

# Retroanálise em Escorregamento em Solo Residual em Nova Friburgo/RJ

Lucas Daltro Xavier Nobrega Miguez

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [lucasdaltro@live.com](mailto:lucasdaltro@live.com)

Marcio Fernandes Leão

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [marcio.leao@puc-rio.br](mailto:marcio.leao@puc-rio.br)

**RESUMO:** A região serrana do Rio de Janeiro é marcada pela dificuldade de seus acessos. Por estarem inseridas em superfícies montanhosas, as obras de estradas que ligam as cidades litorâneas a essas áreas sempre denotam grande dificuldade. Neste contexto, a necessidade do conhecimento das propriedades dos materiais que compõem as encostas dessas vias é de vital importância para a segurança da população que ocupa a região, bem como para a economia local. Este artigo apresenta a retroanálise realizada no talude da estrada RJ-142, que liga os municípios de Casimiro de Abreu a Nova Friburgo, com o objetivo de comparar os parâmetros obtidos nas análises por meio de equilíbrio limite, ora variando os parâmetros geomecânicos da camada coluvionar, ora os parâmetros da camada residual madura, aos ensaios realizados em laboratório. Ao longo do texto será possível apreciar os resultados obtidos na campanha de investigação programada após o deslizamento, contando com a coleta de duas amostras indeformadas, selecionadas a partir da campanha de sondagens mistas, sendo uma para o material identificado como solo coluvionar e outra para o solo residual maduro. Cada bloco forneceu quatro corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto com os corpos de prova inundados e quatro em umidade natural, além da caracterização para determinar os percentuais granulométricos, limites de consistência e massa específica dos grãos. Foi possível identificar, em primeira análise, que o fator de segurança obtido para as amostras em condição inundada é consideravelmente abaixo da unidade e, para as amostras em umidade natural, os resultados apontam para um fator de segurança pouco acima da unidade, o que sugere a hipótese do talude íntegro antes do deslizamento, mas suscetível à ruptura frente a qualquer variação das condições.

**PALAVRAS-CHAVE:** Parâmetros geomecânicos; Serra de Macaé; Sana.

**ABSTRACT:** The mountainous region of Rio de Janeiro is characterized by the inherent difficulty of its access routes, as road construction across rugged relief linking coastal cities to inland areas has historically posed significant engineering challenges. Within this context, a thorough understanding of the geotechnical properties of slope-forming materials is essential to ensure both the safety of local populations and the resilience of regional infrastructure. This article presents a back-analysis of the slope at kilometer 41 of the RJ-142 highway, which connects the municipalities of Casimiro de Abreu and Nova Friburgo, aiming to compare parameters derived from limit equilibrium analyses—considering variations in the geomechanical behavior of the colluvial and mature residual layers—with laboratory test results. The post-failure investigation campaign involved mixed-method drilling and the collection of two undisturbed soil blocks, one from the colluvial horizon and the other from the mature residual profile. Each block provided four specimens tested under direct shear in saturated conditions and four under natural moisture, complemented by particle size distribution, Atterberg limits, and specific gravity determinations. The analyses revealed that safety factors under saturated conditions were markedly below unity, whereas those under natural moisture remained marginally above unity, suggesting that the slope was in a precarious state of equilibrium prior to failure and highly susceptible to collapse upon even modest hydrological variations.

**KEYWORDS:** Geomechanical parameters; Serra de Macaé; Sana

## 1 INTRODUÇÃO

Sob a ótica da evolução dos conceitos em engenharia, observa-se que grande parte dos avanços decorre da análise de estruturas que entraram em colapso, cujas falhas fornecem subsídios empíricos valiosos para o aprimoramento de métodos de dimensionamento, critérios de estabilidade e compreensão do comportamento

dos materiais envolvidos. Nesse contexto, a retroanálise de taludes rompidos destaca-se como ferramenta apropriada e de baixo custo, ao possibilitar a inferência de parâmetros geomecânicos mais representativos das condições reais de campo (Guidicini e Nieble, 1983).

