

Retroanálise de Rupturas de Taludes em Nova Friburgo/RJ

Ursula Gonçalves Guerra

GEO-RIO / PCRJ, Rio de Janeiro, Brasil, uguerre@rio.rj.gov.br

Mauricio Ehrlich

COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, me@coc.ufrj.br

RESUMO: No verão de 2011, verificou-se na região serrana do estado do Rio de Janeiro um megadesastre que provocou a perda de muitas vidas e deixou um rastro de destruição, principalmente na cidade de Nova Friburgo. Neste artigo apresentam-se análises efetuadas em encostas situadas nas localidades de São Jorge e Floresta. A área do Floresta, antes dos deslizamentos, era intensamente ocupada, e nas porções mais íngremes das vertentes do anfiteatro observava-se a ocorrência de afloramentos rochosos verticalizados. A localidade do São Jorge é uma encosta montanhosa retilínea, com afloramento rochoso em diversos pontos, presença de vegetação arbustiva e arbórea e camada de solo delgada. Objetivando a retroanálise dos movimentos ocorridos, foram levantados os perfis dos terrenos, antes e após os acidentes, e retiraram-se blocos indeformados para ensaios em laboratório. As análises efetuadas indicaram que, mesmo antes do evento, os taludes em questão já se encontravam em condições precárias de estabilidade. As fortes chuvas promoveram a saturação do solo e a perda da coesão aparente, redundando no colapso das encostas.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de massa, retroanálise, Nova Friburgo.

1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos que desencadeiam os movimentos de massa podem ser fatores naturais, porém, são significativamente potencializados pela ação antrópica. Os movimentos de massa de grande magnitude, quando ocorridos em áreas ocupadas, provocam consideráveis prejuízos socio-econômicos, e geralmente vítimas fatais.

Nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, fortes chuvas provocaram diversos deslizamentos na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, onde os municípios mais afetados: Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo. Nesta ocasião diversas propriedades destruídas e contabilizaram muitas mortes, desaparecidos e desabrigados.

2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Nova Friburgo está situado na região serrana do estado do Rio de Janeiro. A cidade se situa no reverso da escarpa da Serra do Mar, que nesta região recebe o nome de Serra dos Órgãos. O território tem 933,4 km² e uma população de 182.082 habitantes (IBGE, 2011), que se concentra entorno do rio Bengala e seus formadores (rio do Cônego e rio de Santo Antônio). A vegetação original da região, constituída pela Mata Atlântica, já foi fortemente devastada pela ação do homem permanecendo ainda intacta em locais afastados dos núcleos urbanos e/ou de difícil acesso (CPRM, 2007).

O centro da cidade de Nova Friburgo está instalado em um vale extenso e largo, que se estende na direção aproximada N-S, preenchido por sedimentos aluvionares, representando a drenagem principal. Este vale está cercado por afloramentos rochosos que se alternam a vales de dissecação associados a estruturas geológicas, por onde quase sempre se

desenvolve a urbanização secundária (CPRM, 2007).

Nova Friburgo possui um clima tropical de altitude, com invernos frescos e secos e verões agradáveis e úmidos. As temperaturas variam com a mínima de 13,8°C e a máxima de 24,3°C. A precipitação média anual total é de 1.246,3mm, a evaporação média anual total é de 605,3mm e a umidade relativa média anual é de 80% (Normais Climatológicas, 1992).

2.1 Geologia e Geomorfologia Regional

A região de Nova Friburgo está inserida na Faixa Ribeira, que é constituída por um complexo cinturão de dobramentos e empurrões relacionado ao encurtamento crustal com vergência para NNW (FERRASSOLI, 2006).

Os gnaisses que ocorrem na região apresentam em sua maioria dos casos uma textura tipicamente fitada e as principais ocorrências se localizam na parte leste da cidade, nas encostas dos morros da margem direita do Rio Bengalas. As ocorrências de granitos são frequentes e apresentam grande variedade de texturas e composição mineralógica. Nos blocos rochosos e salientes da topografia (1100 – 1300 m) eles estão quase sempre presentes (AB'SABER, 1951).

Embora os eventos tectônicos tenham sido os principais processos geradores do relevo, os intervalos de relativa calma tectônica foram fundamentais para que as forças erosivas esculpisse o relevo nas distintas condições climáticas reinantes (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012). Nas áreas mais escarpadas, são comuns os grandes afloramentos do substrato rochoso, de natureza granito-gnáissica. As encostas apresentam espessas coberturas de solos coluviais e depósitos de talus e os talwegues dos vales apresentam coberturas aluvionares e colúvio-aluvionares significativas (CPRM, 2007).

