic analyses (thin sections and X-ray diffraction), and laboratory tests — including grain size analysis, Atterberg limits, and triaxial tests — were performed. Results show that phyllites from the Piracicaba Group have a higher content of micas (muscovite and paragonite), contributing to anisotropy and lower mechanical strength. In contrast, phyllites from the Saramenha Formation, Sabará Group, exhibit greater strength, influenced by hematite and goethite. Textural and mineralogical differences directly affect geotechnical behavior, especially in slope stability. The study highlights the relevance of integrated characterization for engineering applications in the region.

**KEYWORDS:** Phyllites; Slopes; Geotechnical characterization; Geomechanical properties.

## 1. INTRODUÇÃO

O intemperismo provoca alterações significativas nas rochas expostas à superfície terrestre, promovendo transformações químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas. Essas modificações geralmente resultam na degradação das propriedades geotécnicas, com consequências diretas na estabilidade de maciços rochosos (Carvalho, 2019). A atuação progressiva desses processos gera perfis de alteração compostos por zonas que variam da rocha intacta ao solo residual, cada uma apresentando comportamentos mecânicos distintos.

A análise dessas transformações exige o uso de ensaios laboratoriais que permitam caracterizar as propriedades químicas, físicas e mecânicas das rochas alteradas. No entanto, essa caracterização torna-se mais



desafiadora em materiais fortemente intemperizados, como os filitos, que combinam baixa resistência mecânica com forte anisotropia induzida por estruturas foliadas.

No Quadrilátero Ferrífero (QF), as atividades de mineração demandam grandes escavações e obras de contenção, alterando significativamente o equilíbrio natural dos maciços. A classificação geotécnica dos materiais rochosos, com base em observações diretas e ensaios laboratoriais, é essencial para identificar parâmetros relevantes ao seu comportamento, promovendo uma linguagem técnica comum entre geólogos e engenheiros (Bieniawski, 1989). Os filitos, muito frequentes na região, representam um desafio adicional por seu comportamento geomecânico complexo: mesmo em estados relativamente pouco alterados, apresentam baixa resistência e elevada suscetibilidade ao intemperismo.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar geológica e geotecnicamente os filitos dos Grupos Sabará e Piracicaba, com foco na correlação entre os processos de alteração e os parâmetros mecânicos obtidos. Foram conduzidas investigações de campo, análises petrográficas (lâminas delgadas e difração de raios X) e ensaios geotécnicos, como ensaios de compressão triaxiais e de caracterização física, permitindo uma análise integrada do comportamento dessas rochas em perfis de intemperismo. Com base nisso, este trabalho busca responder ao questionamento: Como as variações mineralógicas e estruturais influenciam o comportamento geomecânico dos filitos do Quadrilátero Ferrífero ao longo dos perfis de intemperismo?

## 2. GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado no extremo sul do Cráton São Francisco, constitui a principal província mineral brasileira, com destaque para a produção de minério de ferro. Abrange cerca de 7.000 km<sup>2</sup> e apresenta geologia complexa, composta por unidades arqueanas e paleoproterozoicas (Almeida, 1977; Farina et al., 2016). Dentre essas, destacam-se: (i) complexos metamórficos arqueanos (gnaiesses, migmatitos e granitoides); (ii) o Supergrupo Rio das Velhas, com rochas metavulcânicas e metassedimentares; (iii) o Supergrupo Minas, com metassedimentos do Neoarqueano ao Paleoproterozoico; e (iv) o Grupo Itacolomi, com conglomerados, meta-arenitos e filitos (Dorr, 1969; Lana et al., 2013).

O Supergrupo Minas, formado entre 2,60 e 2,10 Ga, é subdividido nos Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr, 1969; Hartman et al., 2000). O Grupo Sabará ocorre em discordância erosiva sobre o Piracicaba, e ambos integram o contexto tectonoestratigráfico do Supergrupo Estrada Real (Endo, 2020; Almeida et al., 2005).

