1	Outubro/2022	Alteração de projeto
0	Junho/2021	Emissão inicial
Emissão	Data	Descrição

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE
INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE

Projeto Básico de Implantação do Sistema de Barreiras Flexíveis de Contenção de Fluxo de Detritos no Rio Príncipe – Teresópolis

MEMORIAL DESCRITIVO DE CÁLCULO

DATA	AUTOR/IDENT.	NÚMERO DO DOCUMENTO	
Junho/2021	Estevão Mendonça Pinto 2020100413 – CREA - RJ	DRM-BHRP-PTR-BMP-E001-MD	**01/01**

Projeto Básico de Implantação do Sistema de Barreiras Flexíveis de Contenção de Fluxo de Detritos no Rio Príncipe - Teresópolis



ÍNDICE

RESUMO 1
1 INTRODUÇÃO 2
2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO RIO PRÍNCIPE 3
3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA 4
3.1 Caracterização Geológico-Geomorfológica 4
3.2 Caracterização Hidrólogica e Climática 6
3.3 Caracterização Geral do Evento de 2011 8
3.4 Caraterização do Evento no Rio Príncipe 9
3.5 MEDIDAS GEOTÉCNICAS IMPLANTADAS NO RIO PRÍNCIPE 233
4 CONDIÇÕES ATUAIS DA ÁREA 255
5 PROJETO DAS BARREIRAS FLEXÍVEIS 29
5.1 Intervenção com Barreiras Flexíveis 29
5.2 Modelo Geomecânico 322
5.3 Métodos de Dimensionamento das Barreiras Flexíveis 35
5.4 Análise das Trajetórias de Queda de Blocos 39
5.5 Locação das Barreiras e Análise das Envoltórias de Energia de Impacto 411
5.6 Seleção e Verificação das Barreiras Flexíveis 48
5.7 Dimensionamento das Ancoragens 511
5.8 Resumo das Intervenções Geotécnicas 522
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 53
7 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA 54
ANEXOS 57
ANEXO 1 BOLETINS DE SONDAGENS 57
ANEXO 2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – BARREIRA EPFM 5000 65
ANEXO 3 MÉTODO EXECUTIVO DO CHUMBADOR – INJEÇÃO DE CIMENTO 67
ANEXO 4 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – SISTEMA DE ALERTA HELLOMAC 68

RESUMO

A proteção e controle de danos provocados por movimentos de massa do tipo debris flows e queda de blocos rochosos na área do Rio Príncipe correspondem à instalação de 2 linhas de barreiras flexíveis com capacidade de suportar blocos de até 5,0m^3 e sedimentos, do tipo abertas, adequadas para a instalação em áreas planas sem presença de canal, solicitadas por esforços dinâmicos e estáticos, sendo os esforços críticos representados pelas cargas de impacto dinâmicas dos blocos rochosos. As barreiras flexíveis são Barreiras EPFM 5000, com capacidade de energia nominal de 5500kJ, altura de 6,0m, distância entre postes de 10,0m. Cada linha de barreira flexível (BMP-01 e BMP-02) tem extensão de 50,0m e serão instaladas no eixo do Rio Príncipe, conforme especificações de projeto. Recomenda-se fortemente o monitoramento das barreiras flexíveis com o sistema de alerta HELLOMAC, capaz de detectar deslocamentos e avisar em tempo real os órgãos responsáveis pela segurança e manutenção da área. As intervenções técnicas garantem a proteção contra debris flows na área de contribuição do Rio Príncipe e atendem às recomendações das normativas internacionais.

1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta a memória de cálculo revisada do Projeto Executivo de Barreiras Flexíveis de Proteção para o Rio Príncipe, no trecho localizado a noroeste do Município de Teresópolis, Estado do Rio de Janeiro, atendendo à chamada de Execução de Obras Complementares para controle de Inundação e Recuperação Ambiental no Município de Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro - Implantação de Barreiras Flexíveis, sob responsabilidade do INEA. Conforme solicitação do próprio INEA, o projeto original, que abrangia a área de contribuição dos movimentos de fluxos de detritos no Rio Iconha e Rio Príncipe, foi alterado para a implantação das barreiras flexíveis de proteção somente no Rio Príncipe. O trecho de influência do Rio Iconha será tratado com outras estruturas do tipo barragem Sabo, cujo projeto é de responsabilidade de outras entidades.

