

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS TRIAXIAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE FRATURAS FECHADAS EM FILITOS DO GRUPO CANASTRA, NOROESTE DE MINAS GERAIS, BRASIL

Mateus Zanini Broetto ¹; Daniel Prates Pederneiras Barbosa²; Rodrigo Peluci de Figueiredo ³; Fabio Soares Magalhães ⁴; Fernando Maia Saliba ⁵; Nilo Rodrigues Junior ⁶.

Resumo – O entendimento do comportamento das discontinuidades é fundamental para antecipar potenciais mecanismos de ruptura e para o desenvolvimento de intervenções seguras e eficazes em áreas com maciços rochosos fraturados. Nesse contexto, este trabalho buscou caracterizar fraturas fechadas, com preenchimento duro, presentes em filitos do Grupo Canastra, por meio de ensaios triaxiais em corpos de prova coletados de testemunhos de sondagem. Foram obtidos, para fraturas em filitos foliados comuns, um ângulo de atrito de 46,3° e uma coesão de 2,3 MPa. Já para fraturas em filitos silicificados, pouco foliados, foram encontrados um ângulo de atrito de 33,3° e uma coesão de 29,7 MPa. O valor bem maior de coesão para as fraturas em filito silicificado foi atribuído ao preenchimento de sílica, precipitado durante processo de silicificação das amostras. Ao se comparar os parâmetros obtidos neste trabalho com os parâmetros levantados para as respectivas rochas intactas, verificou-se que as fraturas em filitos foliados comuns apresentaram um ângulo de atrito 9,6° maior e cerca 6% da coesão da rocha intacta. Já para as fraturas em filitos silicificado, observou-se que apresentaram um ângulo de atrito 5,7° menor e cerca de 60 % da coesão da rocha intacta silicificada.

Abstract – The understanding of behavior of discontinuities is essential for anticipating potential failure mechanisms and for developing safe and effective interventions in areas with fractured rock masses. In this context, this study aimed to characterize closed fractures with hard infillings in phyllites from the Canastra Group through triaxial tests on samples collected from drilling cores. As a result, for fractures in common phyllites (non-silicified), a friction angle of 46.3° and a cohesion of 2.3 MPa were obtained, while for fractures in silicified phyllites, a friction angle of 33.3° and a cohesion of 29.7 MPa were found. The higher cohesion value for fractures in silicified phyllites was attributed to the silica infill precipitated during the silicification process of the samples. When comparing the parameters obtained in this study with those for the intact rock, it was found that fractures in common phyllites had a friction angle 9.6° higher and about 6% of the intact rock's cohesion. For fractures in silicified phyllites, it was observed that they had a friction angle 5.7° lower and about 60% of the cohesion of the intact silicified rock.

Palavras-Chave – resistência ao cisalhamento; filitos; silicificação; fraturas fechadas; preenchimento duro;

¹ Geól., MSc, Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP) – Laboratórios Quaternion, (31) 9 9305-5369, mateuszanini7@gmail.com

² Geól., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003, daniel.prates@walmengenharia.com.br

³ Eng., Prof., Dr., Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP), (31) 9 9711-2777, rpfigueiredo@ufop.edu.br

⁴ Geól., Dr., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003, fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br

⁵ Eng., MSc, Laboratórios Quaternion - Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos, (31) 9 8893-5653, fetsaliba@gmail.com

⁶ Geól, Laboratórios Quaternion, (53) 9 9956-4259, nilorodriguesjunior@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As descontinuidades estruturais em maciços rochosos desempenham um papel fundamental em seu comportamento geomecânico, condicionando sua estabilidade, frente aos esforços solicitantes impostos por obras diversas. Entre essas estruturas, as fraturas apresentam características peculiares que podem modificar significativamente os parâmetros de resistência dos maciços. No contexto da geotecnia, a compreensão detalhada do comportamento dessas descontinuidades é essencial para a previsão de possíveis mecanismos de ruptura e para o planejamento de intervenções seguras e eficientes em exposições de maciços rochosos.

Os parâmetros mais utilizados para caracterização da resistência de fraturas são o ângulo de atrito (φ°) e a coesão (c), provenientes do critério de Mohr-Coulomb. Tais parâmetros podem ser obtidos de forma direta por meio da realização de ensaios de laboratório e *in situ*. Idealmente, os ensaios *in situ* de resistência ao cisalhamento deveriam ser realizados em larga escala em descontinuidades isoladas. No entanto, esses testes são onerosos e de complexa execução, e, por isso, não são comumente realizados (Read e Stacey, 2009). Dessa forma, são realizados, alternativamente, ensaios de laboratório, dos quais se destaca o ensaio de compressão triaxial, por sua facilidade de execução em fraturas fechadas e capacidade de aplicar tensões normais elevadas sob o plano da fratura.

Para execução dos ensaios triaxiais, utiliza-se, comumente, fraturas inclinadas entre 20° e 45° em relação ao eixo do corpo de prova (ângulo ψ°) (Goodman, 1989). As tensões confinantes e axiais são aplicadas de maneira idêntica àquela para ensaios triaxiais realizados em rochas intactas. Porém, o critério de resistência obtido não pode ser entendido como uma “envoltória” aos círculos de Mohr, visto que, a ruptura está condicionada a ocorrer na fratura de ângulo ψ° e não pelo plano de ruptura mais crítico (Goodman, 1989). Dessa forma, os parâmetros de resistência de Mohr-Coloumb podem ser obtidos pelo ajuste de uma reta aos pontos de tensão normal e cisalhante, calculados a partir da projeção das tensões principais (axial e confinante) no plano da fratura.