Tectonicamente, o QF passou por três principais fases deformacionais (Dorr, 1969; Almeida et al., 2001; 2002; 2004; 2005): (1) formação do terreno granito-greenstone (2700–2600 Ma); (2) desenvolvimento de uma bacia extensional (2600–2400 Ma); e (3) cinturão de dobras transamazônicas (~2125 Ma), responsável por zonas de cisalhamento e estruturas dobradas (Alkmim & Marshak, 1998). Eventos posteriores, como a evolução da Bacia do Espinhaço (~1750 Ma) e a orogenia Brasiliana (~650–500 Ma), reativaram falhas e influenciaram a estruturação final da região.

A arquitetura estrutural do QF é marcada por empurrões e dobras de várias gerações, entre elas: a Nappe Curral (vergência N-NE), o Sistema de Nappes de Ouro Preto (vergência S-SW) e dobras tardias associadas à orogenia Brasiliana (Castro et al., 2020). A Nappe Curral delimita o flanco inverso da Serra do Curral, com o flanco normal formando o Sinclinal Moeda (Endo et al., 2005).

A área de estudo está inserida no Sinclinal Santa Rita, estrutura associada à Nappe Santa Rita e limitada pela Falha São Bento (base) e Falha de Água Quente (topo), com eixo 110/55. Essa estrutura engloba unidades do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas em seu flanco leste, com estratigrafia invertida e evidências de boudinagem (Dorr, 1969; Angeli, 2015; Endo et al., 2019a,b; Rossi & Endo, 2015). Estruturas adjacentes, como os sinclinais de Alegria e Conta História, refletem sobreposição de fases compressivas e extensivas, associadas às falhas de Água Quente, Frazão e Alegria. A Falha do Frazão (N-S) separa o Sinclinal Santa Rita dessas unidades (Dorr, 1969; Maxwell, 1972 apud Endo & Fonseca, 1992).

A complexidade estrutural da região influencia diretamente a geometria dos maciços e a orientação das foliações, sendo um fator determinante para o comportamento geomecânico dos filitos estudados (Figura 1).

