

**INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE ROCHAS NA RESISTÊNCIA À ESTABILIDADE: UMA AVALIAÇÃO POR MEIO DO ENSAIO DE INCLINAÇÃO (*TILT TEST*)**

Haline Dugolin Ceccato <sup>1</sup>; Marco Antonio da Rosa Soares <sup>2</sup>; Rinaldo José Barbosa Pinheiro <sup>3</sup>; Andréa Valli Nummer <sup>4</sup>

**Resumo** – Este estudo investigou a influência da rugosidade superficial no ângulo crítico de deslizamento de rochas vulcânicas utilizando o *Tilt Test*. Amostras com estruturas vesiculares e amigdaloides foram submetidas a tratamentos de superfície distintos: serrada (rugosidade natural), polimento com abrasivo #100 (granulação grossa) e #1500 (granulação fina). Os resultados demonstraram que abrasivos grossos aumentaram o ângulo crítico em ~23% (45,7°–46,5°), porém com alta variabilidade (amplitudes de 5,01°–7,05°), enquanto abrasivos finos reduziram-no em 7%–13% (36,01°–36,86°), exceto na amostra 8 (DP = 0,74), que apresentou consistência excepcional. A heterogeneidade na microrrugosidade, associada ao uso de abrasivos grossos, reforçou a necessidade de critérios estatísticos rigorosos, como o descarte de médias quando a diferença entre extremos e mediana excede 3°. A sensibilidade do ensaio a imperfeições residuais, mesmo em superfícies lisas, foi confirmada, destacando a importância de protocolos metodológicos controlados. A saturação das amostras não foi avaliada devido à ruptura prematura causada pela infiltração de água em estruturas vesiculares. Conclui-se que a rugosidade superficial é um parâmetro crítico para estimar o ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ), mas sua análise requer integração entre estatística robusta, caracterização microscópica e controle experimental, essencial para aplicações geotécnicas confiáveis.

**Abstract** – This study investigated the influence of surface roughness on the critical sliding angle of volcanic rocks using the *Tilt Test*. Samples with vesicular and amygdaloidal structures were subjected to distinct surface treatments: sawn (natural roughness), polished with #100 abrasive (coarse grit), and #1500 abrasive (fine grit). Results demonstrated that coarse abrasives increased the critical angle by ~23% (45.7°–46.5°), albeit with high variability (ranges of 5.01°–7.05°), while fine abrasives reduced it by 7%–13% (36.01°–36.86°), except for sample 8 (SD = 0.74), which exhibited exceptional consistency. Heterogeneity in microroughness, associated with coarse abrasives, reinforced the need for rigorous statistical criteria, such as discarding means when the difference between extremes and the median exceeds 3°. The test's sensitivity to residual imperfections, even on smooth surfaces, was confirmed, highlighting the importance of controlled methodological protocols. Saturation of samples was not evaluated due to premature rupture caused by water infiltration into vesicular structures. It is concluded that surface roughness is a critical parameter for estimating the basic friction angle ( $\phi_b$ ), but its analysis requires integration of robust statistics, microscopic characterization, and experimental control, essential for reliable geotechnical applications.

**Palavras-Chave** – Rugosidade superficial; Tilt Test; Ângulo de atrito básico.

<sup>1</sup> Geól., Msc. Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, haline.ceccato@gmail.com

<sup>2</sup> Geógrafo, Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, ma-arco@hotmail.com

<sup>3</sup> Eng. Civil, Professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria e do PPGECC da UFSM, rinaldo@ufsm.br

<sup>4</sup> Geól., Professora do Curso de Geografia da Universidade Federal de Santa Maria e do PPGECC da UFSM, a.nummer@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes em contextos geotécnicos, como barragens, projetos minerários e infraestruturas viárias, representa um significativo risco socioambiental, cujas consequências podem ser catastróficas dependendo da proximidade de áreas habitadas. Nesse cenário, a determinação do ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ) assume papel crítico na estimativa da resistência ao cisalhamento de descontinuidades rochosas, parâmetro fundamental para análises de estabilidade em projetos de engenharia geotécnica. Estudos consolidados demonstram que o uso desse parâmetro oferece resultados consistentes com condições reais (Barton, 1973; Barton e Choubey, 1977; Kulatilake et al., 1995; Grasselli e Egger, 2003; Xia et al., 2014; Tang e Wong, 2016).