Geralmente, os parâmetros típicos de resistência encontrados na literatura são obtidos a baixas tensões, e referem-se a descontinuidades não preenchidas ou preenchidas com material mole. No entanto, tais parâmetros podem não ser os mais adequados em minas subterrâneas profundas, onde recorrentemente, encontram-se fraturas fechadas de preenchimentos duros e inalterados, submetidas a altas tensões.

Nesse contexto, este trabalho busca caracterizar fraturas fechadas com preenchimento duro, presentes em filitos do Grupo Canastra, encontrados no noroeste de Minas Gerais, Brasil. Para isso, foram conduzidos ensaios triaxiais em corpos de prova coletados de testemunhos de sondagem, permitindo a determinação e comparação dos parâmetros de resistência das fraturas com os da respectiva rocha intacta.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

2.1. Contexto geológico das amostras

As amostras de filitos utilizadas neste trabalho pertencem à porção centro-leste da Faixa Brasília, Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1981). Essa faixa orogênica representa um cinturão de rochas dobradas relacionada ao Ciclo Brasileiro (600 Ma), que se estende por mais de 1.000 quilômetros ao longo da margem ocidental do Cráton São Francisco. A Faixa Brasília é composta por rochas metassedimentares clásticas, predominantemente pelíticas, e de baixo grau metamórfico. Em sua porção leste aflora uma espessa sequência de dolomitos do Grupo Vazante, que estão em contato tectônico com as rochas do Grupo Canastra, no qual os filitos em questão estão inseridos (Figura 1).

Em termos de caracterização geomecânica, os maciços de filito, alvos deste estudo, possuem proporções semelhantes em grau de intemperismo entre rocha moderadamente alterada (W3) e rocha levemente alterada (W2). Os graus de resistência são moderadamente resistentes (R3) e, em menor proporção, resistentes (R4), com ocorrência de núcleos R4 esparsos em meio aos maciços R3. Em profundidade, de forma contínua, ocorrem filitos silicificados (silicificação e carbonatação disseminada na matriz) com graus de intemperismo de rocha levemente alterada

(W2) e rocha sã (W1), bem como, graus de resistência resistentes (R4) e muito resistentes (R5). A classificação geomecânica dos maciços rochosos estudados se enquadra na categoria de classe I-II, correspondente a maciços rochosos de filito fresco, de muito boa qualidade geomecânica, e baixo grau de fraturamento (Figura 2). Na área estudada, os maciços de classe I-II estão distribuídos como lentes em meio aos maciços de classe III e de forma contínua em profundidade.

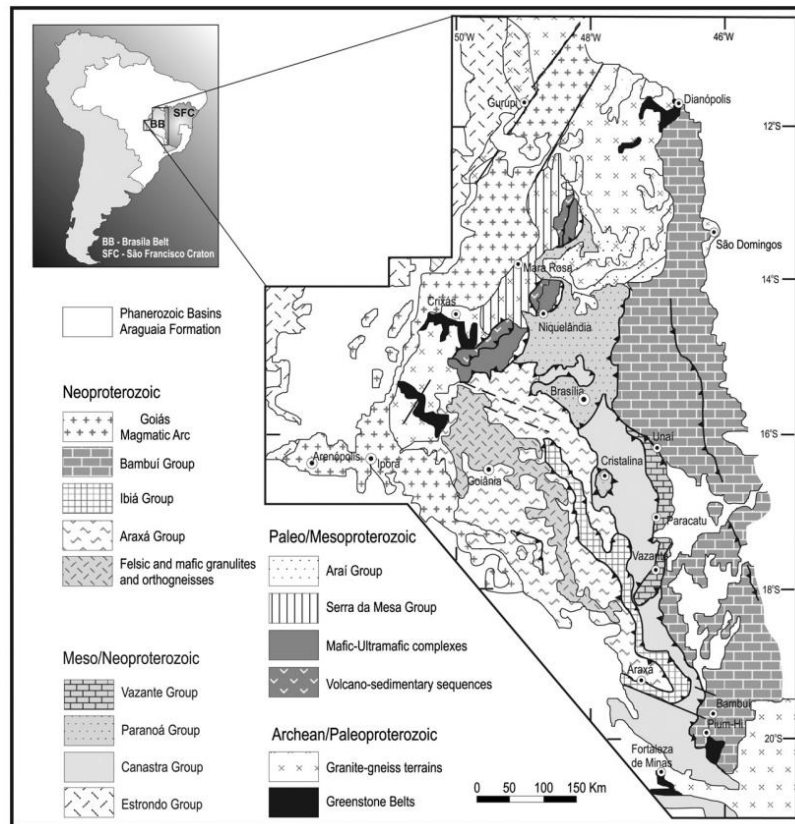


Figura 1. Mapa geológico e contexto geotectônico da Faixa Brasília (Modificado de Dardenne, 2000).



Figura 2. Afloramento de maciço de filito de classe geomecânica I-II e testemunhos de sondagem do mesmo litotipo, em profundidade.

2.2. Descrição macroscópica dos filitos

Os testemunhos de filitos coletados para este trabalho apresentam cor cinza claro a cinza escuro, com granulação fina e foliação oblíqua a horizontal, por vezes apresentando bandamento de

sericita intercalada a bandas de quartzo/carbonato. Secundariamente, podem ser observados *boudins* de quartzo, dobras e *kink bands*. São filitos carbonosos compostos predominantemente por quartzo e micas (clorita, sericita, muscovita) e, em menor quantidade, por carbonatos e sulfetos. Algumas amostras apresentam grande quantidade de sílica disseminada, tanto na matriz quanto nas estruturas, por terem passado pelo processo de silicificação (filitos silicificados) (Figura 3).