Desta forma, o Projeto Executivo de Barreiras Flexíveis de Proteção para o Rio Príncipe foi desenvolvido considerando:

i. Inspeções de campo para caracterização geológica e geotécnica realizadas pela GEOPHI Engenharia em 10/03/2021;
ii. Levantamento bibliográfico do evento catastrófico de movimentos de massa e inundação na região dos Rios Iconha e Príncipe em 11-12/01/2011;
iii. Levantamento das medidas de recuperação implementadas na região após os eventos de 11-12/01/2011;
iv. Levantamento topográfico e aéreo (VANT) da região;
v. Conceitos, dimensionamentos e recomendações para debris flows (fluxos de detritos) e quedas de blocos de Nunes (2013), Nunes & Sayão (2014) complementados por Pelizoni & Nunes (2016) e Grau Sacoto & Nunes (2018);
vi. Recomendações dos códigos da Comunidade Europeia EN 1997-1:2004, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules; EN 1997-2:2007, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing e ETAG 027 (2008), Guideline for European technical approval of falling rock protection kits.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO RIO PRÍNCIPE

A ocorrência em estudo localiza-se no 1º Distrito do Município de Teresópolis, na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, a noroeste do centro da cidade que conta com a bacia hidrográfica Paquequer e a sub bacia Rio Príncipe ou Córrego do Príncipe, abrangendo os Bairros de Posse, Campo Grande e Cascata do Imbuí, uns dos mais afetados pelos eventos de 2011. As Figuras 1 e 2 apresentam a imagem de satélite do local.

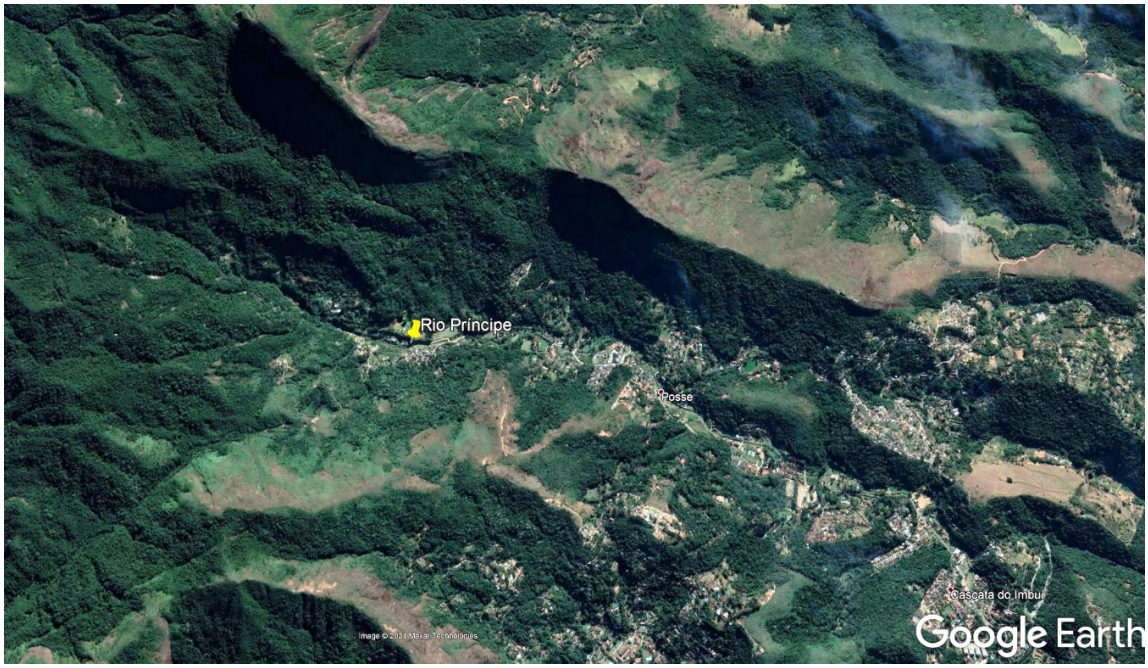


Figura 1. Imagem de satélite do local (*Google Earth*).