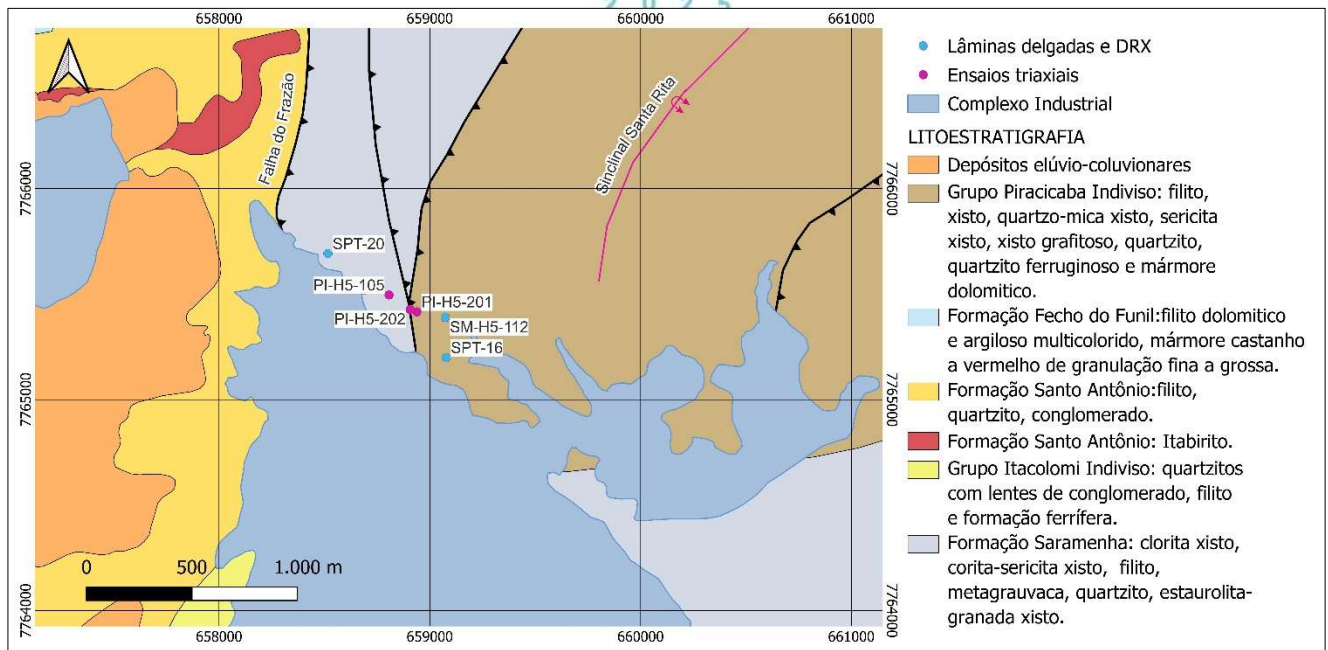




Figura 1: Mapa geológico com localização das amostragem e ensaios de campo.

### 3. METODOLOGIA

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir de furos de sondagens rotativas, localizados de forma a representar os dois contextos geológicos analisados: os Grupos Sabará e Piracicaba. Para os ensaios triaxiais e produção de lâminas delgadas, foram selecionados trechos dos testemunhos com menor grau de alteração e maior integridade estrutural. A Tabela 1 apresenta a identificação das amostras, os ensaios realizados e os respectivos litotipos, seguidos de uma imagem representativa dos furos de sondagem.

Tabela 1. Relação das amostras, ensaios realizados e unidades geológicas correspondentes.

AMOSTRA	ENSAIO	LITOTIPO	FURO DE SONDAAGEM
PB-20	Lâmina, DRX	Grupo Sabará, Formação Saramenha	
SM-H5-107	Lâmina		
PI-H5-105	Ensaio Triaxial		
SM-H5-112	Lâmina	Grupo Piracicaba (indiviso)	
SPT-16	Lâmina e DRX		
PI-H5-201	Ensaio Triaxial		
PI-H5-201	Ensaio Triaxial		

A análise petrográfica foi realizada em lâminas delgadas orientadas perpendicularmente à foliação, possibilitando a observação da mineralogia, textura e estruturas microscópicas dos filitos. As lâminas foram confeccionadas no Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC-UFGM) a partir de cortes retangulares colados a lâminas de vidro e submetidos a polimento até atingir a espessura padrão de 0,03 mm.

Os difratogramas foram obtidos em temperatura ambiente ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ), utilizando um difratômetro Panalytical Expert PRO com tubo de cobre (radiação  $\text{CuK}\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$ ) e goniômetro em geometria Bragg-Brentano. A análise foi realizada no modo contínuo, entre  $5\text{--}70^\circ 2\theta$ , com passo de  $0,02^\circ$  e tempo de exposição de 0,5 s por passo. Filtros e máscaras foram empregados para controle do feixe e área de incidência. O detector





utilizado foi uma câmara proporcional cilíndrica com mistura de xenônio/metano e janela de berílio. O processamento dos dados foi feito com o software HighScore Plus, utilizando o banco de dados COD (Crystallography Open Database).

A análise granulométrica foi empregada para determinar a distribuição de tamanhos das partículas nas amostras conforme a norma ABNT/NBR 6502:2022. Os Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP), bem como o Índice de Plasticidade (IP), foram determinados conforme a norma NBR 7180. Os ensaios triaxiais do tipo CIU (Consolidado, Isotrópico, Não Drenado) foram realizados com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade dos filitos. Os parâmetros geotécnicos obtidos (coesão e ângulo de atrito, totais e efetivos) foram determinados a partir das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb, conforme Higashi & Espíndola (2011).