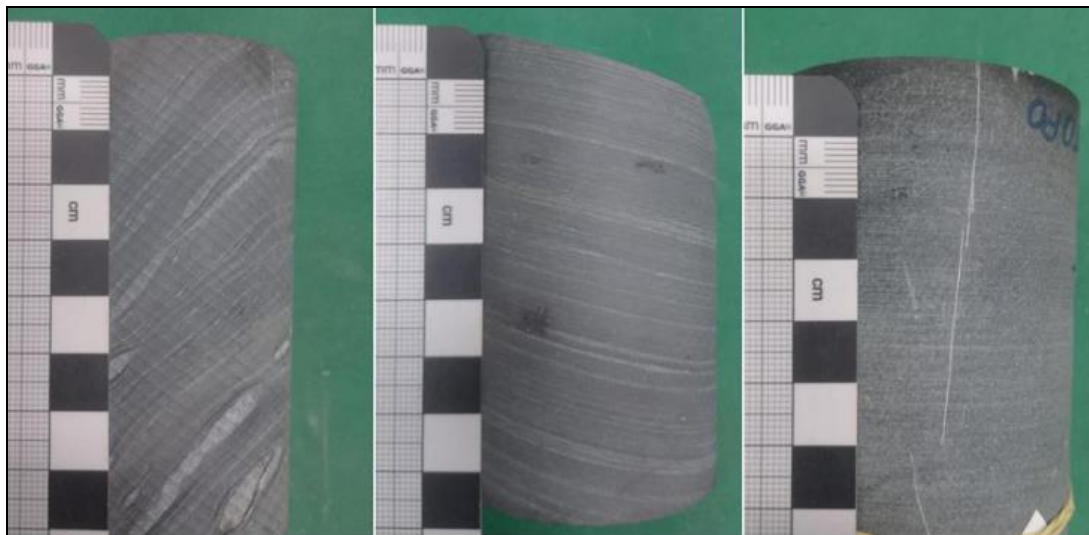


Figura 3 – Amostras de Filito do Grupo Canastra.

2.3. Descrição macroscópica das fraturas

As fraturas presentes nos testemunhos coletados são classificadas como fechadas (0 - 0,25 mm), estando, por vezes, preenchidas por veios de quartzo. Para caracterização geomecânica das fraturas, utilizou-se os índices de rugosidade, Jr, e de alteração das paredes, já, de Barton *et al.* (1974). O grau de rugosidade das amostras analisadas é classificado como majoritariamente ondulada áspera e, secundariamente, como plana áspera. As paredes das fraturas são predominantemente classificadas como levemente alteradas a oxidadas e, subordinadamente, sem alteração e muito resistentes, duras, com preenchimentos impermeáveis (quartzo). Com relação à orientação espacial do grupo de fraturas selecionadas para ensaio, verificam-se ângulos ψ° de 20° a 60° com relação ao eixo do corpo de prova. Ressalta-se que não se obtiveram valores de direção e ângulo de mergulho das estruturas, uma vez que a sondagem executada para obtenção dos testemunhos não foi orientada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de amostragem dos corpos de prova (CPs) para execução de ensaios triaxiais em laboratório se deu em testemunhos de sondagem com diâmetro HQ (63,5 mm). A coleta de amostras ocorreu subsequente à descrição geomecânica dos testemunhos de sondagem. A descrição tátil-visual revelou intervalos distintos para as variações de filito. Identificou-se a variedade carbonosa e, em profundidade, silicificação e carbonatação disseminada na matriz rochosa, sendo esse um fator contribuinte para o aumento relativo da resistência da rocha intacta, quando comparada ao litotipo filito comum. Dessa forma, amostrou-se ambos os litotipos para serem testados em laboratório. Dentre esses testemunhos, foram separados 35 com fraturas fechadas e seladas, estando presentes em 20 testemunhos de filito comum e em 15 testemunhos de filito silicificado. Todos os testemunhos de filito coletados (silicificados e não silicificados) apresentavam foliação sub-horizontal, com um ângulo superior a 60° em relação ao eixo do CP (ângulo ψ). De cada testemunho retirou-se um corpo de prova com suas extremidades (topo e base) regularizadas por uma retífica montada em um torno mecânico, respeitando-se as dimensões/tolerâncias sugeridas pela ISRM (1979) e ISRM (1983). A regularização não foi feita ao longo do eixo do corpo de prova para evitar perturbações nas fraturas. Após a retífica, os corpos de prova ficaram com uma relação altura/diâmetro de 2,1 a 2,3. Em seguida, estimou-se o ângulo

dos planos das fraturas com relação ao eixo do corpo de prova (ψ°), por meio de um clinômetro, com uma precisão de 1° .