Figura 2. Detalhe da imagem de satélite do local (*Google Earth*).

3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

A caracterização geotécnica da área foi realizada por meio de inspeções técnicas de campo, associadas ao levantamento de dados geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e cadastros dos eventos de movimentos de massa e inundações ocorridos em 2011 no trecho do Rio Príncipe em estudo. A consolidação das informações e dados dos levantamentos e inspeções de campo subsidiaram a análise do problema e das soluções de engenharia e o desenvolvimento do projeto de proteção com barreiras flexíveis.

3.1 Caracterização Geológico-Geomorfológica

As formações rochosas na região de Teresópolis são representadas por 2 tipos predominantes, Suíte Serra dos Orgãos e Unidade Santo Aleixo, compostas por granitoides tardio-colisionais tarnscorrentes, ambas do Neoproterozóico (Brasiliano II), conforme apresentado no Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro, Escala 1: 500.000 (Figura 3).

O segmento do Rio Príncipe se situa em região de rochas da Suíte Serra dos Orgãos, Unidades Serra dos Orgãos composta por hornblenda-biotira granitoide de granulação grossa e composição de tonalítica a granítica, composição cálcio-alcalina (Nγ2s) com enclaves de paleodiques sanfibolíticos localizados. O pacote rochoso preserva texturas e estruturas magmáticas com foliação tangencial suprimpostas (CPRM, 2003).

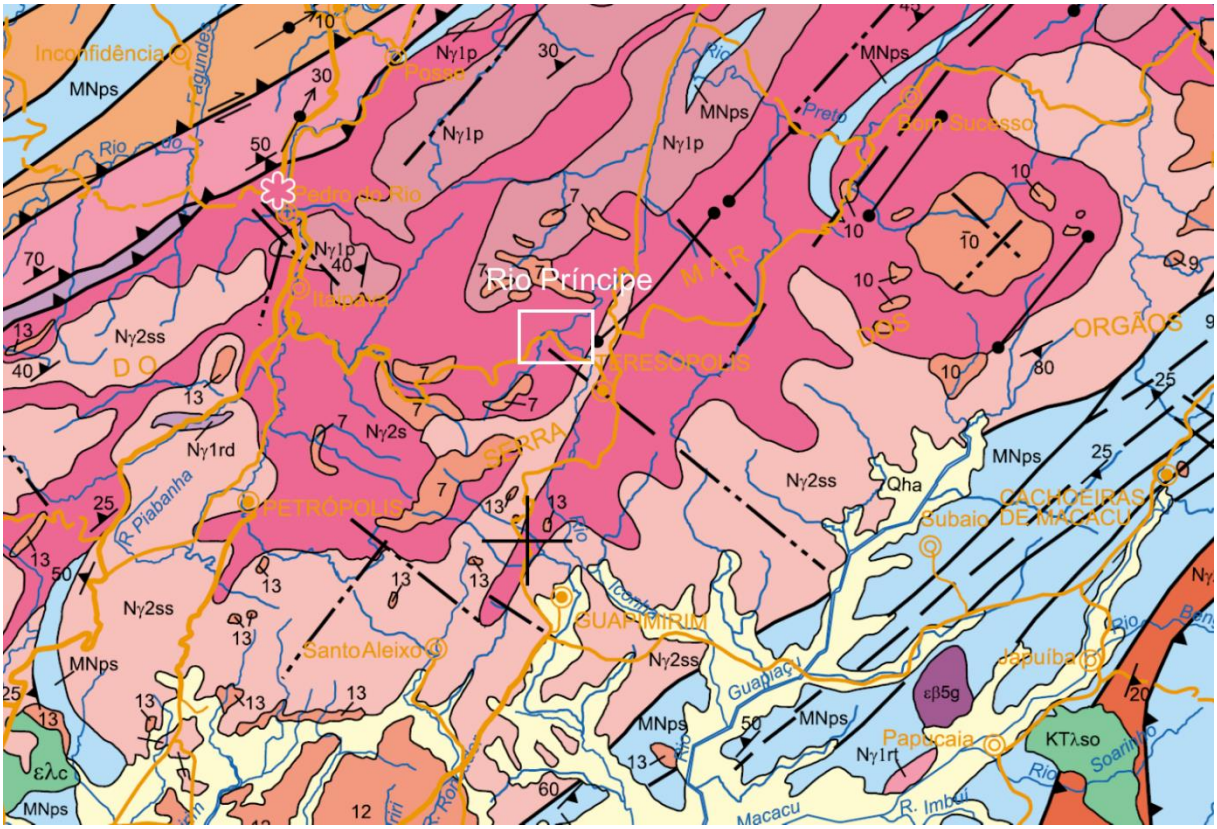
Em relação à tectônica regional, o estado do Rio de Janeiro se localiza na Província Mantiqueira, a mais complexa província estrutural afetada pelo Ciclo Orogênico neoproterozóico/cambriano na América do Sul (CPRM, 2011). Essa evolução orogênica foi responsável pela deformação, metamorfismo, magmatismo e articulação dos diversos terrenos que compõem a geologia do estado, denominados Domínios tectônicos (Figura 4).