2.2 Locais dos Acidentes

Dentre as inúmeras ocorrências registradas no evento em questão, optou-se por estudar dois pontos de deslizamento verificados nos loteamentos Três Irmãos (São Jorge) e Floresta.

Ambos os locais estão situados no distrito de Conselheiro Paulino, ao norte de Nova Friburgo, na bacia dos rios Santo Antônio e Bengala.

A montante do Loteamento Três Irmãos na região da localidade do Morro do São Jorge tem-se uma encosta montanhosa retilínea, com afloramento rochoso em diversos pontos, presença de vegetação arbustiva e arbórea e camada de solo delgada. Tem-se também a ocorrência de blocos de rocha superpostos, apoiados principalmente sobre maciço rochoso, mas também sobre solo residual. Em destaque na Figura 1 está indicada a seção em análise.

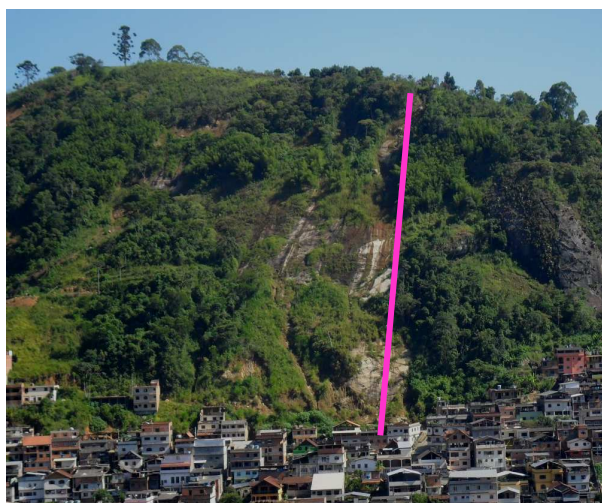


Figura 1. Seção estudada da encosta São Jorge

A evolução do relevo no local promoveu a formação de lascas rochosas originárias de fraturas de alívio. Os planos de fraturas são preenchidos com solo residual e observa-se a presença de vegetação, que favorece o processo de intemperização. As lascas e os blocos de rocha têm formas e volumes variados. É provável que a menor inclinação do relevo no topo da encosta favoreceu a formação dos blocos de rocha.

Na região do Loteamento Floresta tem-se uma encosta coletora de água com curvas de nível côncavas e perfil de encosta côncavo, é caracterizado como anfiteatro cuja forma é controlada por processos erosivos. Na Figura 2 indica-se a seção em análise. A área, antes dos deslizamentos, era intensamente ocupada, restavam setores sem construções nas porções mais íngremes das vertentes do anfiteatro que

tem como característica principal a ocorrência de afloramentos rochosos verticalizados, decorrentes da maior resistência ao intemperismo do maciço rochoso local.



Figura 2. Seção estudada da encosta Floresta

2.3 Chuvas

A Tabela 1 relaciona os dados disponibilizados pelo INEA relativo ao evento chuvoso de Janeiro de 2011. A média pluviométrica das Normais Climatológicas do Departamento Nacional de Meteorologia (1992) nos meses de janeiro para o município de Nova Friburgo é de 208,6 mm de chuva.

Tabela 1. Dados das estações pluviométricas. (adaptado de COELHO NETTO *et. al.*, 2011)

Estação Pluviométrica	Precipitação (mm)	
	11-12/Jan	acumulada até 11/Jan
Conselheiro Paulino*	Dado indisponível	
Olaria	177,4	119,6
YPU	207,4	113,4
Nova Friburgo	141,6	86,8
Sítio Sta Paula**	190,0	121,8

* O INEA informou que houve a interrupção do monitoramento para manutenção entre os meses de julho 2010 a outubro de 2011.

**O registro de dados foi interrompido às 5h00 do dia 12/01/2011 devido à perda do equipamento, que foi levado pelas águas da chuva.

Na Tabela 1 observa-se que a precipitação média acumulada no primeiro terço do mês de janeiro de 2011 já era de aproximadamente 110 mm, isso pode indicar que o solo da região já estava com teor de umidade elevado. As chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 devem ter promovido a saturação do solo, foi mensurado aproximadamente 180 mm em quatro horas.

Na localidade São Jorge, decorrido quase dois anos do primeiro deslizamento, no início

do segundo ciclo de chuvas, após evento pluviométrico significativo (113 mm em 24hs) no dia 12 de novembro de 2012, um segundo deslizamento ocorreu na área, destruindo mais moradias e deixando alguns feridos.