O componente friccional da resistência ao cisalhamento está intrinsecamente associado ao ângulo de repouso observado em materiais granulares sob equilíbrio cinemático em superfícies inclinadas. Quantificado empiricamente, o  $\phi_b$  é amplamente adotado na modelagem de estabilidade de maciços rochosos naturais ou projetados, seja em taludes (Alejano et al., 2010, 2011) ou em escavações subterrâneas (Alejano et al., 2008), visando mitigar mecanismos de ruptura planar, em cunha ou por tombamento. Adicionalmente, esse parâmetro estende-se ao cálculo do fator de segurança em projetos de engenharia, reafirmando sua relevância técnica e prática.

Definido como o ângulo de atrito medido em superfícies planas não alteradas, o  $\phi_b$  constitui uma propriedade intrínseca do material rochoso, cuja magnitude depende da sua composição mineralógica e textura (Patton, 1966; Barton, 1973). Na década de 1970, Barton (1973, 1976) sistematizou valores de  $\phi_b$  referenciais para diferentes litologias, identificando intervalos entre 21° e 38°. Estudos posteriores observaram que rochas sedimentares apresentam  $\phi_b$  entre 25° e 30°, enquanto rochas ígneas e metamórficas exibem valores superiores (30°–35°), indicando correlação direta entre litotipo e resistência friccional (Alejano et al., 2012).

Em relação à quantificação experimental, o  $\phi_b$  tem sido historicamente realizado por meio de ensaios de inclinação (*tilt tests*), metodologia amplamente difundida por sua simplicidade operacional e custo reduzido (Horn e Deere, 1962; Stimpson, 1981; Cruden e Hu, 1988; Bruce et al., 1989; Wines e Lilly, 2003; Alejano et al., 2012; Ruiz e Li, 2014; González et al., 2014). Nessa abordagem, o ângulo crítico de deslizamento de um corpo rochoso sobre uma superfície inclinada corresponde diretamente a  $\phi_b$ , sob condições estáticas ideais. Apesar de sua ampla adoção, não há consenso metodológico padronizado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) para sua determinação (Ulusay e Hudson, 2007), embora técnicas como a proposta por Stimpson (1981) — que utiliza núcleos cilíndricos posicionados sobre superfícies homólogas — sejam frequentemente adotadas.

A fundamentação física do ensaio baseia-se no equilíbrio de forças gravitacionais: à medida que uma plataforma contendo as amostras é inclinada gradualmente, o ângulo crítico ( $\beta$ ) registrado no instante pré-deslizamento equivale ao  $\phi_b$ , assumindo ausência de coesão e adesão. Contudo, a reprodutibilidade dos resultados é influenciada por variáveis não controladas, como rugosidade superficial, taxa de inclinação, efeitos de adsorção e eletricidade estática (Stimpson, 1981; Alejano et al., 2012). Essas interferências explicam a distribuição não normal dos dados obtidos, sugerindo a urgência de protocolos mais rigorosos para minimizar as variações nos resultados obtidos.

A rugosidade superficial em descontinuidades rochosas é função direta de processos de preparação mecânica, como corte diamantado ou polimento com abrasivos. Por exemplo, as superfícies serradas mantêm microasperezas naturais (rugosidade elevada) enquanto o polimento com granulometria fina (e.g., #600) promove a redução de irregularidades, aproximando-se de condições ideais de contato (Grasselli e Egger, 2003). Essa dualidade impacta a interpretação do  $\phi_b$ : em superfícies rugosas, a interlockagem mecânica entre asperezas pode elevar artificialmente o ângulo crítico, mascarando o atrito intrínseco do material (Patton, 1966). Por outro lado, superfícies excessivamente lisas introduzem artefatos como adesão ou efeitos de escala, subestimando  $\phi_b$  (Ruiz e Li, 2014).

Diante desse paradoxo, propõe-se uma análise sistemática de três condições de rugosidade em testemunhos vulcânicos: (i) superfície serrada (rugosidade natural), (ii) polimento com abrasivo #100 (rugosidade intermediária) e (iii) polimento com abrasivo #600 (rugosidade reduzida); e duas condições de estado dos testemunhos com a rugosidade modificada com o abrasivo: (i) seca (ii)

saturada. Amostras foram submetidas a *Tilt Test* padronizados, com controle de velocidade de inclinação e dimensões geométricas, para isolar o efeito da rugosidade. O objetivo central deste estudo visa avaliar como a rugosidade superficial influencia a inclinação crítica de deslizamento via *Tilt Test*.