A cidade de Teresópolis está localizada no Arco Serra dos Orgãos do Domínio da Faixa Ribeira que se desenvolveu durante a Colagem Brasiliana quando ocorreu a amalgamação do Gondwana, e que se estende pela região litorânea do Sudeste do Brasil, ao longo dos Estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná.

Geomorfologicamente a região é caracterizada por lineações de vales estruturais de cristas serranas, maciços graníticos, morros com desníveis altimétricos acentuados e alvéolos intermontanos. Essas feições refletem áreas de dobramentos remobilizados sob forma de blocos justapostos. A drenagem da Serra dos Órgãos se desenvolve sob o controle lito-estrutural, apresentando padrões paralelos e sub-paralelos.

O ambiente de Formação Montana se estende sobre litologia pré-cambriana, em formação de Latossolos, Podzólicos, Cambissolos e subordinadamente Litossolos com afloramentos rochosos nas vertentes mais íngremes, normalmente ocupando locais de difícil acesso, quase sempre constituindo áreas de preservação ambiental (Oliveira, 2015).

As inspeções de campo permitiram identificar o domínio de solo tipo Cambissolo, pouco espessos sobre os horizontes rochosos.



Legenda

Nγ2s	**Suite Serra dos Órgãos** **Unidade Serra dos Órgãos** Hornblenda-biotita granitóide de granulação grossa e composição expandida de tonalítica a granítica, composição cálcio-alcalina. Texturas e estruturas magmáticas preservadas com foliação tangencial em estado sólido superimpostas. Localmente podem ser observados enclave paleodiques sanfibolíticos ***Serra dos Órgãos Suite*** ***Serra dos Órgãos Unit*** *I-type, hornblende-biotite coarse-grained granitoid with expanded tonalitic to granitic, with calc-alkaline composition. Well-preserved magmatic textures and structures, mildly overprinted by solid-state, thrust-related foliation. Locally, amphibolite enclaves and paleodykes are observed*
Nγ2ss	**Unidade Santo Aleixo** *Fácies* marginal do Batólito Serra dos Órgãos constiutída por granada-hornblenda-biotita granodiorito, rico em xenólitos de paragnaisse parcial-mente fundido e assimilado (migmatito de injeção). Intrusões tardias de leucogranito tipo-S são comuns ***Santo Aleixo Unit*** *Marginal facies of Serra dos Órgãos Batholith comprising hornblende-garnet-biotite bearing grandiorite, rich in partly melted and assimilated paragneissic country-rock xenoliths and late S-type leucogranite intrusion (injection migmatite facies)*

Figura 3. Unidades geológicas da região do Rio Príncipe conforme Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro, Escala 1: 50.000 (adapt. CPRM/DRM-RJ, 2000).