3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Amostras indeformadas foram retiradas dos locais em estudo em camada correspondente aos solos situados no plano de ruptura observado. Ensaio de cisalhamento direto foram realizados em seu estado natural e submersas em água, sob diferentes tensões normais de forma a obter as envoltórias de resistência. Ensaio de caracterização foram conduzidos em amostras deformadas obtidas nos dois locais.

Para o solo da localidade Floresta, foram também efetuados ensaios de curva característica (ou curva de retenção), utilizando a técnica do papel-filtro, conforme recomendações de VAN GENUCHTEN (1980), que relaciona o conteúdo de água no solo com a sucção mátrica. E também foi realizado ensaio de permeabilidade de carga variável. Com os resultados dos ensaios de papel-filtro e o ensaio de permeabilidade saturada utilizou-se o programa RETC para gerar as curvas característica e de condutividade hidráulica não saturada do solo da localidade Floresta.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio de Laboratório

O solo coluvionar presente na localidade São Jorge é um silte arenoso, de baixa plasticidade, ML. O solo residual da localidade Floresta é uma argila siltosa, de alta plasticidade, CH. O solo de Floresta apresenta limites de plasticidade e de liquidez de 24% e 65%, respectivamente. O índice de atividade ($A=IP/\%<0,002\text{mm}$) é igual a 0,98 o que indica uma atividade normal (PINTO, 2000).

Nos solos das localidades Floresta e São Jorge, na condição de não saturação, se observa coesões aparentes que lhes conferem maiores resistências, 46 kPa e 12kPa, e com a saturação

a coesão dos solos anula-se e reduz-se para 5 kPa, respectivamente. Os ângulos de atrito para os dois solos são de 31°.

Tabela 2. Índices físicos das amostras de solo.

	São Jorge	Floresta
γ_{nat}	12,8 kN/m ³	14,1 kN/m ³
w_{nat}	15,9%	26,7%
e_0	1,47	1,43
γ_{sat}	16,8 kN/m ³	16,9 kN/m ³
γ_s	11,0 kN/m ³	11,1 kN/m ³
G	2,77	2,74
S	30%	51%

Na localidade Floresta de acordo com a curva característica ter-se-ia na condição atual de campo ($w_{nat} = 26,7\%$) uma sucção de 1550 kPa. A permeabilidade não saturada nestas condições se apresenta cerca de 10^{-6} cm/s e com a saturação passa a cerca de 10^{-4} cm/s. Para esse teor de umidade, o valor da coesão aparente verificado nos ensaios é de 46 kPa e com a saturação torna-se nula.

4.2. Análise de estabilidade

Na localidade São Jorge ocorreram deslizamentos em dois momentos distintos e as análises foram conduzidas para ambas as situações. No estudo considerou-se o material saturado e poro-pressão nula, visto o elevado grau de fraturamento do material rochoso subjacente à delgada camada de solo existente na encosta que poderia garantir uma condição de fluxo vertical no solo. Análises foram efetuadas assumindo uma ruptura planar e utilizando o método de taludes infinitos.

Com base na planta de restituição aerofotogramétrica e levantamento topográfico, desenvolveu-se o perfil apresentado que foi complementado por informações de sondagens representativas. Como o perfil da encosta (Figura 3) é muito irregular adotaram-se trechos de inclinação diversos ao longo da encosta. A posição do trecho analisado da encosta no primeiro deslizamento se divide em crista (se referindo a crista do talude mesmo), meio e

trecho inferior (que tem como limite inferior o afloramento rochoso e não o pé do talude em si). No segundo deslizamento, os trechos são divididos em topo (termina logo abaixo do afloramento rochoso), meio e pé (base da encosta).

Os resultados indicam que antes do primeiro evento o talude já se encontrava em condições próximas ao limite de estabilidade. Quando da ocorrência das chuvas, com a perda de sucção do solo e significativa redução da coesão aparente verificou-se a instabilização. Observou-se também que na crista do talude o fator de segurança mantém superior à unidade, mesmo quando saturado. Portanto, as análises não explicariam o colapso que se estendeu até o topo da encosta. Entretanto, deve-se considerar que, após o deslizamento da massa situada no meio da encosta, verificou perda da contenção lateral do material acima, e tal situação poderia explicar a propagação da ruptura até a crista. Na Tabela 3 e Tabela 4 apresentam-se os parâmetros adotados no estudo e resultados, respectivamente.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos adotados– São Jorge