O equipamento utilizado para execução da campanha de ensaios proposta possui uma capacidade para aplicar até 150 tf de carga axial. Tem um desenho compacto, não convencional (*Bishop type self supporting cell*), no qual a estrutura de reação consiste de vários tirantes de aço temperado acoplando o prato superior à base, onde fica abrigado o sistema hidráulico. A pressão axial é aplicada por meio de um atuador hidráulico servo-acionado, que movimenta o CP contra a reação da estrutura mediante controle por *software* específico. Todo o controle e aquisição de dados do ensaio são feitos via *wireless*. A Figura 1 ilustra o equipamento preparado para execução dos ensaios de compressão uniaxiais e triaxiais nas fraturas. Vale notar, que na realização dos primeiros, o equipamento utiliza um cilindro de aço vazado em torno do CP (Figura 1A) que lhe confere uma grande rigidez no descarregamento, minimizando bastante, com isso, a possibilidade da ocorrência de rupturas "explosivas" e descontroladas, principalmente em situações com rocha intacta. Por sua vez, nos ensaios triaxiais é incorporada uma célula triaxial, ilustrada na (Figura 1B) que permite aplicar até 70 MPa de pressão confinante. As tensões confinantes são aplicadas por um macaco hidráulico manual e medida por dois manômetros com faixas de leitura de 0 a 15 MPa e 0 a 70 MPa (Teste tipo I, sugerido em ISRM, 1983). Para ambos os ensaios, uniaxiais e triaxiais, foram aplicadas taxas de carregamento axial de 0,5 a 1 MPa/s, conforme sugestões da ISRM (1979) e ISRM (1983).

Para determinação dos parâmetros de resistência das fraturas, foram montadas 7 séries com 5 corpos de prova cada. Para cada série, utilizaram-se tensões confinantes entre 1,5 e 28 MPa, a depender do litotipo, tendo sempre, em cada série, um CP submetido a confinamento nulo (ensaio uniaxial). A tensão de confinamento máxima ($\sigma_{3\text{máx}}$) para cada litotipo foi definida com base na resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, sendo igual a 25 % desse valor. A partir da $\sigma_{3\text{máx}}$ foram definidos os níveis de confinamento inferiores atendendo à seguinte progressão geométrica decrescente: $\sigma_{3\text{máx}}$, $\sigma_{3\text{máx}}/2$, $\sigma_{3\text{máx}}/4$, $\sigma_{3\text{máx}}/8$ e $\sigma_{3\text{máx}}/16$ (Tabela 1). Todos os corpos de prova foram ensaiados em condição natural de umidade (secos).

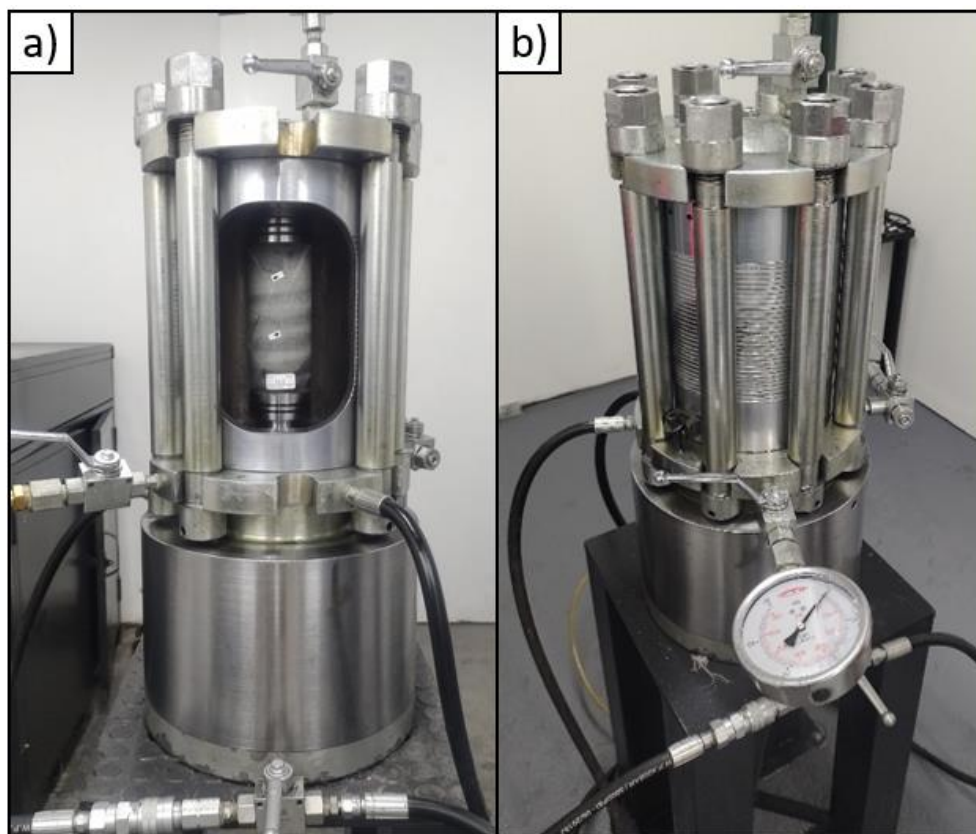


Figura 4. Equipamento utilizado para ensaios uniaxiais e triaxiais nos corpos de prova, do tipo *Bishop type self supporting cell*. A) Cilindro de aço vazado para ensaios uniaxiais. B) Célula triaxial.

Tabela 1. Condições dos ensaios triaxiais executados para fraturas fechadas em filitos comuns e silicificados.

Descontinuidades	Nº de CP's	Níveis de confinamento	$\psi_{\min} - \psi_{\max}$
Fraturas - Filito	20	0 - 1,5 - 3,0 - 6,0 - 12 MPa	20° - 60°
Fraturas - Filito Silicificado	15	0 - 3,5 - 7,0 - 14,0 - 28,0 MPa	21° - 55°

Para a definição dos parâmetros de resistência das fraturas, optou-se pela utilização do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O critério foi obtido de acordo com o melhor ajuste aos pontos de tensões normais e cisalhantes atuantes sobre o plano da fratura de ângulo ψ° , sendo resultado da transformação das tensões principais, conforme exemplificado na Figura 5, onde são apresentados os resultados da série de ensaios número 10. Durante o ajuste, considerou-se somente as rupturas ocorridas pelos planos das fraturas (rupturas válidas), sendo consideradas como inválidas, as rupturas ocorridas exclusivamente na matriz da rocha, ou de forma mista (ruptura passando pela matriz e a fratura).