## 4. Resultados

### 4.1 Filitos do Grupo Piracicaba (Indiviso)

Os filitos do Grupo Piracicaba apresentam coloração variável, diretamente relacionadas ao grau de intemperismo. A textura é sedosa, a granulação fina, e a resistência varia conforme o grau de alteração (ver Figura 1 e Tabela 2):

Tabela 2. Caracterização dos Filitos do Grupo Piracicaba.

Tipo de Filito / Saprólito	Cor predominante	Textura / Matriz	Foliação (ângulo)	Resistência (R)	Observações
Filito amarelo rosado	Amarelo rosado	Fina, sedosa	—	R2/R3 (branda a medianamente resistente)	Necessita golpe firme de martelo para fragmentar
Filito marrom acinzentado	Marrom acinzentado	Fina, sedosa	—	R1+ (muito branda)	Fragmenta-se facilmente com força moderada
Filito avermelhado / alaranjado	Vermelho a alaranjado claro	Fina, quartzo muito cominuído	—	R2/R3 (muito branda a branda)	Quartzo visível em cortes de talude
Filito muito alterado	Roxo com partes amareladas	Matriz fina, foliação preservada	20°–45°	R1 (muito branda)	Foliação bem definida
Filito extremamente alterado	Marrom/ocre	Matriz argilosa com pedregulhos preservados	Reliquiar	R0 (solo residual)	Desagrega-se em matriz argilosa
Filito A4/A3	Roxo e avermelhado	Fraturado	60°	R1 (muito branda)	Fraturas coincidentes com a foliação
Filito A3	Roxo e vermelho	Matriz fina	45°–60° (subvertical)	R2/R3	Foliação preservada
Filito com intercalações de saprólito	Marrom avermelhado	Matriz silto-argilosa com veios de quartzo (até 4 cm)	—	R2 a R1	Intercalações de quartzo em veios e pedregulhos
Saprólito associado	Marrom avermelhado a roxo/ocre	Silto-argiloso, com núcleos preservados (A3)	45°–55°	“Duro”	Núcleos preservados em meio argiloso

A deformação tectônica local gerou foliação bem definida com crenulações pontuais. As atitudes medidas incluem: 33/088, 36/075, 45/074 e 31/025, indicando variação estrutural local. A análise petrográfica das lâminas SPT-16 e SM-H5-112 revelou a predominância de quartzo e micas brancas (muscovita e paragonita), corroborada pela análise de DRX, que também identificou caulinita (Figura 2). A presença dessas micas está associada à anisotropia e à menor resistência mecânica, o que pode aumentar o potencial para movimentos de massa.

Nos ensaios triaxiais, a amostra PI-H5-202, coletada em zona de falha, apresentou os melhores parâmetros geomecânicos: ângulo de atrito de  $32^\circ$  e coesão de 23 kPa, com valores elevados de LL, LP e IP (Figura 3a). A alta proporção de pedregulhos e a resistência do quartzo explicam esse desempenho, mesmo em um ambiente tectonicamente frágil.

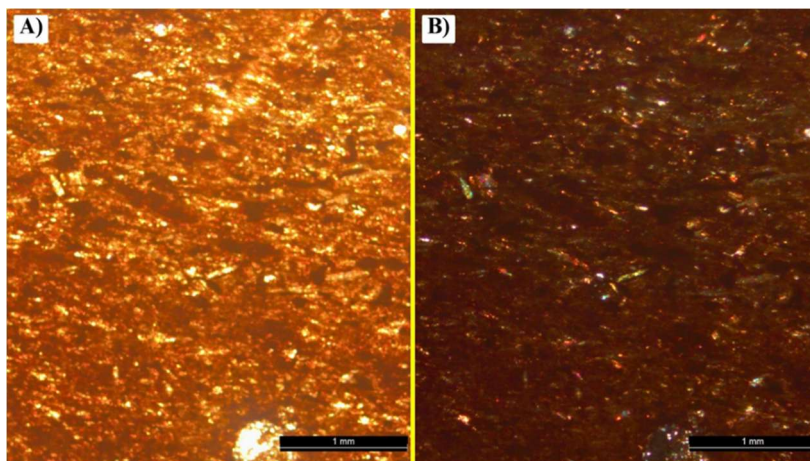


Figura 2: Lâmina referente ao ponto SPT-16, à nicóis descruzados (A) e cruzados (B). Micas brancas.