Parâmetros	Condição natural	Condição saturada
Coesão	12,2 kPa	4,9 kPa
Ângulo de atrito	31,8°	31,7°
Peso específico	12,7 kN/m ³	16,8 kN/m ³

Tabela 4. Resultado das análises – São Jorge

Inclinação talude	Trecho encosta	Altura talude	Fator de segurança	
			Cond. natural	Cond. saturada
Deslizamento de janeiro de 2011				
24,7°	crista	7,11	1,70	1,45
34,1°	meio/crista	10,01	1,12	0,98
35,3°	meio/inferior	6,83	1,17	0,96
42,6°	inferior	5,17	1,05	0,79
Deslizamento de novembro de 2012				
40,1°	topo	3,40	1,31	0,91
40,1°	meio	2,24	1,60	1,00
40,1°	pé	4,64	1,16	0,80

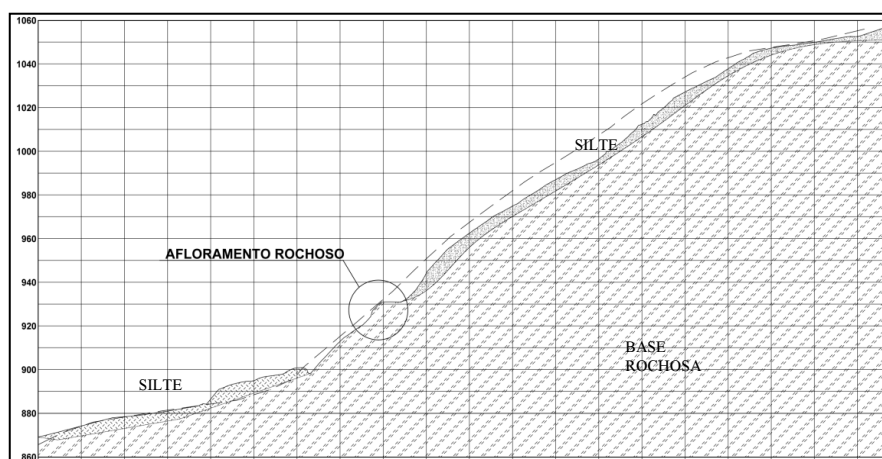


Figura 3. Perfil da encosta São Jorge

No trecho inferior, considerando uma ruptura planar o fator de segurança já se apresentava próximo à unidade, antes das chuvas, e passaria a 0,79, quando da saturação do solo. Entretanto, note-se que o afloramento rochoso situado logo abaixo inviabilizou nesse trecho o desenvolvimento desse tipo de ruptura. Dessa forma, efetuou-se com o programa GEOSLOPE uma análise de ruptura circular buscando melhor representar o ocorrido. Assim, utilizando o método de Morgenstern & Price, e considerando a condição saturada do solo e perda da coesão aparente, o fator de segurança calculado apresentou-se unitário.

Para a localidade Floresta, o perfil apresenta-se razoavelmente regular (Figura 4) e adotou-se nas análises a inclinação de 31°, como representativa da situação da encosta antes do deslizamento. As análises foram conduzidas considerando os parâmetros geotécnicos determinados na condição submersa (Tabela 5) e poro-pressão nula.

Tabela 5. Parâmetros geotécnicos adotados – Floresta

Parâmetros	Cond. natural	Cond. saturada
Coesão	46 kPa	0 kPa
Ângulo de atrito	31,0°	31,0°
Peso específico	14,1 kN/m³	16,9 kN/m³

Devido à maior permeabilidade das camadas de solo inferiores e o elevado grau de fraturamento do material rochoso subjacente é razoável se considerar que quando das chuvas tenha se verificado uma condição de fluxo vertical e nestas condições a poro-pressão se apresentaria nula. Na condição saturada,

utilizando o método dos taludes infinitos, o fator de segurança nestas condições se apresenta unitário. Na condição de não saturação o fator de segurança passaria a 2,0.

Na porção central da encosta tem-se um aprofundamento significativo na espessura do material deslizado. Ao longo do talude a capa de deslizada apresentou uma espessura média de cerca de 3,0 m, enquanto a cicatriz pós-deslizamento na região central chegou a 7,3 m.

De forma a aprofundar as análises na porção central, utilizou-se o programa GEOSLOPE. Os parâmetros geotécnicos adotados nesta análise foram os mesmos determinados da localidade São Jorge. Na Tabela 6 apresentam-se resultados das simulações considerando variações na condição de saturação do solo e de poro-pressão.

