

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Proposta de um Procedimento para Parametrização Geomecânica de  
Saprólitos de Filito via Ensaio Triaxiais**

Silas Santos Salgado  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**SILAS SANTOS SALGADO**

**Proposta de um Procedimento para Parametrização Geomecânica de  
Saprólitos de Filito via Ensaio Triaxiais**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo A. Gomes Marques

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Salgado, Silas Santos, 1983-  
S164p Proposta de um procedimento para parametrização  
2025 geomecânica de saprólitos de filito via ensaios triaxiais / Silas  
Santos Salgado. – Viçosa, MG, 2025.  
1 dissertação eletrônica (78 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Referências bibliográficas: f. 72-78.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.466>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mecânica do solo. 2. Mecânica de rochas. 3. Saprólitos.  
4. Filito. I. Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
III. Título.

CDD 22. ed. 624.1513

**SILAS SANTOS SALGADO**

**Proposta de um Procedimento para Parametrização Geomecânica de  
Saprólitos de Filito via Ensaio Triaxiais**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de abril de 2025.

Assentimento:

---

Silas Santos Salgado  
Autor

---

Eduardo Antonio Gomes Marques  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 22/08/2025 às 06:40:23 e pelo orientador em 22/08/2025 às 07:42:15. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **Q1A5.VAAM.328V** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e à minha família.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao professor Eduardo Marques (UFV), à geóloga Mônica Pires (VALE), à DF+ Engenharia e à VALE por possibilitarem o desenvolvimento deste projeto.

Ao laboratório Chammas, pela parceria no desenvolvimento dos ensaios.

Aos amigos de trabalho da DF+ Engenharia pelas diversas discussões técnicas que me permitiram aprofundar nas análises realizadas neste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“If one does not know to which port one is sailing, no wind is favourable”.  
(Sêneca)

## RESUMO

SALGADO, Silas Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2025. **Proposta de um Procedimento para Parametrização Geomecânica de Saprólitos de Filito via Ensaios Triaxiais.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Os saprólitos consistem em rochas altamente alteradas a totalmente decompostas (grau intempérico W4 a W5, segundo a ISRM), com resistência à compressão uniaxial (UCS) normalmente entre 0.25 MPa a 5 MPa (=R1+), que preservam a trama (fabric) de sua rocha de origem e possuem comportamento mecânico transicional, entre solos e rochas. Em ambientes tropicais, como o Brasil, os saprólitos apresentam significativa espessura, sendo entendimento do comportamento mecânico e a determinação dos seus parâmetros geotécnicos de grande relevância em projetos de cavas à céu aberto e de infraestrutura em geral. No cenário atual, os saprólitos são avaliados sob a óptica da mecânica dos solos e das rochas, a depender de sua resistência. Especificamente, sua análise no âmbito da mecânica dos solos é empregada para materiais de menor resistência (<R1-) e abrange um processo que envolve desde a coleta dos blocos indeformados à interpretação dos ensaios realizados. Um obstáculo ao aprofundamento do conhecimento geotécnico quanto aos saprólitos, consiste na ausência de um padrão que contemple todas as etapas envolvidas na determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade e no entendimento adequado do comportamento mecânico. Neste cenário, a presente dissertação propõe e aplica um procedimento para a determinação dos parâmetros geotécnicos de saprólitos de filito. Os saprólitos de filito foram coletados na Mina A, por sua vez localizada no flanco oeste da macroestrutura do sinclinal Moeda, na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, porção centro-sul do Estado de Minas Gerais. Os blocos de filito amostrados, seguindo o procedimento proposto, foram submetidos ao seguinte fluxo de atividades: I) descritos em campo com aferição dos parâmetros de resistência e posterior caracterização via petrografia microscópica; II) talhagem dos CPs considerando um conjunto de amostras com ângulo agudo entre a direção de confinamento ( $s_3$ ) e o plano de foliação metamórfica em torno  $45^\circ$  (amostras S1) e um conjunto de amostras com ângulo agudo entre a direção de confinamento ( $s_3$ ) e o plano de foliação metamórfica superior a  $70^\circ$ ; III) determinação das propriedades índices (e.g. índice de vazios); IV) realização de ensaios CIU e CID para dois conjuntos de amostras, denominados S1 e S2; V) determinação do mecanismo de ruptura dos CPs, dos parâmetros de resistência e deformabilidade, bem como análise do

comportamento deformacional e dilatância; VI) análise integrada de todas as informações obtidas. A análise integrada dos dados compartimentou os ensaios triaxiais em 4 grupos, sendo que cada grupo engloba ensaios de CPs que compartilham elementos como comportamento deformacional, dilatância, parâmetros de resistência e deformabilidade, dentre outros. A análise integrada dos dados culminou na compartimentação dos materiais com índices de vazios inferiores a 1 (grupos 3 e 4) e superiores a 1,2 (grupos 1 e 2). Os grupos 3-4 (índice de vazios  $< 1$ ) registraram um comportamento mecânico mais próximo ao da rocha, apresentando: I) o cisalhamento como o principal mecanismo de ruptura, sendo controlado pela foliação metamórfica nos ensaios S1 e oblíquo a estas estruturas nos ensaios S2; II) geração de poropressão predominantemente negativa e comportamento deformacional essencialmente elasto-frágil; III) maiores valores de coesão para os ensaios S2 (grupo 4), registrando a menor resistência ao cisalhamento ao longo do plano de foliação metamórfica. Os grupos 1-2 (índice de vazios  $> 1,20$ ) registraram um comportamento mecânico mais próximo aos solos, apresentando: I) mecanismos de ruptura variáveis entre flambagem, cisalhamento paralelo e oblíquo à foliação metamórfica; II) geração de poropressão positiva; III) comportamento deformacional variável, abrangendo elasto-plástico, elasto-frágil, strain hardening e strain softening; IV) especificamente, os ensaios S1 (grupo 2) sob condições não-drenadas registraram um maior controle estrutural das rupturas dos CPs, sugerindo o efeito da poropressão ao longo dos planos de foliação. A caracterização petrográfica realizada indicou que os grupos 1 e 2 registram um grau intempérico W5, enquanto os grupos 3 e 4 registram um grau intempérico W4. A transição entre as faixas de intemperismo W4 para W5 ocorre associada a conversão de minerais primários (e.g. muscovita) em minerais secundários (e.g. sericita e caulim), alterando a trama da rocha, seus índices físicos e seus parâmetros de resistência e deformabilidade. Por fim, são apresentadas correlações com trabalhos pretéritos, bem como uma análise dos saprólitos de filito no contexto da transição mecânica rocha-solo. Entende-se que a aplicação do procedimento proposto abre uma janela de oportunidade para o aprofundamento científico quanto ao entendimento geotécnico dos saprólitos.

Palavras-chave: saprólito, filito, procedimento, ensaios triaxiais.

## ABSTRACT

SALGADO, Silas Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2025. **Proposal of a Procedure for Geomechanical parameterization of saprolites of phyllite saprolites via triaxial tests.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Saprolites are rocks that have undergone intense weathering to complete decomposition (weathering grades W4 to W5), with uniaxial compressive strength (UCS) typically ranging between 0.25 MPa and 5 MPa (=R1+). These materials preserve the fabric of the parent rock and exhibit transitional mechanical behaviour between soils and rocks. In tropical environments such as Brazil, saprolites often form thick weathered profiles, making the understanding of their mechanical behaviour and the determination of their geotechnical parameters crucial for open pit mine designs and infrastructure projects in general. Currently, saprolites are assessed using both soil mechanics and rock mechanics approaches, depending on their strength. Specifically, the soil mechanics approach is commonly applied to lower-strength materials (<R1-), involving a process that spans from the collection of undisturbed block samples to the interpretation of laboratory tests. A key challenge in advancing the geotechnical understanding of saprolites lies in the absence of a standardised procedure that comprehensively addresses all stages required for the determination of strength and deformability parameters, as well as for understanding their mechanical behaviour. In this context, this study proposes and applies a methodology for determining the geotechnical parameters of saprolites of phyllite. The samples were collected from Mine A, located on the western limb of the Moeda Syncline macrostructure, within the Quadrilátero Ferrífero Mineral Province in south-central Minas Gerais, Brazil. The block samples were subjected to the following procedure: (i) field description with preliminary strength assessment and subsequent petrographic characterisation; (ii) sample preparation with two sets of specimens — one with an acute angle of approximately 45° between the direction of confinement (s3) and the metamorphic foliation plane (S1), and another with an angle greater than 70° (S2); (iii) determination of index properties (e.g., void ratio); (iv) execution of CIU and CID triaxial tests on both S1 and S2 sample sets; (v) assessment of failure mechanisms, strength and deformability parameters, as well as deformational behaviour and dilatancy; and (vi) integrated analysis of all collected data. The integrated analysis grouped the triaxial tests into four categories (groups 1, 2, 3, and 4), based on common features such as deformational

behaviour, dilatancy, and strength and deformability parameters. Groups 3 and 4, characterised by void ratios lower than 1, displayed mechanical behaviour more akin to rock, with: (i) shear failure predominating — controlled by foliation in S1 tests and occurring obliquely in S2 tests; (ii) predominantly negative pore pressure generation and an essentially elastic-brittle deformational behaviour; and (iii) higher cohesion values in S2 (group 4), where the lowest shear strength was associated with failure along the foliation plane. Conversely, groups 1 and 2, with void ratios greater than 1.20, exhibited mechanical behaviour more similar to soils, featuring: (i) varied failure mechanisms including buckling, shear parallel to foliation, and oblique shear; (ii) generation of positive pore pressures; (iii) diverse deformational responses, encompassing elastic-plastic, elastic-brittle, strain hardening, and strain softening behaviours; and (iv) particularly in the undrained S1 tests (group 2), a stronger structural control on specimen failure, suggesting a significant influence of pore pressure along foliation planes. Petrographic analysis indicated that groups 1 and 2 correspond to weathering grade W5, while groups 3 and 4 correspond to grade W4. The transition from W4 to W5 is associated with the alteration of primary minerals (e.g., muscovite) into secondary minerals (e.g., sericite and kaolinite), resulting in changes to the rock fabric, physical indices, and mechanical parameters. Finally, the study presents correlations with previous research and discusses the mechanical transition of saprolites of phyllite within the rock-soil mechanics. The application of the proposed procedure represents a significant step forward in advancing the geotechnical understanding of saprolites.

Keywords: saprolite, phyllite, procedure, triaxial tests.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$e$  - void ratio

$\Phi^\circ$  - friction angle

$C$  - cohesion

$\gamma$  - specific weight

$E$  – deformational modulus

$\nu$  – poisson ratio

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	14
2.1 Definição do termo Saprólito e Solo Residual – Faixa de Resistência e Grau Intempérico Correlatos.....	14
2.2 Saprólito – Correlação entre Resistência, Grau Intempérico, Anisotropia e Propriedades Índices .....	17
2.3 Comportamento Geomecânico de Filitos Brandos do Quadrilátero Ferrífero..	19
2.3.1 Modelos Constitutivos para Rochas Brandas .....	20
2.4 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb e Ensaios Triaxiais Drenados e Não-Drenados .....	20
2.4.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb .....	20
2.4.2 Ensaios Triaxiais em Solo.....	21
3. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
3.1 Geologia Regional.....	24
3.2 Geologia Local .....	26
3.2.1 Estratigrafia.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Laboratório e Normas .....	28
4.2 Proposição – Procedimento para Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Saprólito .....	29
4.2.1 Amostragem, Descrição Geológico-Geomecânica e Petrografia Microscópica.....	30
4.2.2 Talhagem dos Corpos de Prova (CPs) .....	30
4.2.3 Determinação das Tensões Confinantes Empregadas no Ensaio Triaxial .....	31
4.2.4 Determinação das Propriedades Índices .....	32
4.2.5 Análise dos Ensaios Triaxiais .....	32
4.2.6 Análise Integrada.....	34
5. RESULTADOS .....	34
5.1. Caracterização dos Blocos Indeformados.....	34
5.1.1 Bloco - AM-229 .....	34
5.1.2 Bloco - AM-231 .....	35
5.1.3 Bloco - AM-239 .....	35
5.1.4 Bloco - AM-243 .....	35

5.1.5 Bloco - AM-242 .....	35
5.1.6 Bloco - AM-241 .....	35
5.1.7 Bloco - AM-263 e Bloco AM-267 .....	35
5.1.8 Bloco - AM-276 .....	36
5.2 Caracterização Petrográfica Microscópica .....	38
5.3 Ensaio Triaxiais Consolidados Drenados e Não-Drenados .....	39
5.3.1 Grupo 1 .....	43
5.3.2 Grupo 2 .....	46
5.3.3 Grupo 3 .....	51
5.3.4 Grupo 4 .....	57
6. DISCUSSÃO .....	60
6.1 Análise Integrada .....	60
6.1.1 Grupo 1 .....	60
6.1.2 Grupo 2 .....	60
6.1.3 Grupo 3 .....	61
6.1.4 Grupo 4 .....	61
6.1.5 Correlação entre os Parâmetros Geomecânicos, as Faixas de Resistência e o Grau Intempérico dos grupos 1, 2, 3 e 4 .....	62
6.2 Análise dos Parâmetros Geomecânicos e Propriedades Índices dos Saprólitos de Filito da Mina A .....	62
6.3 Correlação Geológico-Geotécnica entre os Saprólitos de Filito da Mina A e Estudos Pretéritos realizados em Filitos da Formação Batatal .....	64
6.4 Transição Mecânica Solo-Rocha no Contexto dos Saprólitos do Filito da Formação Batatal .....	65
6.4.1 Mecanismo de Ruptura e Comportamento Deformacional .....	66
6.5 Tratamento dos Parâmetros Geomecânicos em Saprólitos à Luz do Procedimento Proposto .....	68
7. CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Os saprólitos consistem em rochas altamente intemperizadas a totalmente decompostas (grau intempérico W4 a W5, de acordo com a classificação proposta pela *International Society for Rock Mechanics*, ISRM 1981), com resistência à compressão uniaxial (UCS) normalmente entre 0.25 MPa a 5 MPa ( $\leq R1+$ ), que preservam a trama (*fabric*) de sua rocha de origem e possuem comportamento mecânico transicional, entre solos e rochas (Deer e Patton 1971; Blight, 1997; Cella et al. 2019; Martin e Stacey 2018). São classificados como um dos tipos de rocha branda (Martin e Stacey 2018) e, em ambientes tropicais, grande parte da infraestrutura mineira e civil encontra-se estabelecida sobre estes materiais, tornando-se fundamental o entendimento de seu comportamento mecânico e a determinação de seus parâmetros geomecânicos. Especificamente, na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero (QF), conhecida por seus depósitos de classe mundial de ferro e ouro e localizada na porção centro-sul do Estado de Minas Gerais, saprólitos são praticamente onipresentes e ocorrem em minas à céu aberto associados à diversas formações e litologias incluindo as formações ferríferas bandadas pertencentes a Formação Cauê (Grupo Itabira/Supergrupo Minas; Dorr, 1969; Alkmim e Marshak, 1998).

As formações ferríferas (hematitas e itabiritos) exploradas no QF são essencialmente friáveis e encontram-se encaixadas em saprólitos de quartzitos, xistos e, filitos brandos. As atividades de lavra, em maior escala, iniciaram a partir de 1960 e com o aprofundamento das cavas à céu aberto, atualmente, as escavações podem alcançar profundidades superiores a 200 m, estabelecidas sobretudo, em maciços rochosos brandos (resistência à compressão uniaxial inferior à 10 MPa; Cella et. al 2020), dentre estes os saprólitos. Os saprólitos de quartzito, xisto, filito e itabirito afloram em boa parte do *footwall* e *hangingwall* das minas a céu aberto do QF, controlando de forma parcial ou integral as geometrias globais das cavas e, consecutivamente, as relações estéril/minério (Costa, 2021; Figura 1). Isso faz com que a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos saprólitos seja uma etapa fundamental na definição dos ângulos operacionais das cavas à céu aberto. O entendimento do comportamento mecânico dos saprólitos é de extrema relevância também para os projetos geotécnicos na área de infraestrutura e energia desenvolvidos em todo território nacional, já que dá suporte ao dimensionamento das estruturas de contenção, escavações, dentre outras intervenções.

Atualmente, a caracterização geomecânica dos saprólitos é realizada sob a óptica da mecânica dos solos (materiais de menor resistência) e da mecânica das rochas (materiais de maior resistência). Especificamente, sob a óptica da mecânica dos solos, sua caracterização geomecânica normalmente envolve a determinação dos principais índices físicos (e.g. índice de vazios, índice de plasticidade) e de parâmetros de resistência e deformabilidade via realização de ensaios de compressão triaxial adensados drenados (CID) e não-drenados (CIU), bem como ensaios de cisalhamento direto (Cella et al. 2019; Martin e Stacey, 2018). Neste cenário, a ausência de um procedimento que abranja desde a coleta das amostras indeformadas, à extração dos corpos de prova, passando ao tratamento e análise dos ensaios triaxiais, é um ponto crítico no avanço do conhecimento sobre estes materiais. Estas etapas são desenvolvidas das formas mais variadas no presente cenário e, comumente, pontos importantes no tratamento dos ensaios são negligenciados, como a influência de um

plano de anisotropia no controle da ruptura e no comportamento deformacional dos corpos de prova, bem como a correlação entre os índices físicos e os parâmetros de resistência (Futai et al. 2004; Fietze et al. 2013).

A ausência de um procedimento que consolide critérios a serem contemplados durante o processo de parametrização dos saprólitos, englobando desde a etapa de campo até a análises dos ensaios de laboratório, dificulta o avanço no entendimento geomecânico dos saprólitos. Frequentemente, pontos importantes como o mecanismo de ruptura dos corpos de prova, a direção da foliação, o tipo de ruptura ocorrido e os dados brutos, por exemplo, não são apresentados, restringindo, a possibilidade de correlação entre ensaios (Martin e Stacey, 2018). Diante deste cenário, e visando corroborar com o aprofundamento do conhecimento quanto a mecânica dos saprólitos, a presente dissertação propõe um procedimento para parametrização geotécnica de saprólitos via ensaios triaxiais, abrangendo desde a amostragem dos blocos indeformados, passando pela talhagem dos corpos de prova, determinação dos índices físicos, caracterização petrográfica, determinação das tensões confinantes, realização e análise dos ensaios triaxiais e, em última instância, a análise integrada de todas as informações que, por sua vez, permite determinar e correlacionar: o comportamento deformacional, os parâmetros de resistência e deformabilidade, a dilatância e os mecanismos de ruptura observados em cada corpo de prova (e.g. cisalhamento na foliação metamórfica).

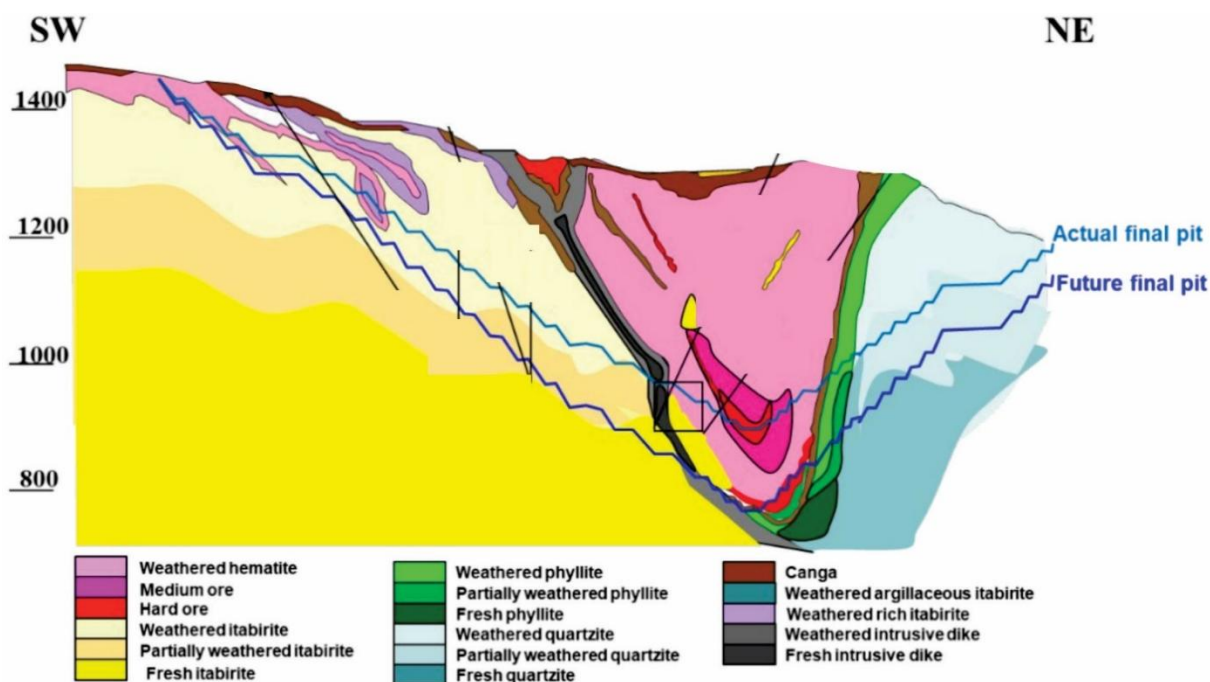


Figura 1 – Seção geológico-geomecânica com as principais unidades aflorantes nas minas a céu aberto da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Costa, 2021.

O procedimento proposto é aqui avaliado e implementado em blocos indeformados de filito da Formação Batatal coletados em uma mina à céu aberto denominada Mina A (nome fictício por questões de confidencialidade), localizada no flanco oeste da macroestrutura do QF denominada sinclinal Moeda (Alkmim e Marshak, 1998). A cava é constituída, em larga escala, por rochas brandas e sua estratigrafia abrange micaxistos (Grupo Nova Lima/Supergrupo Rio das Velhas) e unidades do Supergrupo Minas como quartzitos da Formação Caraça, filitos da Formação Batatal e formações

ferríferas bandadas (itabiritos) da Formação Cauê. Diques máficos cortam todas as demais unidades. O filito da Formação Batatal (filito Batatal) foi selecionado por se tratar de uma unidade com amplo histórico de rupturas no QF e que tem influência direta nos ângulos operacionais das cavas à céu aberto, sendo também relevante para toda infraestrutura local. Ainda, o filito Batatal representa uma das unidades geológico-geotécnicas mais estudadas do QF, fornecendo assim uma base de dados com a qual a presente dissertação pode ser correlacionada (Silva, 2006; Santiago, 2008; Silva et al. 2010; Leão et al. 2017).

A aplicação do procedimento proposto neste trabalho, em conjunto a uma ampla revisão bibliográfica, também permitiu uma análise detalhada do comportamento mecânico dos filitos, contemplando pontos como: i) correlação entre as propriedades índices e os parâmetros de resistência; ii) influência da foliação metamórfica nos parâmetros de resistência; de foliação em seus parâmetros de resistência; iii) a análise dos parâmetros obtidos no contexto dos estudos pretéritos realizados nos filitos da Formação Batatal; iv) a transição mecânica entre solo e rocha no contexto dos filitos da Formação Batatal e a correlação entre o mecanismo de ruptura do CP e o comportamento deformacional.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Definição do termo Saprólito e Solo Residual – Faixa de Resistência e Grau Intempérico Correlatos

A separação do manto intempérico (regolito) de natureza *in situ* formado a partir do intemperismo do maciço rochoso é um tema controverso, já que não existe um padrão na aplicação dos termos saprólito e solo residual. Por exemplo, a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) individualiza o manto intempérico em saprólito, solo residual jovem e solo residual maduro e, ainda, menciona o termo solo saprolítico, enquanto a NBR-6502-1995 aplica apenas o termo saprólito, que engloba o solo saprolítico e o solo residual jovem, deixando claro que tal material deve preservar a trama (*fabric*) da rocha de origem. O termo solo residual maduro é restrito a solos de natureza autóctone que não preservam a trama da rocha original. Adiante segue um histórico de importantes trabalhos que fazem referência à aplicação dos termos saprólito e solo residual.

Deer e Patton (1971) apresentam um perfil intempérico para as rochas ígneas e metamórficas e uma clara definição para saprólito e solo residual (Figura 2). Para os autores, o termo saprólito deve ser aplicado para materiais intemperizados, que preservam a trama (*fabric*) da rocha de origem incluindo estruturas reliquiares como falhas e fraturas. Tais materiais se comportam mecanicamente principalmente como solos, contudo, são portadores de estruturas herdadas da rocha de origem que podem controlar sua resistência. Por fim, os autores ainda salientam que tal horizonte deve possuir um montante máximo de 10% de blocos imersos em matriz. O termo solo residual é aplicado pelos autores para material *in situ* proveniente da alteração do maciço rochoso, mas que já não preserva nenhuma estrutura da rocha de origem e com os elementos solúveis já mobilizados. Pode estar enriquecido em elementos de baixa mobilidade como alumínio, sílica e ferro. Em linha com Deer e Patton (1971), Blight (1997) define saprólitos como materiais com resistências de solo que preservam

a trama da rocha de origem e mencionam a influência de seu padrão estrutural preservado na condutividade hidráulica destes materiais.

A definição realizada por Deer e Patton (1971; Figura 2) serviu como base para grande parte dos trabalhos desenvolvidos a partir daí, contudo, tentativas de se alterar este conceito inicialmente proposto culminaram na ausência de um consenso da comunidade científica na aplicação do termo. Neste trabalho, segue-se a definição de Deer e Patton (1971).

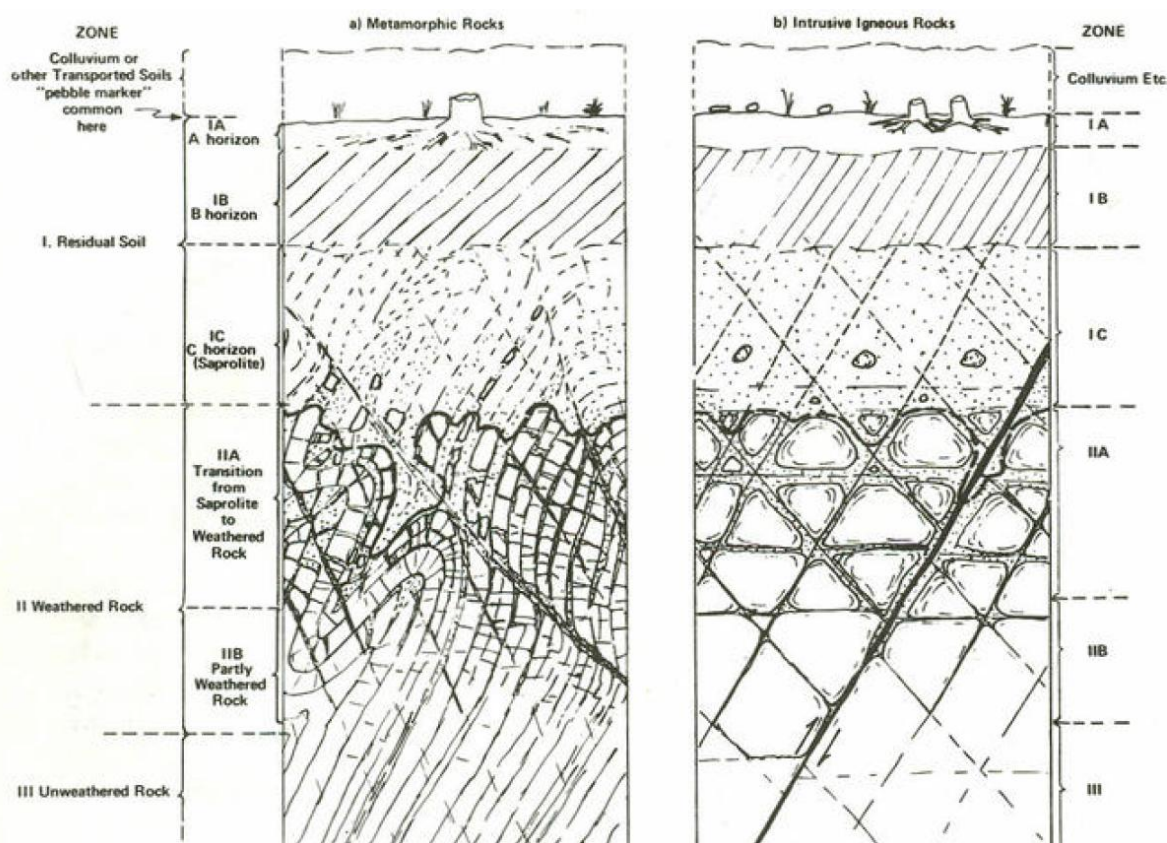


Figura 2 – Perfil intempérico para rochas ígneas e metamórficas. Fonte: Deer e Patton (1971).