#### 4.2 Filitos da Formação Saramenha (Grupo Sabará)

Os filitos da Formação Saramenha apresentam uma grande variação de coloração, refletindo diferentes estágios de alteração, conforme observados na Figura 1 e descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização dos Filitos do Grupo Piracicaba.

Tipo de Filito	Cor predominante	Textura / Matriz	Foliação (ângulo)	Resistência (R)	Observações
Filito alterado avermelhado (A4)	Cinza avermelhado / vermelho	Muito alterado, pulverulento	25/114	R0 (extremamente fraco)	Desintegra-se ao toque
Filito com núcleos resistentes	Marrom / bege	Quartzo leitoso cominuído	—	R3 (medianamente resistente)	Núcleos preservados em matriz alterada
Filito marrom alaranjado a amarelado	Marrom / amarelo	Granulação fina	76/020	R2– (brando)	Fragmenta-se após 3–4 golpes de martelo
Filito arroxeadado	Roxo / lilás	Rico em sericita	62/005	R1+ (muito brando)	Fragmenta-se com 2 golpes
Filito variegado	Marrom, amarelo, roxo	Heterogêneo	58/060 e 60/055	R1– a R2+ (muito brando a brando)	Variação cromática associada a diferentes estágios de alteração

A amostra PI-H5-105, representativa desse grupo, é classificada como uma rocha extremamente alterada, associado a ausência de limites de liquidez e plasticidade, apesar de conter 8% de argila (Figura 3b). A presença de hematita e goethita, identificadas por DRX, pode justificar uma resistência residual superior ao esperado para materiais com essa mineralogia. A alta umidade e porosidade superficial sugerem comportamento mecânico mais vulnerável próximo à superfície.

A trajetória de tensões efetivas da amostra evidencia dois regimes de comportamento. Para baixas tensões confinantes (50–100 kPa), ajusta-se uma envoltória com  $\phi' = 39,2^\circ$  e  $c' \approx 0$  kPa, típica de materiais superficiais pouco confinados. Em contraste, para tensões mais elevadas (200–400 kPa),

observa-se uma envoltória mais resistente, com  $\phi' = 42,5^\circ$  e  $c' \approx 11$  kPa, representativa de condições mais profundas. A ocorrência de poropressão negativa durante o ensaio reflete o desbalanço entre as tensões in situ e as condições laboratoriais, ressaltando a sensibilidade do material ao confinamento aplicado (Figura 4).