## 2. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A caracterização petrográfica indica que as rochas são vulcânicas ácidas equigranular afanítica cinza-clara com estrutura veicular e amigdaloidal, com variação milimétrica a centimétricas. No geral, as amígdalas são preenchidas por minerais secundários de baixa temperatura, como por exemplo, zeolitas, calcita. Foram selecionados testemunhos de sondagem com geometria padronizada: com comprimento (l) de 12 cm e diâmetro de (D) de 53 cm. As amostras satisfazem, portanto, a condição de  $l/h > 3 \tan \beta$ , que é uma condição de deslizamento normal abaixo do ângulo de deslizamento ( $\beta$ ) de  $59^\circ$  (Alejano et al., 2012). As amostras secas foram aquecidas com o mantimento dos testemunhos em um forno por 24 horas em temperatura constante de  $40^\circ\text{C}$ . As amostras saturadas foram mantidas submersas em água destilada por um período de 32 horas em um recipiente selado.

### 2.1 Tratamento de superfícies

Três tipos de superfícies deslizantes foram preparados para examinar o efeito das diferentes condições da superfície deslizante no ângulo de deslizamento. O primeiro tipo de superfície foi cortado por uma serra de diamante, um método comumente usado em estudos anteriores (Horn e Deere, 1962, Stimpson 1981, Cruden e Hu 1988, Bruce et al., 1989, Grasselli e Egger, 2003; Alejano et al., 2012).

A superfície cortada pela serra é quase plana e suavemente polida por uma lâmina de serra rotativa de alta velocidade, embora traços de corte em forma de degrau devido à lâmina de serra sejam visíveis. Para preparar o segundo e o terceiro tipo, as superfícies foram polidas por pó de moagem #100 e #1500 (denominados superfície #100 e superfície #1500). A superfície #100 é plana e lisa, enquanto a superfície #1500 é mais plana e lisa do que a superfície #100 e a superfície cortada pela serra; no entanto, não é brilhante como um espelho. Nove amostras de rochas (vulcânicas) e três tipos de superfícies (corte de serra, superfície #100 e superfície #1500) foram preparadas para o teste de inclinação. Cada teste envolve cinco repetições da seguinte sequência de inclinação:

(i) a parte inferior dos corpos de provas é fixada na plataforma basculante e a horizontalidade da superfície ou dos contatos deve ser garantida por meio um nível de bolha, ou nível eletrônico;

(ii) antes de cada repetição do teste de inclinação (são recomendados cinco testes em cada amostra), a superfície deve ser limpa e o pó de rocha deve ser removido (nas amostras que passaram por processo de alteração da superfície);

(iii) a parte superior da amostra deve ser colocada sobre a(s) outra(s) peça(s) com suas superfícies correspondentes em contato, e a posição relativa de todas as peças da amostra deve ser verificada para ser reproduzível em repetições subsequentes. A direção de deslizamento deve ser ao longo da dimensão máxima da amostra (l);

Cada grupo experimental contou com 6 corpos de prova (totalizando 18 amostras), homogêneos quanto à orientação de estratificação e ausência de microfissuras. As superfícies foram limpas em banho de água por 15 minutos para remoção de detritos abrasivos e secos na estufa.

### 2.2 Tilt Test

O ensaio seguiu o método descrito por Stimpson (1981), baseado no uso de três amostras cilíndricas (conforme recomendados para testes UCS, (Ulusay e Hudson, 2007), de 54 mm de diâmetro e com uma altura de pelo menos o dobro do diâmetro. Uma amostra foi colocada sobre as

outras duas de modo que tivesse uma geratriz em contato com cada uma (Figura 2). Cinco repetições de cada teste para cada condição da amostra foram realizadas.



Figura 1. Imagem do equipamento utilizado durante o ensaio.

Sendo  $\beta$  a inclinação do conjunto no momento do deslizamento, conforme proposto por Stimpson (1981), o ângulo de atrito básico foi estimado conforme apresentado na Equação 1.

$$\phi_b = \tan^{-1} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \tan \beta \right) \quad \text{Equação 1}$$

### 3.RESULTADOS

Na Figura 2 é exemplificado por meio de imagem e descrição as características iniciais dos nove corpos de provas utilizados neste estudo, evidenciando principalmente a textura da rocha, que nesse caso, temos a predominância de vesículas e amígdalas.



CP 01, Vesículas com diâmetro entre 1 e 2 mm foram observadas, associadas a amígdalas de dimensões variando de 1 a 3 mm. Tais estruturas apresentam-se integralmente preenchidas por celadonita, conforme identificado em análise mineralógica.