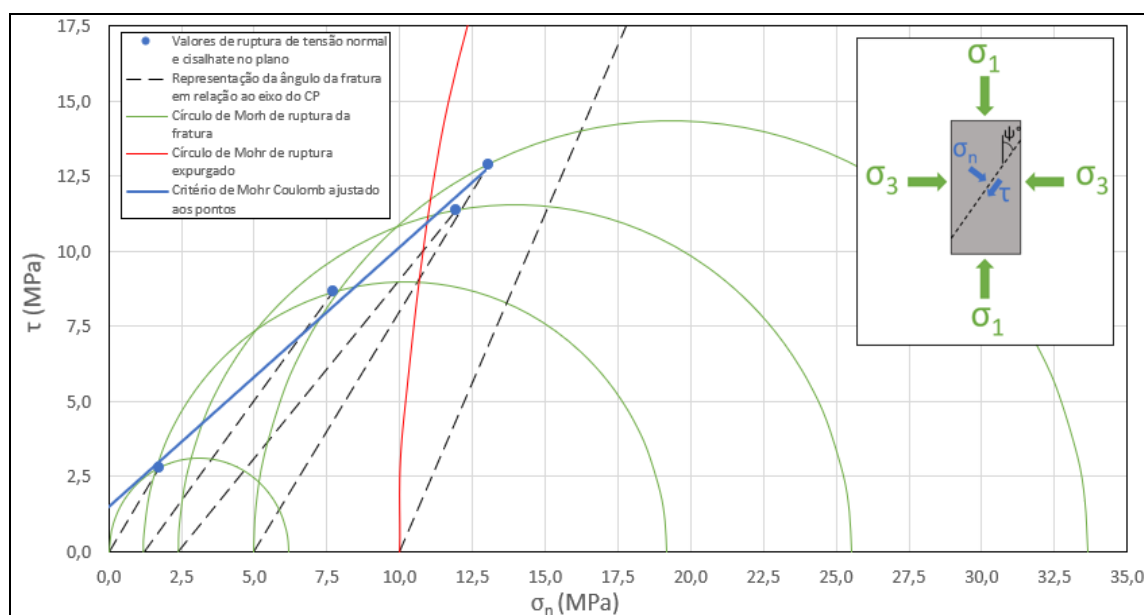


Figura 5. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb aplicado à análise dos resultados dos ensaios triaxiais, calculando-se as tensões normal e cisalhante atuantes nos planos das fraturas fechadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a execução dos ensaios foram obtidas 23 rupturas válidas e 12 rupturas inválidas, sendo, das rupturas válidas, 15 nos filitos comuns e 8 nos filitos silicificados, conforme exemplificado na Figura 6. As rupturas se desenvolveram em fraturas com ângulos ψ de 24° a 53° para os filitos comuns e de 23° a 39° para os filitos silicificados. De acordo com as recomendações de Goodman (1989), a faixa de ângulo ψ das fraturas ensaiadas deveria ser de 20° a 45°, para se evitarem rupturas fora do plano da fratura. Entretanto, observaram-se rupturas válidas em uma faixa de ângulos ψ mais ampla, especialmente para os filitos comuns. Cerca de 80% das rupturas inválidas (10) não ocorreram fora da faixa de ângulo ψ esperada ($\psi > 45^\circ$), e, sim, justamente o oposto, com ângulos ψ variados, de 20° a 40°. Para esses casos, as rupturas ocorreram de forma mista ou exclusivamente pela matriz da rocha, devido à elevada resistência das fraturas em relação à matriz, por efeito do preenchimento ou revestimento duro e pontes de rocha, presentes principalmente nas fraturas dos filitos silicificados. Dessa forma, a resistência relativa entre o preenchimento das fraturas e matriz, e não a orientação das fraturas, foi fator preponderante para ocorrência de rupturas inválidas. Assim, é plausível concluir que a faixa de ψ° recomendada por Goodman (1989) seja mais adequada para fraturas abertas, sem ou com preenchimento mole.