Cella et al. (2019; 2020) aplicam o termo saprólito e solo residual para materiais que atendem as definições de Deer e Patton (1971), contudo, o termo saprólito é definido como um material com comportamento mecânico semelhante aos solos, que preserva a trama da rocha de origem (grau intempérico W5) e cuja resistência varia normalmente entre R0 e R2-. O grau intempérico proposto segue as definições da ISRM (1981; Figura 3) enquanto as faixas de resistência R1 (1-5 MPa) e R2 (5-25 MPa), propostas por ISRM (1981), são subdivididas em R1- (1-3 MPa), R1+ (3-5 MPa), R2- (5-10 MPa) e R2+ (10-25 MPa) conforme proposto por Cella et al. (2019; Figura 4). Os autores ainda apresentam critérios práticos de campo para a determinação das faixas de resistência.

Fietze et al. (2013) em trabalho específico com filitos correlacionam as faixas de resistência R1 e R2 com os graus intempéricos W5-W4 e W4-W3. Jeffcoate et al. (2013) em seu estudo, rastreiam a variação de resistência dos filitos com base em variações geoquímicas ocasionadas pelo processo de intemperismo químico, normalmente associado à lixiviação da sílica e ao incremento nos teores de alumínio e ferro (quando presente). Vilela (2022), aplicou a mesma abordagem de Jeffcoate et

al. (2013) a maciços intemperizados da mina de Barro Alto, em Goiás, com resultados igualmente interessantes.

Martin e Stacey (2018) em capítulo do livro *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks* definem saprólito como uma rocha branda com grau intempérico W5 (totalmente decomposta) com faixas de resistência normalmente entre R0 e R1+.

Na presente dissertação, o termo saprólito encerra rochas altamente alteradas a totalmente decompostas (grau intempérico W4 a W5), com resistência à compressão uniaxial (UCS) normalmente entre 0.25 MPa a 5 MPa ( $\leq R1+$ ), que preservam a trama (*fabric*) de sua rocha de origem e possuem comportamento mecânico transicional, entre solos e rochas (Deer e Patton 1971; Blight, 1997; Cella et al. 2019; Martin e Stacey 2018).

Grau Intempérico	Descrição	Características do Material
W6	Solo Residual	Material totalmente transformado em solo. Estruturação da rocha original destruída. Grande alteração de volume, mas sem transporte significativo.
W5	Rocha Completamente Alterada	Material completamente transformado completamente em solo, mas preservando em grande parte a estrutura da rocha primária.
W4	Rocha Altamente Alterada	Mais da metade do material encontra-se convertida em solo. Presença de rocha fresca ou descolorida em um arranjo descontínuo ou na forma de matacões.
W3	Rocha Moderadamente e Alterada	Menos da metade do material encontra-se convertida em solo. Presença de rocha fresca ou descolorida em um arranjo descontínuo ou na forma de matacões..
W2	Rocha Levemente Alterada	Rocha e descontinuidades descoloridas com resistências superficiais inferiores a resistência da rocha sã.
W1	Rocha sã	Sem Indicativo de Intemperismo.

Figura 3 – Faixas de Grau Intempérico propostas pela ISRM (1981). Fonte: Brown (1981).

ISRM (ADAPTADO POR BVP)															
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA <sup>2</sup>	DESCRIÇÃO	R <sub>c</sub> (MPa)	LS. (MPa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO											
				(1) Martelo	(2) Risco Canivete <sup>1</sup>	(3) Queda Canivete	(4) Raspagem Canivete <sup>1</sup>	(5) Risco Unha	(6) Pressão Manual						
R6	Extremamente Resistente	>250	>10	Lascada	-	-	-	-	-						
R5	Muito Resistente	100-250	4-10	Quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-						
R4	Resistente	50-100	2-4	Quebra com vários golpes	Risco superficial	-	-	-	-						
R3	Mediamente Resistente	25-50	1-2	Quebra com dificuldade com um golpe	Risco superficial	Ponto pequeno	Com muita dificuldade	-	-						
R2	R2 <sup>+</sup> Pouco Resistente	10-25	-	Quebra com um golpe	Risca	Ponto grande	Com dificuldade	-	-						
	R2 <sup>-</sup> Branda	5-10		Fragmenta com um golpe			Produce pó	Risco superficial	-						
R1	R1 <sup>+</sup> Muito Branda Superior	3-5	-	Desagrega	Risca fundo	Penetra	Com facilidade produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente						
	R1 <sup>-</sup> Muito Branda Inferior	1-3			Corta (separa)		Descasca entalha	Penetra	Quebra as bordas						
R0	Extremamente Branda	0,25-1	-	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega						
Método de avaliação de campo da consistência das rochas															
1 - Reação ao golpe com martelo de geólogo				4 - Reação à raspagem do canivete na borda da amostra											
2 - Reação ao risco com a ponta do canivete				5 - Reação ao risco com a unha											
3 - Reação à queda da ponta do canivete				6 - Reação à pressão dos dedos											
<sup>1</sup> A resposta à utilização do martelo em amostras muito ricas em minerais lamelares é mais significativa que do canivete <sup>2</sup> Referências típicas: R0 - R1 <sup>+</sup> (Saprolito); R1 <sup>+</sup> (Tijolo); R2 <sup>-</sup> (Solo-Cimento); R2 <sup>+</sup> (Concreto comum); R3 (Concreto especial)								<b>Resposta ao método</b> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="background-color: #f08080;"></td><td>Alta</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;"></td><td>Média</td></tr> <tr><td style="background-color: #90ee90;"></td><td>Baixa</td></tr> </table>			Alta		Média		Baixa
	Alta														
	Média														
	Baixa														

Figura 4 – Classificação de Faixas de Resistência da Rocha Intacta e seus produtos intempéricos adaptada de ISRM (1981). Fonte: Cella et al. (2019).

## 2.2 Saprolito – Correlação entre Resistência, Grau Intempérico, Anisotropia e Propriedades Índices

Partindo da definição previamente apresentada de saprolitos como uma rocha branda, de comportamento mecânico semelhante aos solos, com grau intempérico W5 e resistências entre R0 e R2- (Deere e Patton, 1971; Cella et al. 2019; 2020; Martin e Stacey, 2018) apresenta-se, a seguir, uma revisão das correlações disponíveis na literatura entre os parâmetros resistência, grau intempérico, anisotropia e propriedades índices para estes materiais.

No que tange às propriedades físicas e deformacionais destes materiais, Cella et al. (2019) apresentam a significativa perda de resistência da rocha intacta e saprolitos em função do aumento do índice de vazios. Reporta ainda que o aumento do grau intempérico, que ocorre em conjunto ao aumento do índice de vazios, impacta majoritariamente no parâmetro de coesão do material, conforme observado em ensaios. Tal comportamento vincula-se à alteração na ligação entre grãos/partículas minerais e pode gerar impactos nos valores da coesão na ordem de duas casas decimais. Fietze et al. (2013), em trabalho realizado especificamente em filitos, registra que o incremento do índice de vazios provocado pelo aumento do grau intempérico culmina em uma redução dos parâmetros de resistência (principalmente coesão). Ainda, reporta a influência da foliação metamórfica na redução da resistência ao cisalhamento destas rochas, principalmente na coesão, com os maiores valores de coesão associados aos ensaios perpendicular a esta estrutura.

Lambe e Whitman (1969) registram a correlação entre o índice de vazios e a resistência dos materiais, mas destacam que materiais com o mesmo índice de vazios

podem apresentar parâmetros distintos em função do tamanho, forma e arranjo das partículas que compõem os solos.

Mitchel e Sitar (1982) recordam que a geotecnia clássica foi desenvolvida predominantemente em climas temperados e a maioria dos conceitos de mecânica dos solos foram relacionados a materiais transportados. Desta forma, conceitos clássicos da mecânica dos solos precisam ser cuidadosamente compreendidos e examinados antes de sua aplicação em materiais residuais.

Elliott e Brown (1985) reportam a influência do índice de vazios na resistência de rochas brandas e na transição entre comportamentos essencialmente dúcteis e rúpteis

Irfan e Dearman (1978) apresentam e recomendam uma sistemática quantitativa de estimativa do grau intempérico visando trazer mais robustez na correlação deste parâmetro com propriedades índices e de resistência.

Lambe e Hertz (1988) registram a influência da foliação metamórfica no controle da resistência dos materiais, em que amostras ensaiadas apresentando paralelismo entre a foliação metamórfica e o eixo de tensão principal ( $\sigma_1$ ) registraram dobramento dos corpos de prova o que culminou em elevadas deformações e em dificuldades de se obter a tensão cisalhante de pico. Wesley (1990) registra a influência da anisotropia em "solos residuais" essencialmente siltosos e reflete sobre conceitos sobre a perda irreversível de resistência associada ao aumento do grau intempérico em materiais siltosos.

Leroueil e Vaughan (1990) registram a presença e a importância da cimentação em saprólitos (rochas brandas), registra o comportamento mecânico destes materiais sendo marcado comportamento inicialmente rígido passando a escoamento (plastificação).

Au (1996) apresenta uma variação da razão entre a resistência da matriz e de descontinuidade (anisotropia) presente em saprólito. Estabelece uma correlação entre o índice de vazios e a resistência do material e indica que o índice de vazios, de fato, pode ser empregado de maneira indireta como estimativa do grau intempérico. Registra que para saprólitos com índices de vazios elevados (em torno de 0,85) não há variação ou a variação é muito menor entre a resistência da matriz e da descontinuidade. Party (1997) também registra uma correlação entre a resistência de solos residuais tropicais e seus respectivos índices de vazios.

Gupta e Rao (1998) registra que o grau intempérico reflete-se um aumento no índice de vazios, teor de humidade saturada e porosidade com o avanço do intemperismo. A resistência medida é negativamente relacionada com a porosidade, que é considerada um importante indicador do grau intempérico. Registra que a relação entre a porosidade absoluta e os valores de resistência pontual, índice brasileiro e resistência à compressão simples é geralmente negativamente e exponencial.

Aydin (2006) seguindo os conceitos de saprólito e solo residual conforme proposto por Deer e Patton (1971), salienta a importância da trama da rocha e da presença de estruturas reliquias (e.g. juntas) no controle da resistência de saprólitos. Futai et al.

(2004) registram o efeito da anisotropia em saprólitos de ambiente tropical e um comportamento essencialmente dilatante para estes materiais.

Castro et al. (2013) apresentam uma função de transição entre os critérios de ruptura Mohr-Coulomb e Hoek-Brown baseada na resistência (MPa) dos materiais. Com base na função, observa-se que a zona de transição entre materiais controlados essencialmente pela matriz e materiais controlados pela descontinuidade ocorre entre 1-3 MPa.

Martin e Stacey (2013) em trabalho direcionado a rochas brandas registram que o aumento da porosidade e do teor de umidade está diretamente relacionado à redução de resistência dos materiais.

Sabatakakis e Tsiambaos (1983) em estudo realizado com filito sobre compressão não confinada, encontraram um índice de anisotropia (resistência perpendicular sobre a resistência paralela em relação à foliação) igual a unidade para rocha sã e 1,43 para rocha alterada.

Papadopoulos e Marinou (1992) analisaram a relação existente entre o índice de anisotropia de xistos atenienses com o grau de intemperismo e concluíram que valores baixos de anisotropia foram apresentados para rochas com maior grau de alteração. Constataram também um aumento do índice de anisotropia para amostras de média a ligeiramente alteradas, com uma tendência de diminuição da anisotropia para rocha no seu estado sã.

### 2.3 Comportamento Geomecânico de Filitos Brandos do Quadrilátero Ferrífero

O comportamento geomecânico de saprólitos de filitos presentes no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero foi objeto de análise de trabalhos cujas principais informações seguem detalhadas adiante.

Silva (2006) em trabalho realizado em saprólitos de filito e xisto (Fm. Batatal) presentes na Mina do Pico reportou a influência da foliação metamórfica no controle de resistência destes materiais, principalmente na coesão. Lopes et al. (2007) em trabalho direcionado a filitos presentes na mina Córrego do Sítio registram o impacto do intemperismo na porosidade, índice de vazios e peso específico dos materiais, bem como sua influência na resistência dos materiais, principalmente no parâmetro de coesão. A mineralogia reportada para os filitos foi quartzo, muscovita e caulinita. Soares (2008) em trabalho realizado em filitos registra a influência da foliação metamórfica no controle da resistência destes materiais, bem como sua elevada susceptibilidade à ciclagem. Silva et al. (2010), em trabalho realizado em filitos da Formação Batatal presentes na mina de Pau Branco, também registram que o aumento do intemperismo está diretamente relacionado ao aumento do índice de vazios e à redução do peso específico.

Santiago (2008), em trabalho direcionado a filitos da Formação Batatal presente nas minas do Pico, Capitão do Mato e Tamanduá, inseridas no âmbito do Quadrilátero Ferrífero, registra uma redução dos parâmetros de resistência e do peso específico dos filitos em função do grau intempérico, em conjunto a um aumento nos índices de

vazios. O autor propõe que índices físicos sejam empregados para aferição indireta da resistência dos materiais.

Leão et al. (2017) em trabalho direcionado a filitos provenientes da Formação Batatal (Quadrilátero Ferrífero) demonstra que o intemperismo de filitos promove mudanças significativas nas propriedades físicas (como aumento da porosidade e diminuição da densidade) e mecânicas (redução da resistência). É destacado a relação não-linear entre as mudanças dos índices físicos e as propriedades de resistência.

Carvalho et al. (2020) em trabalho direcionados a filitos do Quadrilátero Ferrífero reportam uma mineralogia essencialmente composta por muscovita/sericita, quartzo e clorita. O trabalho registra que o aumento do grau intemperico correlaciona-se com um aumento da porosidade e uma redução dos parâmetros de resistência. É destacada a relação não-linear entre as mudanças dos índices físicos e as propriedades de resistência.

Pereira et al. (2021) em trabalho que abrange filitos resistentes ( $UCS > 200$  MPa) amostrados no QF, registram a anisotropia de resistência neste litotipo em função da foliação metamórfica.

Franca et al. (2018) em capítulo do livro *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks* (Martin e Stacey, 2018) apresentam uma análise de um grande volume de ensaios realizados em saprólitos de filito do Quadrilátero Ferrífero com resistências inferiores a R2. Os autores salientam que a variabilidade nos parâmetros se deve a aspectos intrínsecos como variações composicionais e a questões técnicas vinculadas aos próprios ensaios. Os parâmetros ângulo de atrito e coesão são tratados segundo uma abordagem estatística, considerando parâmetros como coeficiente de variação e desvio padrão. O papel da foliação metamórfica no controle da resistência dos materiais não é abordado pelos autores.

### 2.3.1 Modelos Constitutivos para Rochas Brandas

Os modelos constitutivos exercem um papel crítico nas simulações do comportamento mecânico de maciços rochosos brandos. Estes modelos dependem de forma fundamental de dados empíricos obtidos a partir de experimentos e ensaios (Azad et al. 2024). Em cavas a céu aberto estabelecidas em rochas brandas, normalmente emprega-se modelos mais comuns como o elasto-plástico (e.g. Mohr-Coulomb) e modelos mais complexos como *strain hardening* e *strain softening*, que são capazes de avaliar as condições de deformação elasto-plástica e plásticas (Oka et al. 2002).

## 2.4 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb e Ensaios Triaxiais Drenados e Não-Drenados

### 2.4.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é amplamente aplicado na estimativa da resistência ao cisalhamento de solos sendo baseado em dois parâmetros: coesão e ângulo de fricção, ambos obtidos para uma dada tensão normal e cisalhante, conforme apresentado na Equação 1. Assume como premissa uma envoltória de

ruptura linear, rupturas de natureza rúptil (não considerando comportamentos dúcteis) e não considera a tensão de ruptura intermediária ( $\sigma_2$ ; Head e Epps 2006).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \text{ (Equação 1)}$$

$\tau$  = tensão cisalhante no plano de ruptura

$\sigma$  = tensão normal no plano de ruptura

$c$  = coesão

$\phi$  = ângulo de fricção

#### 2.4.2 Ensaio Triaxiais em Solo

Os ensaios triaxiais em solo são normalmente empregados na determinação dos parâmetros de resistência e deformacionais, bem como o comportamento mecânico destes materiais. Em sua configuração mais comum, o ensaio consiste na aplicação de uma tensão axial principal ( $\sigma_1$ ) e tensões horizontais iguais e constantes ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) exercendo o confinamento da célula. Os ensaios triaxiais são compartimentados nas etapas de saturação do corpo de prova, consolidação do corpo de prova e compressão do corpo de prova. Os ensaios confinados drenados e não-drenados são normalmente empregados (Head e Epps 2006; Figura 5).

- Ensaio Triaxial Consolidado Drenado

Durante a etapa de consolidação o corpo de prova é submetido a uma determinada tensão confinante e condições drenada. Posteriormente, na fase de compressão a condição drenada permanece e a variação volumétrica é determinada.

- Ensaio Triaxial Consolidado Não-Drenado

Durante a etapa de consolidação o corpo de prova é submetido a uma determinada tensão confinante e condições drenada. Posteriormente, na fase de compressão é estabelecida uma condição não-drenada onde é realizada a determinação das pressões neutras (poropressão).

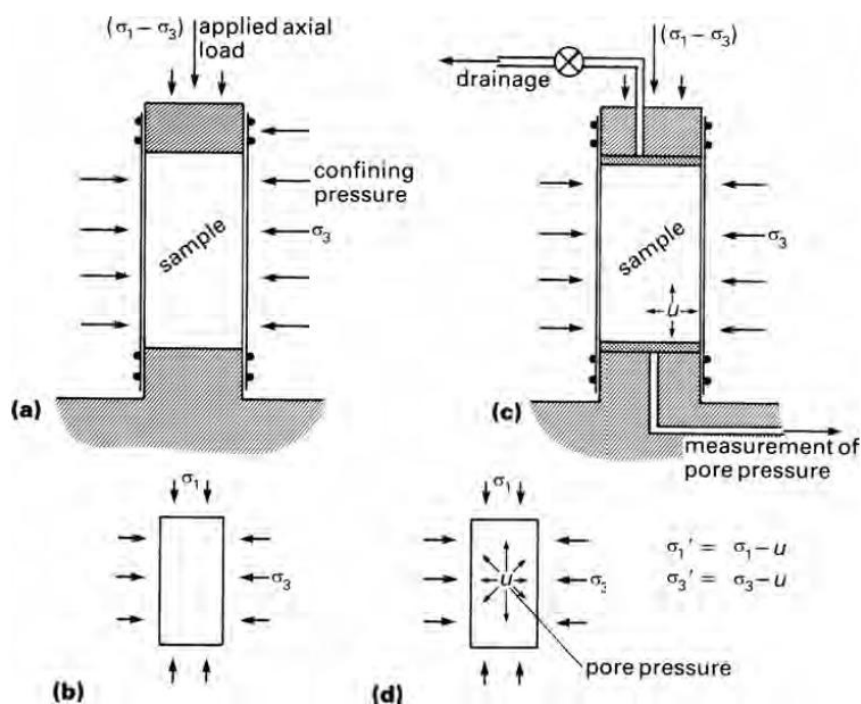


Figura 5 – Princípios dos ensaios de compressão triaxiais: (a) aplicação das tensões; (b) representação das tensões principais; (c) arranjo usual para as tensões efetivas e (d) representação da tensão total e efetiva Fonte: Head e Epps (2006).

Os ensaios triaxiais drenados e não-drenados são normalmente avaliados com base nos seguintes gráficos (Head e Epps 2006):

- Tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) versus Deformação axial - Este gráfico mostra como a diferença entre a tensão principal maior (axial) e a tensão principal menor (radial) varia à medida que o corpo de prova se deforma. Permite a classificação dos materiais em função do seu comportamento deformacional em pelo menos quatro padrões principais: elasto-plástico, elasto-frágil, *strain hardening* e *strain softening* (Figura 6). A classificação é sugerida para posterior correlação entre o mecanismo de ruptura do CP e os referidos comportamentos deformacionais. Ainda, os comportamentos deformacionais podem ser correlacionados e dar suporte na definição do modelo constitutivo durante a modelagem geotécnica numérica.

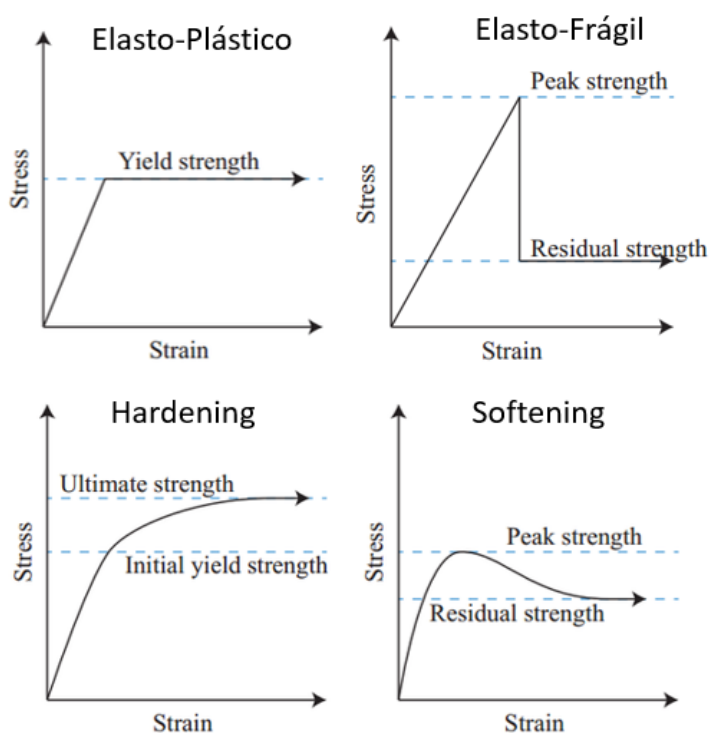


Figura 6 – Curvas tensão x deformação apresentando os comportamentos deformacionais: a) elasto-plástico; b) elasto-frágil; c) *strain hardening* e; d) *strain softening* (Maleki et al. 2021).

- Trajetória das Tensões Efetivas ( $t$  versus  $s$ ) – neste gráfico a tensão desviadora efetiva dividida por dois ( $t = (\sigma'1 - \sigma'3)/2$ ) é plotada em função da tensão média efetiva ( $s' = (\sigma'1 + \sigma'3)/2$ ). É empregado na determinação dos parâmetros efetivos de coesão e do ângulo de fricção, bem como na análise do comportamento do corpo de prova quanto a geração de poropressão (no caso específico dos ensaios CIU).
- Poropressão ( $u$ ) versus Deformação axial (exclusivo para ensaios CIU) – Este gráfico mostra como a poropressão varia em função da deformação axial. Pode dar suporte a determinação do ponto de ruptura do corpo de prova.
- Variação do Volume ( $\Delta V$ ) versus a deformação axial – Este gráfico captura a variação do volume do corpo de prova em função da deformação axial à medida que o corpo se deforma e permite definir se o corpo apresenta dilatância. É empregado também na correção da área de aplicação de carga do ensaio.

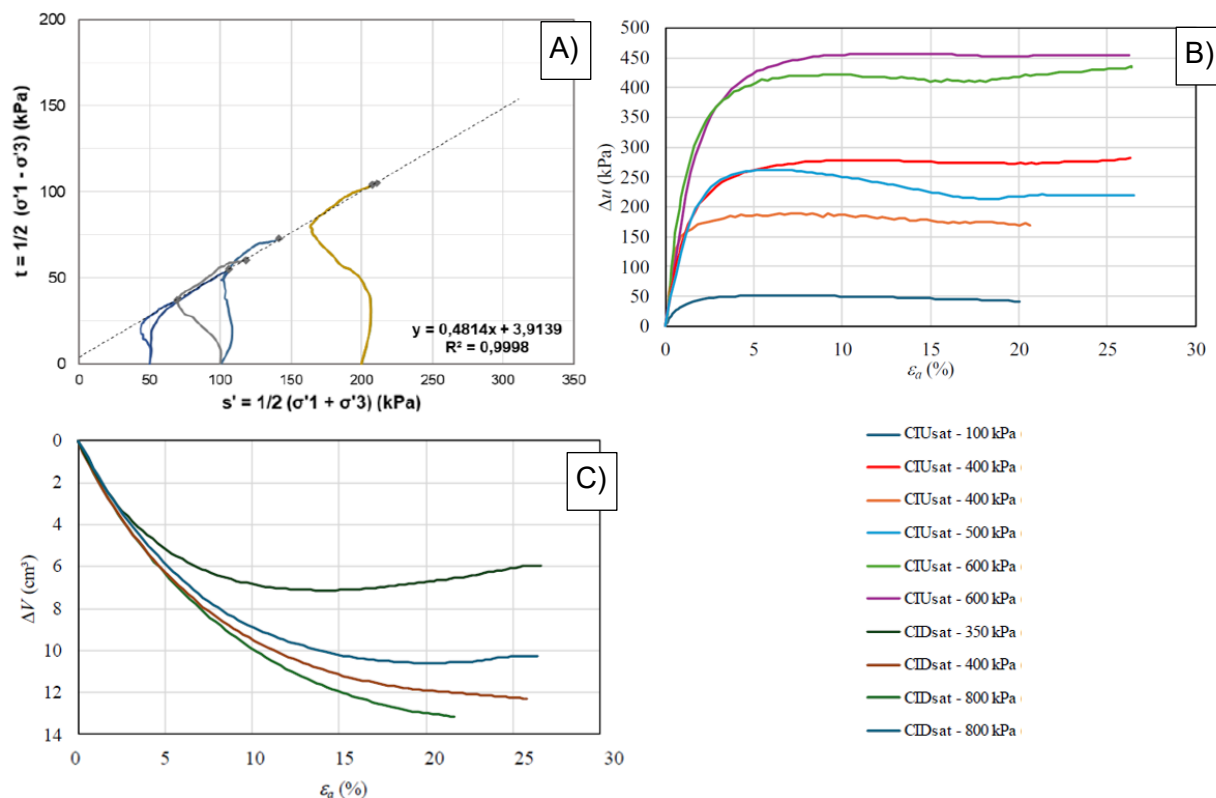


Figura 7 – A) Gráfico  $t \times s'$ ; B) gráfico variação da poropressão  $\times$  deformação axial; C) gráfico volumétrica  $\times$  deformação axial. Fonte: Autor.

### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1 Geologia Regional

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) abrange uma área de 7000 km<sup>2</sup> e localiza-se na porção sudeste do Cráton São Francisco (Figura 8; Dorr, 1969; Endo et al., 2019). Consiste em uma área de elevada complexidade lito-estrutural e que hospeda depósitos de classe mundial de ferro e ouro, sendo por este motivo umas das regiões mais estudadas no Brasil. É subdividida nas seguintes macro unidades geológicas: i) Embasamento Cristalino: correspondente às rochas granito-gnáissicas Arqueanas a Proterozoicas; Supergrupo Rio das Velhas: *greenstone belt* Arqueano de rochas metavulcânicas e metassedimentares; Supergrupo Minas: rochas metassedimentares Proterozoicas; Supergrupo Estrada Real: rochas metassedimentares de bacia restrita Pré-Cambriana; Depósitos Cenozoicos: correspondentes a depósitos sedimentares recentes em bacias restritas.