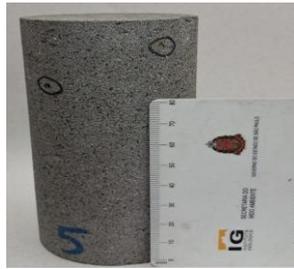
CP 02, Vesículas com diâmetro entre 1 e 5 mm foram observadas, associadas a amígdalas de dimensões variando de 1 a 3 mm. Tais estruturas apresentam-se integralmente preenchidas por celadonita, conforme identificado em análise mineralógica.



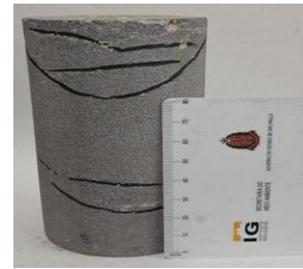
CP 03, Não foram identificadas vesículas nas amostras analisadas. Entretanto, constatou-se a ocorrência de amígdalas com dimensões reduzidas em comparação aos demais corpos de prova (CP), apresentando diâmetro entre 0,2 e 0,5 mm. Essas estruturas exibem preenchimento completo por limonita.



CP 04, Vesículas com diâmetro entre 1 e 5 mm foram identificadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 4 mm. Essas estruturas exibem preenchimento combinado por celadonita e calcedônia, conforme caracterização mineralógica realizada.



CP 05, Vesículas com diâmetro entre 3 e 4 mm foram identificadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 2,5 mm. Essas estruturas apresentam preenchimento composto por celadonita e calcedônia, conforme caracterização mineralógica realizada.



CP 06, Vesículas com diâmetro entre 1 e 4 mm foram identificadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 4 mm. Essas estruturas exibem preenchimento composto por celadonita e calcedônia, conforme caracterização mineralógica realizada. A distribuição e a morfologia dessas feições são claramente evidenciadas na amostra.



CP 07, Vesículas com diâmetro entre 1 e 20 mm foram identificadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 20 mm. Essas estruturas apresentam preenchimento poliminerálico, composto por celadonita, calcedônia, zeólita e quartzo, conforme caracterização mineralógica realizada.



CP 08, Vesículas com diâmetro entre 1 e 35 mm foram identificadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 20 mm. Essas estruturas apresentam preenchimento poliminerálico, composto por celadonita, calcedônia, zeólita e quartzo, conforme caracterização mineralógica detalhada.



CP 09, Vesículas com diâmetro entre 1 e 30 mm foram observadas, associadas a amígdalas de dimensões entre 1 e 30 mm. Essas estruturas exibem preenchimento poliminerálico, constituído por celadonita, calcedônia, zeólita e quartzo, conforme caracterização mineralógica detalhada.

Figura 2. Descrição petrográfica dos corpos de prova.

Os dados analisados originam-se de ensaios realizados para determinação do ângulo de atrito básico de juntas de rocha, um parâmetro fundamental que reflete a adesão entre superfícies de contato. Como evidenciado na literatura (Wines e Lilly, 2003; Ruiz e Li, 2014; Jang et al., 2017), superfícies polidas são essenciais para medições precisas desse ângulo, uma vez que minimizam a influência da rugosidade macro e mesoscópica. No entanto, mesmo em núcleos perfurados com diamante – método frequentemente utilizado para obter superfícies cilíndricas “lisas” –, há rugosidade em pequena escala (Li et al., 2019), o que pode introduzir variações nos resultados, conforme observado nos dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo estatístico do *Tilt Test* com todas as amostras.

| Resumo estatístico |       |         |               |              |              |           |
|--------------------|-------|---------|---------------|--------------|--------------|-----------|
| Amostra            | média | mediana | desvio padrão | valor mínimo | valor máximo | amplitude |
| 1                  | 37,69 | 38,96   | 2,82          | 39,99        | 33,69        | 6,30      |
| 2                  | 38,95 | 38,96   | 1,27          | 41,03        | 37,91        | 3,11      |
| 3                  | 36,86 | 37,91   | 2,11          | 38,96        | 33,69        | 5,27      |
| 4                  | 37,07 | 36,87   | 0,88          | 37,91        | 35,81        | 2,10      |
| 5                  | 37,49 | 36,87   | 0,94          | 38,96        | 36,87        | 2,09      |
| 6                  | 38,33 | 38,96   | 1,59          | 39,99        | 35,81        | 4,18      |
| 7                  | 41,43 | 42,06   | 2,00          | 44,10        | 38,96        | 5,14      |
| 8                  | 38,53 | 37,91   | 2,60          | 43,08        | 36,87        | 6,21      |
| 9                  | 38,95 | 38,96   | 1,27          | 41,03        | 37,91        | 3,11      |