Tabela 6. Simulações no programa GEOSLOPE

	c (kPa)	γ (kPa)	u (kPa)	Fator Segurança	
				M & P	Bishop
S1	0	16,86	= 0	1,022	1,024
S2	0,5	16,86	= 0	1,110	1,112
S3	0,5	16,86	≠ 0	1,045	1,044

Na primeira simulação (S1), o fator de segurança ficou muito próximo à unidade. Entretanto, a massa envolvida no colapso não correspondeu ao verificado no campo.

Na segunda simulação (S2), adotou-se um pequeno valor de coesão para a capa superficial argilosa de forma a evitar que a superfície crítica se desenvolvesse superficialmente. No entanto as análises efetuadas levaram a uma ruptura ainda não representativa do observado.

Na terceira simulação (S3), além do valor de

coesão, inseriu-se uma linha de poro-pressão seguindo a configuração pós-ruptura do talude (superfície atual). Verificou-se em ambas análises efetuadas rupturas circulares e

profundas, mais representativas do verificado no campo.

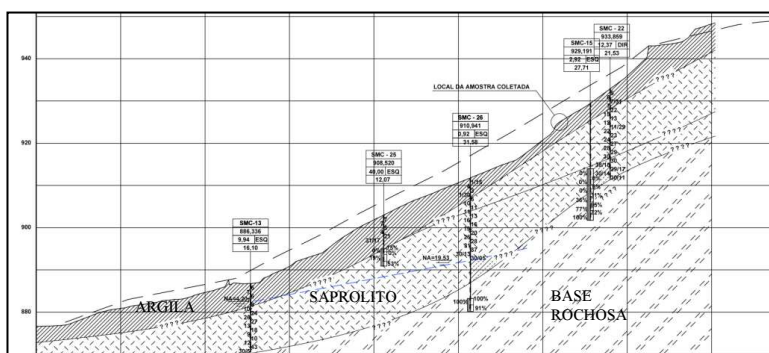


Figura 4. Perfil da encosta – Floresta

5 CONCLUSÕES

Na localidade São Jorge o colapso pode ser explicado por uma ruptura planar, considerando nulas as pressões de água, a saturação e a perda da coesão aparente do solo. No trecho inferior dessa encosta, o afloramento situado logo abaixo inviabilizou a ruptura planar, e uma ruptura do tipo circular melhor representou o mecanismo de colapso observado neste trecho.

A porção da encosta logo abaixo do afloramento rochoso permaneceu estável no primeiro evento (Jan/2011), vindo a colapsar meses após (Nov/2012). O colapso deste trecho não deve ter ocorrido no primeiro momento provavelmente devido à presença do afloramento. A possibilidade de infiltração na encosta ter-se alterado, pelas cicatrizes resultantes da primeira ruptura, e tal pode ter favorecido o deslizamento posterior.

Na localidade Floresta, para uma análise de ruptura translacional, em condições saturadas e tomando-se nula a poro-pressão tem-se um fator de segurança unitário. Entretanto, na porção central da encosta não se verificou propriamente uma ruptura planar. Nesta porção se observou um significativo aprofundamento na espessura de material deslizado. Análises efetuadas utilizando os métodos Morgenstern & Price e Bishop Simplificado, considerando uma pequena coesão para camada superficial argilosa e também pequenas poro-pressões, pode representar o comportamento observado.

REFERÊNCIAS

- Ab'Saber, A.N. (1951) Geomorfologia da região de Nova Friburgo, *Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros*, Vol.5, n. 2, pp. 80-102.
- Coelho Netto, A.L. et al. (2011) January 2011: the extreme landslide disaster in Brasil, *Proceedings of the Second World Landslides Forum*, Rome – Italy.
- CPRM / Prefeitura Municipal de Nova Friburgo –RJ, *Plano Municipal de Redução de Riscos – Relatório Final*. Nova Friburgo, 2007.
- Departamento Nacional de Meteorologia (1992) *Normais Climatológicas 1961-1990*. Secretaria Nacional de Irrigação. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília. 83p.
- Ferrassoli, M.A. (2006) *Geologia do Maciço Granítico dos Frades, Rio de Janeiro, RJ*. Monografia de Graduação, Faculdade de Geologia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- IBGE (2011), Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=33&dados=1>. Acessado em 08 out. 2014
- Pinto, C.S. (2002) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. Oficina de Textos, 2ª Ed. São Paulo, 355p.
- Tupinambá, M. et al. (2012) *Geologia e recursos minerais da folha Nova Friburgo L. C. da Silva*. (Org.), Belo Horizonte: CPRM, 136 p.
- Van Genuchten, M.Th. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of American Journal*, v.44, pp. 892-898.