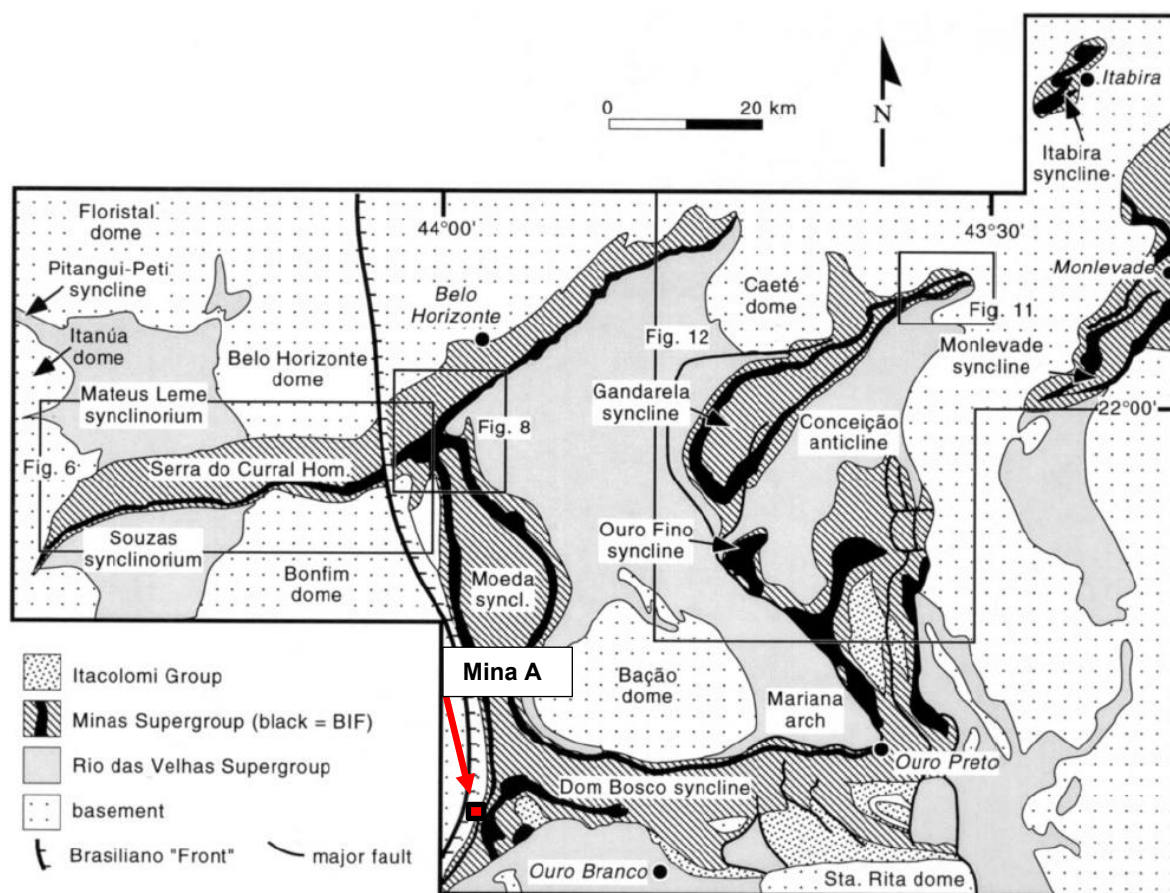


Figura 9 – Mapa Geológico destacando as principais feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero e o posicionamento da mina A (quadrado vermelho). Fonte: Alkmim e Marshak (1998).

## 3.2 Geologia Local

### 3.2.1 Estratigrafia

A Mina A abrange xistos do Grupo Nova Lima (Supergupo Rio das Velhas), de idade arqueana, bem como as unidades paleoproterozoicas do Supergupo Minas, representadas pelo quartzito da Formação Moeda, filitos da Formação Batatal (ambos do Grupo Caraça) e os itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira). Rochas máficas intrusivas mais jovens cortam ambos os supergrupos e coberturas cenozoicas coluvionares recobrem a borda da cava. Zonas de cisalhamento compressionais dúcteis (falhas de empurrão) de direção NW-SE constituem o contato entre o Grupo Nova Lima e as unidades do Supergupo Minas (Figura 10).

O Gr. Nova Lima (Supergupo Rio das Velhas) aflora preferencialmente na porção leste e sul da cava, sendo representado por mica xistos de coloração variegada entre branco, ocre, marrom, roxo, vermelho e verde. Pode ocorrer intercalado a lentes quartzíticas de até 20 cm de espessura. No limite sul da área é limitado por uma zona de cisalhamento e apresenta texturas miloníticas.

A Formação Moeda (Supergupo Minas/Grupo Caraça) ocorre na crista da serra e consiste principalmente em ortoquartzitos de cor predominantemente branca, com

lâminas róseas ou pretas, granulação muito fina à grossa, com presença de minerais micáceos em menor quantidade. Apresentam foliação e estruturas sedimentares reliquias (acamamento e estratificações cruzadas tabulares e acanaladas).

A Formação Batatal (Supergrupo Minas/Grupo Caraça), da qual foram coletadas as amostras utilizadas no presente estudo, é composta por filitos sericíticos de cor predominantemente cinza claro, podendo apresentar coloração marrom, ocre, rosa avermelhada e branca. A composição dos filitos é predominantemente micácea (sericita) com contribuição quartzosa em menor escala. Na região da área de operação, o filito apresenta-se em contato com a rocha intrusiva e com itabiritos. O contato da Fm. Batatal com os itabiritos do Gr. Itabira acontece de maneira gradual, em que normalmente o itabirito silicoso vai se tornando cada vez mais goethítico.

A Formação Cauê (Supergrupo Minas/Grupo Itabira) é composta, na área da cava, por itabiritos silicosos e goethíticos. O bandamento varia de milimétrico a centimétrico. Os itabiritos goethíticos apresentam coloração ocre-alaranjada com bandas pretas, comumente menos resistentes que os itabiritos silicosos, de granulação argila a areia fina, por vezes areia média. Em algumas áreas, os itabiritos silicosos e o goethíticos encontram-se intercalados.

A rocha intrusiva aflora com composição máfica intrudindo as rochas do Sg. Minas e, ocasionalmente, é possível identificar metamorfismo de contato. No contato da intrusiva com o itabirito, este apresenta composição mais magnetítica e maior resistência.

A cobertura coluvionar tem cor vermelha, com matriz silto-argilosa e clastos que variam de areia a grânulo, com presença de blocos.

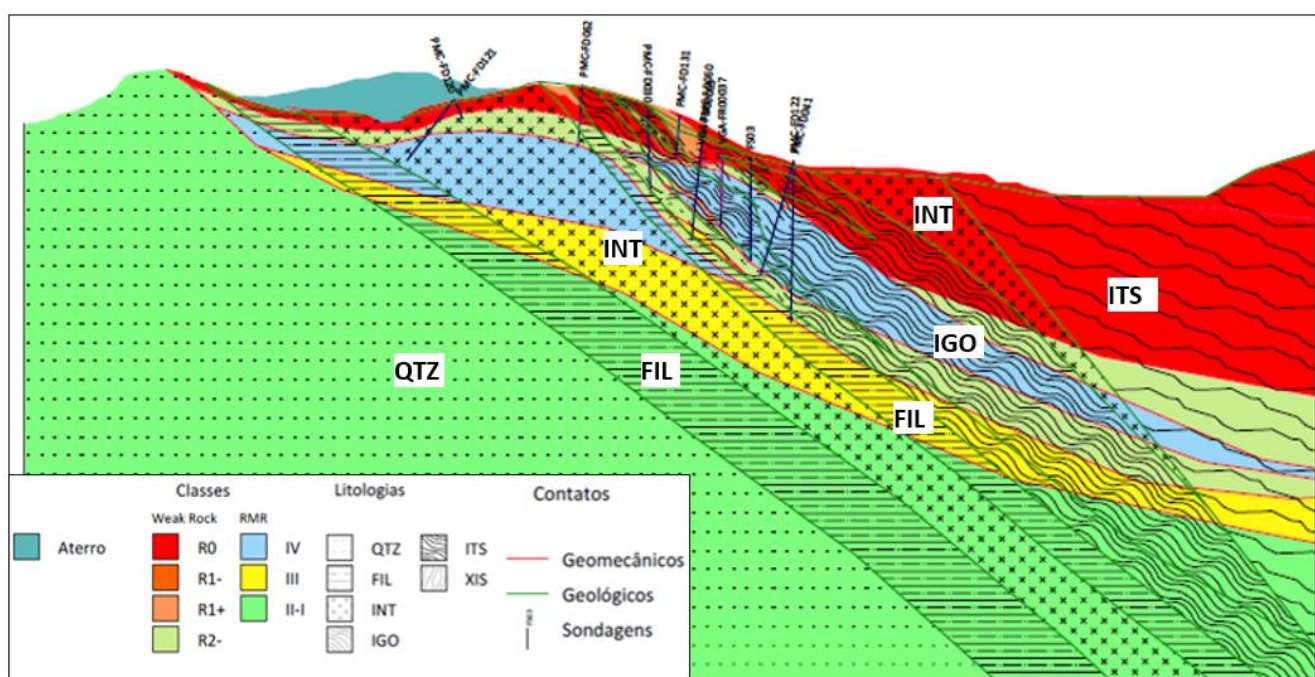


Figura 10 – Seção Geológico-Geomecânica da Mina A. QTZ – Quartzito; FIL – Filito; INT – Rocha intrusiva; IGO – Itabirito Goethítico; ITS – Itabirito Silicoso. Fonte: Mina A.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os blocos indeformados de filito da Formação Batatal coletados na Mina A foram selecionados com base no mapeamento geológico-geomecânico previamente realizado na cava sob supervisão do presente autor. Desta forma, para cada um dos blocos coletados tem-se um ponto de mapeamento de campo correlato. Todos os blocos coletados foram descritos e definidos pelo autor como saprólitos de filito com grau intempérico W5 e resistência R1- (1-3 MPa; Cella et al., 2020). A determinação da resistência foi baseada em critérios tátil-visuais associado a testes de resistência ao martelo, à penetração pela lâmina do canivete e a quebra mecânica. Duas lâminas petrográficas polidas foram confeccionadas para cada um dos blocos, AM-242 e AM-276, em um total de quatro, e permitiram um detalhamento da trama dos blocos, sua mineralogia e seu grau intempérico.

Na Tabela 1 encontram-se listados os 9 blocos coletados na Mina A. Destaca-se que no presente trabalho são apresentados apenas os blocos dos quais houve amostras (CPs) efetivamente ensaiadas. Contudo, houve outros blocos coletados dos quais não foram realizados ensaios devido à quebra mecânica e a problemas durante a moldagem dos CPs.

Tabela 1 – Relação de blocos indeformados coletadas na Mina A e ensaiadas no laboratório da empresa CHAMMAS.

Nº do Bloco	Estação de Campo	Unidades Geológicas
AM-263 e AM-267	VG-02	Filito – Fm. Batatal
AM-243	VG-13	
AM-276	VG-03	
AM-229	VG-15	
AM-239	VG-04	
AM-231	VG-05	
AM-241	VG-04G	
AM-242	VG-04	

##### 4.1 Laboratório e Normas

Os ensaios foram realizados no laboratório da empresa Chammas, localizado no bairro Jardim Canadá, Nova Lima-MG, e suportados pelas normas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Normas empregadas na realização dos ensaios triaxiais e ensaios de caracterização física.

Norma	Ano
ASTM D4767 - Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils	2020
ASTM D7181 - Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soil	2020
NBR 7.181 – Análise Granulométrica	2018
NBR 6458 - Determinação da Massa Específica dos Grãos	2017
NBR 16867 - Determinação da Massa Específica Aparente	2020
NBR 6457 - Umidade Natural	2016

#### 4.2 Proposição – Procedimento para Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Saprólito

O procedimento para determinação de parâmetros geotécnicos de saprólitos ( $\leq R1+$ ; rocha branda) a partir de ensaios triaxiais é apresentado na Figura 11 e contempla seis etapas principais: I) amostragem, descrição geológico-geomecânica e caracterização petrográfica microscópica; II) talhagem dos CPs; III) determinação das propriedades índices; IV) determinação das tensões confinantes; V) análise dos ensaios triaxiais e VI) análise integrada. Parte das etapas consideradas no procedimento proposto são de praxe em trabalhos desta natureza. Contudo, não são normalmente apresentadas nem avaliadas de forma sistemática e integrada, o que dificulta a correlação entre diferentes tipos de saprólitos ensaiados. Em especial a avaliação dos mecanismos de ruptura, a análise do comportamento deformacional não é usualmente realizada, a despeito de aportarem informações importantes sobre o comportamento geotécnico dos materiais.

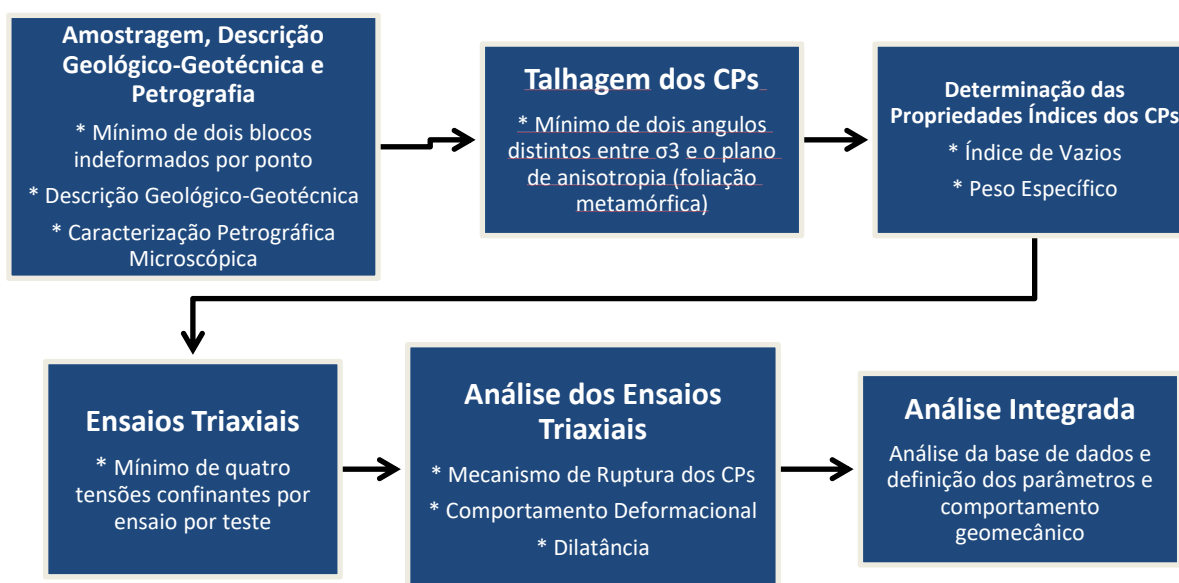


Figura 11 – Procedimento para determinação dos parâmetros geomecânicos de saprólitos (rocha branda) via a realização de ensaios triaxiais.

#### 4.2.1 Amostragem, Descrição Geológico-Geomecânica e Petrografia Microscópica

Foram coletados dois blocos indeformados por ponto, visando assegurar um número mínimo de amostras para o desenvolvimento dos ensaios triaxiais. Os blocos indeformados coletados são representativos dos filitos da Formação Batatal e foram descritos seguindo os requisitos mínimos: natureza da rocha de origem; estimativa da resistência à compressão não-confinada (conforme Cella et al., 2020); grau intempérico (ISRM 1981), granulometria, *fabric*/trama (e.g. foliada, bandada etc.) e plasticidade. Esses parâmetros são elementos básicos para a descrição de um saprólito e, considerando um cenário hipotético de trabalho, a natureza da rocha é crucial para se determinar qual característica deve ser detalhada.

A caracterização petrográfica dos filitos da Formação Batatal foi realizada com suporte de microscópio de modelo Zeiss AxioLab 5 KMAT de luz transmitida e refletida, disponibilizado pelo Labtec, localizado no Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Foram confeccionadas quatro lâminas polidas, sendo duas seções para o bloco AM-242 e duas lâminas polidas para o bloco AM-276.

#### 4.2.2 Talhagem dos Corpos de Prova (CPs)

Os corpos de prova foram talhados de forma que a foliação metamórfica (paralela ao acamamento sedimentar) estabelecesse duas faixas de ângulos com relação à direção da tensão confinante ( $\sigma_3$ ). Na relação geométrica entre as direções de  $\sigma_3$  e a foliação metamórfica, foi considerado sempre o ângulo agudo (Figura 12). O intuito desta abordagem é a verificação se uma potencial anisotropia de resistência dos corpos de prova em função da foliação metamórfica.

- Corpos de Prova S1 – Foram talhados de forma que a direção de confinamento ( $\sigma_3$ ) estabelecesse um ângulo com a foliação metamórfica (plano de anisotropia) em torno de 45°, variando aproximadamente entre 35° e 50° (Figura 12A e Figura 12B);
- Corpos de Prova S2 – Foram talhados de forma que a direção de confinamento ( $\sigma_3$ ) estabelecesse um ângulo foliação metamórfica (plano de anisotropia) igual ou superior à 70° (Figura 12C e Figura 12D).

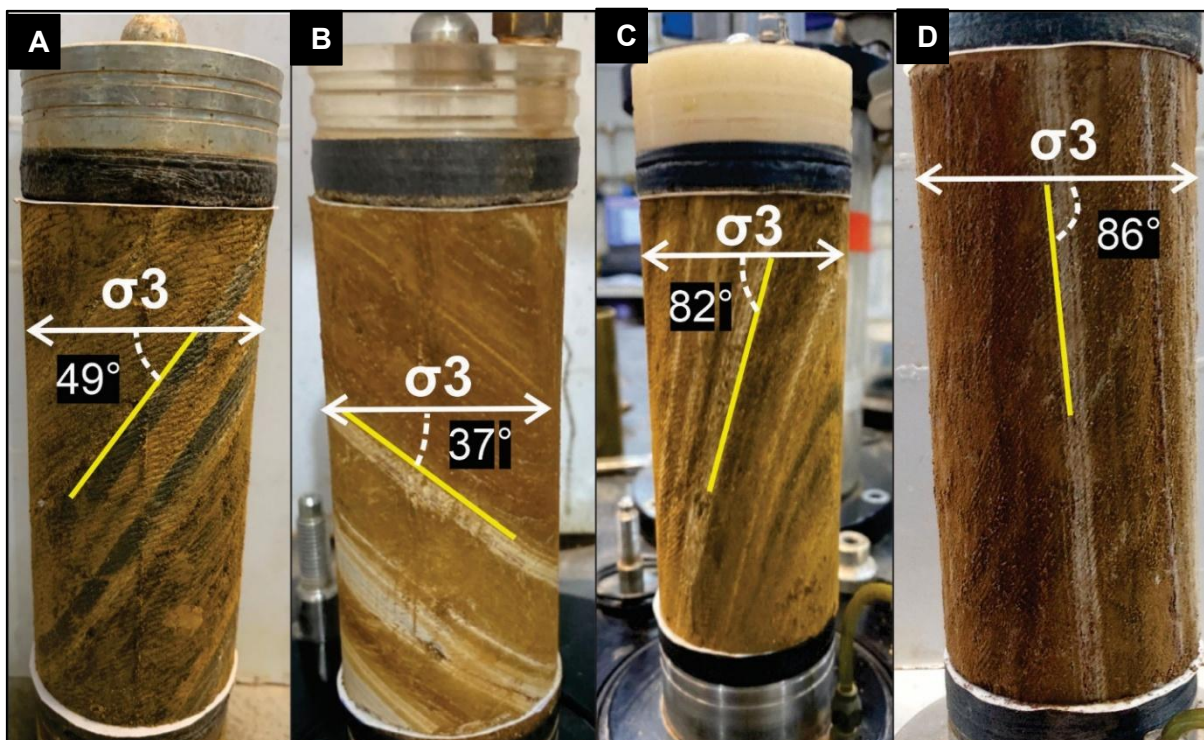


Figura 12 – Corpos de prova de filito. A) e B) representam corpos de prova talhados segundo o padrão S1; C) e D) representam corpos de prova talhadas segundo padrão S2.

#### 4.2.3 Determinação das Tensões Confinantes Empregadas no Ensaio Triaxial

A tensão confinante definida para ensaios triaxiais deve considerar o objetivo da análise. Especificamente, em taludes/cavas a céu aberto o valor de  $\sigma_3$  máximo tem como referência as tensões atuantes ao longo de uma potencial superfície de ruptura global nos taludes (Martin e Stacey, 2018). A Figura 13 exemplifica este cenário e apresenta as estimativas da tensão  $\sigma_3$  via uma análise tensão x deformação. Neste trabalho, considerou-se que uma potencial superfície de ruptura global estaria presente a cerca de 30 m de profundidade. Desta forma, definiu-se uma tensão máxima de confinamento equivalente a 600 kPa considerando um peso específico de  $2,0 \text{ g/cm}^3$  para o pacote de saprólitos sobrejacente ao plano de ruptura. As demais tensões confinantes empregadas foram 400 kPa, 200 kPa e 100 kPa considerando potenciais superfícies de rupturas mais rasas.

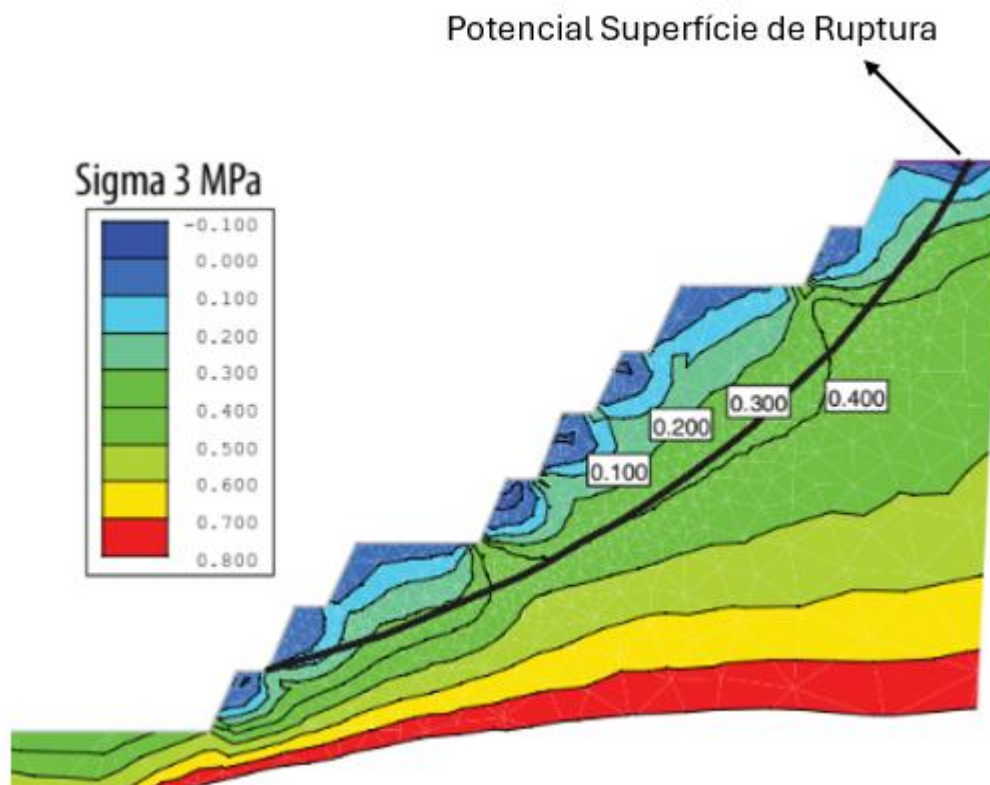


Figura 13 – Análise tensão x deformação com a estimativa dos valores de  $\sigma_3$  ao longo de uma potencial superfície de ruptura global (Martin e Stacey, 2018).

#### 4.2.4 Determinação das Propriedades Índices

Neste trabalho foram selecionados o peso específico saturado e o índice de vazios como parâmetros correlacionáveis as propriedades de resistência e deformacionais dos saprólitos. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas listadas na

#### 4.2.5 Análise dos Ensaio Triaxiais

A análise dos resultados dos ensaios triaxiais envolveu diferentes elementos que seguem discriminados adiante.

##### i) Determinação do Mecanismo de Ruptura do Corpo de Prova

Consistiu na etapa de classificação visual do mecanismo de ruptura em cisalhamento com controle estrutural (foliação metamórfica/acamamento), cisalhamento obliquo e flambagem/deformação.

##### ii) Determinação das Tensões de Ruptura dos Corpos de Prova

Conforme sugerido Head e Epps (2006) e Lade (2016) foram considerados os seguintes critérios na determinação das tensões de ruptura dos corpos de prova:

- Tensão Desviadora Máxima ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) – critério tradicionalmente empregado, no qual se considera que a ruptura ocorre sob a maior diferença entre as tensões verticais

e horizontais ( $\sigma_1$ – $\sigma_3$ ). Em ensaios drenados tem-se apenas a variação de  $\sigma_1$  e se pode trabalhar com as tensões totais, enquanto em ensaios não-drenados com geração de poropressão deve-se trabalhar com as tensões efetivas;

- Máxima Razão Entre as Tensões Principais  $\sigma_1/\sigma_3$  – considera o maior valor da razão entre a tensão principal máxima e menor. Inicia-se com razões iguais a 1 tanto para ensaios CIU quanto CID. Pode ou não coincidir com a máxima desviadora. É normalmente sugerido para materiais argilosos nos quais ocorre o crescimento contínuo da tensão desviadora até elevadas deformações;
- Limite de deformação – Aplicado a solos em que grandes deformações são necessárias para se alcançar a resistência ao cisalhamento máxima. A ruptura é definida para uma determinada deformação limite ( $\epsilon_{lim}$ );
- Pico de Poropressão – Aplicado especificamente para ensaios não-drenados;
- Análise Gráfica – definição gráfica da ruptura no ponto de máxima curvatura considerando o gráfico da tensão desviadora ou da razão entre as tensões ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) versus deformação axial;

### iii) Análise das Curvas Tensão X Deformação

Nesta abordagem, realiza-se a análise das curvas tensão X deformação e classificação dos corpos de prova segundo diferentes comportamentos deformacionais. Neste trabalho foram considerados os comportamentos: elasto-plástico; elasto-frágil; *strain hardening* e *strain softening* mostrados na Figura 6. Esta análise visa estabelecer uma correlação entre o comportamento deformacional, o mecanismo de ruptura dos CPs e com os modelos numéricos constitutivos (Oka et al. 2002; Azadi et al. 2024).

### iv) Análise da Dilatância

Esta análise classifica os corpos de prova como de comportamento contrátil ou dilatante baseado na geração de poropressão (ensaios CIU) e na variação do volume (ensaios CID);

### v) Determinação do Módulo de Deformação e Coeficiente de Poisson

O cálculo de ambos os parâmetros é realizado especificamente nos ensaios triaxiais drenados (CID) conforme as Equações 2 e 3. O método da reta tangente foi aplicado sendo a reta definida à 50% da deformação de ruptura.

$$E = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta\epsilon_1 \quad (\text{Equação 2})$$

$\sigma_1$  – tensão principal maior  
 $\sigma_3$  – tensão principal menor

$$\nu = 1/2(1 - \Delta\epsilon_v / \Delta\epsilon_1) \quad (\text{Equação 3})$$

$\epsilon_1$  – Deformação Axial  
 $\epsilon_v$  – Deformação Volumétrica

#### 4.2.6 Análise Integrada

Esta etapa consiste na integração entre os dados geológico-geomecânicos e os índices físicos dos corpos de prova, bem como toda a gama de informações extraída dos ensaios triaxiais (e.g. comportamento deformacional, dilatância). Adiante, segue uma síntese das principais etapas que envolvem a análise integrada aplicada na presente dissertação.

- i) Separação dos blocos ensaiados em função dos índices físicos obtidos nos CPs (e.g. índice de vazios);
- ii) Análise e classificação dos CPs em função de seu mecanismo de ruptura;
- iii) Análise e classificação dos CPs em função de seu comportamento deformacional;
- iv) Análise e classificação dos CPs em função da dilatância, sendo separados em comportamento contrátil e dilatante (aplicado de forma restrita aos ensaios CIU);

Posteriormente, a análise integrada seguiu com o agrupamento de ensaios com base nos seguintes critérios:

- i) Blocos com similaridades entre seus índices físicos, mecanismos de ruptura dos CPs, comportamento deformacional, dilatância e parâmetros de resistência e deformabilidade foram agrupados; e
- ii) Para os blocos que atendem a primeira condição, foi realizado o agrupamento entre os ensaios CIU e CID, em casos específicos em que os ensaios CIU indicaram comportamento drenado (geração de poropressão negativa).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Caracterização dos Blocos Indeformados

Os blocos indeformados coletados foram classificados como saprólitos de filito que preservam à foliação metamórfica (paralela ao acamamento sedimentar) e possuem resistência R1- (1-3 MPa) e grau intempérico W5. Adiante é apresentado para cada bloco o registro fotográfico (Figura 14), bem como detalhes de sua composição/*fabric*, propriedades índices e curva granulométrica.