Segundo definição de Gerscovich (2016), talude corresponde a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, seja natural ou antrópica. Os taludes rodoviários, por sua vez, consistem em cortes e aterros executados ao longo de vias terrestres para adequação ao relevo, configurando-se como estruturas particularmente suscetíveis à instabilidade — sobretudo em regiões serranas submetidas a regimes pluviométricos intensos e irregulares, como as que caracterizam o trecho analisado neste trabalho, situado no km 41 da Rodovia RJ-142, entre Lumiar e Barra do Sana, no limite entre os municípios de Casimiro de Abreu e Nova Friburgo. Busca-se, ao longo deste artigo, contribuir para a compreensão dos mecanismos envolvidos na ruptura, reforçar a relevância de investigações detalhadas e alertar para a existência de taludes rodoviários em condições análogas àquelas verificadas neste estudo. Assim, o objetivo do presente artigo é apresentar a retroanálise realizada no talude da estrada RJ-142, que liga os municípios de Casimiro de Abreu a Nova Friburgo, buscando comparar os parâmetros obtidos nas análises por meio de equilíbrio limite, ora variando os parâmetros geomecânicos, ora o coeficiente  $R_u$ , aos ensaios realizados em laboratório.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

Em abril de 2020, foi registrada a ruptura de um talude de superfície convexa difusora ao longo da Rodovia RJ-142, também conhecida como Avenida Serramar, durante o período final da estação chuvosa — tradicionalmente marcada por elevados índices pluviométricos. No entanto, a análise dos dados meteorológicos disponíveis não indica acumulados excepcionais nos dias imediatamente anteriores ao escorregamento, o que sugere a atuação de outros fatores locais, como saturação pré-existente, alterações nos materiais constituintes e condicionantes geotécnicos específicos da encosta, como elementos decisivos na deflagração do movimento.



Figura 1. Encosta com a seção analisada.

### 2.1 Geologia, Geomorfologia e Litologia

Segundo o mapeamento geológico da CPRM para a Folha Casimiro de Abreu (2012), a área de estudo localiza-se na Serra de Macaé, entre o Arraial e a Barra do Sana, em zona de transição entre a Baixada Fluminense e a região Serrana do Rio de Janeiro. Geotectonicamente, integra a Província Mantiqueira e o Cinturão Ribeira, marcados pelo Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico–Cambriano). Predominam rochas da Suíte Intrusiva Sana (SIS), especialmente o Granito Sana, um monzo a sienogranito leucocrático, equigranular, de granulação fina a média, com biotita, muscovita e sillimanita em zonas cisalhadas. Apresenta caráter peraluminoso, assinatura crustal e fracionamento de ETRs, compatível com ambiente de arco magmático. Suas fácies incluem granodioritos e biotita granitos, correlacionáveis a granitóides tipo-S gnaissificados.

Estruturalmente, o Granito Sana é classificado como uma intrusão pós-tectônica sin-F4, datada em 492–488 Ma, com orientação predominante E-W e intrusão forçada em estruturas ENE-WSW sob compressão NNW-SSE. A compartimentação estrutural da região, dominada por zonas de cisalhamento tardias, falhas e fraturas, confere ao relevo um aspecto fortemente dissecado, com morros íngremes e encostas instáveis. As feições morfoestruturais, como vales retilíneos e escarpas lineares, refletem a intensa atividade tectônica e a presença de rochas cataclásticas, favorecendo a recorrência de movimentos de massa sobre coberturas delgadas.

## 2.2 Clima, Vegetação e Hidrogeologia

Predomina clima mesotérmico úmido do tipo Cfa (Köppen), resultante da altitude elevada, da proximidade com o oceano Atlântico e da densa vegetação tropical. A umidade atmosférica, despreendida pela vegetação durante o dia, sofre à noite a influência dos ventos marítimos frios, condensando-se em forma de uma densa neblina (CPRM, 2012). A Mata Atlântica cobre áreas íngremes, com pastagens e capoeiras ocupando setores desmatados. A fonte Bicuda Grande percola rochas granitóides do domínio do Granito Sana, as quais são descritas como muito fraturadas. No estado do Rio de Janeiro, a maioria das fontes de água mineral é do tipo fissural. Já a drenagem regional organiza-se nas bacias dos rios Macaé, Grande e São João, com destaque para o Rio Sana, que escoar sobre falha NE-SW e apresenta padrão dendrítico paralelo (CPRM, 2012).

Na figura 2 mostra-se o gráfico que ilustra os volumes mensais de chuva acumulada entre dezembro de 2019 e abril de 2020 nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Nova Friburgo (A624) e Macaé (A608). Observa-se forte atividade pluviométrica nos meses de verão e queda significativa em abril. Apesar disso, os cinco dias que antecederam o escorregamento somaram 103,2 mm em Nova Friburgo e 119,6 mm em Macaé, indicando chuvas concentradas.