A metodologia de *tilt tests* com amostras de rochas de testemunho de sondagem (Stimpson, 1981; Li et al., 2019) – adotada por muitos pesquisadores – foi utilizada nos 45 ensaios realizados. Esse método, embora padronizado, está sujeito a flutuações devido a:

- Rugosidade residual: mesmo em superfícies cilíndricas consideradas lisas, irregularidades microscópicas podem causar dispersões nos valores de ângulo de atrito crítico, especialmente em amostras com alta variabilidade (e.g., amostras 1 e 8, com amplitude > 6°).

- Efeito do desgaste: a realização de repetições sucessivas nos mesmos corpos de provas (prática comum, conforme Bruce et al., 1989; Alejano et al., 2012) pode alterar as propriedades superficiais. Por exemplo, a amostra 1, com valor mínimo de 33,69° e máxima amplitude (6,30°), pode refletir desgaste acumulado após 5 repetições, reduzindo progressivamente a adesão entre as superfícies.

A recomendação do Alejandro et al. (2012) – usar 3 repetições, com uma quarta se a diferença entre valores extremos e a mediana exceder 3° – é relevante para interpretar os dados. Amostras como a 1 (diferença de ~ 5,3° entre a mediana e o mínimo) e a 8 (diferença de ~ 6,21° entre o máximo e o mínimo) ultrapassam esse limiar, sugerindo que ensaios adicionais seriam necessários para validar a média. Isso reforça a importância de critérios estatísticos rigorosos na seleção do número de repetições. A alta variabilidade na amostra 7 (DP = 2,00), no entanto, pode estar ligada a imperfeições na preparação das superfícies ou à heterogeneidade do material, mesmo após polimento.

A análise dos dados de ângulo de atrito básico em amostras com rugosidade modificada por abrasivo é apresentada na Tabela 2 que correspondem a 6 amostras (4 a 9), divididas em dois grupos conforme o abrasivo utilizado para modificar a rugosidade superficial: Amostras 4,5 e 6: abrasivo 100 (granulação mais grossa, maior rugosidade induzida); Amostras 7,8 e 9: abrasivo 1500 (granulação mais fina, superfície mais lisa).

A escolha do abrasivo exerceu influência direta sobre os valores médios do ângulo de atrito básico. As amostras tratadas com abrasivo 100 (granulação grossa), representadas pelas amostras 4,5 e 6, exibiram médias mais elevadas (45,7 a 45,5°), em comparação às amostras com abrasivo 1500 (granulação fina), que registraram médias entre 36,01° e 36,86°. Essa diferença é atribuída ao maior interlocking mecânico gerado pela rugosidade induzida pelo abrasivo 100, conforme teorizado por Cruden e Hu (1988).

Tabela 2. Resumo estatístico com as amostras que sofrerão modificação na rugosidade.

| Resumo estatístico |       |         |               |              |              |           |
|--------------------|-------|---------|---------------|--------------|--------------|-----------|
| Amostra            | média | mediana | desvio padrão | valor mínimo | valor máximo | amplitude |
| 4                  | 46,10 | 46,11   | 2,57          | 49,11        | 42,06        | 7,05      |
| 5                  | 46,50 | 45,11   | 2,88          | 50,09        | 44,10        | 6,00      |
| 6                  | 45,70 | 44,10   | 2,31          | 49,11        | 44,10        | 5,01      |
| 7                  | 36,01 | 35,81   | 2,40          | 38,96        | 33,69        | 5,27      |
| 8                  | 36,86 | 36,87   | 0,74          | 37,91        | 35,81        | 2,10      |
| 9                  | 36,65 | 36,87   | 1,74          | 37,91        | 33,69        | 4,22      |

Entretanto, essa mesma rugosidade também ampliou a variabilidade interna: as amostras 4 e 5, por exemplo, tiveram amplitudes superiores a 6°, excedendo o limiar de 3° estabelecido por Alejano et al. (2012) como critério de confiabilidade estatística. Esse comportamento sugere que, embora o abrasivo 100 aumente a resistência ao deslizamento, heterogeneidades na microrrugosidade – oriundas de fatores como abrasividade variável da rocha ou inconsistências na aplicação do abrasivo – pode comprometer a confiabilidade dos resultados, exigindo maior número de repetições para estabilizar a média.