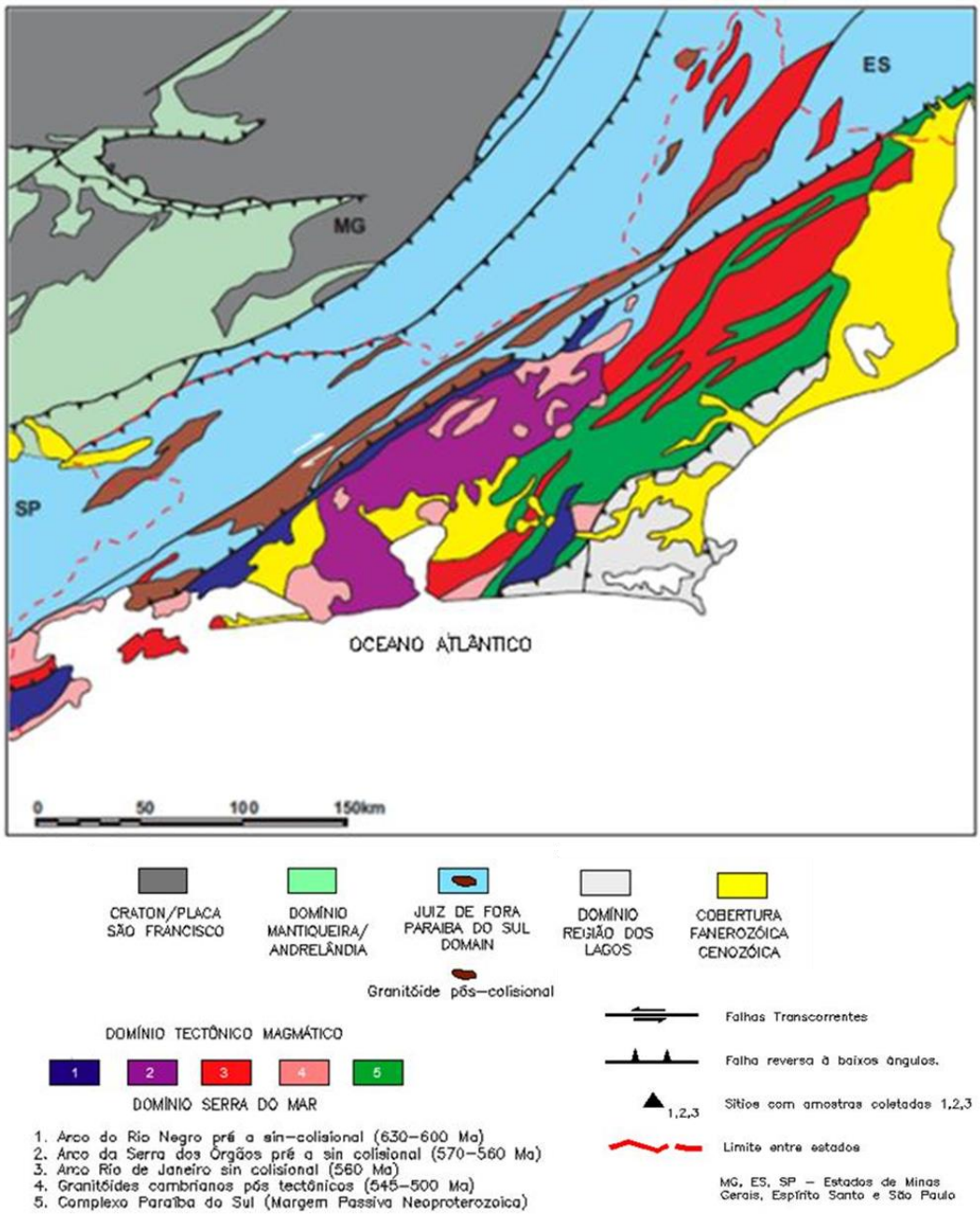


Figura 4. Domínios Tectônicos do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2011).