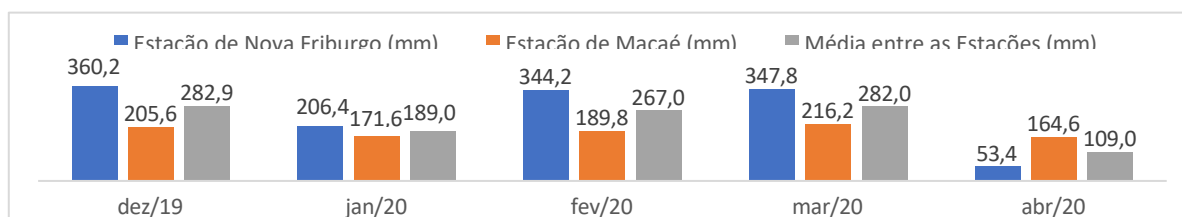


Figura 2. Chuva acumulada mensal.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Investigações Geológico-Geotécnicas

Visando ao conhecimento das características dos materiais constituintes da encosta rompida, uma campanha de sondagens mista foi realizada entre abril e julho de 2020, fornecendo o nível freático medido 24 horas após a perfuração, a profundidade das camadas do perfil, expondo a caracterização tátil-visual e a resistência à penetração nas espessuras do solo e os graus de alteração, além do fraturamento e coerência das rochas encontradas nas verticais, além do Rock Quality Designation (RQD). Os boletins assinalam o típico perfil de intemperismo ao longo da encosta, onde o colúvio aparece com espessura variável não superior a cinco metros; a camada de solo residual maduro apresenta profundidade não superior a 10 metros; o solo residual jovem, junto ao manto, apresenta profundidade similar ao maduro; e a camada de rocha alterada possui espessura média de sete metros. Entretanto, em sondagens próximas à rodovia, observaram-se espessuras inferiores a um metro.

No que tange ao maciço rochoso, encontram-se majoritariamente composto de gnaisses e granitos, típicos da geologia do Rio de Janeiro. Os testemunhos de gnaiss extraídos apresentaram variação nos graus de fraturamento entre F1 e F4, predominando F1 nas cotas superiores do perfil e F4 nas inferiores; graus de alteração e coerência mostraram configurações similares às descritas quanto à fraturamento. Nos testemunhos de granito, predominaram A1, F1 e C1. A Figura 3 evidencia a seção representativa encontrada na encosta do km 41 da RJ-142, indicando as camadas e seus mergulhos no trecho rompido. O ângulo basal, próximo a 45° na área colapsada, da encosta antes da ruptura foi reconstituída por aproximação a partir do levantamento topográfico extrapolando as cotas obtidas em trecho contíguos ao rompido.

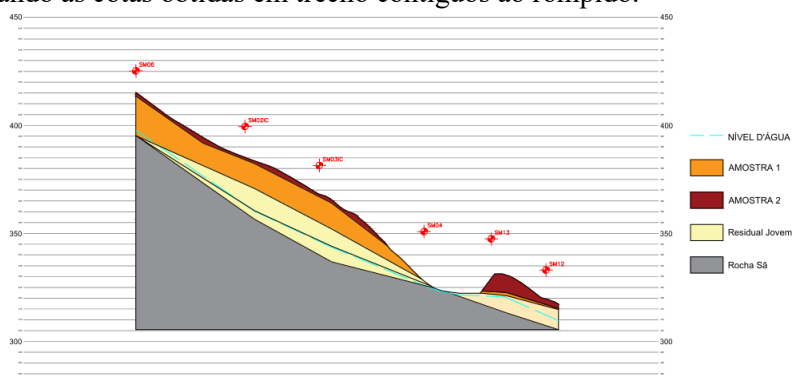


Figura 3. Perfil representativo do talude.

### 3.2 Ensaios de laboratório

Em face de o escorregamento ter ocorrido posteriormente à ruptura e, por consequência, do interesse em conhecer a superfície de ruptura, optou-se pela priorização da caracterização e da determinação de parâmetros de resistência do colúvio e do solo residual maduro. Assim, um bloco de amostra indeformada foi coletado em agosto de 2020 para cada uma dessas camadas e levado ao laboratório para a realização de ensaios que revelassem as propriedades índices do solo e ensaio de cisalhamento direto com amostras inundadas e em umidade natural, visando à definição dos parâmetros de resistência.