#### 5.1.1 Bloco - AM-229

Predominantemente siltoso, marcado pela intercalação entre camadas centimétricas a milimétricas de cor ocre, bege e marrom com eventuais camadas quartzo-arenosas brancas (Figura 14A). A distribuição granulométrica do bloco indicou 20% de argila (maior fração dentre todos os blocos), 64% de silte, 14% areia e 2% de pedregulho (Figura 15). Os 6 CPs ensaiados registraram peso específico médio saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é de 1,06.

#### 5.1.2 Bloco - AM-231

Predominantemente siltoso, marcado por intercalações entre camadas centimétricas a milimétricas de cor cinza, branca e bege-marrom com ocasionais níveis arenosos (areia fina) e goethíticos. As camadas siltosas são formadas essencialmente por filossilicatos (Figura 14B). A distribuição granulométrica indicou 13% de argila, 60% de silte, 17% areia e 10% de pedregulho (Figura 15). Os 4 CPs ensaiados registraram valor médio de peso específico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é de 1,01.

#### 5.1.3 Bloco - AM-239

Predominantemente siltoso, marcado pela intercalação entre camadas centimétricas a milimétricas de cor cinza, amarela e bege com presença pontual de camadas quartzo-arenosas (areia fina) de cor branca (Figura 14C). A distribuição granulométrica do bloco indicou 11% de argila, 85% de silte, 3% areia e 1% de pedregulho (Figura 15). Os 11 CPs ensaiados registraram valor médio de peso específico saturado 20 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 0,89.

#### 5.1.4 Bloco - AM-243

Predominantemente siltoso marcado pela intercalação entre camadas centimétricas a milimétricas de cor cinza, ocre/bege e marrom (Figura 14D). A distribuição granulométrica do bloco indicou 11% de argila, 81% de silte, 7% areia e 1% de pedregulho (Figura 15). Os 12 CPs ensaiados registraram valor médio de peso específico saturado de 19 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 1,25.

#### 5.1.5 Bloco - AM-242

Predominantemente siltoso, de cor amarela, bege e roxo (Figura 14E). A distribuição granulométrica indicou 4% de argila, 91% de silte, 4% areia e 1% de pedregulho (Figura 15). Os 7 CPs registraram valor médio de peso específico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. O índice de vazio médio é 0,80.

#### 5.1.6 Bloco - AM-241

Predominantemente siltoso, de cor amarela, bege e roxo (Figura 14F). A distribuição granulométrica indicou 9% de argila, 77% de silte, 12% areia e 2% de pedregulho (Figura 15). Os 3 CPs ensaiados registraram valor médio de peso específico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 0,87.

#### 5.1.7 Bloco - AM-263 e Bloco AM-267

Os blocos AM-263 e AM-267 foram coletados no mesmo ponto. Predominantemente silto-arenoso formado pela intercalação entre camadas centimétricas a milimétricas siltosas e arenosas. As camadas siltosas predominam no bloco, possuem cor marrom, bege e branca são coesas e formadas por micas, argilominerais e hidróxidos de ferro. As camadas de areia fina são essencialmente friáveis (Figura 14G; Figura 14H). A distribuição granulométrica indicou 15% de argila, 52% de silte, 33% areia (maiores concentrações dentre todos os blocos) e ausência de pedregulho (Figura 15). Os 12 CPs ensaiados do bloco AM-263 registraram valor médio de peso específico saturado de 17,5 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 1,78. Os 8 CPs ensaiados do bloco AM-267

apresentam valor médio de peso específico saturado de 18,5 KN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 1,66.

#### 5.1.8 Bloco - AM-276

Predominantemente siltoso formado pela intercalação entre camadas centimétricas a milimétricas de cor ocre, preta e marrom. Ainda ocorrem camadas quartzo-arenosas (Figura 14). A distribuição granulométrica indicou 19% de argila, 68% de silte, 12% areia e 1% de pedregulho (Figura 15). Os 16 CPs ensaiados do bloco AM-276 registraram valor médio de peso específico saturado de 18,5 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazio médio é 1,72.

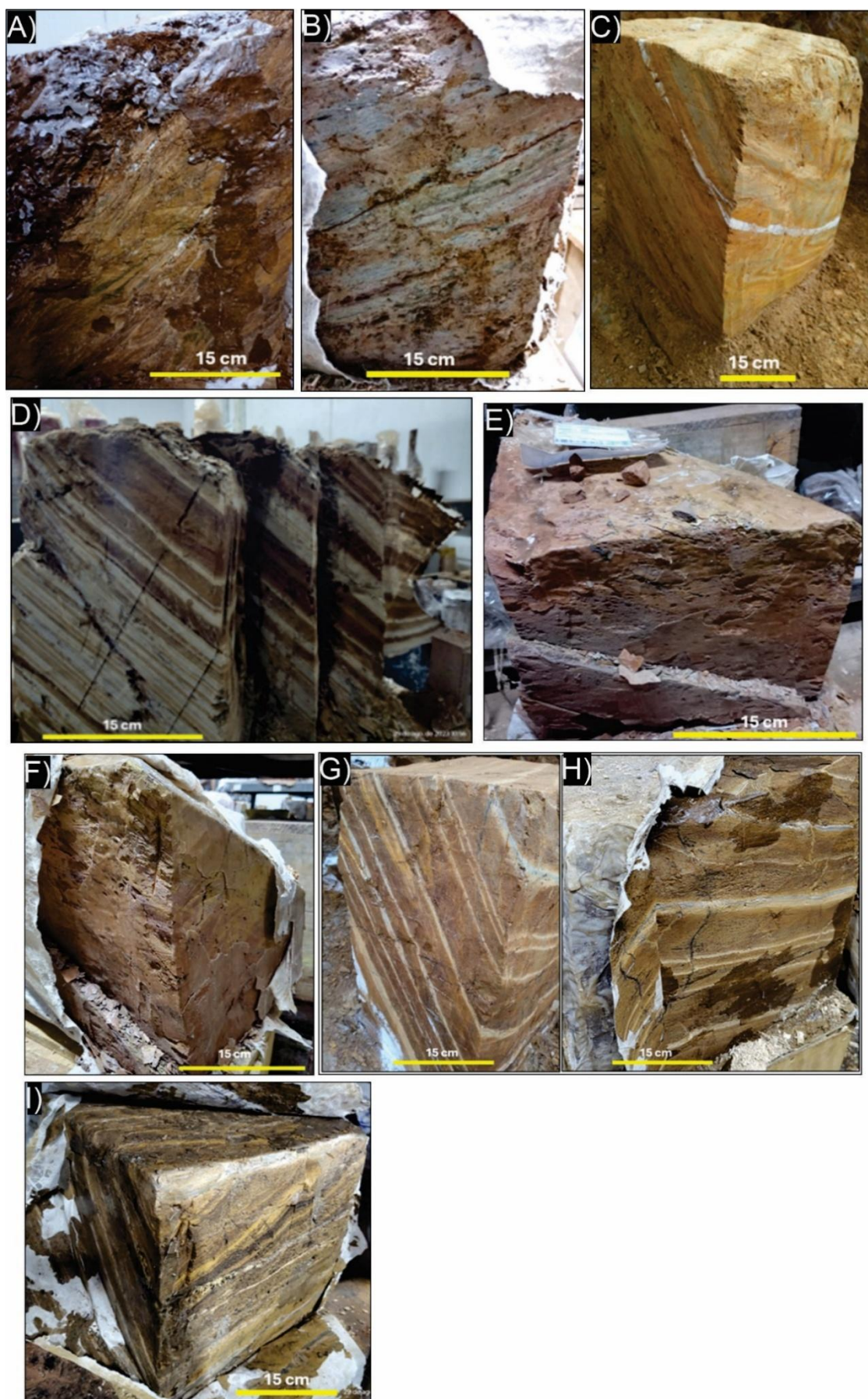


Figura 14 – A) Bloco AM-229; B) Bloco AM-231; C) Bloco AM-239; D) Bloco AM-243; E) Bloco AM-242; F) Bloco AM-241; G) Bloco AM-263; H) Bloco AM-267 e I) Bloco AM-276.

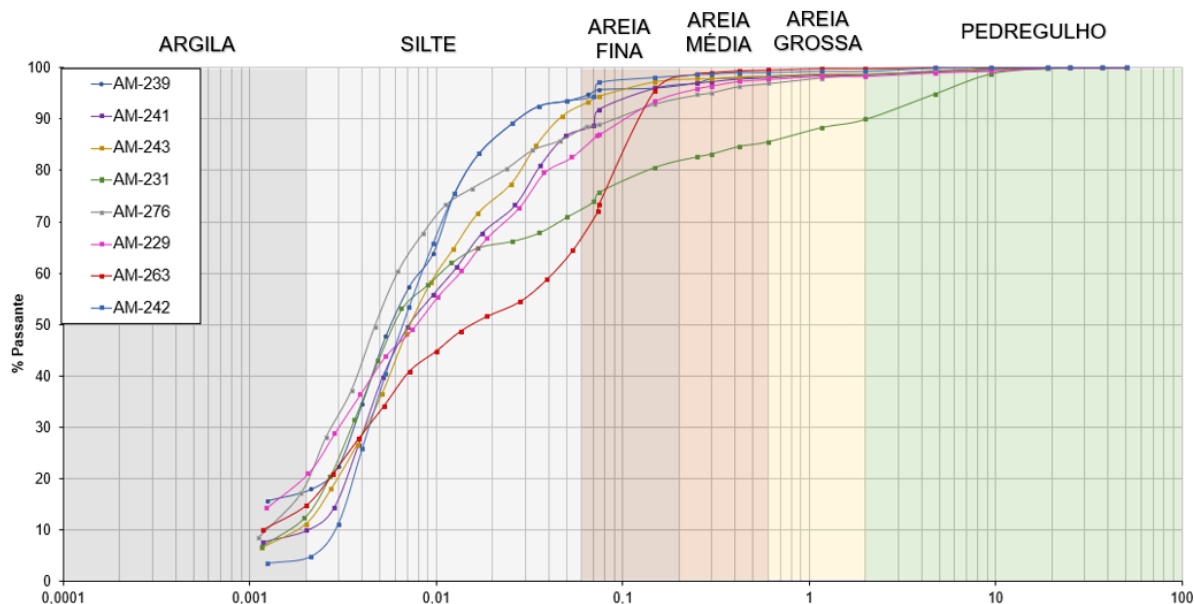


Figura 15 – Curvas granulométrica dos blocos de filito coletados e ensaiados.

## 5.2 Caracterização Petrográfica Microscópica

As lâminas polidas foram confeccionadas para os blocos AM-242 e AM-276. O processo de seleção dos blocos a serem descritos considerou o contraste nos valores do índice de vazios, sendo o valor médio de 0,80 obtido o bloco AM-242 e 1,72 obtido para o bloco AM-276.

A caracterização petrográfica do bloco AM-242 registrou uma granulação fina, inequigranular e trama granolepidoblástica. Sua mineralogia é dada, em ordem de abundância, por sericita, quartzo, caulinita e goethita (Figura 16A e Figura 16B). A sericita e a caulinita consistem em minerais secundários, sendo o último constituído a partir da quebra da estrutura da muscovita (hidrólise). A goethita também configura em um mineral secundário sendo formada a partir da hidratação da hematita. Pontualmente foram observadas porções das lâminas com o predomínio de sericita e caulinita (Figura 16C e Figura 16D). A caracterização petrográfica do bloco AM-276 registrou granulação fina, inequigranular, com a elevada conversão da sericita em caulinita, culminando na perda de parte da trama metamórfica, que passa a ser percebida apenas pela orientação do quartzo. Ocorre ainda na lâmina bolsões de quartzo isolados (Figura 16E e Figura 16F).

A intensidade da conversão da muscovita em sericita e em uma massa de caulinita, foi o principal critério na determinação do grau intempérico. O bloco AM-242 foi classificado como de grau intempérico W4 e caracteriza-se por ainda ser possível a identificação de muscovita e pela presença predominante de sericita. No bloco AM-276 a sericita segue como o mineral de maior abundância, contudo, ocorre associada a expressiva presença de caulinita.

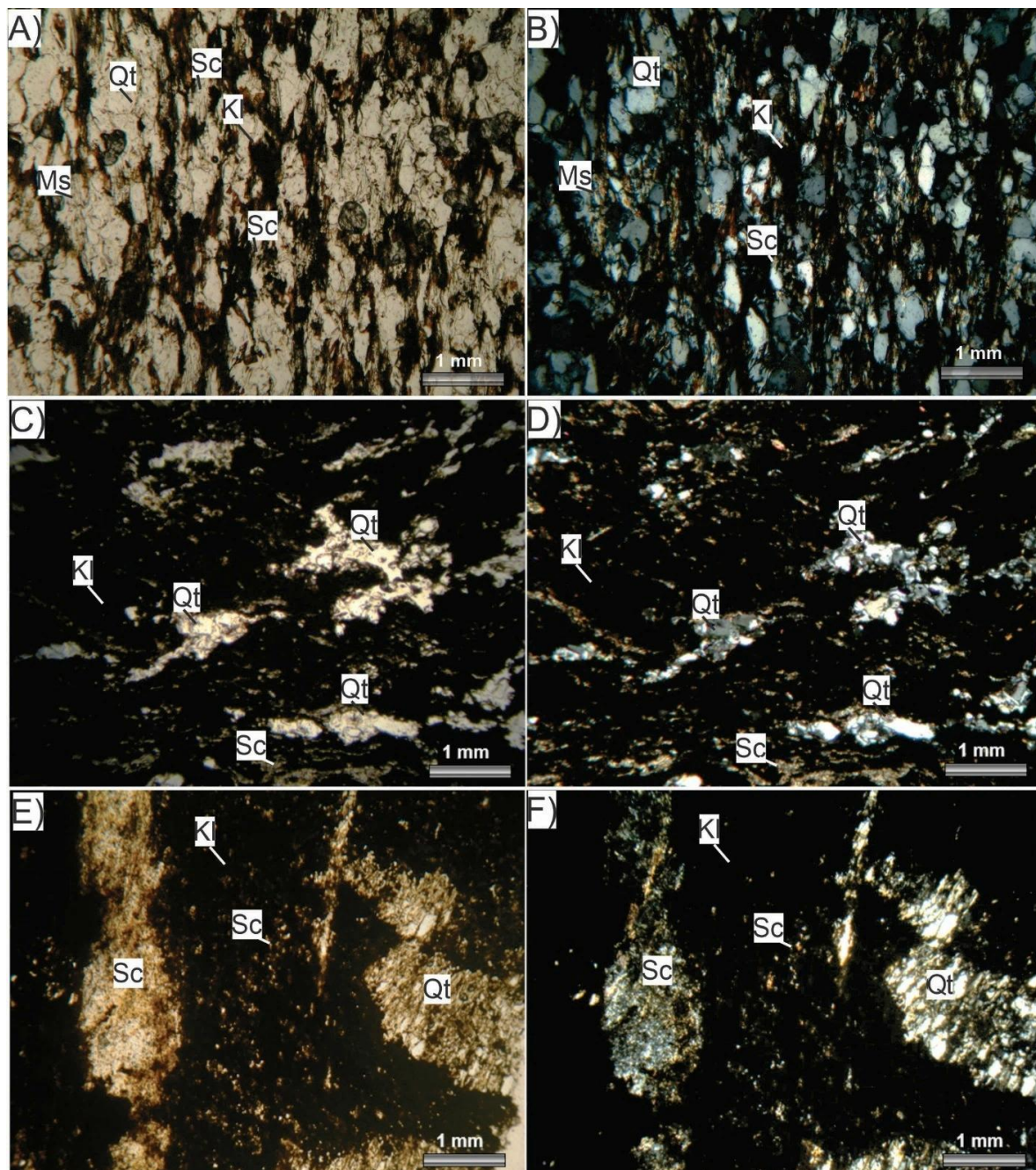


Figura 16 – Fotomicrografias das lâminas polidas confeccionadas para os blocos AM-242 (A, B, C e D) e AM-276 (E e F). A) e B) registram saprólito de filito com textura granolepidoblástica marcada pela presença de quartzo e muscovita. Parte da muscovita está convertida em sericita e caulinita; C) e D) registram a alternância entre horizontes sericíticos e quartzosos parcialmente preservados, em meio a massa de argilomineral; E) e F) registram a sericita associada a expressiva presença de caulinite e bolsões de quartzo. Fotomicrografias A, C e E (nicóis cruzados) e fotomicrografias B, D e F (nicóis descruzados). Qt – quartzo; Ms – muscovita; Kl – caulinita; Sc – sericita.

### 5.3 Ensaios Triaxiais Consolidados Drenados e Não-Drenados

Os ensaios CID e CIU foram realizados considerando os padrões de talhagem dos corpos de prova S1 ( $\sim 45^\circ$ ) e S2 ( $> 70^\circ$ ), culminando assim no conjunto de ensaios CIU-S1, CIU-S2, CID-S1 e CID-S2. Os corpos de prova foram submetidos às tensões confinantes de 100 KPa (CP-A), 200 KPa (CP-B), 400 KPa (CP-C) e 600 KPa (CP-D). Idealmente, a sistemática de trabalho culminava na realização de 16 ensaios triaxiais

por bloco, sendo 8 ensaios CIU (4 S1 e 4 S2) e 8 ensaios CID (4 S1 e 4 S2). Contudo, o número de ensaios triaxiais previsto no procedimento foi implementado de maneira integral apenas nos blocos AM-276, AM-243 e AM-239, já que problemas associados à quebra mecânica dos blocos/CPs, à talhagem dos CPs e ensaios triaxiais invalidados, reduziram o montante de ensaios para os demais blocos. Em um total de 80 CPs inicialmente previsto foram, de fato, empregado nas análises 72 CPs. A redução no montante total de ensaios triaxiais inicialmente previstos não impediu que os demais elementos contidos no procedimento fossem seguidos, resultando apenas em um menor volume de informações a serem tratadas.

Os blocos ensaiados foram classificados com base em suas propriedades índices, no mecanismo de ruptura dos CPs, no comportamento deformacional, na dilatância e nos parâmetros geomecânicos (Tabela 3). Os blocos que apresentaram similaridades entre todos os critérios supracitados, foram agrupados nos grupos 1, 2, 3 e 4. A constituição dos grupos tem como principal finalidade a determinação dos parâmetros geomecânicos e do comportamento mecânico dos saprólitos a partir de uma ampla base de dados, reduzindo assim o efeito de eventuais outliers.

Os grupos 1 e 2 contemplam saprólitos com índice de vazios superior à 1,2 e envolvem a análise de um mesmo conjunto de blocos 243, 263, 267 e 276 que foram ensaiados sob condição drenada no caso do grupo 1 (ensaios CID-S1 e CID-S2) e sob condições não-drenadas no grupo 2 (CIU-S1 e CIU-S2). Os grupos 3 e 4 representam saprólitos com índice de vazios inferiores a 1,0. Estes materiais apresentam maior rigidez, o que dificultou o processo de talhagem dos corpos de prova e culminou em um menor número de ensaios. Os ensaios realizados nos grupos 3 e 4 registraram materiais com comportamento essencialmente dilatante e rupturas por cisalhamento controladas pela foliação nos ensaios S1 e oblíqua à foliação nos ensaios S2. O grupo 3 abrangeu os ensaios S1 não-drenados (blocos 229, 239 e 241) e drenado (bloco 239) enquanto o grupo 4 abrangeu os ensaios S2 sob condição drenada e não-drenada dos blocos 239 e 242.

Tabela 3 – Compilação dos ensaios triaxiais CIU e CID no contexto da Análise Integrada dos Dados.

Blocos	Número de CPs	Tipo de Ensaio	$\sigma_3 \times$ Foliação	Mecanismo de Ruptura	$\Phi'$	$C'$ (KPa)	Comportamento Deformacional	Dilatância	E (MPa)	$\nu$	$\gamma_{Sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$e$
267 Grupo 1	4	CID	S1-45°	Flambagem (CP-C – Cisalhamento na foliação)	22	22	100-200 KPa – Elasto-plástico 400 -600 KPa – <i>Strain Hardening</i>	-	51,23	0,16	1,92	1,59
267 Grupo 1	4	CID	S2≥70°	Flambagem (CP-C – Cisalhamento na foliação)	21	20	<i>Strain Hardening</i> (100 KPa - Elasto-plástico)	-	51,4	0,23	1,75	1,74
276 Grupo 1	4	CID	S1-45°	CP-01 e 03 - Cisalhamento na foliação CP-02 e 04 - Flambagem	18	61	<i>Strain Hardening</i> (100 KPa - Elasto-plástico)	-	17,35	0,18	1,85	1,70
276 Grupo 1	4	CID	S2≥70°	Flambagem	25	16	100-200 KPa – Elasto-plástico 400-600 KPa – <i>Strain Hardening</i>	-	31,08	0,07	1,88	1,65
263 Grupo 1	4	CID	S1-45°	Flambagem	18	29	200-600 KPa - <i>Strain Hardening</i> 100 KPa – Elasto-plástico 400 KPa - <i>Strain Softening</i>	-	46,0	0,10	1,85	1,88
263 Grupo 1	4	CID	S2≥70°	Flambagem	26	21	Elasto-plástico (600 KPa – <i>Strain Hardening</i> )	-	59,4	0,17	1,64	1,72
243 Grupo 1	4	CID	S1-45°	CP-02 e 04 - Cisalhamento na foliação CP-01 e 03 - Flambagem	18	35	100-200 KPa – Elasto-plástico 400-600 KPa – <i>Strain Hardening</i>	-	66	0,18	1,90	1,26
243 Grupo 1	4	CID	S2≥70°	Flambagem	26	14	100 KPa - Elasto-plástico <i>Strain Hardening</i>	-	97,09	0,22	1,90	1,23
263 Grupo 2	3	CIU	S2≥70°	Flambagem	17	21	Elasto-plástico	Contrátil	-	-	1,77	1,76
276 Grupo 2	3	CIU	S1-45°	Cisalhamento na foliação	19	0	100-200 KPa -Elasto-plástico 400-600 KPa- <i>Strain Softening</i>	Contrátil	-	-	1,85	1,73

Blocos	Número de CPs	Tipo de Ensaio	$\sigma_3 \times$ Foliação	Mecanismo de Ruptura	$\Phi'$	$C'$ (KPa)	Comportamento Deformacional	Dilatância	E (MPa)	$\nu$	$\gamma_{Sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$e$
276 Grupo 2	3	CIU	S2 $\geq$ 70°	Flambagem (CP- D – Cisalhamento oblíquo)	20,5	15	<i>Strain Softening</i> (100 KPa - Elasto-plástico)	Contrátil	-	-	1,75	1,78
243 Grupo 2	4	CIU	S1-45°	Cisalhamento na foliação	18	32	Elasto-frágil (200 KPa – <i>Strain-Softening</i> )	Contrátil	-	-	1,9	1,25
243 Grupo 2	4	CIU	S2 $\geq$ 70°	Cisalhamento Oblíquo	22	24	Elasto-plástico; (400 KPa - <i>Strain Softening</i> )	Contrátil (100 KPa – Dilatante)	-	-	1,87	1,25
229 Grupo 3	4	CIU	S1-45°	Cisalhamento na foliação	29,5	42,5	200 KPa-600 KPa - <i>Strain Softening</i> 100 KPa-400 KPa - Elasto-plástico	Dilatante (600 KPa – Contrátil)	-	-	1,97	1,03
241 Grupo 3	3	CIU	S1-45°	Cisalhamento na foliação	27,5	12	Elasto-frágil (200 KPa – Elasto-plástico)	Dilatante	-	-	1,98	0,87
239 Grupo 3	4	CIU	S1-45°	Cisalhamento Oblíquo/Cisalhamento na foliação	27	18	<i>Strain Hardening</i>	Dilatante	-	-	1,99	0,87
239 Grupo 3	3	CID	S1-45°	Cisalhamento na foliação (CP-D - Flambagem)	19	55	Elasto-frágil (600 KPa - <i>Strain Hardening</i> )	-	109,08	0,22	1,98	0,86
239 Grupo 4	4	CID	S2 $\geq$ 70°	Cisalhamento Oblíquo	23	60	200 KPa - Elasto-plástico 400-600 KPa – <i>Strain Softening</i>	-	102,30	0,22	1,95	0,89
242 Grupo 4	3	CID	S2 $\geq$ 70°	Cisalhamento Oblíquo	29	150	Elasto-frágil	-	345,22	0,31	1,97	0,80
242 Grupo 4	4	CIU	S2 $\geq$ 70°	Cisalhamento Oblíquo	32	100	Elasto-frágil	Dilatante	-	-	2,00	0,82

### 5.3.1 Grupo 1

O grupo 1 contempla os ensaios CID-S1 e CID-S2 realizados nos blocos 243, 263, 267 e 276. Ao total foram ensaiados 29 CPs que indicaram valores de índice de vazios entre 1,22 e 1,88, sendo a mediana e média iguais a 1,67 e 1,57, respectivamente. Os valores do peso específico saturado variam entre 17,50 kN/m<sup>3</sup> e 19,20 kN/m<sup>3</sup> com mediana e média iguais à 18,6 kN/m<sup>3</sup> e 18,3 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos do peso específico saturado e índice de vazios do Grupo 1.

<b>Blocos 243, 263, 267 e 276 (29 CPs)</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>γ saturado (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18,3	18,6	0,097	5,28%	16,4	19,2
<b>Índice de Vazios</b>	1,57	1,67	0,237	15,08%	1,23	1,88

De maneira geral, os ensaios CID's S1 (~45°) e S2 (>70°) registraram a flambagem (Figura 17) como o principal mecanismo de ruptura dos corpos de prova, sendo a ruptura por cisalhamento ao longo da foliação também observada, mas de forma pontual nos blocos 243 e 276. No que se refere ao comportamento deformacional dos materiais, para tensões entre 100 KPa e 200 KPa foi constatado um comportamento elasto-plástico, enquanto para as tensões entre 400 KPa e 600 KPa observou-se um comportamento *strain hardening* predominante (Figura 17; Figura 18), em especial para maiores tensões confinantes.

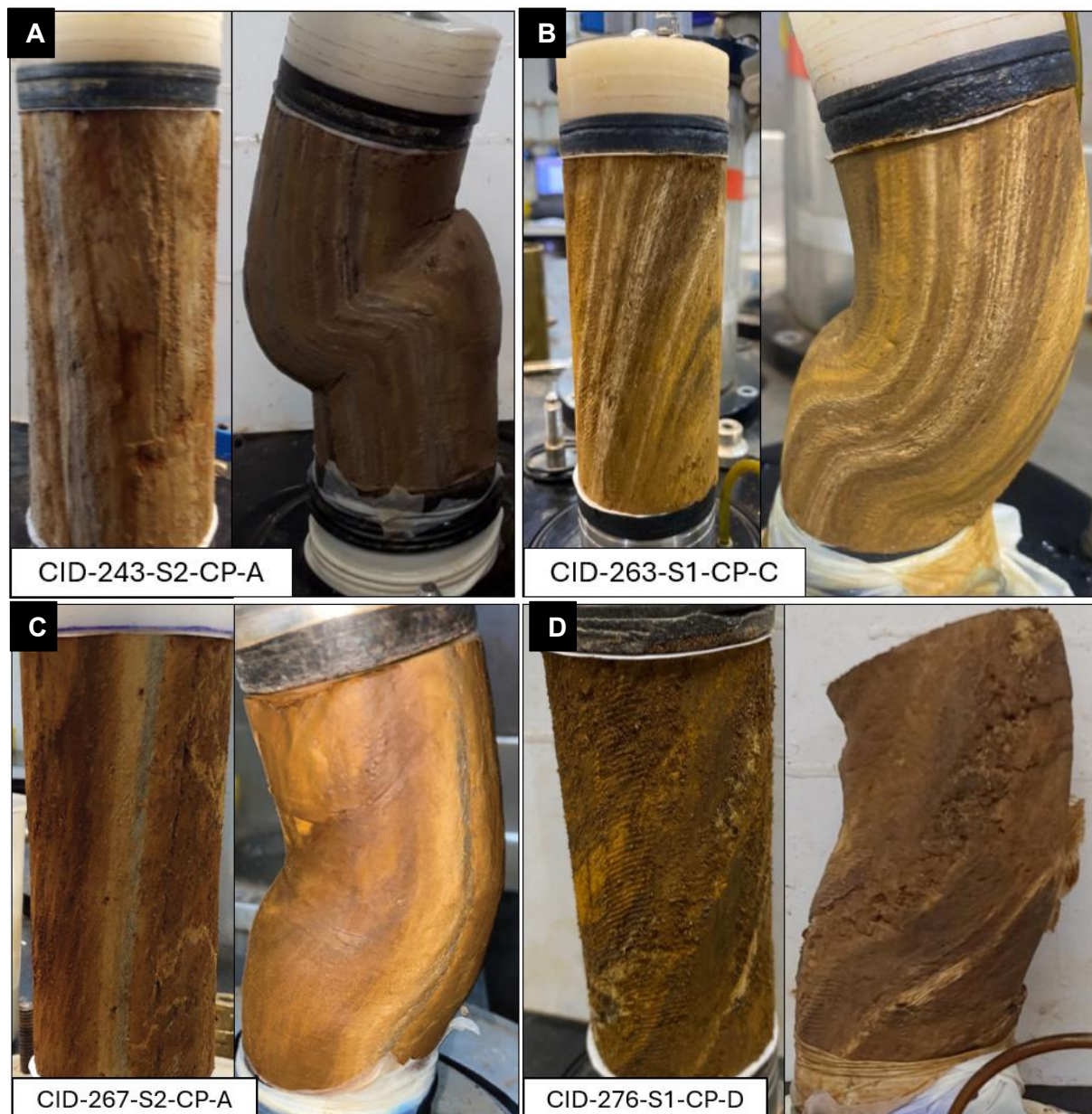


Figura 17 – Registro fotográfico de CPs do Grupo 1 pré e pós ruptura As figuras A, B, C e D exibem fotografias dos CPs onde se observa à flambagem como principal mecanismo de ruptura dos CPs.