A baixa dispersão observada nas amostras 7, 8 e 9 (abrasivo 1500) corrobora a relação entre superfícies lisas e consistência nos resultados. A amostra 8, em particular, destacou-se com desvio padrão de apenas 0,75, sugerindo que o abrasivo fino, quando aplicado sob condições controladas, minimiza irregularidades superficiais. Contudo, a amostra 7 – submetida ao mesmo abrasivo 1500 – registrou amplitude de 5,27°, anomalia possivelmente associada a imperfeições residuais na superfície ou desgaste assimétrico durante os ensaios, fenômeno descrito por Li et al. (2019) como comum mesmo em superfícies macroscopicamente lisas.

A análise comparativa entre as amostras revelou implicações práticas importantes. Por exemplo, a amostra 5 (abrasivo 100), apesar da média alta (46,5°), apresentou valor mínimo de 44,1°, o que demandaria uso desse limite inferior em projetos geotécnicos para garantir segurança. Já a amostra 8 (abrasivo 1500), com baixíssima dispersão, seria ideal para modelos precisos, como simulações de estabilidade de taludes.

Para otimizar a confiabilidade dos ensaios, recomenda-se: padronizar parâmetros operacionais (pressão, velocidade do abrasivo) durante o preparo das superfícies, aumentar o número de repetições em amostras com alta variabilidade (como as amostras 4 e 5), seguindo diretrizes de Alejano et al. (2012); e integrar técnicas de caracterização superficial (e.g., perfilometria a laser) para correlacionar microrrugosidade com resultados experimentais, conforme proposto por Jang et al. (2017). Essas medidas mitigariam incertezas ligadas à heterogeneidade do material e às limitações metodológicas, alinhando a prática experimental aos padrões exigidos em aplicações críticas de engenharia.

Embora o objetivo do estudo contemplasse a realização do *Tilt Test* em amostras saturadas, essa etapa não pôde ser executada. Conforme evidenciado na Figura 2, a maioria das amostras apresentava estruturas com amígdalas e vesículas. Quando submetidas ao processo de saturação, há indícios de que a água penetrou nessas cavidades, ocasionando tensões internas no material. Esse fenômeno resultou na ruptura prematura dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 3. Diante desse comportamento mecânico incompatível com a integridade necessária para a realização do ensaio, optou-se por excluir a condição saturada da análise experimental.



A) CP 08



B) CP 06

Figura 3. Representação das amostras após o processo de saturação.

### 3.1 Discussão dos resultados antes e após o polimento com abrasivos

Os resultados evidenciaram que a granulometria do abrasivo utilizada no tratamento superficial influenciou decisivamente tanto a magnitude quanto a variabilidade do ângulo de atrito crítico ( $\phi_b$ ) das amostras. Nas amostras 4,5 e 6, polidas com abrasivos 100 (granulação grossa), observou-se um aumento expressivo nas médias do ângulo de atrito crítico, passando de  $37,07^\circ$  -  $38,33^\circ$  para  $45,70^\circ$  -  $46,50^\circ$ , o que representa um incremento relativo de aproximadamente 23%. Esse comportamento está em consonância com a teoria clássica de que superfícies mais rugosas, geradas por abrasivos grossos, promovem maior interlocking mecânico entre as superfícies de contato, elevando a resistência ao deslizamento (Cruden e Hu, 1988).

Entretanto, esse ganho foi acompanhado por uma ampliação significativa na variabilidade dos resultados, com amplitudes que saltaram de  $2,09^\circ$  -  $4,18^\circ$  para  $5,01^\circ$  -  $7,05^\circ$ . Essa dispersão sugere heterogeneidade na microrrugosidade induzida pelo abrasivo 100, possivelmente devido a interações não uniformes entre o abrasivo e a matriz rochosa, agravadas por fatores como abrasividade variável do material ou inconsistências na aplicação da pressão durante o polimento (González et al., 2014).

Por outro lado, as amostras 7,8 e 9, tratadas com abrasivo 1500 (granulação fina), as médias do ângulo de atrito crítico reduziram-se de  $38,53^\circ$  -  $41,43^\circ$  para  $36,01^\circ$  -  $36,86^\circ$ , refletindo uma diminuição de 7% a 13%. Essa tendência corrobora estudos anteriores que associam superfícies mais lisas à menor adesão entre interfaces (Li et al., 2019).