As amostras foram retiradas da parte intermediária do talude, ambas no mesmo plano horizontal, em blocos cúbicos de 30 cm de aresta, que foram envolvidos por um insulfilm, papel laminado e tela, e, em seguida, parafinados e etiquetados. Na sequência, foram acomodadas em caixa de madeira devidamente forrada com serragem, suavizando qualquer processo de perturbação no solo durante o transporte, sendo armazenadas em câmara com temperatura e umidade controladas, conforme Figura 4, aos blocos 1 e 2.



Figura 4. Blocos indeformados.

No horizonte em que a Amostra 02 foi coletada, identificou-se a existência de blocos de rocha de tamanhos variados, perceptíveis tanto no mapeamento de campo quanto nas perfurações realizadas. De acordo com os boletins de sondagem, os blocos predominantemente encontrados são classificados como rochas ígneas básicas. Essa configuração pode indicar a existência de processo de deposição no tempo geológico, formando esse manto superficial com sedimentos variados, muito similar a materiais que a literatura descreve como tálus.

O bloco catalogado como Amostra 01 demonstra estrutura reliquiar bem conservada e similar aos bandados gnáissicos encontrados em rochas originadas em metamorfismo de alto grau. Vale destacar que essas estruturas preservadas também são plano de fraqueza, assim como nas rochas, e suas condições podem ser bastante agravadas pela heterogeneidade e camufladas quando apresentam porosidades negativas.

#### 3.2.1 Caracterização das Amostras

Para a determinação das propriedades referentes a tamanho dos grãos e limites de consistência dos solos que compõem os blocos, os mesmos foram submetidos aos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg e determinação da densidade real. Todos os ensaios de caracterização foram realizados conforme as normativas brasileiras vigentes, sendo a ABNT NBR 6457:2016 para preparação de amostras; ABNT NBR 7181:2016 para granulometria; ABNT NBR 6458:2016 para determinação da densidade real dos grãos. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1. Resultados obtidos nos ensaios de caracterização.

Amostra	Material	argila, silte, areia (%)	LL – LP – IP (%)	Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	HRB	IG
Bloco 01	Areia siltosa	7 – 27 – 66	52 – 34 – 18	2,892 g/cm <sup>3</sup>	A-7-5	4,0
Bloco 02	Silte argiloso	23 – 45 – 32	57 – 37 – 20	2,621 g/cm <sup>3</sup>	A-7-5	15,4

#### 3.2.2 Cisalhamento Direto

Toda a condução do ensaio de cisalhamento direto foi realizada nas referidas amostras, alinhada à prática internacional por intermédio da norma ASTM D3080-04. Inicialmente, os corpos de prova foram preparados em moldes metálicos, quadrados, biselados e com seção de 10 x 10 cm e 2,0 cm de altura. Nos corpos de prova (CPs) submetidos ao ensaio em umidade natural, a realização da etapa de adensamento e posterior cisalhamento ocorreu imediatamente após a moldagem. Diferente das amostras em condição inundada, que tiveram as fases de adensamento e cisalhamento iniciadas após a inundação. Nesses casos, os CPs ficaram 24 horas submersos.



Objetivando a determinação dos parâmetros geomecânicos sob critério de ruptura de Mohr-Coulomb, propõem-se a condução dos ensaios nas tensões normais ( $\sigma_n$ ) de 50, 150, 300 e 600 kPa. Para ambas as amostras e condições de saturação, em todas as tensões, a velocidade de deformação adotada foi de 0,50 mm/min, calculada a partir da etapa de adensamento, evitando a promoção de excesso de poros durante o ensaio, como preconizado na referida norma ASTM. Ao todo, foram realizados oito ensaios por cada bloco: em umidade natural e para corpos de prova inundados.