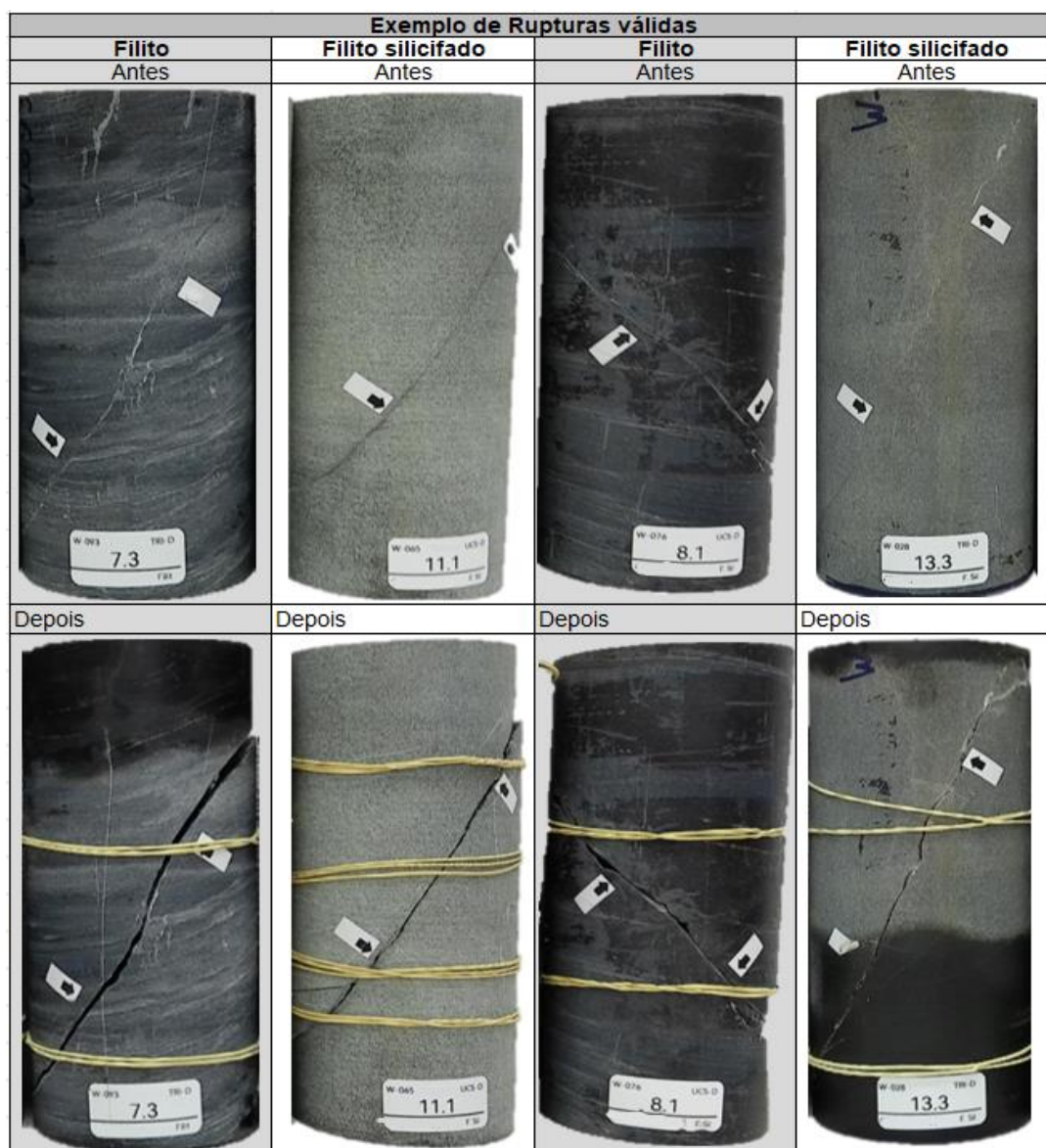


Figura 6. Exemplos de rupturas válidas através das discontinuidades analisadas.

Quanto aos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb, obteve-se, para as fraturas dos filitos comuns, um ângulo de atrito de $46,3^\circ$ e uma coesão de 2,3 MPa. Já para as fraturas dos filitos silicificados, foram encontrados um ângulo de atrito de $33,3^\circ$ e uma coesão de 29,7 MPa (Figura 7 e Tabela 2). Esses parâmetros foram obtidos para uma faixa de tensão normal de ruptura de 1,7 a 102,5 MPa, sendo, portanto, consideravelmente maior do que as aplicadas em equipamentos de cisalhamento direto. No entanto, em ensaios triaxiais, as tensões normais não se mantêm constantes sobre plano da fratura e não são aplicadas de forma direta. Nesses ensaios as tensões normais aumentam gradativamente até o momento da ruptura, e são tão maiores quanto maior for a resistência e o confinamento aplicado. Por esse motivo, para o caso das fraturas em filitos silicificados, não foi possível obter valores de resistência para tensões normais inferiores a 25 MPa, pelo fato dessas fraturas apresentarem uma resistência (coesão) muita alta.

Tabela 2. Parâmetros de resistência do critério de ruptura de Mohr-Coulomb obtidos para os planos de fraturas ensaiados.

Para as rupturas consideradas como válidas					
Descontinuidades	N° de CP's	$\psi_{\min} - \psi_{\max}$	φ	C	$\sigma_n(\psi)_{\min} - \sigma_n(\psi)_{\max}$
Fraturas - Filito	15	$24^\circ - 53^\circ$	$46,3^\circ$	2,3 MPa	1,7 – 55,3 MPa
Fraturas - Filito Silicificado	8	$23^\circ - 39^\circ$	$33,3^\circ$	29,7 MPa	24,4 - 102,6 MPa