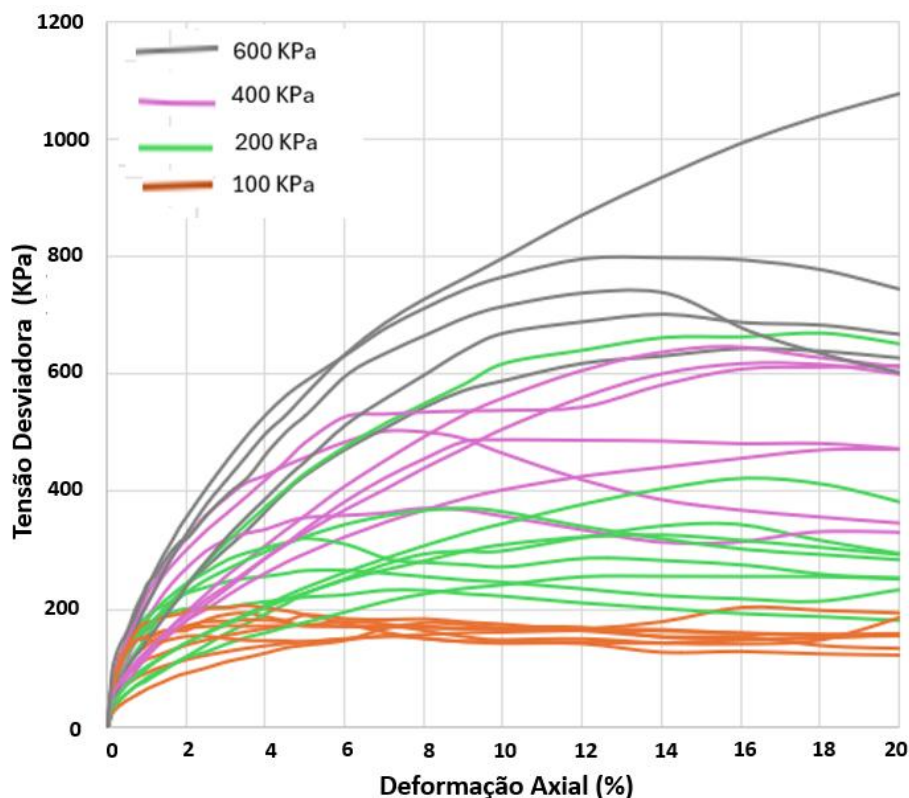


Figura 18 – Gráfico Tensão Desviadora X Deformação Axial. Os ensaios com tensões confinantes entre 100 KPa e 200 KPa apresentando comportamento, em geral, elasto-plástico. Os ensaios para as tensões confinantes de 400 KPa e 600 KPa apresentando comportamento, em geral, como *strain hardening*.

Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e intercepto coesivo, foram definidos para cada um dos blocos ensaiados, agrupando os ensaios S1 e S2 uma vez que não foi observado um claro controle estrutural na ruptura dos CPs. Ainda, nos CPs onde pontualmente o controle estrutural foi observado, a tensão de pico não registrou um comportamento anômalo. O resultado dos ensaios CID realizados para os blocos 243, 263, 267 e 276 encontram-se apresentados em diagramas  $t \times S$  (Figura 19). Os valores de ângulo de atrito variaram entre  $18^\circ$  e  $22^\circ$  graus com mediana e média iguais a  $21^\circ$  e  $20,5^\circ$ . O intercepto coesivo variou entre 11,50 KPa e 31 KPa com mediana e média iguais a 20,75 KPa e 21 KPa. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi acima de 0,90 em todos os diagramas.

Os parâmetros deformacionais módulo de deformação e coeficiente de Poisson estão apresentados, para cada um dos blocos, na Tabela 3. A Tabela 5 apresenta um tratamento estatístico de ambos os parâmetros que registraram mediana e média do módulo de deformação iguais a 51,31 MPa e 52,44 MPa e mediana e média do coeficiente de Poisson iguais à 0,16 e 0,18, respectivamente.

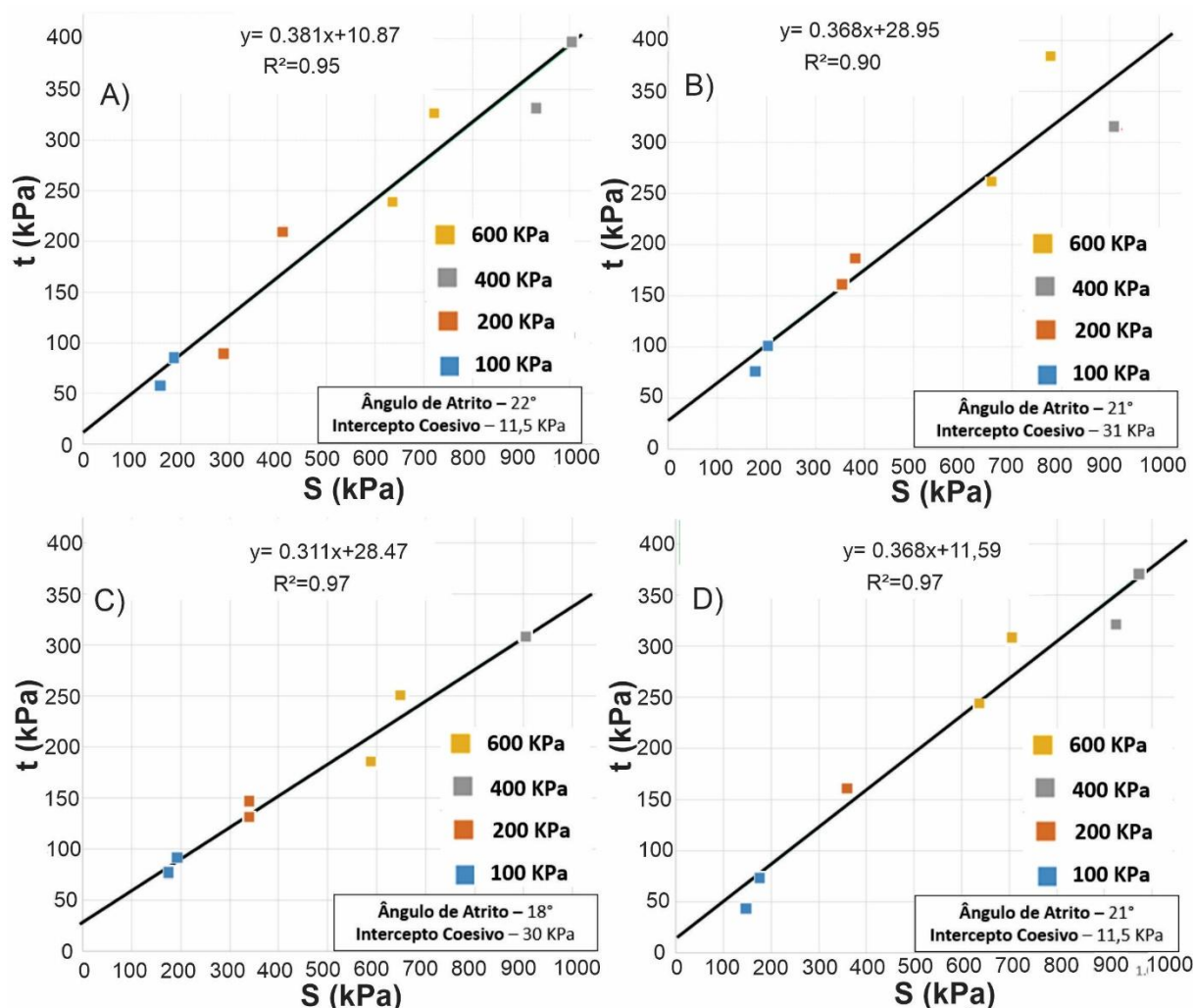


Figura 19 – Diagrama  $t \times S$  com os valores do ângulo de atrito e coesão dos blocos. A) bloco 276; B) bloco 243; C) bloco 263 e; D) bloco 267.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos do módulo de deformação e do coeficiente de Poisson do Grupo 1.

Blocos 243, 263, 267 e 276 (8 Ensaios CID)	Maior Valor	Menor Valor	Mediana	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
<b>E (MPa)</b>	97,09	17,35	51,31	52,44	23,15	44,25%
<b><math>\nu</math></b>	0,23	0,07	0,16	0,18	0,05	31,25%

### 5.3.2 Grupo 2

O grupo 2 contempla os ensaios CIU-S1 e CIU-S2 realizados nos blocos 243, 263, 267 e 276. Ao total foram ensaiados 16 CPs que indicaram valores de índice de vazios entre 1,22 e 1,88, sendo a mediana e média iguais a 1,67 e 1,57, respectivamente. Os valores do peso específico saturado variam entre  $17,50 \text{ kN/m}^3$  e  $19,20 \text{ kN/m}^3$  com mediana e média iguais à  $18,6 \text{ kN/m}^3$  e  $18,3 \text{ kN/m}^3$ , respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos do peso específico saturado e índice de vazios do Grupo 2.

<b>Blocos 243, 263 e 276 (16 CPs)</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b><math>\gamma</math> saturado (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18,3	18,5	0,063	3,44%	17,5	19,0
<b>Índice de Vazios</b>	1,55	1,73	0,26	16,77%	1,25	1,78

Os ensaios CIU's S1 (~45°) e S2 (>70°) registraram mecanismos de ruptura distintos, com a ruptura por cisalhamento ao longo do plano de foliação ocorrendo nos ensaios S1 e ruptura por cisalhamento oblíquo à foliação e flambagem nos ensaios S2 (Figura 20). Os comportamentos deformacionais elasto-frágil, *strain softening* e elasto-plástico foram observados nos ensaios S1 e estão associados com mecanismos de ruptura distintos. No comportamento elasto-frágil, a superfície de ruptura secciona o CP e constitui, de fato, uma descontinuidade (regime rúptil). Os comportamentos *strain softening* e elasto-plástico foram observados para situações em que a superfície de ruptura secciona parte do CP, sendo seguida por uma estreita banda de cisalhamento dúctil responsável pelo arraste e extensão da matriz da rocha em sua zona de influência. Nos ensaios S2 constatou-se comportamentos elasto-plástico e *strain softening* (Figura 20; Figura 21; Figura 22).

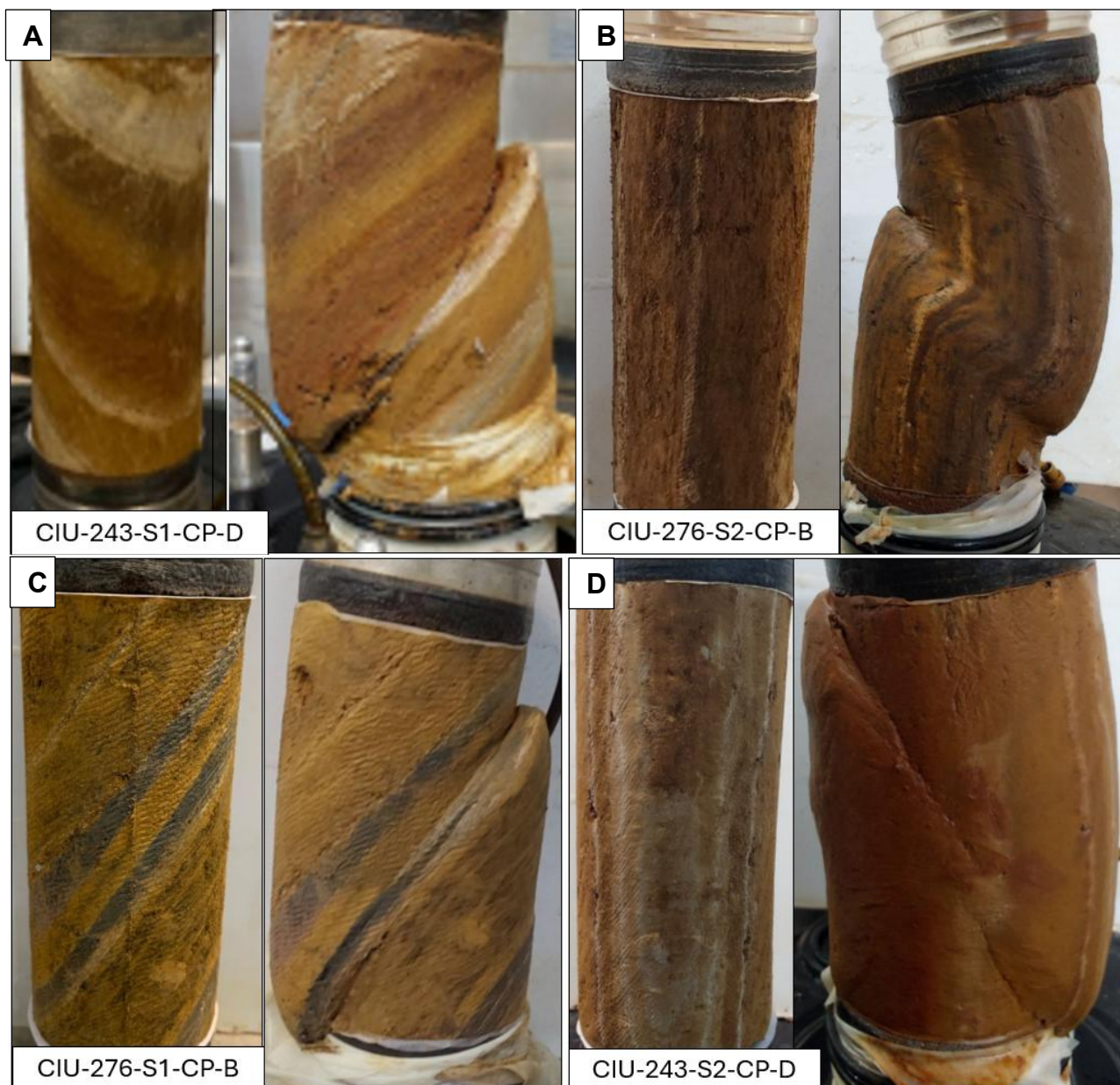


Figura 20 – Registro fotográfico de CPs do Grupo 2 pré e pós ruptura. As figuras A) e C) registram os mecanismos de ruptura com cisalhamento paralelo à foliação metamórfica; B) registra o mecanismo de flambagem e, D) apresenta o cisalhamento oblíquo à foliação metamórfica.

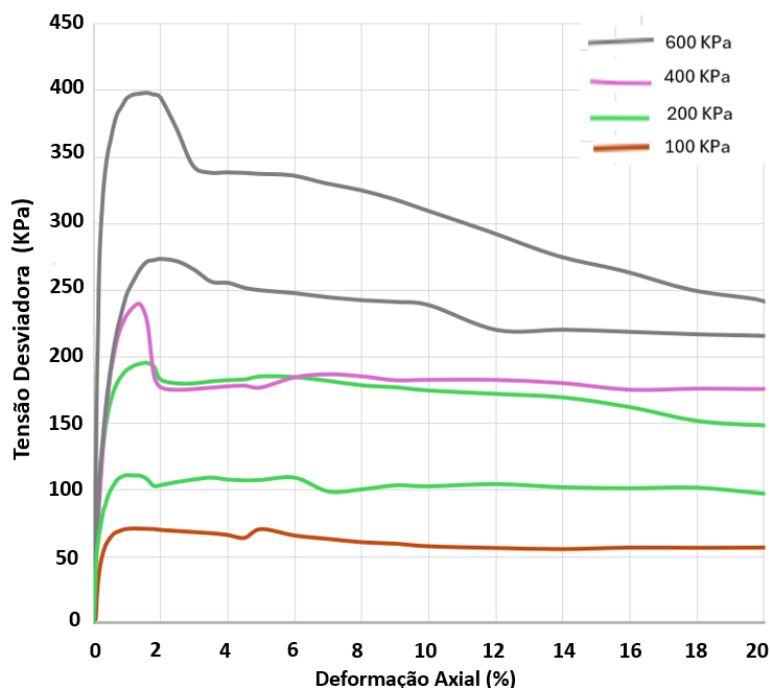


Figura 21 – Gráfico tensão desviadora X deformação axial para os ensaios S1 (Grupo 2). Os ensaios apresentam um comportamento, em geral, elasto-plástico e elasto-frágil.

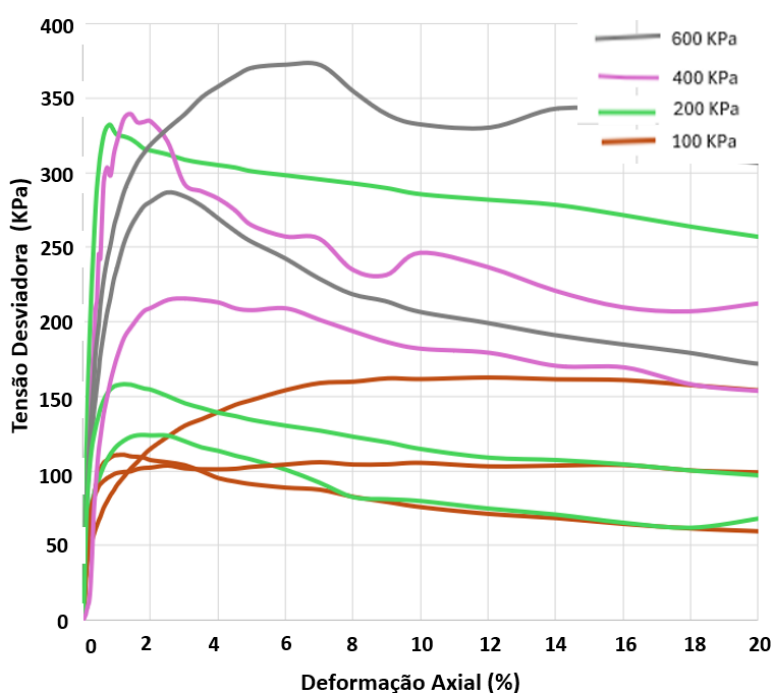


Figura 22 – Gráfico tensão desviadora X deformação axial para os ensaios S2 (Grupo 2). Os ensaios apresentam um comportamento geral elasto-plástico e *strain softening*.

Como resultado da análise integrada, definiu-se que os parâmetros de resistência ângulo de atrito e o intercepto coesivo deveriam ser definidos para os ensaios S1 e S2 de forma independente, já que foram constatadas variações nos mecanismos de ruptura e no comportamento deformacional de ambos os ensaios. Isso demonstra a importância do procedimento sugerido na presente pesquisa, já que usualmente, a tendência seria de se determinar os parâmetros considerando todos os ensaios realizados.

O parâmetro S1 definido a partir de 6 CPs (ensaios CIU-243-S1 e CIU-276-S1) foi de 21° e 6,5 KPa, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,93, enquanto o parâmetro S2 definido a partir de 10 CPs (ensaios CIU-243-S2, CIU-276-S2, CIU-263-S2) foi de 21° e 16 KPa, respectivamente, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,87 (Figura 23; Figura 24). Ou seja, a consideração do mecanismo de ruptura e do comportamento deformacional permitiu identificar uma diferença de quase 250% no valor da coesão.

Os ensaios CIU-S1 e CIU-S2 registraram variações de poropressão positivas (comportamento contrátil) com o incremento de  $\Delta U$  expressivo até níveis da deformação axial entre 2% e 4% (fase inicial do ensaio), com posterior estabilização ou leve redução, exceto para a tensão confinante de 600 KPa, que registra um maior incremento da poropressão até níveis de deformação axial em torno de 4% e uma curva ascendente com a manutenção do aumento da poropressão até o fim do ensaio (Figura 25).

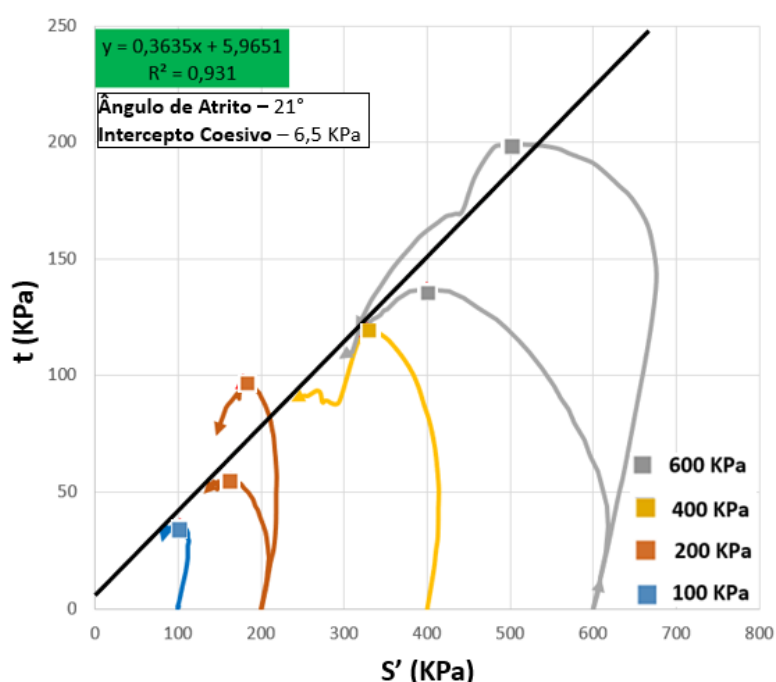


Figura 23 – Gráfico  $t \times S$  para amostras do Grupo 2 (ensaios S1) com o valor do ângulo de atrito e do intercepto coesivo obtidos. Ensaios CIU-243-S1 e CIU-276-S1.

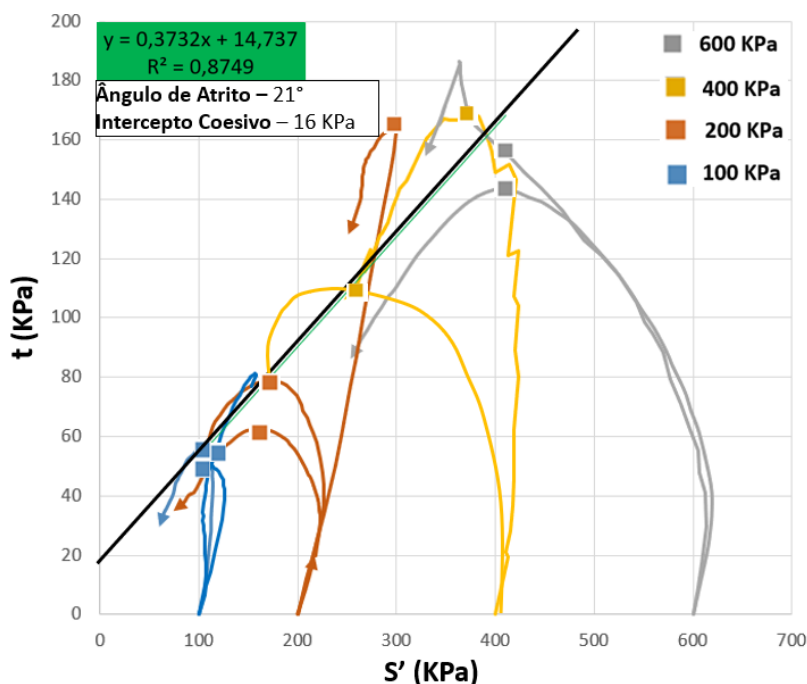


Figura 24 – Gráfico  $t \times S$  para amostras do Grupo 2 (ensaios S2) com o valor do ângulo de atrito e do intercepto coesivo obtidos. Ensaios CIU-243-S2, CIU-276-S2 e CIU-263-S2.

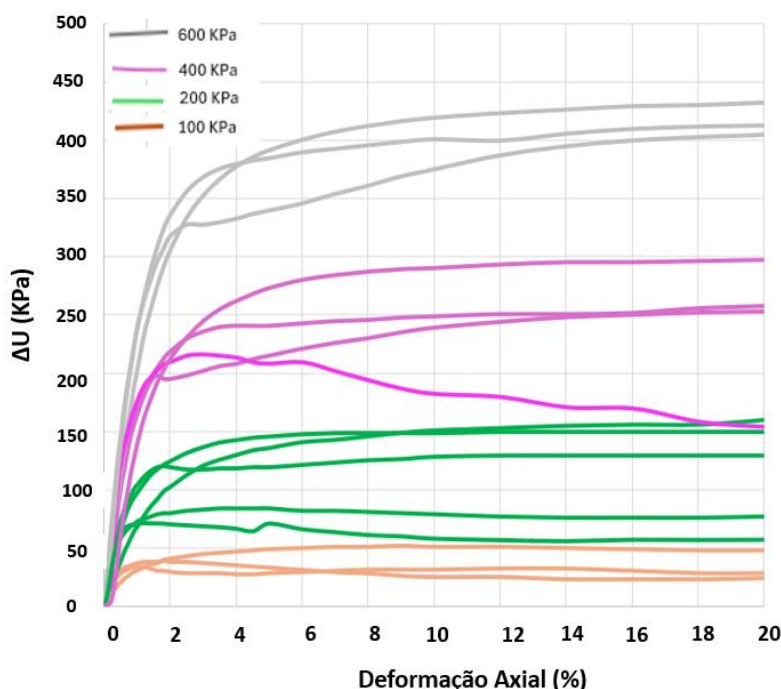


Figura 25 – Gráfico da variação da poropressão ( $\Delta U$ ) x deformação axial para todos os ensaios do Grupo 2.

### 5.3.3 Grupo 3

O grupo 3 abrangeu os ensaios CIU-S1 dos blocos 229, 239 e 241 e um ensaio CID-S1 realizado no bloco 239. Ao total foram ensaiados 14 CPs que indicaram valores de índice de vazios entre 0,86 e 1,03, sendo a mediana e média iguais a 0,87 e 0,90, respectivamente. Os valores do peso específico saturado variam entre 19,70 kN/m<sup>3</sup> e 19,90 kN/m<sup>3</sup> com mediana e média iguais à 19,80 kN/m<sup>3</sup> (Tabela 7).

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos do peso específico saturado e índice de vazios do Grupo 3.