A partir das curvas tensão-deformação para cada tensão normal (Figura 5), foi possível identificar a tensão cisalhante máxima e, consequentemente, após o plot dos dados em gráfico tensão cisalhante x tensão normal para cada conjunto de corpos de prova em condições de saturação similar, traçou-se a reta obtida pela regressão linear, obtendo-se o intercepto coesivo e o ângulo de atrito. Esse procedimento foi realizado tanto para o solo residual maduro quanto para o colúvio, nas duas condições. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 2. Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Amostra	Material	Condição do CP	Grau de Saturação (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Bloco 01	Areia siltosa	Natural	42	16,47	17,4	29
Residual		Inundado	55	17,04	6,6	29
Bloco 02	Silte argiloso	Natural	71	16,09	24,3	25
Colúvio		Inundado	75	16,30	19,8	25

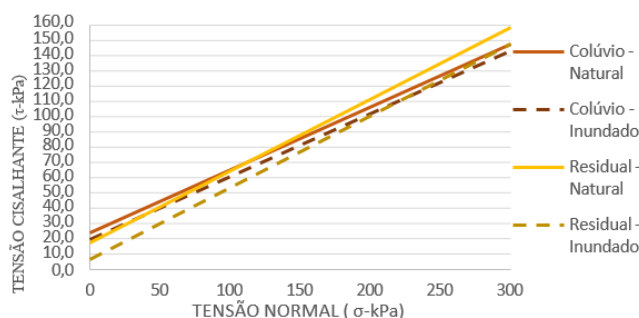


Figura 5. Envoltórias de Resistência.

Pode ser observado na Tabela 2 que apesar do aumento do peso específico do solo residual, próximo a 3,6%, o mesmo não acontece na camada do solo coluvionar, podendo indicar também a absorção de cada solo no processo de inundação, mostrando assim que este processo não garante a saturação das amostras. Em ambas condições de saturação a envoltória de resistência apresenta o mesmo ângulo de inclinação tanto para o colúvio o quando para o solo residual. Ocorre variação apenas no intercepto coesivo da envoltória dos dois solos, com uma queda brusca, especificamente 37,9% para a areia siltosa e 18,5% para o silte argiloso.

Souza Pinto (2006) pontua que atração química entre partículas pode desenvolver uma resistência independente da tensão normal, constituindo uma coesão real, podendo no casos de solos desenvolvidos pedologicamente atingir valores significativos. Esta coesão real, que é uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos úmidos, não saturados, deve ser bem diferenciada da coesão aparente que com a saturação do solo desaparece. Torna-se conveniente ressaltar que este é o efeito causador de muitas ruptura em taludes naturais e que tal conhecimento tem extrema valia para os solos tropicais.

#### 4 ANÁLISES E RESULTADOS

Opta-se no presente estudo pela abertura de duas frentes de análise. Na primeira, apresenta-se a análise por equilíbrio limite da seção original com os parâmetros obtidos com os corpos de prova em umidade natural e inundados, permitindo avaliar a estabilidade antes da ruptura e um cenário onde o perfil encontra-se em condição mais desfavorável a segurança. Adicionalmente, uma seção simula um retaludamento suavizando o mergulho do talude. Em um segundo momento, pretende-se retroanalisar a ruptura do talude, variando o intercepto coesivo do colúvio e da camada de solo residual maduro até que o fator de segurança atinja a unidade.

Tendo em vista a confiabilidade dos dados adquiridos na campanha de investigação, o levantamento topográfico de alta precisão e o conhecimento pregresso do histórico de rupturas na região serrana do Rio de

Janeiro, e ainda dispondo das potencialidades do software Slide 2, elegeu-se os métodos rigorosos de Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967), com mecanismo de busca tipo “cuckoo search” para superfícies de ruptura não circulares, para a determinação do fator de segurança em todas as análises citadas neste item.

Como discutido ao longo do texto, o movimento previamente observado levou à campanha de investigação a, de certa forma, negligenciar os parâmetros de camadas mais profundas. Convém pontuar a existência de correlações para determinação de parâmetros de resistência dessas rochas. No entanto, visto a superfície de ruptura encontrada in loco não interceptar o perfil de intemperismo — apenas o residual maduro — e que os valores fornecidos por correlações expressam precisão inferior aos métodos diretos para as análises, julga-se pertinente adotar valores para esses estratos que não exerçam influência no fator de segurança para todas as análises.

#### 4.1 Análises por Equilíbrio Limite

Como pontuado em seções anteriores, as análises por equilíbrio limite, que serão expostas a seguir na Tabela 3, foram realizadas utilizando os parâmetros fornecidos pela envoltória de resistência determinada a partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto. Além dessas análises construídas a partir da geometria reconstituída com levantamento topográfico da encosta, simula-se também um cenário com as camadas em condição inundada, corriqueiramente utilizada em projetos de estabilização, e com o talude escavado a  $33^\circ$ , ângulo basal amplamente utilizado em obras de infraestrutura em taludes de aterro. Na figura 6 evidencia-se as superfícies obtidas pelo método de Morgenstern & Price.