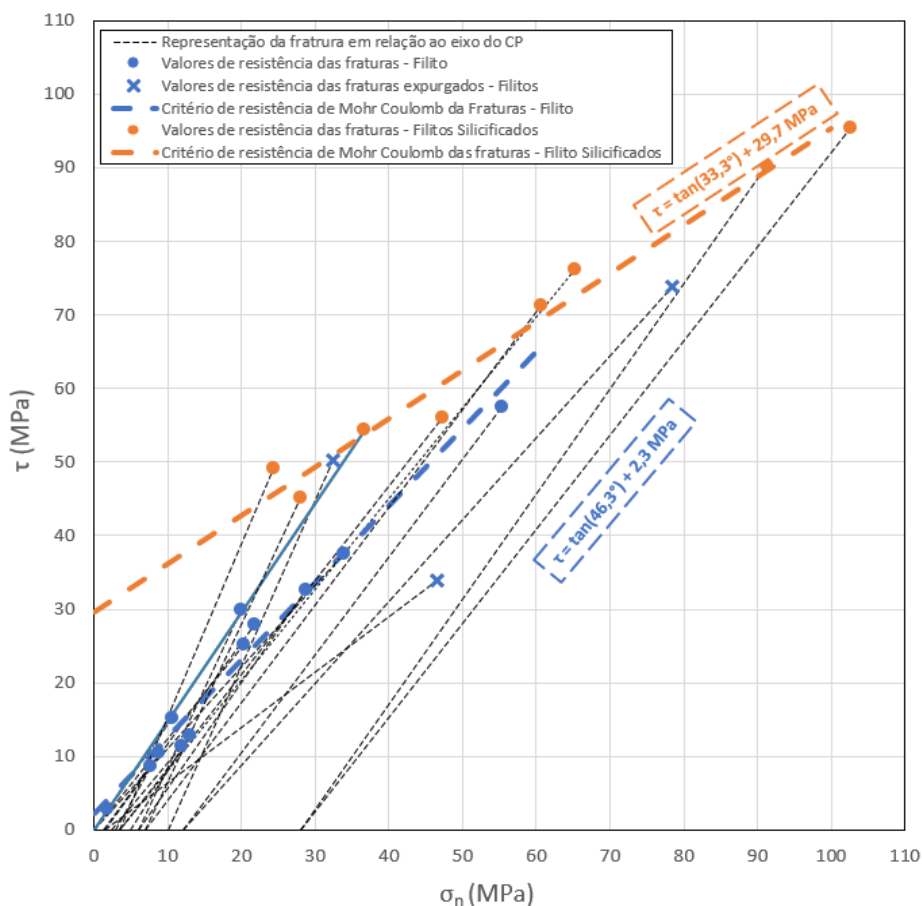


Figura 7. Critérios de ruptura de Mohr-Coulomb ajustados aos dados, no gráfico de tensões cisalhantes por tensões normais, separados por litotipo.

Foi possível observar um aumento substancial de coesão nas fraturas devido ao processo de silicificação, quando comparadas com a coesão das fraturas presentes no filito comum, não silicificado. Em contrapartida, as fraturas em filito comum, apesar de possuírem uma coesão menor, apresentaram um ângulo de atrito 13° maior do que o obtido para as fraturas silicificadas, provavelmente, por terem sido ensaiadas com tensões normais menores, as quais favorecem o efeito da dilatância. Ao se considerarem níveis de tensão normal equivalentes aos aplicados nas fraturas em filitos silicificados ($\sigma_n > 20$ MPa), nos quais o efeito de dilatância deve ter sido parcialmente suprimido, obtém-se, para as fraturas em filito comum, uma coesão de 10,5 MPa e um ângulo de atrito de $39,2^\circ$, que é $5,9^\circ$ maior que o obtido para as fraturas silicificadas (Figura 8).

Broetto (2024) realizou 50 ensaios uniaxiais e 60 ensaios triaxiais nos mesmos litotipos sem a presença de fraturas (rochas intactas) e com foliação sub-horizontal ($\psi > 60^\circ$). O nível de tensões aplicadas (confinamento) nos ensaios triaxiais foram iguais aos aplicados nos ensaios realizados nas fraturas. Na Figura 8, também são apresentados os parâmetros de Mohr-Coulomb para ambos os filitos intactos, silicificados e não silicificados (comuns). Ao se comparar os parâmetros obtidos neste trabalho com os parâmetros levantados por Broetto (2024), verifica-se que as fraturas em filitos comuns apresentaram um ângulo de atrito $9,6^\circ$ maior e cerca 6% da coesão da rocha intacta. Para o caso das fraturas em filitos silicificados, observa-se que elas apresentaram um ângulo de atrito de $5,7^\circ$ inferior e cerca de 60 % da coesão da rocha intacta silicificada. Tal valor de coesão (29,7 MPa) é expressivamente alto quando comparado aos parâmetros de fraturas abertas, as quais geralmente possuem uma coesão de magnitude menor do que a coesão da rocha, muitas vezes, de valores inferiores a 400 KPa, conforme levantamento feito por Read e Stacey (2009). No entanto, geralmente esses valores de coesão presentes na literatura referem-se a fraturas abertas preenchidas por material mole ou particulado, as quais, frequentemente, governam o comportamento do maciço rochoso. Já a presença de fraturas com preenchimento duro, como as fraturas silicificadas abordadas nesse trabalho, só representariam uma condição

crítica de ruptura, caso o maciço rochoso fosse pouco fraturado e se estivesse submetido a altas tensões desviadoras, as quais deveriam ser minimamente superiores à resistência da fratura desconfiada.