3.2 Caracterização Hidrólogica e Climática

A bacia hidrográfica do Córrego do Príncipe (Rio Príncipe) se localiza no limite entre os municípios de Teresópolis e Petrópolis e apresenta cerca de 1197ha com rede de drenagem de orientação preferencial NW-SE, característica das redes hidrográficas da região, relacionadas à reativação das falhas no evento de abertura do Atlântico durante o Mesozóico. O córrego do Príncipe é um afluente do rio Paquequer que faz parte da bacia do Piabanha, na bacia do rio Paraíba do Sul (Figura 5).

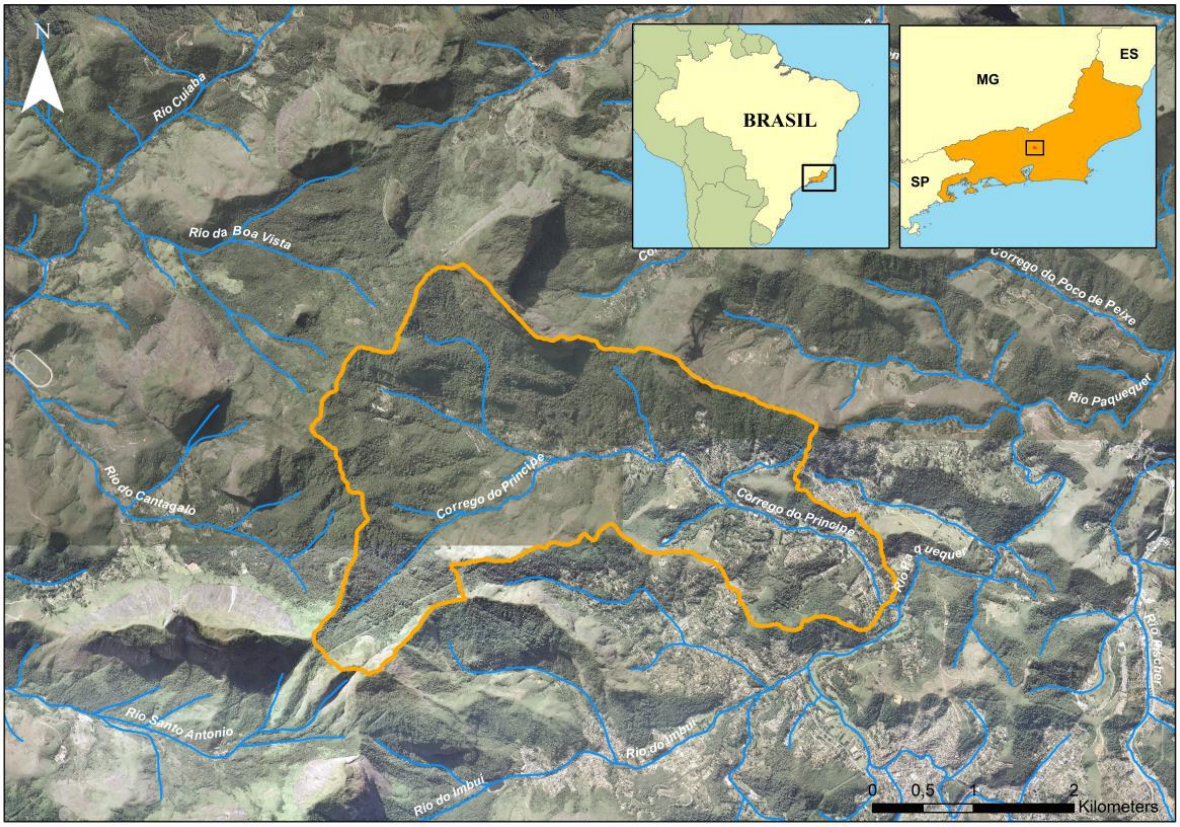


Figura 5. Bacia hidrográfica do Córrego do Príncipe entre Petrópolis e Teresópolis (Waldherr & Tupinambá, 2015).