Tabela 3. Fator de segurança.

Condição	Ruptura	Método	Fator de segurança
Natural	Local – Inferior	Morgenstern & Price	1,06
		Spencer	1,06
Inundado	Local – Inferior	Morgenstern & Price	0,82
		Spencer	0,82
Inundado – Talude c/ $33^\circ$	Global	Morgenstern & Price	1,02
		Spencer	1,03

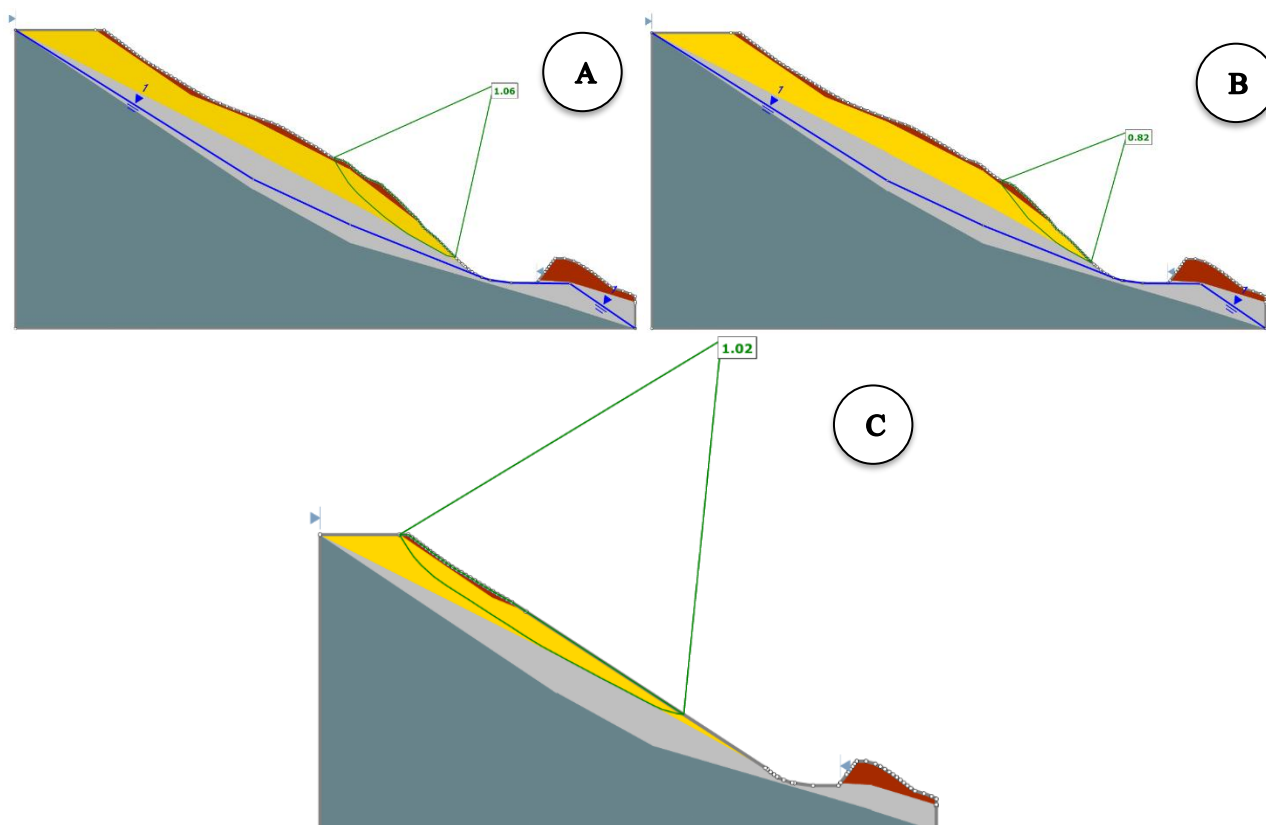


Figura 6. Superfícies de Ruptura – A) Condição Natural; B) Condição Inundada; C) Inundada com  $33^\circ$ .