Contudo, a variabilidade comportou-se de maneira heterogênea: enquanto a amostra 8 exibiu uma redução drástica no desvio padrão (de  $2,60^\circ$  para  $0,74^\circ$ ), indicando alta consistência após o polimento, a amostra 7 manteve dispersão elevada ( $DP = 2,4^\circ$ ), com amplitude de  $5,27^\circ$ . Essa discrepância pode estar associada a imperfeições residuais na superfície ou a um desgaste assimétrico ocorrido com os ensaios repetitivos, fenômeno descrito por Ruiz e Li (2014) como comum mesmo em superfícies macroscopicamente homogêneas.

A análise estatística (Tabela 4) reforça a significância dessas mudanças. Um teste t pareado revelou diferenças significativas nas médias antes e após o polimento apenas para o primeiro grupo ( $p < 0,0020$  para abrasivo 100). Além disso, o coeficiente de variação (CV) demonstrou que o abrasivo 100 aumentou a variabilidade relativa em todas as amostras tratadas (e.g., CV da amostra 5 subiu de 2,51% para 6,19), enquanto o abrasivo 1500 reduziu o CV apenas na amostra 8 (de 6,75 para 2). Esses resultados destacam que a eficácia do polimento em gerar consistência depende não apenas da granulometria do abrasivo, mas também da homogeneidade intrínseca do material e do controle rigoroso das condições experimentais.

A análise de valores fora do esperado, denominado *outliers*, também apresenta implicações importantes para a interpretação dos dados. Na amostra 5 (abrasivo 100), o valor máximo pós-polimento atingiu  $50,09^\circ$ , 23% acima do mínimo registrado ( $44,10^\circ$ ), possivelmente devido a picos localizados de rugosidade. Já na amostra 7 (abrasivo 1500), o mínimo de  $33,69^\circ$  ficou 14% abaixo da média, sugerindo que desgaste progressivo ou falhas pontuais na preparação da superfície podem ter comprometido a adesão em ensaios específicos. Tais *outliers* reforçam a recomendação de Alejano et al. (2012) de descartar médias quando a diferença entre extremos e a mediana

ultrapassa 3°, critério que, se aplicado aqui, invalidaria as médias das amostras 4, 5 e 7 sem repetições adicionais.

Tabela 3. Análise estatística.

| Grupo         | Média antes | Média após | p-valor    |
|---------------|-------------|------------|------------|
| Abrasivo 100  | 37,63°      | 46,10°     | < 0,002075 |
| Abrasivo 1500 | 39,64°      | 36,51°     | 0,05718    |

Em síntese, os resultados evidenciaram um trade-off entre a magnitude do ângulo de atrito e a confiabilidade estatística. Embora abrasivo 100 tenha elevado a resistência ao deslizamento, sua alta variabilidade exige cautela em aplicações críticas, privilegiando o uso de valores mínimos para cálculos conservadores. Por outro lado, o abrasivo 1500, reduziu o ângulo de atrito, mostrou que, para as amostras analisadas, não houve diferença significativa entre o material antes e após o polimento.

Para superar essas restrições, recomenda-se a integração técnicas de caracterização superficial (e.g., perfilometria a laser) aos ensaios mecânicos, permitindo correlacionar microrrugosidade quantificada com parâmetros de resistência, conforme proposto por Jang et al. (2017). Essa abordagem multidisciplinar, aliada a protocolos estatísticos, mitigaria incertezas metodológicas e ampliaria a confiabilidade dos resultados em estudos futuros e projetos geotécnicos que exigem um alto nível de precisão.

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo comprovou que a rugosidade superficial influencia significativamente o ângulo crítico de deslizamento (*Tilt Test*), com abrasivos de granulometria grossa (100) elevando o ângulo em ~23% (45,7°–46,5°), porém com alta variabilidade (5,01°–7,05°), enquanto abrasivos finos (1500) reduziram-no em 7%–13% (36,01°–36,86°), exceto na amostra 8 (DP = 0,74), que demonstrou consistência excepcional. A variabilidade observada em superfícies rugosas reforça a necessidade de critérios estatísticos rigorosos (e.g., descarte de médias quando a diferença entre extremos e mediana >3°, conforme Alejano *et al.*, 2012), indicando que cinco repetições são insuficientes para materiais heterogêneos. A sensibilidade do *Tilt Test* a microvariações superficiais (Li *et al.*, 2019) confirma que imperfeições residuais impactam resultados, mesmo em superfícies macroscopicamente lisas. Conclui-se que a rugosidade superficial é um parâmetro crítico para estimar o ângulo de atrito básico, mas sua análise exige integração entre metodologia estatística robusta, caracterização microscópica e controle experimental rigoroso, essencial para aprimorar a previsibilidade de comportamentos geotécnicos em escala real.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e o Programa de Pós Graduação em Geografia (PPGGEO), ambas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo suporte oferecido.