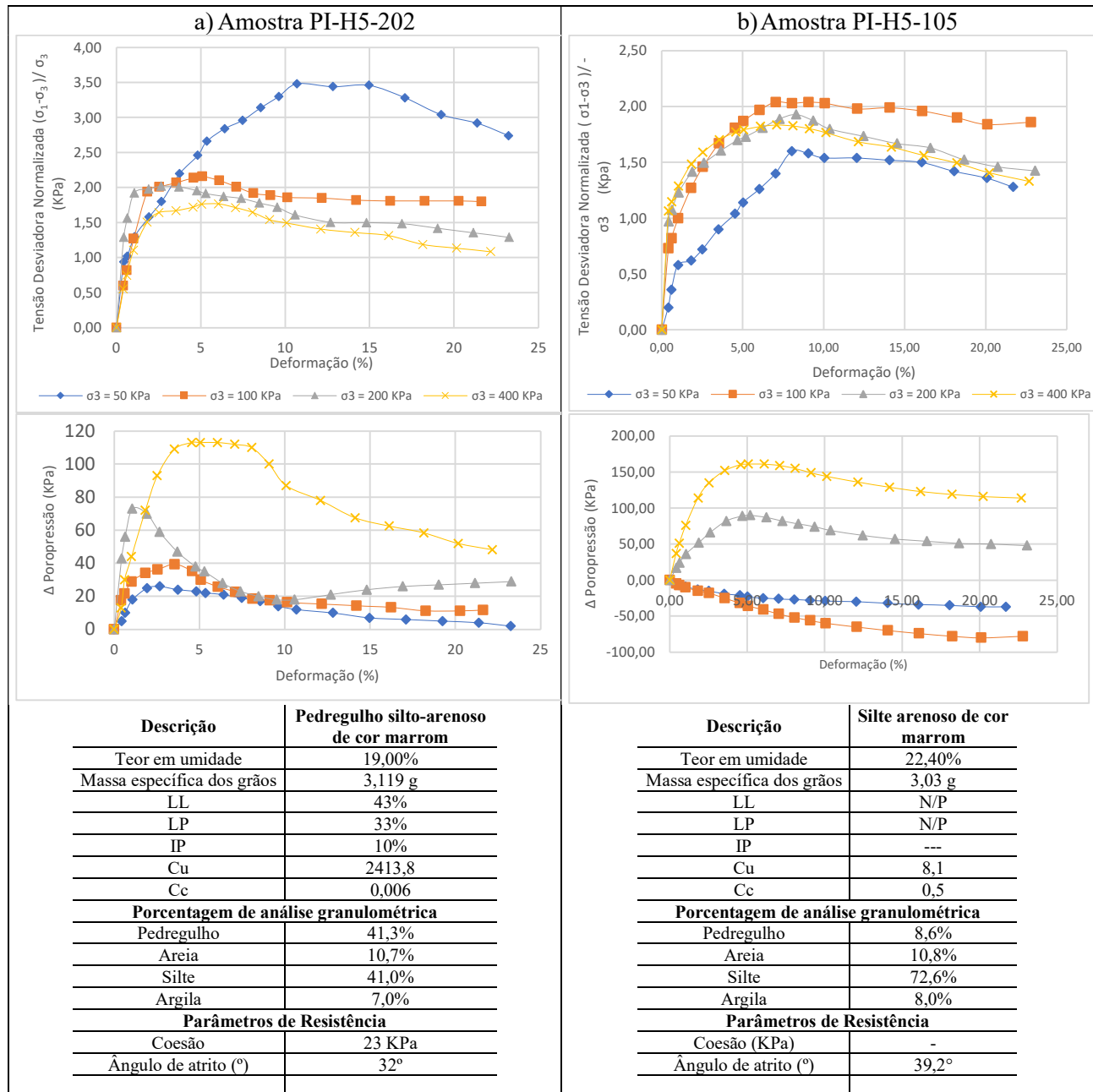


Figura 3: Resultados dos ensaios triaxiais CIU normalizados para as amostras representativas dos Grupos Piracicaba (PI-H5-202) e Sabará (PI-H5-105) e resultados de caracterização.

Além disso, a análise granulométrica indica que, embora a gênese da Formação Saramenha sugira baixa presença de finos, a amostra apresentou 80,6% de silte e argila, o que contribui para a sua resposta mecânica. Entre as lâminas petrográficas analisadas, apenas a SM-H5-107 apresentou estratificação visível, compatível com os dados de DRX (quartzo e hematita como principais minerais).