Nota-se a proximidade dos valores fornecidos pelos diferentes métodos de cálculo e a drástica redução no fator de segurança, na ordem de 22,6 %, quando comparado os obtidos com amostras em condição natural e inundadas. Todavia, as análises com as amostras inundadas não condizem com a realidade, refletindo o fator de segurança (FS) inferior a 1, ou seja, evidenciam que os parâmetro não precisam chegar a esses estágios para induzir a ruptura. Para essas duas primeiras análises a ruptura é local no trecho inferior, como observado em campo, diferente da simulação com um retaludamento que ocorre globalmente, colapsando a partir da camada residual madura.

As análises já indicam a fragilidade do solo residual maduro frente a inundações. Este comportamento é compatível com achados consolidados na literatura geotécnica. Guidicini e Nieble (1983) confirmam que o teor de umidade atua principalmente sobre a coesão. Para Gerscovich (2016) esse efeito observado em campo é justificado pela variação do clima, tendo a sucção aumentada durante épocas secas, conforme a taxa de evaporação, e reduzida nas épocas de chuva frente aos processos de infiltração. Neste contexto, cabe também ressaltar que mesmo com um retaludamento com objetivo de suavizar o mergulho da encosta, o fator de segurança ainda não é satisfaz aos requisitos normativos pertinentes a estabilidade de encostas naturais.

## 4.2 Retroanálises Variando Intercepto Coesivo

Como indicado na tabela 2, o ângulo de resistência ao cisalhamento das amostras submetidas aos ensaios, em ambas as condições de saturação, permanece. Considerando essa condição-limite, com o ângulo mantido inalterado, as retroanálises tomam o viés de variar apenas o intercepto coesivo até que o fator de segurança atinja a unidade, sendo simuladas em dois cenários, onde no primeiro a variação é provocada no solo residual e a segunda no coluvionar. Esta abordagem busca o entendimento da contribuição de ambas camadas para deflagrar o movimento gravitacional. A tabela 4 apresenta os parâmetros obtidos a partir dessa retroanálise e na figura 7 as superfícies de ruptura.

Tabela 4. Retroanálise – Intercepto Coesivo

Cenário	Camada	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)
01	Colúvio	16,09	24,3	25
	Residual Maduro	16,47	14,2	29
02	Colúvio	16,09	6,6	25
	Residual Maduro	16,47	17,4	29

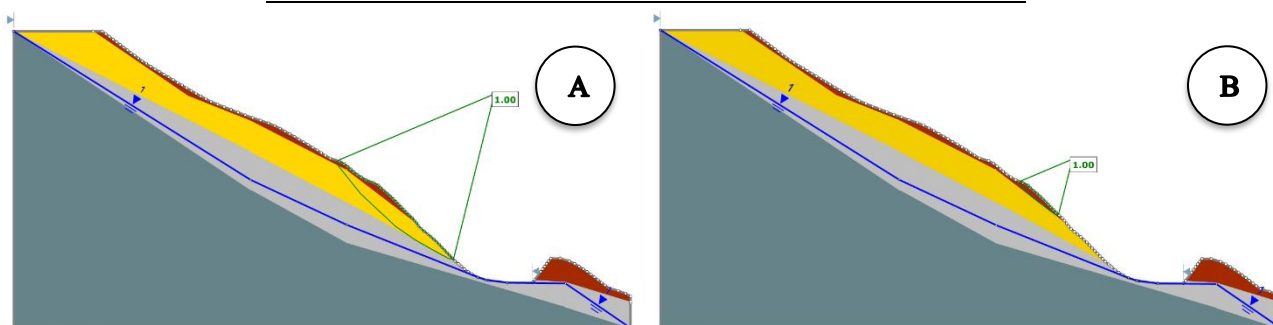


Figura 7. Superfícies de Ruptura – A) Cenário 1; B) Cenário 2.

No cenário 1 o fator de segurança (FS) atinge a unidade com uma variação de 18,4% do intercepto e no cenário 2 a variação necessária para a iminente ruptura é de 72,8%, partindo do valor do intercepto coesivo determinado pelas envoltórias das amostras em umidade natural. Nota-se que o valor da coesão obtida na retroanálise do cenário 2 é 66,7% inferior ao intercepto obtido no ensaio de cisalhamento direto com o corpo de prova inundado. Já no cenário 1, o estado de ruptura iminente se apresenta com valor do intercepto superior ao determinado em laboratório no ensaio com corpos de provas inundados, precisamente 263,6%.