Blocos 229, 239 e 241 (14 CPs)	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Variação	Mínimo	Máximo
$\gamma$ saturado (kN/m <sup>3</sup> )	19,80	19,80	0,01	0,41%	19,70	19,90
Índice de Vazios	0,90	0,87	0,08	9,01%	0,86	1,03

Os ensaios CIU-S1 (blocos 241 e 229) registraram o cisalhamento ao longo do plano de foliação como principal mecanismo de ruptura dos CPs e comportamentos deformacionais elasto-frágil, elasto-plástico e *strain softening* (subordinado; Figura 26; Figura 27; Figura 28). Os ensaios CIU-239 registraram comportamentos essencialmente *strain hardening* e elasto-plástico (Figura 29). Considerando todos os ensaios, o comportamento deformacional elasto-frágil foi constatado nos casos em que a superfície de ruptura seccionou o corpo de prova constituindo dois blocos desmembrados, configurando, de fato, uma descontinuidade (regime rúptil; Figura 26A; Figura 26B). Nas situações em que o comportamento elasto-plástico e *strain softening* foi observado, a superfície de ruptura secciona parte do CP, sendo seguida por uma estreita banda de cisalhamento dúctil associada ao arraste (extensão) da matriz do saprólito em suas imediações (Figura 27A). Desta forma, não configura em seu estágio final uma superfície de descontinuidade, já que o CP permanece unido. O comportamento *strain hardening* ocorreu em situações em que a ruptura do CP ocorreu associada a uma superfície de ruptura limitada e grande mobilização da matriz do saprólito (Figura 27B) ou quando o CP se deformou em um formato de barril, não apresentando controle estrutural.

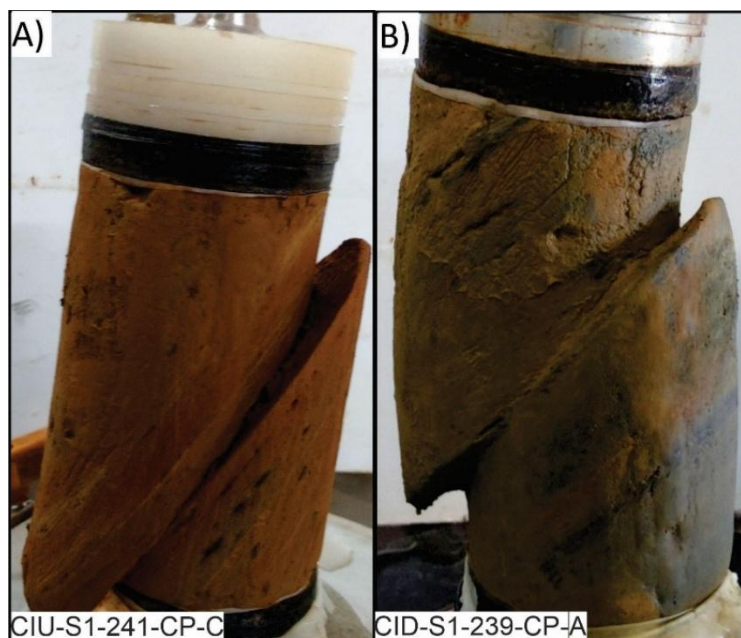


Figura 26 – Registro fotográfico de CPs do Grupo 3 pós ruptura. As figuras registram os mecanismos de ruptura com cisalhamento paralelo à foliação metamórfica. A) e B) registram o desmembramento do corpo de prova pela superfície de ruptura;

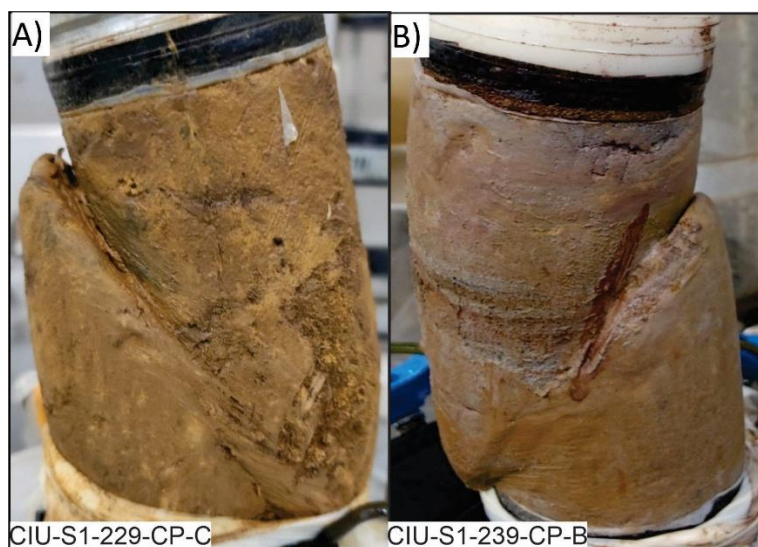


Figura 27 – Registro fotográfico de CPs do Grupo 3 pós ruptura. A) a superfície de ruptura se propaga em parte do CP e é seguida por uma banda de cisalhamento dúctil; B) a superfície de ruptura é incipiente e associada a grande mobilização da matriz.

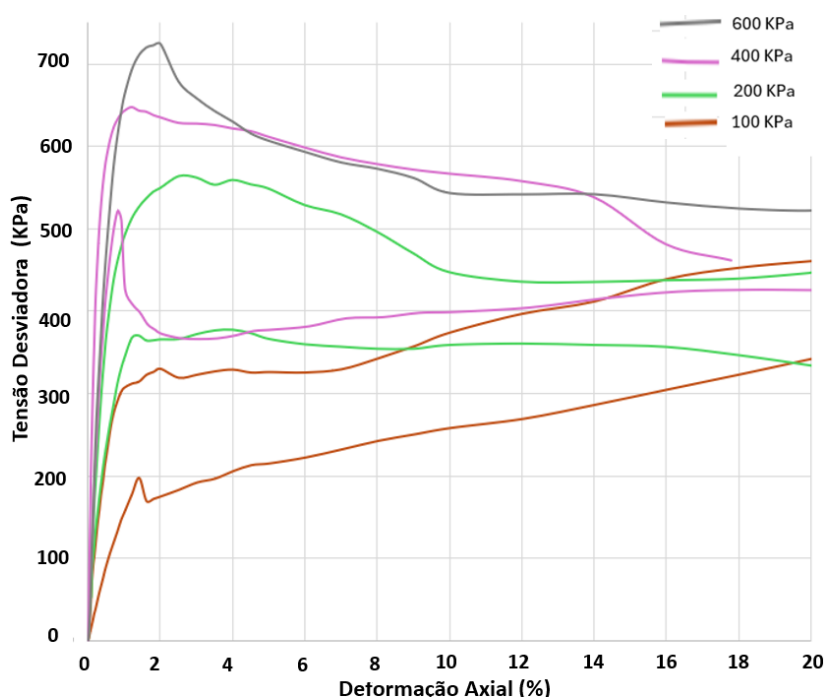


Figura 28 – Gráfico da tensão desviadora X deformação axial. Observa-se o comportamento predominante elasto-frágil, seguidos pelos comportamentos *strain softening* e elasto-plástico. Blocos 241 e 229 (Grupo 3).

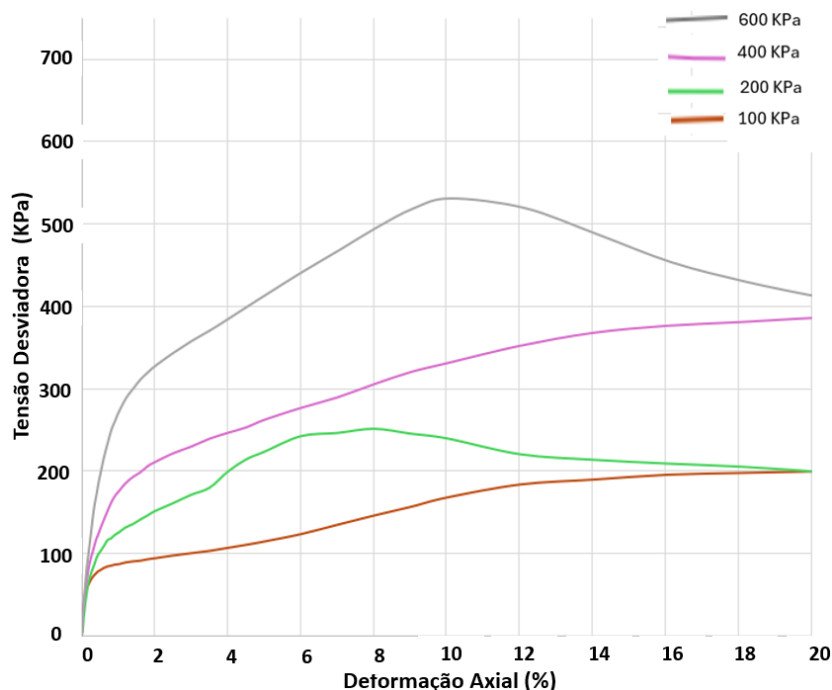


Figura 29 – Gráfico da tensão desviadora X deformação axial. Observa-se o comportamento *strain hardening* e elasto-plástico (subordinado). Bloco 239 (Grupo 3).

No que se refere a geração de poropressão, o bloco 239 registrou comportamento contrátil para as tensões confinantes de 100, 200 e 400 KPa, até deformações axiais em torno de 4%, passando posteriormente ao comportamento dilatante (Figura 30). Para a tensão confinante de 600 KPa o comportamento contrátil segue até a deformação axial em torno de 10%, passando a partir daí para um comportamento dilatante. Os blocos 229 e 241 registraram o comportamento contrátil para todos os ensaios até deformações axiais em torno de 1%, passando a partir daí a um comportamento dilatante até a ruptura dos CPs (Figura 31). Especificamente, o CP-D (tensão confinante de 600 KPa) do bloco 229 registrou o comportamento contrátil até sua tensão de ruptura.

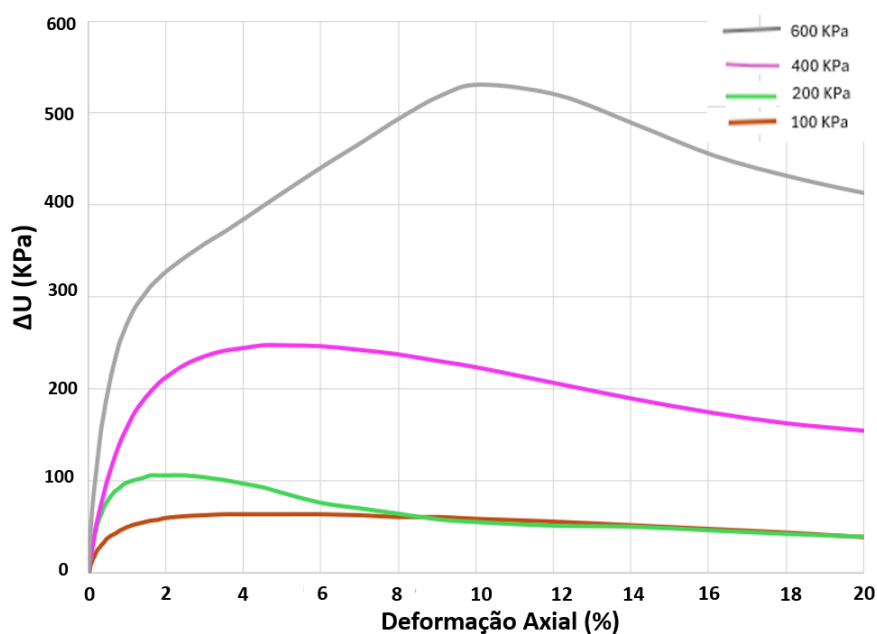


Figura 30 – Gráfico da variação da poropressão ( $\Delta U$ ) x deformação axial para o ensaio CIU-S1-239 (grupo 3).

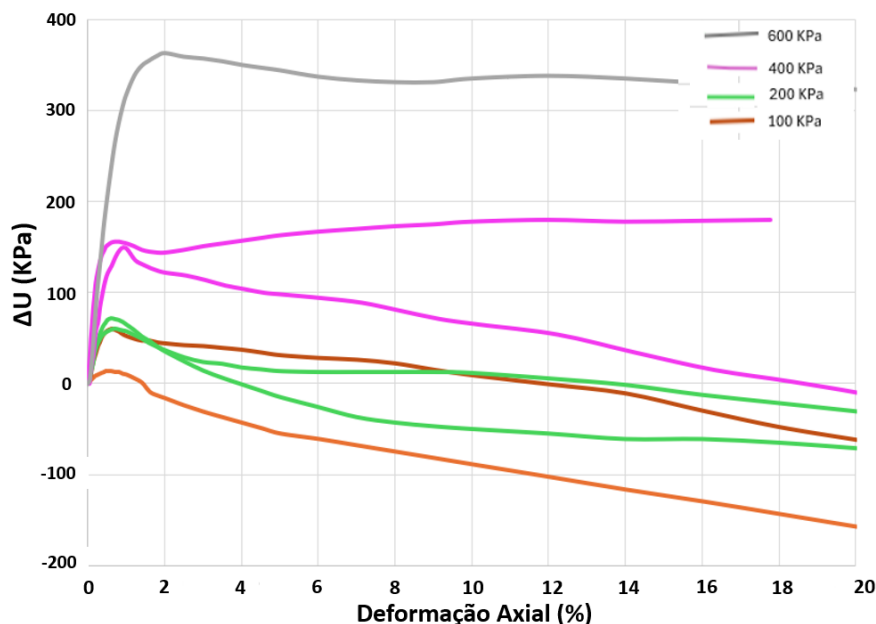


Figura 31 – Gráfico da variação da poropressão ( $\Delta U$ ) x deformação axial para o ensaio CIU-S1-229 e CIU-S1-241 (grupo 3).

Os parâmetros de resistência ângulo de atrito e intercepto coesivo foram calculados para os ensaios CIU-S1 realizados nos blocos 229, 241 e 239. O ensaio CIU-S1-239 não foi empregado na determinação dos parâmetros de resistência por contemplar apenas 3 CPs ensaiados e um destes apresentando tensão de ruptura anômala. O ensaio CIU-S1-239 contemplou quatro CPs e registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $27^\circ$  e 18 KPa, respectivamente, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,97 (Figura 32). A ruptura de todos os CPs ocorreu sob condição dilatante.

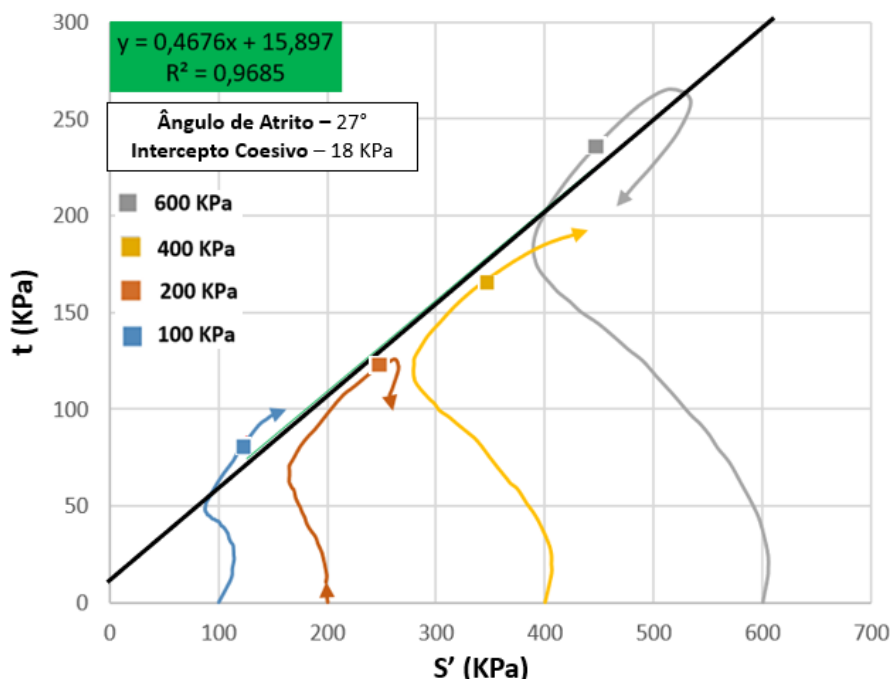


Figura 32 – Gráfico  $t$  x  $s'$  para o ensaio CIU-S1-239 (grupo 3).

O ensaio CIU-S1-229 contemplou quatro CPs e registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $29,5^\circ$  e 42,5 KPa, respectivamente, com coeficiente de determinação ( $R^2$ )

igual a 0,97 (Figura 33). O ensaio CIU-S1-241 contemplou três CPs, já que o ensaio a tensões confinantes de 600 KPa foi refugado. Registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 27,5° e 12 KPa, respectivamente, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,98 (Figura 34). A ruptura de todos os CPs dos ensaios CIU-S1-229 e CIU-S1-241 ocorreu após o pico de poropressão sob condição dilatante, exceto o ensaio CP-D do bloco 239, no qual a ruptura ocorreu sob condição contrátil.

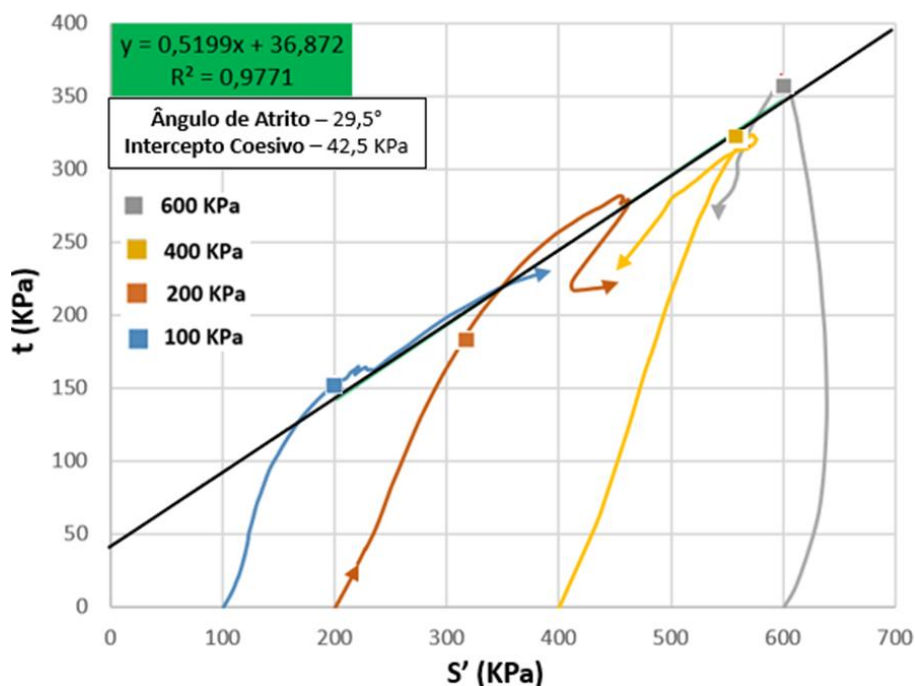


Figura 33 – Gráfico  $t \times s'$  para o ensaio CIU-S1-229 (grupo 3).

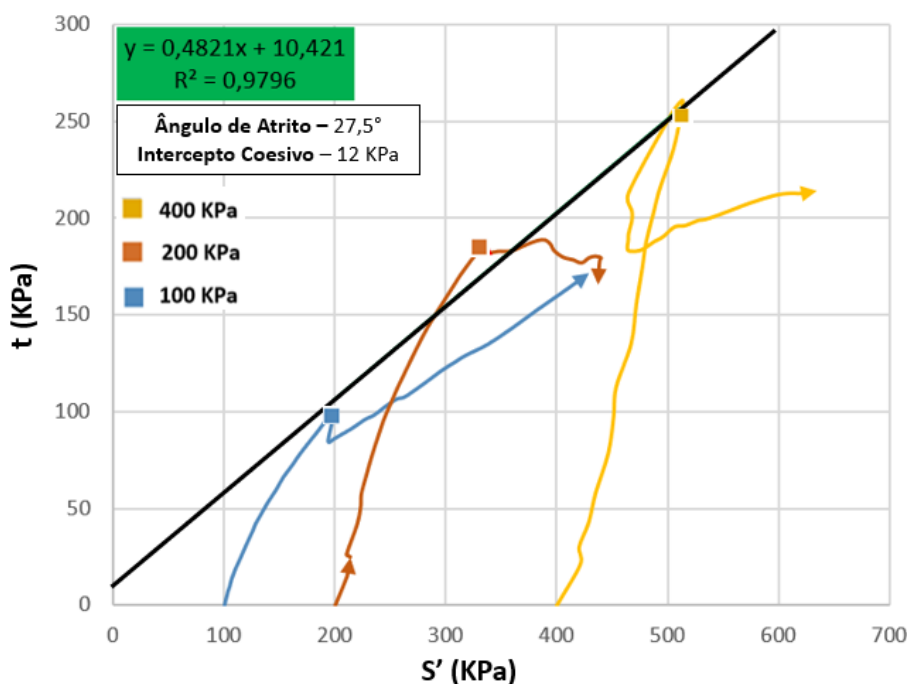


Figura 34 – Gráfico  $t \times s'$  para o ensaio CIU-S1-241 (grupo 3).

Os parâmetros deformacionais módulo de deformação e coeficiente de Poisson foram determinados com base nos CPs A, B e D do ensaio CID-S1-239 conforme apresentado na Tabela 3. O tratamento estatístico de ambos os parâmetros registrou mediana e média do

módulo de deformação iguais a 109,08 MPa e 102,29 MPa e mediana e média do coeficiente de Poisson iguais à 0,23 e 0,22, respectivamente.

#### 5.3.4 Grupo 4

O grupo 4 abrangeu os ensaios CIU-S2 e CID-S2 dos blocos 239 e 242 totalizando 10 CPs ensaiados, que indicaram valores de índice de vazios entre 0,80 e 0,96, sendo a mediana e média iguais 0,83 e 0,82, respectivamente. Os valores do peso específico saturado variam entre 19,50 kN/m<sup>3</sup> e 20,00 kN/m<sup>3</sup>, com mediana e média iguais à 19,70 (Tabela 8).

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos do peso específico saturado e índice de vazios do Grupo 4.

Blocos 239 e 242 (10 CPs)	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Variação	Mínimo	Máximo
$\gamma$ saturado (kN/m <sup>3</sup> )	19,70	19,70	0,02	1,04%	19,50	20,00
Índice de Vazios	0,83	0,82	0,03	4,61%	0,80	0,89

Os ensaios CIU-S2 e o ensaio CID-S2 registaram o cisalhamento oblíquo à foliação metamórfica como o principal mecanismo de ruptura dos CPs (Figura 35) e comportamento deformacional elasto-frágil seguido pelo comportamento elasto-plástico subordinado (Figura 36). Assim como observado nos grupos 2 e 3, o comportamento elasto-frágil encontra-se associado a rupturas que seccionam o CP (regime rúptil) enquanto no comportamento elasto-plástico a superfície de ruptura encontra-se associada a uma banda de cisalhamento dúctil. No que se refere à geração de poropressão, observou-se para todos os CPs que o comportamento contrátil ocorre até deformações máximas em torno de 1% (pico da poropressão), seguindo com o comportamento dilatante até o final do ensaio.

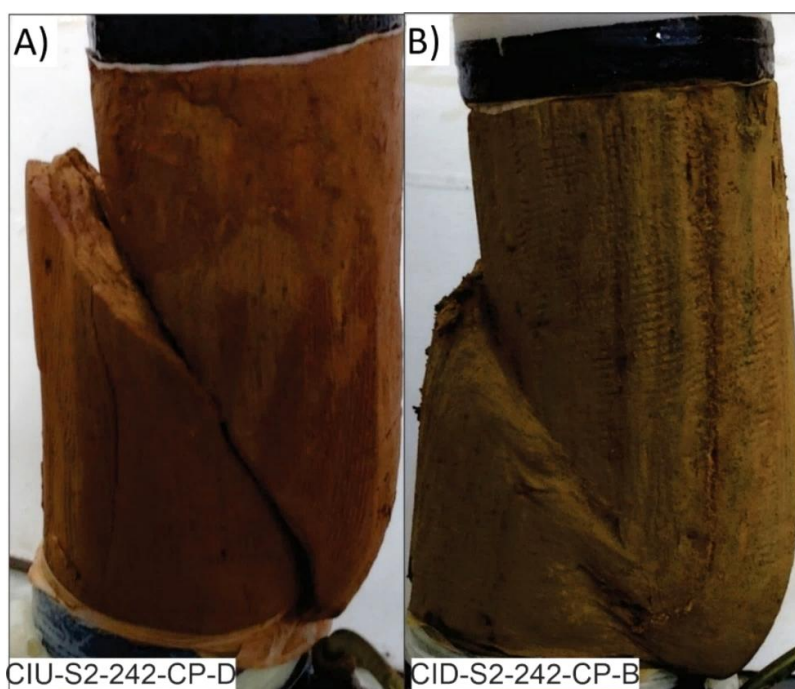


Figura 35 – Registro fotográfico de CPs do Grupo 4 pós ruptura. As figuras A) e B) registram os mecanismos de ruptura com cisalhamento oblíquo à foliação metamórfica, na qual em A) a ruptura ocorre com a secção do corpo de prova (regime rúptil) e em B) a ruptura ocorre associada a uma banda de cisalhamento dúctil.

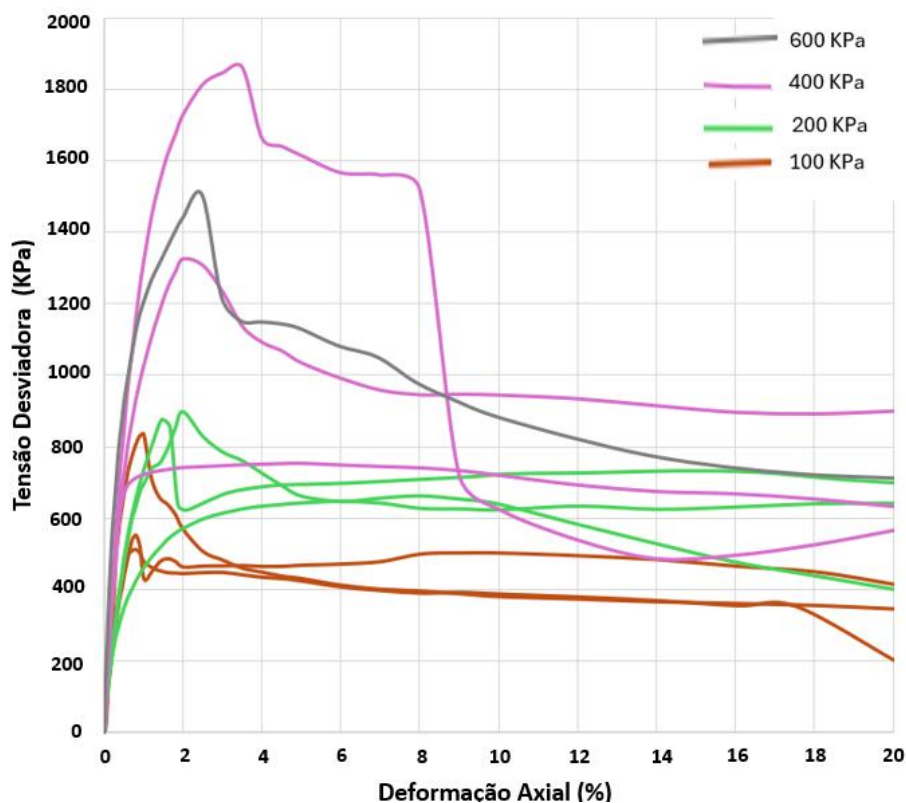


Figura 36 – Gráfico tensão desviadora X deformação axial. Consta-se o comportamento elasto-frágil e elasto-plástico.

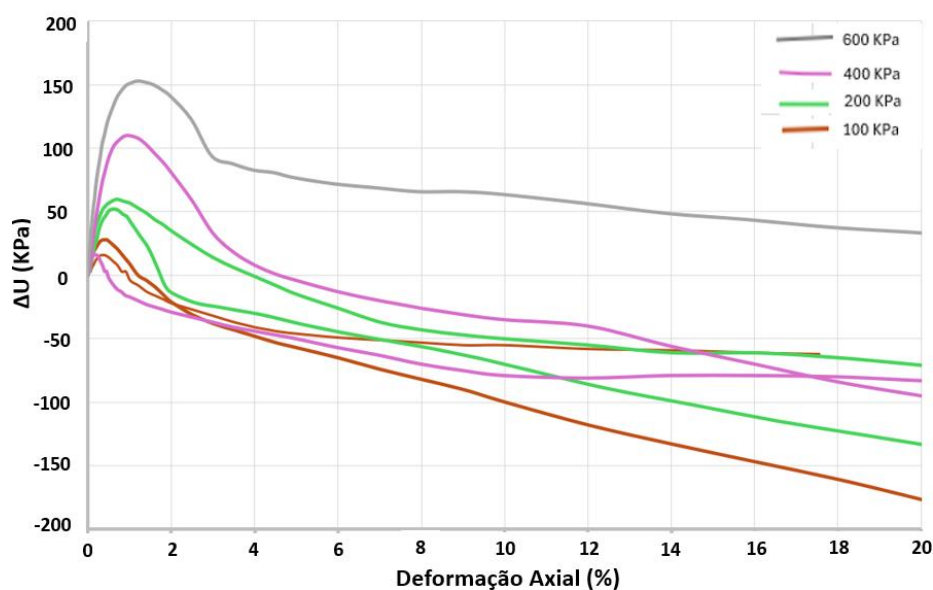


Figura 37 – Gráfico da variação da poropressão ( $\Delta U$ ) x deformação axial para os ensaios do Grupo 4.