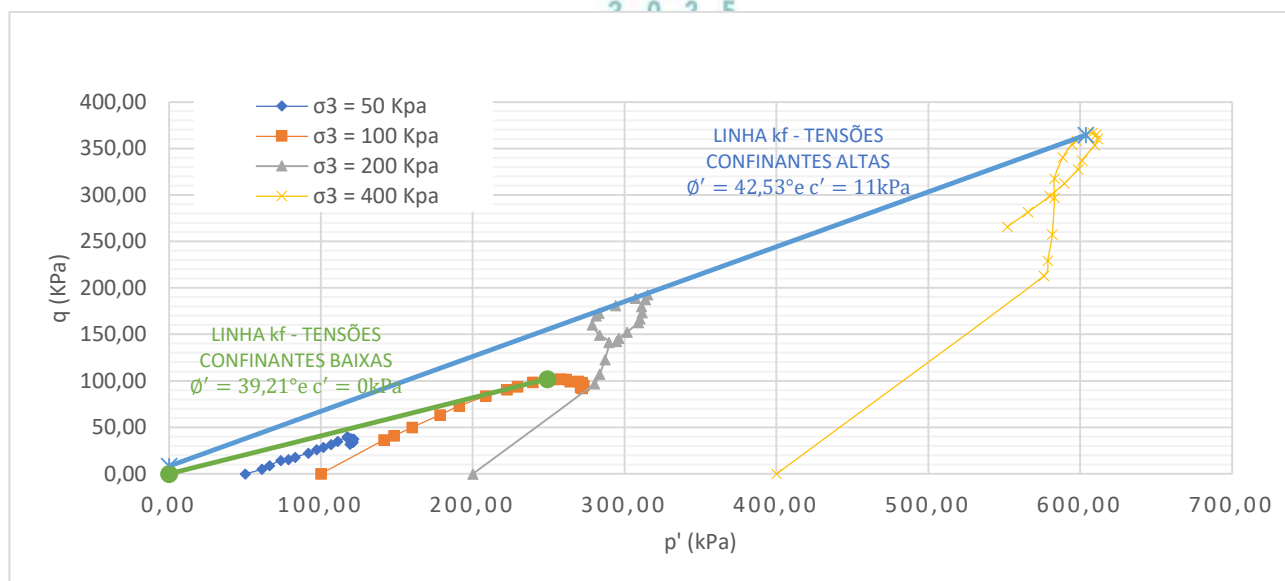


Figura 4: Trajetória de tensões efetivas da amostra PI-H5-105, com envoltórias distintas para baixas e altas tensões confinantes.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo permitiram responder à pergunta central da pesquisa: as variações mineralógicas e estruturais influenciam diretamente o comportamento geomecânico dos filitos do Quadrilátero Ferrífero ao longo dos perfis de intemperismo. Essa influência é observada na forma como a composição mineral, o grau de intemperismo, a foliação e a presença de veios de quartzo afetam a resistência, a coesão e o ângulo de atrito dos materiais.

A comparação entre os dois grupos estudados revelou comportamentos geomecânicos contrastantes. Nos filitos do Grupo Piracicaba, o elevado teor de micas (muscovita e paragonita), aliado à granulação fina e à forte anisotropia, contribuiu para menor resistência ao cisalhamento e maior suscetibilidade à deformação. Ainda assim, a amostra PI-H5-202 destacou-se por apresentar parâmetros elevados, em razão da influência de falhas, processos de recristalização e maior conteúdo de quartzo. Já os filitos da Formação Saramenha (Grupo Sabará) demonstraram comportamento mais consistente, com maior resistência associada à presença de hematita e goethita, mesmo em materiais com alto teor de silte e grau avançado de alteração.

A integração entre DRX, análises petrográficas e ensaios triaxiais demonstrou coerência interna e reforçou a importância da caracterização multidisciplinar para compreender o comportamento de materiais intemperizados e sua implicação na estabilidade de taludes. A forte anisotropia associada a minerais micáceos e a influência de minerais ferruginosos identificadas neste estudo exemplificam os desafios apontados por Martin & Stacey (2018), sobretudo no que se refere à transição entre estados de rocha e solo e às limitações dos métodos tradicionais de classificação.

Esses resultados reforçam que a resposta geotécnica dos filitos está diretamente ligada à mineralogia e à estrutura, e que a interação entre intemperismo, foliação e conteúdo mineral precisa ser cuidadosamente considerada na modelagem de estabilidade de taludes.