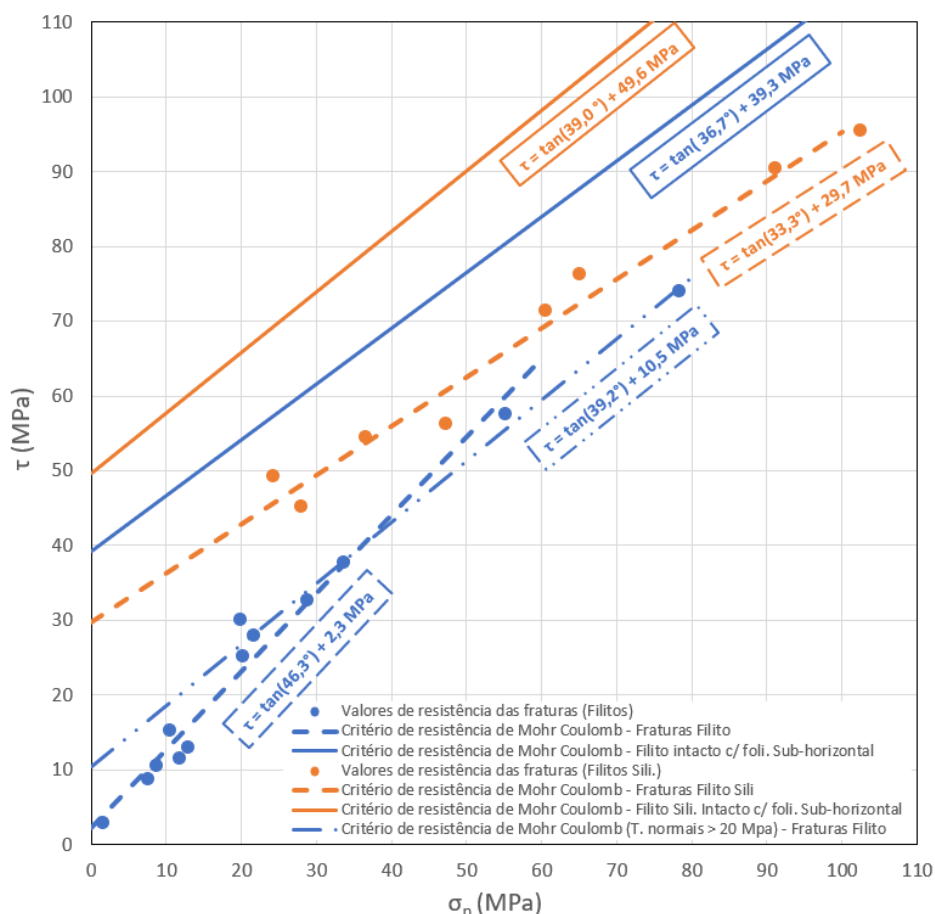


Figura 8 – Critérios de Mohr-Coulomb ajustados para a rocha íntegra e fraturas em filitos comuns e silicificados.

5. CONCLUSÕES

Os estudos conduzidos nessa etapa de trabalho, acerca da resistência de fraturas fechadas em filitos do Grupo Canastra permitiram uma caracterização preliminar, porém relevante, da resistência ao cisalhamento dessas discontinuidades tanto para as fechadas sem preenchimento, quanto para as seladas por preenchimento duro.

O presente estudo evidencia a eficácia da utilização de ensaios triaxiais para caracterização da resistência ao cisalhamento das discontinuidades supracitadas, principalmente para situações de confinamento mais elevado do maciço rochoso, em que o efeito da dilatação é possivelmente suprimido. Os resultados obtidos para as tensões normais e cisalhantes nos planos das discontinuidades, sob diversas tensões confinantes, foram devidamente interpretados para definição dos parâmetros do critério de ruptura de Mohr-Coulomb das fraturas ensaiadas.

Quando comparados aos ensaios usuais de cisalhamento direto em discontinuidades, os ensaios triaxiais são mais acurados, pois permitem conhecer completamente o estado de tensões na amostra e as tensões normais e de cisalhamento são uniformes no plano da fratura (Goodman, 1989). Isso não sucede no cisalhamento direto, onde não se conhece o estado de tensões e as tensões no plano não são, via de regra, uniformes (permitindo, entre outros efeitos indesejados, uma rotação relativa entre as partes da amostra fraturada – Goodman, 1989). Outra vantagem ponderável é a maior facilidade para realização de ensaios multi-estágios, nos quais as tensões confinantes são sucessivamente elevadas à medida que a resistência seja atingida para um determinado confinamento (Goodman, 1989). Tais ensaios multi-estágios permitem obter o critério de resistência da fratura a partir de uma única amostra, outra vantagem substancial, tendo em vista a reconhecida dificuldade de se obter amostras adequadas e representativas.

Conforme observado, os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos para fraturas fechadas em filitos carbonosos e filitos silicificados, ensaiados a tensões confinantes distintas, ressaltam a anisotropia de resistência dessas estruturas com relação à rocha intacta. Ao se comparar os parâmetros obtidos neste trabalho com os parâmetros levantados para as respectivas rochas intactas, verificou-se que as fraturas em filitos foliados comuns apresentaram um ângulo de atrito 9,6° maior e cerca 6% da coesão da rocha intacta. Já para as fraturas em filitos silicificado, observou-se que apresentaram um ângulo de atrito 5,7° menor e cerca de 60 % da coesão da rocha intacta silicificada. Os resultados obtidos também evidenciaram um comportamento resistente significativamente superior àquele relatado na literatura para fraturas abertas.

A partir da análise dos resultados dos parâmetros encontrados, percebe-se que a preservação dessas fraturas em seu estado fechado (íntegras), especialmente em maciços rochosos com boa qualidade geomecânica e baixa densidade de fraturamento, deve ser considerada em projetos de engenharia, destacando a necessidade do uso de técnicas de desmonte que minimizem a indução e propagação de danos excessivos, como o pré-corte.

Para refinamento dos resultados em etapas posteriores recomenda-se que as investigações para amostragem dessas descontinuidades incluam análises petrográficas detalhadas dos preenchimentos, perfilagem das fraturas, além de amostragem com orientação espacial controlada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), que, por meio da concessão de bolsa de estudos, contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, p. 1–29, 1981.

BROETTO, M., Z. Utilização de uma prensa enrijecida ao descarregamento para caracterização e deformabilidade de filitos, magnetitos e rochas calciossilicáticas. 2024. 276 f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

DARDENNE, M. A. The Brasília fold belt. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (ed.). *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. p. 231–263.

GOODMAN, R. E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*. Vol. 16, No. 2, pp. 135 – 140, 1979.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 20, n. 6, p. 283–290, 1983.

READ, J.; STACEY, P. *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood: CSIRO Publishing – CRC Press, 2009.