Os parâmetros de resistência foram definidos para os blocos 242, agrupando os ensaios CIU e CID, já que os mesmos apresentam comportamento dilatante, rupturas por cisalhamento oblíquo a foliação metamórfica e comportamento deformacional elasto-frágil e elasto-plástico. Ainda, foi determinado os parâmetros de resistência para o ensaio CID realizado no bloco 239.

Os ensaios CIU e CID realizados no bloco 242 contemplaram 7 CPs e registraram ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $31^\circ$  e 125,50 KPa, respectivamente, com coeficiente

de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99 (Figura 38). Os ensaios CID realizados no bloco 239 contemplou 3 CPs e registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $19,5^\circ$  e 55 KPa, respectivamente, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99 (Figura 39).

Os parâmetros deformacionais são provenientes exclusivamente dos ensaios CID-239-S2 e CID-242-S2 sendo o valor médio do módulo de deformação e coeficiente de Poisson determinados iguais 223,77 MPa e 0,22 MPa.

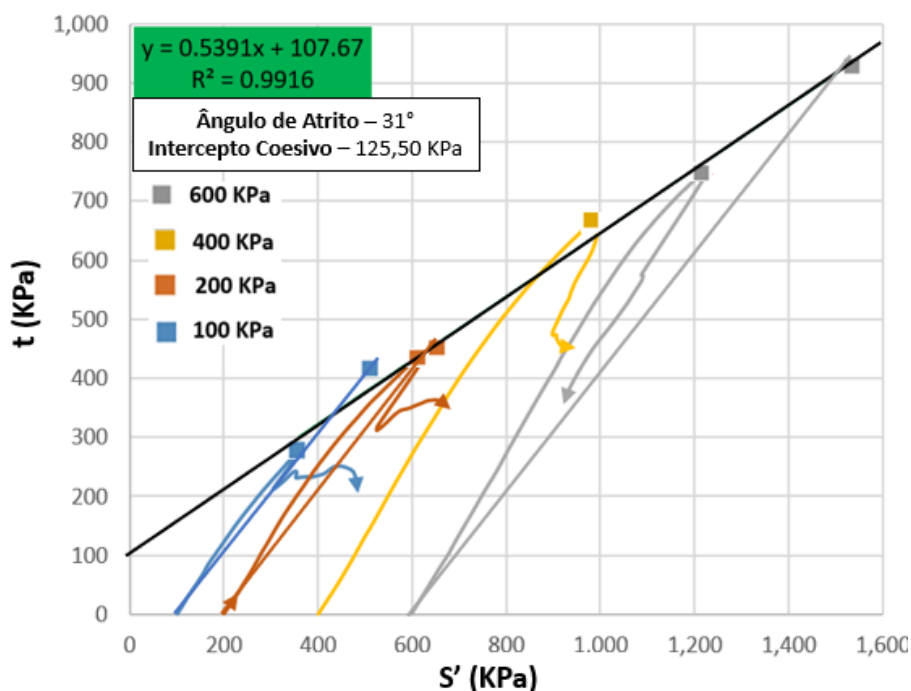


Figura 38 – Gráfico t x s' para o ensaio CIU-S2-242 e CID-S2-242 (grupo 4).

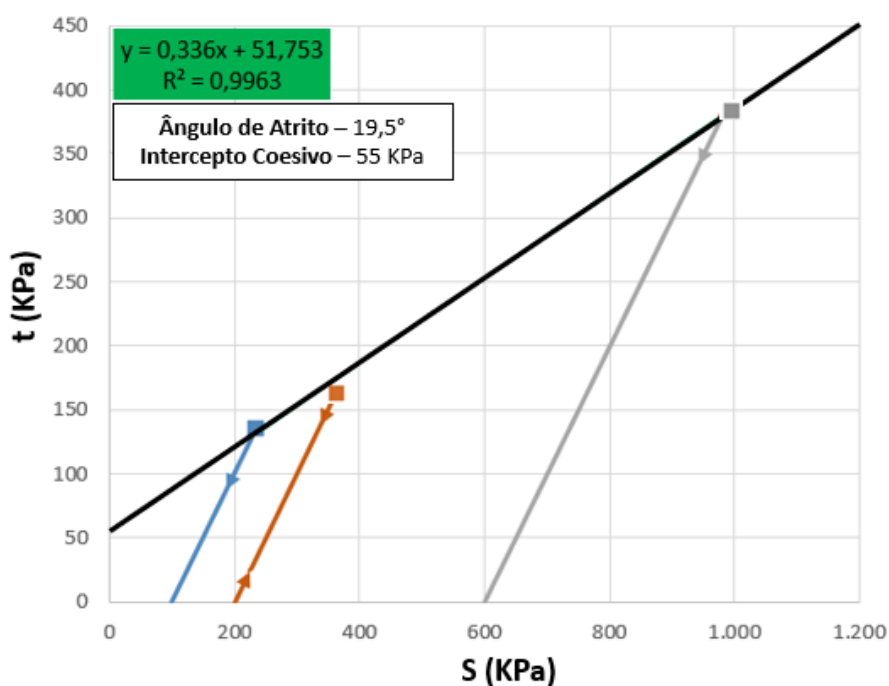


Figura 39 – Gráfico t x s para o ensaio CID-S2-239 (grupo 4).

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1 Análise Integrada

A análise integrada dos dados consiste na última etapa do fluxo de trabalho proposto e refere-se, em última instância, à determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade. Neste trabalho, a análise integrada foi realizada sobre os grupos 1, 2, 3 e 4 previamente definidos. Recorda-se que cada um dos grupos abrange blocos ensaiados que compartilham similaridades quanto a suas propriedades índices, mecanismo de ruptura dos CPs, comportamento deformacional, dilatância e parâmetros geomecânicos.

#### 6.1.1 Grupo 1

O grupo 1 abrange exclusivamente ensaios CID-S1 e CID-S2 realizados nos blocos 276, 243, 263 e 267 que registraram índice de vazios dos CPs superiores a 1,23. Os ensaios apresentaram a flambagem como principal mecanismo de ruptura dos CPs e rupturas pontuais paralelas à foliação metamórfica. No que se refere ao comportamento deformacional, para tensões entre 100 KPa e 200 KPa, foi constatado um comportamento elasto-plástico, enquanto para as tensões entre 400 KPa e 600 kPa, observou-se um comportamento *strain hardening* (predominante). Os parâmetros geomecânicos foram calculados para cada um dos quatro blocos ensaiados (Figura 19), que por sua vez apresentaram valores do ângulo de atrito entre 18° e 26° e valores de coesão entre 14 KPa e 61 KPa (Tabela 9).

Os valores do módulo de deformação variaram entre 17,35 MPa e 97,09 MPa, enquanto os valores do coeficiente de Poisson ficaram entre 0,07 (*outlier*) e 0,23. No que se refere as propriedades índices, os valores do índice de vazios ficaram entre 1,23 e 1,88, enquanto os valores do peso específico saturado ficaram entre 1,64 e 1,92.

A variabilidade dos parâmetros de resistência e deformacionais observada é atribuída a aspectos intrínsecos dos corpos de prova somados a potenciais efeitos inerentes à moldagem dos CPs e ao próprio ensaio, conforme reportado por Head e Epps (2006) e Berre (2011). Diante desta configuração, optou-se por empregar a mediana dos valores do ângulo de atrito (21,5°), do intercepto coesivo (21,5 KPa), do módulo de deformação (51,31 MPa), do coeficiente de Poisson (0,17), do índice de vazios (1,67) e do peso específico saturado (1,86 kN/m<sup>3</sup>), evitando assim a influência de *outliers* no parâmetro final (Tabela 3; Tabela 9).

#### 6.1.2 Grupo 2

O grupo 2 abrange exclusivamente os ensaios CIU-S1 e CIU-S2 realizados nos blocos 243, 263, 267 e 276 que registram índice de vazios dos CPs superiores a 1,25. O grupo 2 apresentou rupturas com controle estrutural (paralelo a foliação) para os ensaios S1, por sua vez associados aos comportamentos deformacionais elasto-frágil, *strain softening* e elasto-plástico. Os ensaios S2 registraram rupturas por cisalhamento oblíquo e flambagem, associado aos comportamentos deformacionais elasto-plástico e *strain softening*. Todos os CPs ensaiados registraram um comportamento essencialmente contrátil.

Os ensaios S1 e S2 foram compartimentados para obtenção dos parâmetros de resistência devido aos distintos mecanismos de ruptura dos CPs. A análise em conjunto dos ensaios

S1 registrou valores do ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais à 21° e 6,5 KPa, respectivamente, enquanto a análise em conjunto dos ensaios S2 registrou valores do ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 21° e 16 KPa, respectivamente (Figura 23; Figura 24; Tabela 9).

No que se refere as propriedades índices, foi adotado o valor da mediana do índice de vazios (1,73) e do peso específico saturado (18,5 kN/m<sup>3</sup>) como representativo destes materiais (Tabela 9).

### 6.1.3 Grupo 3

O grupo 3 contempla os ensaios CIU-S1 e CID-S1 realizados nos blocos 229, 239 e 241 que registraram índice de vazios inferiores a 1,03. É marcado por rupturas paralelas a foliação metamórfica e a análise dos ensaios triaxiais culminou em dois cenários distintos: I) os ensaios CIU-S1 realizado nos blocos 241 e 229 registraram poropressão negativa (dilatante) e comportamento deformacional elasto-frágil, elasto-plástico e *strain softening* (subordinado); II) os ensaios CIU-S1 do bloco 239 registraram poropressão positiva (contrátil) e comportamento deformacional elasto-plástico e *strain hardening*. Neste cenário, os parâmetros geomecânicos foram calculados de forma independente para cada um dos blocos, sendo os valores do ângulo de atrito e do intercepto coesivo iguais à 27°/18 KPa (bloco 239), 27,5°/12 KPa (bloco 241) e 29,5°/42,5 KPa (bloco 229). De forma conservadora, optou-se por empregar à média dos valores do ângulo de atrito (28°) e do intercepto coesivo (24 KPa) como representativos destes materiais. No que se refere as propriedades índices, foi adotado o valor da mediana do índice de vazios (0,87) e peso específico saturado (19,80 kN/m<sup>3</sup>), como representativo destes materiais (Tabela 9). Conforme apresentado, o ensaio CID-S1-239 foi empregado exclusivamente na determinação do módulo de deformação e do coeficiente do Poisson, sendo os valores médios iguais a 102,9 KPa e 0,22, respectivamente.

### 6.1.4 Grupo 4

O grupo 4 contempla os ensaios CIU-S2 e CID-S2 realizados nos blocos 239 e 242 que registraram índice de vazios inferiores a 0,89. É marcado por rupturas oblíquas a foliação metamórfica, poropressão negativa e comportamento deformacional essencialmente elasto-frágil. Os parâmetros geomecânicos foram calculados de forma conjunta para os ensaios CIU e CID do bloco 242 (Figura 38) e registraram ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 31° e 125,5 KPa, respectivamente. O ensaio CID realizado no bloco 239 contemplou apenas 3 CPs e registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 19,5° e 55 KPa, respectivamente. O baixo ângulo de atrito obtido para o bloco 239 é atribuído à ausência do ensaio a tensão confinante de 400 KPa ou a uma potencial interferência de aspectos intrínsecos do CP. Desta forma, o parâmetro obtido para os dois ensaios realizados no bloco 242 como o representativo destes saprólitos. O parâmetro módulo de deformação e coeficiente de Poisson foram determinados a partir dos ensaios CID-242 e CID-239 e registraram valor médio de 223,77 KPa e 0,26, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9 – Compilação dos parâmetros geomecânicos, índices físicos, comportamento deformacional e dilatância definidos para os grupos 1, 2, 3 e 4. Uma faixa de resistência e grau intempérico é sugerida para cada um dos grupos.

Grupo	$\Phi'$	C' (kPa)	E (MPa)	$\nu$	$\gamma_{\text{Sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	Comportamento Deformacional	Dilatância	Correlação Resistência/Grau Intempérico	Mecanismo de Ruptura do CPs
1	21,5	21,5	51,31	0,17	18,60	1,67	Elasto-Plástico <i>Strain Hardening</i>	–	R0/W5	Rupturas paralelas e oblíquas à foliação metamórfica (ensaios S1 e S2)
2	21	6,5	-	-	18,50	1,73	Elasto-Frágil Elasto-Plástico <i>Strain Softening</i>	Positiva	R0/W5	Paralelas à foliação metamórfica (S1)
2	21	16	-	-	18,50	1,73	Elasto-Plástico <i>Strain Softening</i>	Positiva	R0 /W5	Oblíqua à foliação metamórfica (S2)
3	28	24	102,90	0,22	19,80	0,87	Elasto-Frágil Elasto-Plástico <i>Strain Softening</i>	Negativa	R1-/W4-W5 (Paralela a Foliação)	Paralelas à foliação metamórfica (S1)
4	31	125,50	223,77	0,26	19,70	0,83	Elasto-Frágil	Negativa	R1-/W4-W5 (Oblíquo a Foliação)	Oblíqua à foliação metamórfica (S2)

### 6.1.5 Correlação entre os Parâmetros Geomecânicos, as Faixas de Resistência e o Grau Intempérico dos grupos 1, 2, 3 e 4

Os parâmetros geomecânicos definidos para os diferentes blocos foram correlacionados a faixas de resistência (R) e grau intempérico (W), conforme apresentado na Tabela 9 e seguindo a proposta de classificação de rochas brandas de Cella et al. (2019; 2020). A descrição tátil-visual realizada em campo havia indicado que todos os materiais apresentavam resistência R1- e grau intempérico W5, contudo, a caracterização petrográfica realizada no bloco 242 (grupo 4) e no bloco 276 (grupo 1), em conjunto com a consideração das propriedades índices e os parâmetros geomecânicos obtidos, indicam que os grupos 1 e 2, na verdade, apresentam grau intempérico W5 e, são representativos de uma resistência R0, enquanto os grupos 3 e 4 apresentam grau intempérico W4/W5 e correlacionam-se a faixas de resistência R1-.

Os saprólitos de filito estudados neste trabalho, assim como presentes em outras áreas em ambientes tropicais, preservam a trama macroscópica da rocha de origem mesmo sob elevado grau de decomposição de seus minerais. Isso reforça a importância da caracterização petrográfica e, em paralelo, o emprego do índice de vazios na triagem de saprólitos de um mesmo litotipo que apresentam comportamento mecânico similares.

### 6.2 Análise dos Parâmetros Geomecânicos e Propriedades Índices dos Saprólitos de Filito da Mina A

Os grupos 1 e 2 representam ensaios CID e CIU, respectivamente, realizados em saprólitos com propriedades índices similares e que forneceram um ângulo de atrito de aproximadamente 21°. O intercepto coesivo de 21,5 KPa obtido para o grupo 1 pode ser correlacionado ao intercepto coesivo de 16 KPa obtido, especificamente, para os ensaios

S2 do grupo 2 (Tabela 9). Os ensaios S1 do grupo 2 registraram rupturas controladas pela foliação metamórfica e intercepto coesivo de 6,5 KPa.

Uma análise comparativa entre os grupos 1 e 2 indica que o controle estrutural das rupturas no grupo 2 pode estar conectado ao seu comportamento contrátil sob condições não-drenadas. Isso porque a geração de poropressão em materiais com elevada concentração de muscovita/sericita pode apresentar uma distribuição heterogênea dentro do CP, concentrando-se ao longo do plano de foliação metamórfica, interferindo em seus parâmetros de resistência e no mecanismo de ruptura (Berre, 2011; Ventura et al. 2011; Franca et al. 2018). O menor valor do intercepto coesivo obtido nos ensaios S1 (grupo 2) é atribuído à trama da rocha e reflete a menor resistência ao cisalhamento normalmente presente ao longo do plano de foliação metamórfica (Fietze et al. 2013).

Os grupos 3 e 4 apresentam comportamento dilatante e propriedades índices semelhantes (Tabela 9), contudo, se diferem por seus parâmetros de resistência e deformabilidade. O grupo 3 contempla apenas ensaio S1 cujas rupturas apresentaram controle estrutural e registraram ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a 28° e 24 KPa, respectivamente, enquanto o grupo 4 contempla apenas ensaios S2 e registrou ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais à 31° e 125,50 KPa. A redução no valor da coesão ao compararmos os grupos 3 e 4 reforça o comportamento observado no grupo 2, também registrando uma menor coesão no plano de foliação. O grupo 3 ainda apresentou um módulo de deformação próximo à metade do valor do módulo de deformação determinado para o grupo 4, refletindo a menor rigidez ao longo do plano de foliação metamórfica e, de fato, uma anisotropia mecânica destes materiais. Os valores do coeficiente de Poisson determinados para os grupos 3 e 4 são relativamente próximos e superiores ao valor definido para o grupo 1 (Tabela 9), refletindo, sobretudo, o predomínio das rupturas por cisalhamento que ocasiona maiores deformações laterais.

Os parâmetros geomecânicos observados para os grupos 1, 2, 3 e 4 apresentam uma correlação com os índices físicos e consecutivamente com o grau intempérico das amostras ensaiadas. Os menores valores do ângulo de atrito, intercepto coesivo e do módulo de deformação estão vinculados aos grupos 1 e 2, que por sua vez registram os maiores índices de vazios e os menores valores de peso específico saturado.

A anisotropia de resistência observada entre os ensaios S1 e S2 do grupo 2 é sutil e de difícil detecção, sendo os valores de coesão obtidos para os ensaios S1 e S2 inferiores a 25 KPa, enquanto a diferença entre os valores de coesão obtidos nos ensaios do grupo 3 (ensaios S1) e 4 (ensaios S2) é superior a 100 KPa. Os menores valores de coesão e o menor nível de anisotropia de resistência observado no grupo 2 (ensaios S1 e S2) quando comparado aos grupos 3 e 4, reflete seu maior grau intempérico (W5) e seu maior índice de vazios ( $e > 1,25$ ). Os grupos 3 e 4 foram correlacionados ao grau intempérico W4 e apresentam índice de vazios inferior a 1,03. Neste cenário, a redução do nível de anisotropia da rocha correlaciona-se ao incremento do grau intempérico que, por sua vez, ocasiona um aumento do índice de vazios. Papadopoulos e Marinou (1992) também registram este comportamento e sugerem que o avanço do grau intempérico pode levar a uma homogeneização dos parâmetros de resistência, sendo neste cenário a anisotropia de resistência melhor percebida em rochas com grau intempérico moderado (W3) a alto (W4).

### 6.3 Correlação Geológico-Geotécnica entre os Saprólitos de Filito da Mina A e Estudos Pretéritos realizados em Filitos da Formação Batatal

A análise dos trabalhos pretéritos destinados à caracterização geotécnica dos filitos da Formação Batatal, de maneira geral, carece de informações como o mecanismo de ruptura dos CPs, índice de vazios, a geração de poropressão e o comportamento deformacional, fazendo com que as correlações com o presente estudo se restringissem, basicamente, aos parâmetros de resistência. Isso demonstra a importância da abordagem sugerida no presente trabalho, já que todos esses aspectos influenciam nos resultados obtidos.

Neste contexto, Lopes et al. (2007) apresentam um ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $33,7^\circ$  e 158,94 kPa, índice de vazios de 0,44 e peso específico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>m. Os autores ainda registram o impacto do intemperismo no aumento da porosidade, do índice de vazios e na redução do peso específico dos materiais, bem como sua influência na redução nos parâmetros de resistência, principalmente na coesão. Ventura et al. (2011) apresentam ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $32,9^\circ$  e 101,7 kPa para saprólito de filito com grau intempérico W4 e ângulo de atrito e intercepto coesivo iguais a  $21^\circ$  e 63,3 kPa para saprólito de filito com grau intempérico W5. Franca et al. (2018) compilam diversos ensaios realizados em saprólitos de filito de resistência R0 e R1- e reportam uma média de ângulo de atrito igual a  $27^\circ$  e intercepto coesivo de 61,3 kPa. Os parâmetros geomecânicos apresentados por Lopes et al. (2007) se correlacionam ao grupo 4 do presente estudo, contudo, são provenientes de CPs com menor valor de índice de vazios. Os parâmetros geomecânicos apresentados por Ventura et al. (2011) para filitos com o grau intempérico W4 se correlacionam ao grupo 4, enquanto o ângulo de atrito definido para os filitos com grau intempérico W5 se correlacionam com os grupos 1 e 2. O ângulo de atrito proposto por Franca et al. (2018) também é próximo aos ângulos de atrito definidos para os grupos 3 e 4.

No que tange especificamente à influência da foliação metamórfica nos parâmetros de resistência do filito da Formação Batatal, Silva (2006) e Soares (2008) reportam uma anisotropia de resistência destes materiais com os menores parâmetros associados ao plano de foliação metamórfica. Os autores ainda destacam a correlação entre o aumento do grau intempérico com o aumento do índice de vazios e a redução dos parâmetros de resistência, conforme observado no presente estudo. Neste sentido, Leão et al. (2017) e Carvalho et al. (2020) também registram a redução dos parâmetros de resistência com o aumento do grau intempérico, mas destacam uma correlação não-linear entre ambos.

Em síntese, os parâmetros geomecânicos provenientes de estudos pretéritos são relativamente próximos aos obtidos neste estudo, podendo a variabilidade observada ser fruto de aspectos intrínsecos dos filitos e/ou a junção de materiais ou mecanismos de ruptura distintos na parametrização. Especificamente, para as amostras de filito da Formação Batatal avaliadas neste trabalho, a variabilidade no comportamento mecânico e nos parâmetros geomecânicos está diretamente vinculada ao processo de conversão de minerais primários em minerais secundários (muscovita em sericita/caulinita), o que reflete a transição entre os graus intempérico W4 e W5. Em consequência da intensificação do intemperismo, ocorre uma alteração nos contatos entre os minerais e uma redução da

trama da rocha impactando diretamente a coesão (Blight, 1997). O aumento do grau intempérico ainda ocorre associado a um aumento do índice de vazios que, por sua vez, relaciona-se a uma redução dos parâmetros de resistência e a um maior potencial de geração de poropressão (Papadopoulos e Marinos, 1992; Martin e Stacey, 2013).

#### 6.4 Transição Mecânica Solo-Rocha no Contexto dos Saprólitos do Filito da Formação Batatal

As variações nos parâmetros de resistência e deformabilidade, no comportamento deformacional, na dilatância e a influência dos planos de anisotropia no controle da ruptura dos corpos de prova, são elementos que, ao serem analisados, trazem à tona o debate quando ao que diferencia o comportamento mecânico de solos e rochas e, se a consideração da resistência à compressão uniaxial seria suficiente para distinguir ambos os materiais. Os solos são entendidos como materiais governados essencialmente pelo ângulo de fricção, de comportamento isotrópico e susceptíveis às variações de poropressão, enquanto a rocha possui resistência governada pela coesão, normalmente com baixa susceptibilidade a variações de poropressão e podem portar anisotropias internas que representam planos físicos de menor resistência ao cisalhamento (Hoek, 1993; Johnston e Novello 1994; Blight, 1997).

Os saprólitos inserem-se neste contexto como rochas altamente alteradas (W4) a totalmente decompostas (W5), com resistência UCS normalmente entre 0.25 MPa a 5 MPa ( $\leq R1+$ ), comportamento mecânico com nuances de solos e rochas, que preservam a trama (*fabric*) de sua rocha de origem e cujos planos de anisotropia podem controlar sua resistência (Deer e Patton 1971; Blight, 1997; Cella et al. 2019; Martin e Stacey 2018; Futai et al. 2004; Fietze et al. 2013). O espectro de resistência que envolve os saprólitos se sobrepõem à zona de transição no comportamento mecânico dos materiais, o que se reflete nas diferentes abordagens de parametrização, com ensaios de resistência seguindo os preceitos da mecânica dos solos e das rochas, a depender da faixa UCS do material. Castro et al. (2013), em uma análise das complexidades que envolvem o comportamento mecânico da faixa de resistência R1 (1 MPa a 5 MPa), registra que o incremento da resistência UCS correlaciona-se com uma maior influência dos planos de anisotropia no controle da ruptura da rocha intacta, o que ocorre normalmente em conjunto a uma redução da porosidade e, consecutivamente, dos efeitos da poropressão. Os autores propõem uma função de transição no comportamento mecânico, na qual consideram que, para resistências de 1 MPa, os maciços são controlados integralmente por sua matriz (rocha intacta), o que varia de forma exponencial até a resistência de aproximadamente 5 MPa, na qual o maciço é controlado pela resistência ao cisalhamento dos planos de anisotropia (Figura 40). Os filitos da Formação Batatal avaliados inserem neste contexto, mas já indicam a influência dos planos de foliação para materiais classificados como R0 (0,25 MPa-1 MPa – grupo 2). Em contrapartida, ao compararmos os grupos 3 e 4 (correlacionados a resistência R1-) com o grupo 2 (correlacionado a resistência R0), observa-se nos grupos 3 e 4 uma maior variabilidade dos parâmetros de resistência entre os ensaios paralelos e oblíquos a foliação metamórfica, cenário este em consonância com a proposta de Castro et al. (2013). Para os geólogos e geotécnicos que atuam no Quadrilátero Ferrífero e, em ambientes tropicais em geral, a influência dos planos de anisotropia em materiais com resistência R1- e R1+ são nítidas no controle de rupturas.

Ademais dos parâmetros de resistência, uma variação mecânica e na dilatância são observadas, considerando que os grupos 1 e 2 apresentam comportamento contrátil e comportamento deformacional variando entre elasto-plástico, *strain hardening* e *strain softening*, enquanto os grupos 3 e 4 registram comportamento dilatante e comportamento deformacional essencialmente elasto-frágil e elasto-plástico.

Em síntese, sugere-se que os elementos aqui utilizados na caracterização geomecânica dos saprólitos (e.g. propriedades índices; comportamento deformacional), sejam também empregados na análise do seu comportamento mecânico como um todo, que transiciona entre solo e rocha, apresentando eventualmente elementos vinculados a ambos os materiais. Ressalta-se que o fato de saprólitos poderem ser ensaiados conforme as práticas da mecânica dos solos (e.g. CIU), não implica que os mesmos possam ser classificados como solos, uma vez que pode-se observar aspectos normalmente vinculados às rochas, como o controle estrutural das rupturas ou baixa influência da poropressão nos parâmetros de resistência.

Neste trabalho, observou-se que os grupos 1 e 2 se assemelham mecanicamente aos solos, enquanto os grupos 3 e 4 registram aspectos mais conectados mecanicamente às rochas, reforçando o entendimento que, os saprólitos, *sensu stricto*, abrangem uma zona mecânica com ambos os comportamentos, conforme sugerido por Castro et al. (2013). Por fim, salienta-se que de forma semelhante ao constatado na presente dissertação, autores como Elliot e Brown (1985) e Au (1996) também registram transições no comportamento mecânico de saprólitos em função de variações do índice de vazios.