Contudo, este estudo também evidencia uma limitação importante: as rochas brandas ("weak rocks") ainda são pouco compreendidas nos métodos convencionais de caracterização geotécnica, sobretudo no que se refere à transição entre solo e rocha e ao comportamento sob diferentes níveis de confinamento. É fundamental aprofundar os estudos sobre esses materiais, ampliando a base de dados geomecânicos e melhorando os critérios de classificação utilizados em campo e laboratório.

Recomenda-se: (i) realizar ensaios triaxiais adicionais com uma gama mais ampla de tensões





confinantes (abaixo e acima de 200 kPa); (ii) refinar a malha de amostragem, especialmente em áreas de influência tectônica; e (iii) incorporar a mineralogia detalhada (por DRX e lâminas) como variável de entrada nos modelos de estabilidade.

Por fim, este trabalho destaca a relevância da integração entre geologia e engenharia geotécnica para compreender e lidar com as weak rocks do Quadrilátero Ferrífero. A continuidade e o aprofundamento desses estudos são essenciais para garantir intervenções seguras, eficazes e tecnicamente embasadas em ambientes geomecanicamente complexos..

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F.; Marshak, S. (1998) The Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: structural framework, kinematic history, and regional tectonic significance. *Precambrian Research*, 90, p. 29–58.
- Almeida, F.F.M. (1977) O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4), p. 349–364.
- Angeli, N.A. (2015) A estruturação do sinclinal Santa Rita no setor leste do Quadrilátero Ferrífero. *Geonomos*, 23(2), p. 173–184.
- ABNT (2022) NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 7180: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- Carvalho, R.C.S. (2019) *Classificação e caracterização geomecânica de rochas alteradas para aplicação na engenharia geotécnica*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 248 p.
- Castro, P.T.A.; Ferreira, C.M.M.; Borges, F.S. (2020) Arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero: uma síntese atualizada. *Geonomos*, 28(1), p. 5–21.
- Dorr, J.V.N. (1969) Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 341-B.
- Endo, I.; Rossi, M.A.; Silva, G. (2019a) Geologia da região de Santa Rita Durão: implicações na compartimentação tectônica do QF. *Geonomos*, 23(1), p. 65–78.
- Endo, I.; Rossi, M.A.; Silva, G. (2019b) Mapa geológico da região de Santa Rita Durão. Projeto Santa Rita. UFMG, Belo Horizonte.
- Endo, I.; Almeida, C.M.; Fonseca, M.A.R. (2005) Tectônica e empurrões no Quadrilátero Ferrífero. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(1), p. 59–76.
- Farina, F.; Rosière, C.A.; Nalini Jr., H.A. (2016) The Archean evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research*, 275, p. 53–76.
- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; Bossi, J. (2000) Temporal evolution of the Supergroup Minas, Brazil. *Precambrian Research*, 99, p. 25–54.
- Higashi, S.T.; Espíndola, M.P. (2011) Ensaio triaxiais e interpretação para obras geotécnicas. *Solos e Rochas*, 34(2), p. 91–104.
- Lana, C.; Nalini Jr., H.A.; Schrank, A.; Rosière, C.A. (2013) Revisiting the evolution of the Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 43(4), p. 651–673.
- Martin, D., & Stacey, P. (2018). *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. CRC Press/Balkema, Leiden, 504 p.
- Maxwell, J.C. (1972) Structural geology of the Quadrilátero Ferrífero. In: Endo, I.; Fonseca, M.A.R. (1992) *Geologia do Quadrilátero Ferrífero*. CPRM, Belo Horizonte, p. 102–117.
- Rossi, M.A.; Endo, I. (2015) Estratigrafia e estrutura da Nappe Santa Rita: evidências de empurrões neoproterozóicos no QF. *Geonomos*, 23(2), p. 123–140.