Essas análises indicam que a variação dos parâmetros geotécnicos devido a variação de umidade apenas na camada coluvionar não são suficientes para deflagrar o movimento com a magnitude encontrada em campo



e que a encosta com a geometria pré-ruptura estaria íntegra mediante a forte influência da sucção que ocorre no solo residual, que como exposto no item 4.1 atua de maneira corriqueira em solos tropicais.

## 5 CONCLUSÃO

Como visto ao longo texto a sucção matricial contribuiu significativamente para a estabilidade da encosta em condição não saturada e, por sua vez, para a suscetibilidade à ruptura após a saturação. A perda deste efeito, representado pela coesão aparente na envoltória de resistência, propicia significativamente a redução da resistência ao cisalhamento do solo e, em grande medida, associa-se a recorrência de escorregamentos em regiões tropicais, onde as encostas naturais ou antrópicas estão sujeitas a ciclos intensos de umedecimento e secagem. Neste contexto, é inevitável a indicação do monitoramento das encostas, principalmente no que tange a nível freático. Ressalta-se também a relevância do conhecimento das propriedades dos materiais e em um cenário tropical a importância da obtenção da curva característica para a compreensão do comportamento de materiais in situ. Para o caso da encosta o monitoramento pode ser feito com uso de indicadores de nível d'água e a determinação da curva pode ser através de leituras de sucção realizadas em campo com o tensiômetro. Faz-se menção ainda a condução de ensaios com a sucção controlada para medir sua influência em encostas naturais.

Em se tratando dos resultados obtidos na investigação e análises deste estudo, revela-se a clara fragilidade da camada do solo residual maduro de Gnaiss frente à ação do intemperismo e à presença de água. Ainda que sob regime de umidade natural, o fator de segurança se mantenha próximo ao limiar de estabilidade, indicando que a encosta já se encontrava em estado de equilíbrio instável antes do evento, o aumento do grau de saturação foi fator determinante para a ruptura, reduzindo substancialmente o fator de segurança. Quando os parâmetros adquiridos em diversas frentes analíticas são relacionados é possível concluir que os obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto em condição natural refletem melhor o cenário antes da ruptura e os pela retroanálise simulam com maior fidelidade o momento da ruptura. Todavia, em termos de projeto de estabilização de taludes ainda é recomendável a utilização dos parâmetros obtidos com amostras inundadas, absorvendo as incertezas do comportamento do material, e assim atuando a favor da segurança.

As superfícies de ruptura observadas nas análises determinísticas se alinham com o padrão de ruptura superficial observado em campo e com relação a estabilização da encosta, as simulações com retaludamento, adotando suavização da inclinação da encosta, indicaram que essa solução isolada não garante fator de segurança satisfatório, dada a fragilidade dos materiais. Intervenções mais robustas se mostram necessárias, como inclusão de bermas de alívio e/ou reforço por estruturas de contenção. O dimensionamento dessas soluções deve ser baseado em parâmetros obtidos em condição de saturação, contemplando a perda da coesão aparente, e complementado por ensaios que considerem sucção e curva de retenção para representar adequadamente o comportamento não saturado. Adicionalmente pontua-se a relevância do conhecimento das propriedades dos materiais naturais dispostos nas encostas da região serrana bem como o seu monitoramento. O presente estudo de caso contribui para a comunidade com dados obtidos em campanha de ensaio de laboratório e retroanálises determinísticas, contudo chama-se atenção para a necessidade de aumentar o monitoramento e investigação das encostas em todo Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2004). ASTM D3080-04: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Bishop, A. W.; Morgenstern, N. (1960). *Stability Coefficients for Earth Slopes*. London: The Institution of Civil Engineers, 11 p.
- Bromhead, E. N. (1992). *The Stability of Slopes*. 2nd ed. London: Spon Press, 320 p.
- Geraldes, M. C. [et al.]. (2012). *Geologia e recursos minerais da folha Casimiro de Abreu SF-23-Z-B-I, estado do Rio de Janeiro, escala 1:100.000*. Belo Horizonte: CPRM, 136 p.
- Gerscovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de Taludes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 242 p.
- Guidicini, G.; Niebler, C. M. (1983). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 264 p.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Banco de dados meteorológicos. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: jul. 2025.
- Pinto, C. de S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 272 p.