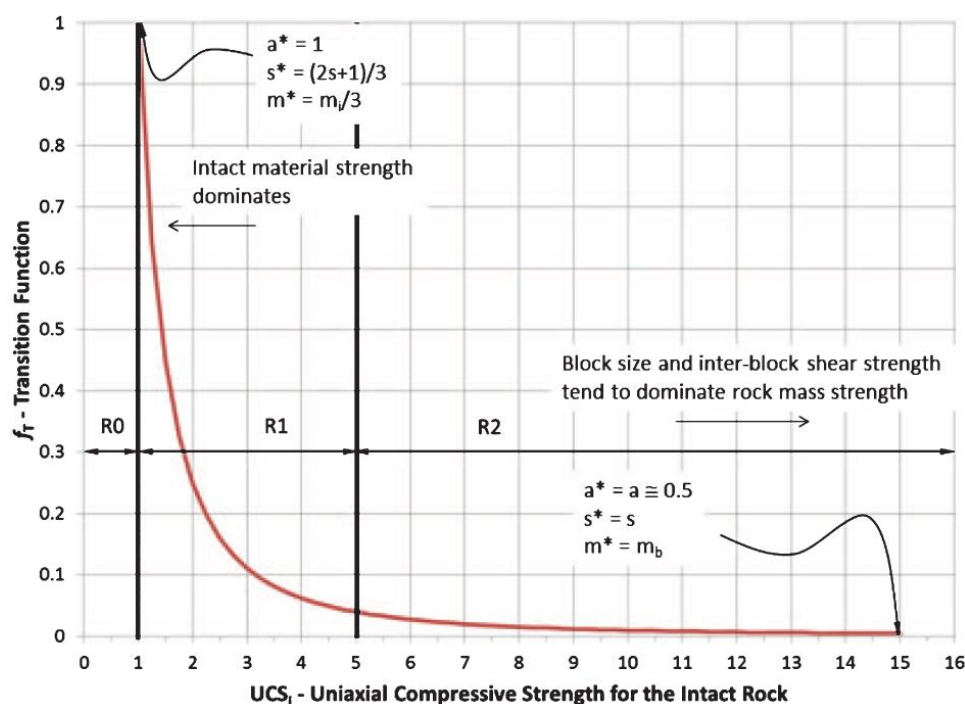


Figura 40 – Função de transição indicando materiais cuja resistência é governada pela matriz (função de transição igual a 1) e materiais governados pela resistência ao cisalhamento no contato entre blocos do maciço rochoso (função de transição igual a 0). Fonte: Castro et al. (2013).

#### 6.4.1 Mecanismo de Ruptura e Comportamento Deformacional

O mecanismo de ruptura e o comportamento deformacional dos saprólitos de filito da Formação Batatal são aspectos interdependentes, conforme pode ser observado nos diferentes grupos. A ruptura por flambagem foi observado na análises dos resultados obtidos para o grupo 1 e está vinculado, normalmente, ao comportamento deformacional *strain hardening* (Figura 17; Figura 18). Rupturas por flambagem são reportadas no Quadrilátero Ferrífero no *footwall* de cavas à céu aberto estabelecidas em saprólitos nas quais a foliação metamórfica mergulha em alto ângulo em direção ao *pit* (Silva, 2012; Silva e Lana, 2014). Lambe e Hertz (1988) também registram o mecanismo de flambagem para ensaios CID realizados em solos residuais de xistos e gnaisses ( $e > 1$ ) que preservam a foliação metamórfica. Os autores sugerem que este comportamento se origina devido às variações composicionais presentes nas amostras, uma vez que camadas/bandas com diferentes mineralogias, espessura e granulometria irão apresentar comportamento mecânico distintos quando solicitadas (comprimidas). Este processo pode justificar a flambagem observada nas amostras de filito analisados no presente estudo e assemelha-se ao mecanismo de dobramento ativo definido e empregado no âmbito da geologia estrutural (Fossen, 2016).

Os ensaios com rupturas controladas pelo plano de foliação metamórfica dos grupos 2 e 3 registraram um comportamento elasto-frágil para as rupturas de natureza rúptil, nas quais ocorre a secção completa do corpo de prova, configurando uma descontinuidade (Figura 41). O comportamento *strain softening* foi constatado para os cenários nos quais uma superfície de cisalhamento rúptil intercepta parte do corpo de prova, sendo seguida por uma banda de cisalhamento dúctil cuja abrangência transcende o plano de foliação (espessura milimétrica) e mobiliza a matriz do saprólito. O comportamento elasto-plástico foi observado onde a superfície de ruptura é constituída integralmente por uma banda de cisalhamento (espessura centimétrica) que mobiliza a matriz do saprólito e pode estar associada a uma pequena superfície de cisalhamento rúptil. O controle estrutural é assumido para este cenário, pelo fato da banda de cisalhamento ser paralela à foliação metamórfica, mas a foliação metamórfica apresenta pouco influência na ruptura, de fato. O mecanismo elasto-frágil ocorre também associado a um cisalhamento oblíquo à foliação metamórfica, sob baixas deformações (<5%) e foi constatado no grupo 4, refletindo a existência de uma coesão real e o comportamento rígido destes materiais. Os comportamentos deformacionais descritos nos ensaios triaxiais para os saprólitos também são reportados em escala de taludes e minas a céu aberto. Normalmente, o comportamento elasto-frágil é descrito para rupturas em nível de banco com claro controle estrutural, o comportamento *strain softening* é associado a rupturas progressivas com grandes deformações após o pico da resistência ao cisalhamento, e o comportamento elasto-plástico, correlaciona-se a rupturas com controle estrutural subordinado, em geral (Malone, 1998; Fourier e Heines, 2007; Renani e Martin, 2020).

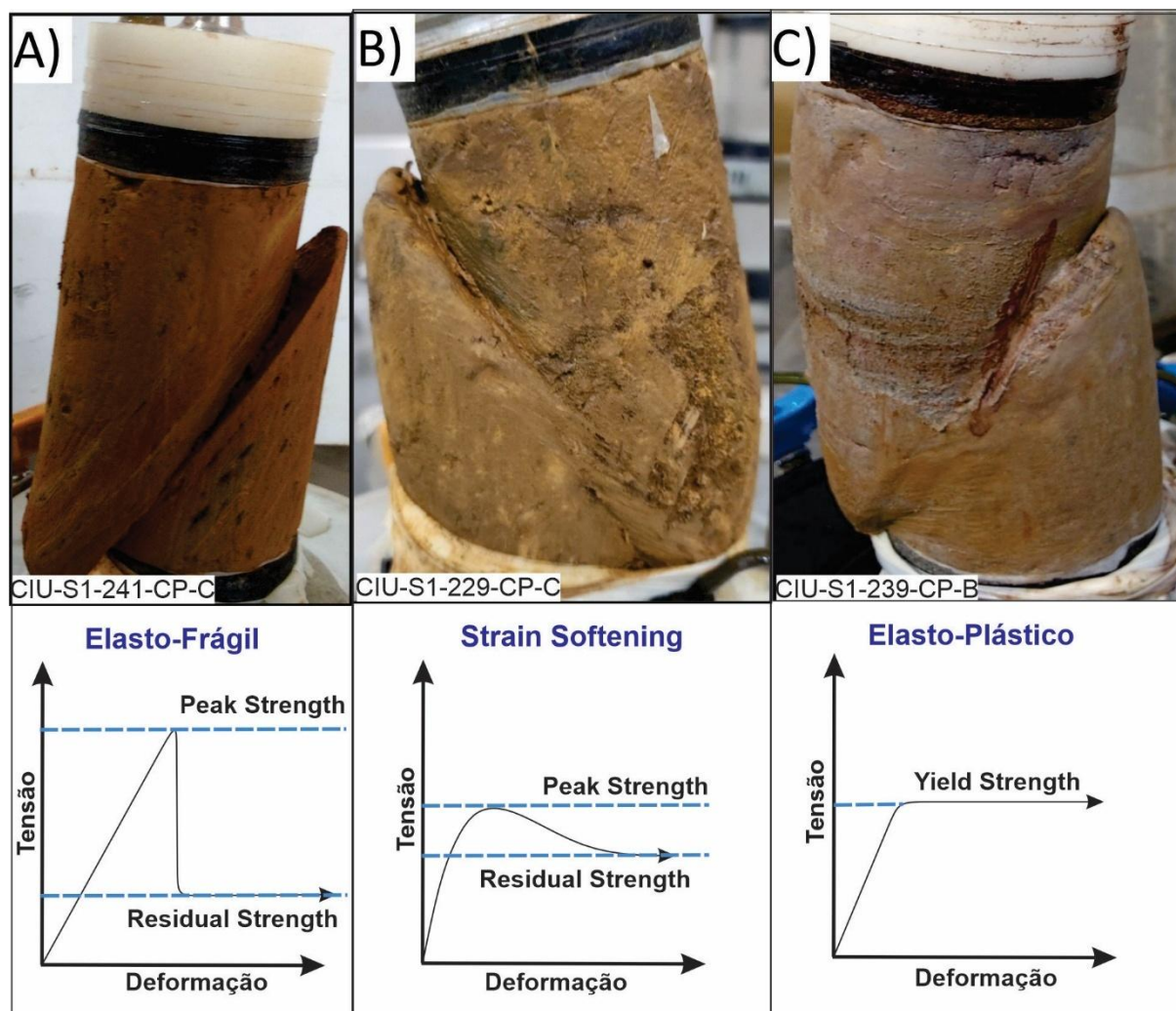


Figura 41 – Correlação entre o mecanismo de ruptura e o comportamento deformacional. A) Comportamento elasto-frágil (secção completa do CP); B) comportamento *strain softening* (secção parcial do CP); C) comportamento elasto-plástico (secção incipiente do CP).

## 6.5 Tratamento dos Parâmetros Geomecânicos em Saprólitos à Luz do Procedimento Proposto

Os trabalhos direcionados à parametrização de saprólitos apresentam, normalmente, um tratamento estatístico aplicado a uma ampla base de ensaios geotécnicos, sem apresentar informações quanto o mecanismo de ruptura do corpo de prova e comportamento deformacional (Martin e Stacey, 2018; Cella et al. 2019; Mandisodza et al. 2019). Isso dificulta a correlação entre ensaios triaxiais e, por vezes, as correlações são realizadas sem o suporte destes dados e, consecutivamente, sem o aprofundamento nas análises, levando a resultados razoavelmente dispersos e prejudicando a definição de parâmetros de resistência. O procedimento proposto apresenta critérios para a realização da amostragem, talhagem dos CPs, realização dos ensaios triaxiais e tratamento dos dados, visando estabelecer pontos mínimos que permitam a correlação entre ensaios triaxiais provenientes de filitos. Um dos pilares do procedimento é a avaliação da influência do plano de anisotropia na ruptura dos saprólitos, já que o controle dos planos de foliação metamórfica na superfície de ruptura e nos parâmetros de resistência dos saprólitos é amplamente reportado na literatura e foi observado nesta dissertação (Leroueil e Vaughan, 1990; Irfan, 1998; Aydin, 2006; Castro et al., 2013; McKenzie, 2016; Fietze et al., 2013). A

caracterização petrográfica dos blocos ensaiados também configura um ponto relevante no fluxo proposto, já que, conforme observado no presente trabalho e reportado por Irfan e Dearman (1978), a descrição tátil-visual realizada em campo não consegue captar em profundidade os processos de transformação de minerais primários em minerais secundários como a quebra da muscovita em sericita e em argilominerais. As transformações mineralógicas impactam de forma direta as propriedades índices.

Outro ponto trazido no procedimento consiste na aplicação do índice de vazios e peso específico saturado na triagem de blocos com potencial similaridade em seu grau intempérico e em seus parâmetros geomecânicos. Em última instância, esta análise poderá justificar o agrupamento de ensaios triaxiais realizados em blocos distintos de um mesmo litotipo (e.g. filito) e, assim, a determinação dos parâmetros geomecânicos é feita com base em um maior volume de CPs, reduzindo a influência de ensaios anômalos. Ainda, caso os blocos não sejam agrupados, pode-se traçar um paralelo entre os mesmos, seguindo os critérios aqui apresentados como o mecanismo de ruptura e o comportamento deformacional. Recorda-se que a correlação das propriedades índices (e.g. índice de vazios) com o grau intempérico e os parâmetros de resistência das rochas brandas, é outro tema largamente reportado na bibliografia, tendo sido mais uma vez observado nesta dissertação e em outros trabalhos dedicados aos filitos da Formação Batatal (Silva 2006; Soares 2008; Leão et al. 2017).

Por fim, sugere-se que ao se tratar ensaios triaxiais realizados em saprólitos, termos corriqueiros no universo da mecânica dos solos, como a classificação dos materiais em sobreadensado e normalmente adensado, sejam avaliados com cuidado, pois podem não ser pertinentes para materiais de natureza *in situ*, portadores de coesão e cujo índice de vazios se correlaciona com o grau intempérico e não com o histórico de tensões, como no caso dos solos transportados (Mitchel e Sitar 1982; Wesley et al. 1990). Outro ponto a ser considerado são as potenciais influências que os parâmetros geomecânicos obtidos podem sofrer, normalmente associadas a perturbações dos CPs durante a amostragem e talhagem, por questões intrínsecas da própria amostra e por heterogeneidades na saturação dos CPs, processo comumente associado à filitos ricos em muscovita (Fourier e Heines, 2007; Berre, 2011; Franca et al. 2018). Em última instância, a realização de retroanálises é um dos elementos chave na verificação dos parâmetros estabelecidos e eventuais ajustes, podendo tais informações auxiliar na calibração dos parâmetros (Clayton et al. 2020; Figueiredo et al. 2021).

## 7. CONCLUSÕES

O entendimento do comportamento mecânico das rochas brandas, em especial, dos saprólitos, é um campo ainda pouco explorado quando comparado, especificamente, a mecânica dos solos e das rochas. Contudo, é de extrema relevância para países localizados em ambientes tropicais, como o Brasil, onde grande parte da infraestrutura mineira e civil está concebida sobre estes materiais. Diante deste cenário, o procedimento para parametrização geomecânica de saprólitos apresentado nesta dissertação definiu elementos mínimos que devem ser considerados no processo de parametrização via ensaios triaxiais. Contemplou as etapas de amostragem de materiais saprolíticos, talhagem dos corpos de prova, determinação de índices físicos, execução de ensaios triaxiais CIU e CID considerando variações entre as direções de carregamento e os da foliação metamórfica.

O procedimento de parametrização foi aplicado a saprólitos de filito da Formação Batatal, que apresenta uma alta complexidade geotécnica e está associada a diversos mecanismos de ruptura nas minas à céu aberto e obras viárias presentes na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero. As amostras indeformadas de filito foram coletadas na Mina A, e talhadas em dois grupos distintos, de forma que a direção da tensão confinante ( $\sigma_3$ ) estabelece-se um ângulo agudo de aproximadamente  $45^\circ$  com a foliação metamórfica (ensaios S1) e um ângulo igual ou superior a  $70^\circ$  com a foliação metamórfica (ensaios S2). Considerando os métodos utilizados e os resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- I) O conjunto de ensaios pode ser compartimentado nos grupos 1, 2, 3 e 4, tendo como base as propriedades índices dos blocos ensaiados, o mecanismo de ruptura dos CPs, o comportamento deformacional, o comportamento de dilatância e os parâmetros geomecânicos obtidos;
- II) Os grupos 1 e 2 são caracterizados por um maior grau intempérico (W5), apresentam os maiores valores de índices de vazios, os menores valores de pesos específicos saturado e os menores parâmetros de resistência, com ângulo de atrito em torno de  $21^\circ$  e coesões inferiores a 21,5 kPa. Entretanto, diferenças importantes são observadas entre esses grupos. Especificamente, os ensaios S1 realizados nas amostras do grupo 2 registraram um controle estrutural das rupturas possivelmente atribuído a heterogeneidades na geração da poropressão em conjunto a seu comportamento contrátil. Já as amostras dos grupos 3 e 4, de comportamento dilatante, apresentam um menor grau intempérico (predominantemente W4), possuem menores valores de índices de vazios, maiores valores de peso específico saturado e maiores parâmetros de resistência, com ângulos de atrito de  $28^\circ$  e  $31^\circ$  e coesões de 24 kPa e 125,5 kPa, respectivamente. A substancial variação nos valores da coesão entre as amostras dos grupos 3 e 4 deve-se à menor resistência ao cisalhamento das rupturas com controle estrutural (paralelas à foliação metamórfica) ocorridas nos materiais do grupo 3. A análise de todos os grupos em conjunto, indicou que a anisotropia de resistência é mais evidente nos materiais com menor grau intempérico (W4) e reduz com o avanço do intemperismo (W5), podendo ser mínima ou inexistente, como constatado nas amostras do grupo 1.
- III) As principais transformações mineralógicas associadas à transição do grau intempérico de W4 para W5 consistem na conversão da muscovita nos minerais secundários sericita e caulim, que aumentam suas concentrações modais no grau intempérico W5. O processo intempérico resulta na degradação dos contatos intergranulares, na perda progressiva da trama original da rocha e, conseqüentemente, na redução da coesão. Ademais, o incremento do índice de vazios está diretamente associado à intensificação do intemperismo;
- IV) No que se refere ao comportamento mecânico dos saprólitos de filito e sua correlação com a mecânica dos solos e das rochas, observou-se que as amostras

dos grupos 1 e 2 se assemelham mecanicamente aos solos, apresentando elevado índice de vazios, geração de poropressão positiva e, pouca ou nenhuma influência dos planos de anisotropia (foliação metamórfica) nos parâmetros de resistência. As amostras dos grupos 3 e 4 apresenta similaridades com as rochas, possuindo comportamento dilatante e substancial influência da foliação metamórfica nos parâmetros de resistência;

- V) O comportamento deformacional e o mecanismo de ruptura dos saprólitos de filito da Formação Batatal são interdependentes. Nas amostras do grupo 1, observou-se a ruptura por flambagem associada ao comportamento *strain hardening*. O mecanismo de flambagem pode ser explicado pelo processo de dobramento ativo, no qual camadas com diferentes reologias e acomodam a deformação de formas distintas quando comprimidas. Os ensaios com rupturas controladas pelo plano de foliação metamórfica nas amostras dos grupos 2 e 3 registraram um comportamento elasto-frágil para as rupturas de natureza rúptil, nas quais ocorre a secção completa do corpo de prova, configurando uma descontinuidade. O comportamento *strain softening* foi constatado para os cenários nos quais uma superfície de cisalhamento rúptil intercepta parte do corpo de prova, sendo seguida por uma banda de cisalhamento dúctil cuja abrangência transcende o plano de foliação e mobiliza a matriz do saprólito. O comportamento elasto-plástico foi observado onde a superfície de ruptura é constituída integralmente por uma banda de cisalhamento que mobiliza a matriz do saprólito e pode estar associada a uma pequena superfície de cisalhamento rúptil;
- VI) Sugere-se a aplicação do procedimento proposto na parametrização de saprólitos a fim de se padronizar os elementos mínimos a serem apresentados, permitir análises e correlações mais profundas referente ao comportamento mecânico destes materiais e comprovar a aplicabilidade do método proposto.

No que se refere ao desenvolvimento de trabalhos futuros, a análise de saprólitos de filito com valores de índice de vazios distintos (inferiores e superiores) aos aqui avaliados irá permitir determinar o comportamento mecânico destes materiais dentro de um espectro maior de resistência e grau intempérico. Outro ponto relevante, consiste na aplicação do procedimento apresentado a saprólitos de outros litotipos, como quartzito e xisto. Por fim, destaca-se que os ensaios de cisalhamento direto também podem corroborar no avanço do conhecimento geotécnico quanto aos saprólitos, desde que realizados em amostras de tamanho capazes de representar as heterogeneidades normalmente presentes nos materiais *in situ*.

## REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998. DOI: 10.1016/S0301-9268(98)00036-8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4767-11 (2020)**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7181-20 (2020)**: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2016**. Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:2016** (versão Corrigida 2:2017). Solo – Determinação da massa específica dos grãos. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016** (versão Corrigida 2:2018). Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16867:2020**. Solo – Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2020.

AU, S. W. C. The influence of joint-planes on the mass strength of Hong Kong saprolitic soils. **Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 29, p. 199-204, 1996.

AYDIN, A. Stability of saprolitic slopes: nature and role of field scale heterogeneities. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 6, p. 89–96, 2006.

AZADI, A.; MOMAYEZ, M. Review on Constitutive Model for Simulation of Weak Rock Mass. **Geotechnics**, v. 4, p. 872-892, 2024.

BERRE, T. Triaxial Testing of Soft Rocks. **Geotechnical Testing Journal**, v. 62, p. 62-75, 2011.

BLIGHT, G. E. **Mechanics of Residual Soils**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. BROWN, E. T. (Ed.). **Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods**. London: Pergamon, 1981. 211 p.

CARVALHO, T.R.R.; LEÃO, M.F.; MARQUES, E.A.G. Characterization of phyllite weathering profiles developed under tropical climate on Quadrilátero Ferrífero region, MG, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. I.], 2020. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102727.

CASTRO, L. M.; CARVALHO, J.; SÁ, G. Discussion on how to classify and estimate strength of weak rock masses. In: DIGHT, P. M. (ed.). **Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 205-217.

CELLA, P.; CASTRO, L.; CARTER, T. Mining Slopes in Weathered and Weak Rocks. **Springer eBooks**, p. 373–406, 2019.

CELLA, P. R.; ALMEIDA, L. G.; CASTRO, L. M. Geomechanical Classification in weak rocks masses: Application of a modified RMR System to an Open Pit mine. In: FONTOURA, S.; ROCCA, R.; PAVÓN MENDOZA, J. (Eds.). **Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development**. [S. I.]: ISRM, 2020. p. 621-627. ISBN 978-0-367-42284-4.

CLAYTON, C.; BARNETT, R.; SLATER, M. Case study: back-analysis of a historical open pit highwall failure at a coal mine in Canada. In: DIGHT, P. M. (ed.). **Slope Stability 2020**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2020. p. 873-888. ISBN 978-0-9876389-7-7. doi:10.36487/ACG\_repo/2025\_57.

COSTA, T. A. V. da. **Brazilian banded iron formations**: a geological and geotechnical characterisation from hard and fresh to weak and completely weathered rocks. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Ambiental e de Minas) – The University of Western Australia, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, Perth, 2021.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope Stability in Residual Soils. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1971, San Juan, Puerto Rico. **Proceedings** [...]. New York: American Society of Civil Engineers, 1971. v. 1, p. 87-105.

DORR, J.V.N. II. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 641-A, pp. 1-110, 1969.

ELLIOTT, G. M.; BROWN, E. T. Yield of a soft, high porosity rock. **Geotechnique**, v. 35, n. 4, p. 413-423, 1985.

ENDO, I.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. de; ZAPPAROLI, A. de C.; CARLOS, D. U.; GALBIATTI, H. F.; CASTRO, P. de T. A.; SUITA, M. T. de F.; BARBOSA, M. S. C.; LANA, C. E.; MOURA, L. G. B. de. *Estratigrafia e arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero: nota explicativa do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Ouro Preto: Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP, Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, [em preparação]. Escala 1:150.000.

FIETZE, C.; CREIGHTON, A.; CASTRO, L. M.; HAMMAH, R. Pit slope design in phyllites for the Simandou large open pit project. In: **Slope Stability 2013**, Brisbane, Australia. Proceedings [...]. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 115-126. ISBN 978-0-9870937-5-2.

FIGUEIREDO, L. et al. Case study: open pit three-dimensional slope stability back-analysis for an anisotropic iron ore rock mass. In: DIGHT, P. M. (ed.). **SSIM 2021**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2021. p. 107-120. ISBN 978-0-6450938-1-0. doi:10.36487/ACG\_repo/2135\_04.

FOSSEN, H. **Structural Geology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

FOURIE, A. B.; HAINES, A. Obtaining Appropriate Design Parameters for Slopes in Weathered Saprolites. In: **Slope Stability 2007**, Perth, Australia, 2007. p. 105-115.

FRANCA, P.; COSTA, T.; STACEY, P. Soft iron ores and other leached rocks. In: MARTIN, D.; STACEY, P. (ed.). **Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks**. Melbourne: CSIRO Publishing, 2018. cap. 10, p. 269-308.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. Yield, Strength, and Critical State Behavior of a Tropical Saturated Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1169–1179, nov. 2004.

HEAD, K. H.; EPPS, R. J. **Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Tests**. 3. ed. Dunbeath: Whittles Publishing, 2006. v. 3.

HOEK, E. Behaviour of Soil and Rock. In: HUDSON, J. A. (Ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects**. Volume 3: Rock Testing and Site Characterization. Oxford: Pergamon Press, 1993. p. 167-211. DOI: 10.1007/3-540-28500-8\_13.

IRFAN, T. Y.; DEARMAN, W. R. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 11, n. 3, p. 233-244, 1978.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities. In: BROWN, E. T. (Ed.). **Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods**. Oxford: Pergamon Press, 1981. p. 3-52.

JAQUES, D. S. et al. Changes in the physical, mineralogical and geomechanical properties of a granitic rock from weathering zones in a tropical climate. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [s.l.], v. 54, p. 4403–4429, 2020.

JEFFCOATE, A. et al. Modelling Intact Rock Strength of Clay-Rich Rocks with Geochemistry at the Simandou Iron Ore Deposit, Guinea West Africa. In: IRON ORE CONFERENCE,

2013, Perth. **Proceedings** [...]. Perth: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2013. p. 1-10.

JOHNSTON, I. W.; NOVELLO, E. A. Soil mechanics, rock mechanics and soft rock technology. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, v. 107, n. 1, p. 3-9, jan. 1994.

LAMBE, P. C.; HEARTZ, W. T. Consolidated drained triaxial testing of Piedmont residual soil. In: DONAGHE, R. T.; CHANEY, R. C.; SILVER, M. L. (Ed.). **Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock**. ASTM STP 977. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988. p. 311-320.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI Version**. Massachusetts: John Wiley & Sons, 1969.

LEÃO, M.F. et al. Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], 2017. DOI: 10.1007/s10064-017-1036-1.

LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P. R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. **Géotechnique**, v. 40, n. 3, p. 467–488, set. 1990.

LOPES, M. da C. et al. Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG). **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p. 471-476, jul./set. 2007.

MALEKI, A. et al. Influence of graphene oxide and reduced graphene oxide on the performance and stability of PVDF membranes during oil/water emulsion separation. *Journal of Membrane Science*, v. 619, 118804, 2021.

MALONE, A. W. **Slope Movement and Failure: Evidence from Field Observations of Landslides Associated with Hillside Cuttings in Saprolites in Hong Kong**. The University of Hong Kong, 1998.

MANDISODZA, K. T.; DUNN, M. J. Geotechnical design and uncertainty in residual soil slopes. In: WESSELOO, J. (ed.). **Mining Geomechanical Risk 2019**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 475-492. ISBN 978-0-9876389-1-5. doi:10.36487/ACG\_rep/1905\_29\_Mandisodza.

MARIANO, D. F.; CARLOS, D. U. **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, 2019.

MARTIN, C. D.; STACEY, P. F. Pit slopes in weathered and weak rocks. In: DIGHT, P. M. (ed.). **Slope Stability 2013**: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 3-28.

MARTIN, D.; STACEY, P. (ed.). **Guidelines for open pit slope design in weak rocks**. Boca Raton: CRC Press, 2018. 414 p.

MITCHELL, J.K.; SITAR, N. Engineering Properties of Tropical Residual Soils. In: GEOTECHNICAL SPECIALTY CONF. ON ENG. AND COST. IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, Honolulu, Hawaii, ASCE. 1982.

OKA, F. et al. Anisotropic Behavior of Soft Sedimentary Rock and a Constitutive Model. **Soils and Foundations**, v. 42, n. 5, p. 59-70, 2002.

PEREIRA, L.C. et al. Geological-geotechnical characterization of different lithotypes in an underground mine. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 74, n. 1, p. 51-58, jan./mar. 2021.

RENANI, H. R.; MARTIN, C. D. Factor of safety of strain-softening slopes. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 473-483, 2020.

SANTIAGO, L. O. R. **Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorfizadas e filitos sericíticos da região do Quadrilátero Ferrífero e sua**

**implicação no comportamento mecânico**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SILVA, C. H. C. **Comportamento geotécnico dos filitos do talude oeste da Mina Pau Branco**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, C. H. C.; LANA, M. S. Modelagem numérica da ruptura por flambagem em um talude de mina. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 67, n. 1, p. 81-86, jan./mar. 2014.

SILVA, E. M. **Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SOARES, E. P. **Geotechnical and mineralogic characterizations of a dolomitic phyllites from Iron Quadrangle (MG) aiming to study the slopes stability incorporating the suction**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

VILELA, F. de F. M. **Modelagem litogeoquímica e geotécnica em depósito de níquel**. 2022. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, 2022.

WESLEY, L. D. Influence of structure and composition on residual soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 4, p. 589–603, abr. 1990.