#### REFERÊNCIAS

- Alejano LR, Taboada J, Bastante FG, Rodríguez P (2008) Multi-approach back-analysis of a roof collapse in a mining room excavated in stratified rock. *Int J Rock Mech Min Sci* 45:899–913. doi:[10.1016/j.ijrmms.2007.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.10.001).
- Alejano LR, Gómez-Márquez I, Martínez-Alegría R (2010) Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Eng Geol* 114:93–104. doi:[10.1016/j.enggeo.2010.03.005](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.005).

- Alejano LR, Ferrero AM, Ramírez-Oyanguren P, Álvarez-Fernández MI (2011) Comparison of limit equilibrium, numerical, and physical models of wall slope stability. *Int J Rock Mech Min Sci* 48:16–26. doi:[10.1016/j.ijrmms.2010.06.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.013)
- Alejano, L. R., González, J., and Muralha, J., 2012, “Comparison of Different Tilt Testing Techniques and Basic Friction Angle Variability Assessment,” *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 45, No. 6, pp. 1023–1035, <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0265-7>
- Barton N (1973) Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Eng Geol* 7:287–332.
- Barton N (1976) The shear strength of rock and rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 13:255–279. doi:[10.1016/0148-9062\(76\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6)
- Barton N, Choubey V (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech* 10:1–54. doi:[10.1007/BF01261801](https://doi.org/10.1007/BF01261801)
- Bruce IG, Cruden DM, Eaton TM (1989) Use of a tilting table to determine the basic friction angle of hard rock samples. *Can Geotech J* 26:474–479
- Cruden DM, Hu XQ (1988) Basic friction angles of carbonate rocks from Kananaskis country, Canada. *Bull Int Assoc Eng Geol* 38:55–59. doi:[10.1007/BF02590448](https://doi.org/10.1007/BF02590448)
- González, J., González-Pastoriza, N., Castro, U., Alejano, L. R., and Muralha, J., 2014, “Considerations on the Laboratory Estimate of the Basic Friction Angle of Rock Joints,” presented at the *ISRM European Regional Symposium EUROCK 2014*, Vigo, Spain, International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, pp. 199–204.
- Grasselli, G. and Egger, P., 2003, “Constitutive Law for the Shear Strength of Rock Joints Based on Three-Dimensional Surface Parameters,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 40, No. 1, pp. 25–40, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00101-6)
- Horn HM, Deere DU (1962) Frictional characteristics of minerals. *Géotechnique* 12:319–335. doi:[10.1680/geot.1962.12.4.319](https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.4.319)
- Kulatilake, P. S. H. W., Shou, G., Huang, T. H., and Morgan, R. M., 1995, “New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 32, No. 7, pp. 673–697, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00022-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00022-9)
- Patton FD (1966) Multiple modes of shear failure in rock. In: *Proceedings of 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics (I)*, Lisbon, pp 509–513
- Ruiz, J. and Li, C., 2014, “Measurement of the Basic Friction Angle of Rock by Three Different Tilt Test Methods,” presented at the *ISRM Regional Symposium—EUROCK 2014*, Vigo, Spain, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Lisbon, Portugal, pp. 261–266.
- Stimpson B (1981) A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18:63–65
- Tang, Z. C. and Wong, L. N. Y., 2016, “New Criterion for Evaluating the Peak Shear Strength of Rock Joints under Different Contact States,” *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 49, No. 4, pp. 1191–1199, <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0811-1>
- Ulusay R, Hudson JA (2007) *The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. ISRM Turkish Natl Group, Ankara.
- Xia, C.-C., Tang, Z.-C., Xiao, W.-M., and Song, Y.-L., 2014, “New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description,” *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 47, No. 2, pp. 387–400, <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0395-6>
- Wines DR, Lilly PA (2003) Estimativas da resistência ao cisalhamento das juntas de rocha em parte da operação a céu aberto de Fimiston na Austrália Ocidental. *Int J Rock Mech Min Sci* 40(6):929–937