A Serra dos Órgãos tem ação dominante na dinâmica do relevo da área, visto que é exposta às massas de ar oceânicas úmidas que atuam na formação do relevo escarpado característico da região. A serra também atua como receptora das aguas pluviais do litoral, visto que é um obstáculo aos ventos provenientes do mar, causando processos erosivos intensos. A pluviosidade anual da bacia do Paquequer oscila entre 2800mm na cabeceira e 1400mm na foz. A estação chuvosa ocorre de novembro a abril com pluviosidades superiores a 60mm/dia.

Os divisores e cabeceiras de drenagem do Córrego do Príncipe apresentam altas elevações altimétricas em alinhamentos montanhosos com altitudes de 1500m, variando de 800m nas cotas mais baixas a mais de 1700m nas cotas mais altas da bacia, encaixados em vales estreitos e assimétricos. As encostas íngremes dos alinhamentos montanhosos apresentam frequentes afloramentos rochosos e/ou camadas pouco espessas de solo sobre o topo rochoso. A bacia se estende por aproximadamente 8km até a confluência no Rio Paquequer.

O perfil longitudinal do rio tem declividade suave ao longo do médio e baixo curso, deixando os trechos mais íngremes para as cabeceiras que minam das vertentes montanhosas. A declividade oscila entre 25º e 30º na face Sul (margem direita do córrego do Príncipe) enquanto a face Norte (margem esquerda) apresenta declividades superiores a 60° (Waldherr et al, 2011). A bacia apresenta colúvios espessos com blocos rochosos em matriz argilosa.

3.3 Caracterização Geral do Evento de 2011

A tragédia da Região Serrana do Rio de Janeiro foi deflagrada pela entrada de massas de ar da Zona de Convergência do Atlântico Sul e que resultaram em temporais de 297mm de chuva na noite do dia 11 para 12 de janeiro de 2011. Os 297mm de chuva haviam sido precedidos por impressionantes 388mm de precipitação no mês de dezembro de 2010 (Nunes et al, 2013).

A Região Serrana apresenta todos os principais fatores predisponentes aos deslizamentos: geologia, geomorfologia, hidrologia e clima, além dos fatores efetivos como uso e ocupação do solo irregulares, erosões fluvial e pluvial e o histórico de chuvas.

Segundo Nunes et al (2013) as estações meteorológicas da região que resistiram aos deslizamentos registraram 3 temporais intensos e consecutivos na área mais atingida. O primeiro aconteceu às 23h15 do dia 11 de janeiro com a descarga de 22,2mm de chuva em trinta minutos apenas. Indicações de nível de transbordamento dos rios da região de Nova Friburgo registraram 4,5m. O nível de transbordamento oficial é de 4,0m. O segundo temporal ocorreu após 2horas e meia depois de chuvas continuas, porém mais fracas. Neste segundo evento, que se iniciou às 2h00 da madrugada do dia 12, foram 30,0mm de chuvas ininterruptas por cerca de 2 horas. O último temporal aconteceu às 5h00 com descarga de 16,4 em 30 minutos. O nível de transbordamento na estação meteorológica de Nova Friburgo acusou impressionantes 5,88m.

As encostas não resistiram e todos os rios e canais transbordaram. As cidades de Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Areal, Sumidouro e Bom Jardim foram severamente atingidas. Dados da Secretaria Nacional de Defesa Civil e Defesa Civil do Rio de Janeiro, publicados 30 dias após a tragédia, contabilizaram 305 mil pessoas afetadas com 23 mil pessoas desalojadas e cerca de 17 mil desabrigadas.

As vítimas fatais oficiais chegaram a 912. Entretanto, é reconhecido que este número está longe de representar a realidade. Estimativas realizadas com os dados do censo relativos ao número de habitantes e levantamento das comunidades que desapareceram sob toneladas de blocos rochosos dos fluxos de detritos indicam 3500 mortes. Com relação às perdas e danos, estimativas do Banco Mundial apontam para custos totais da ordem de R$ 4,78 bilhões, sendo cerca de R$ 3,15 bilhões correspondentes ao setor público.

A tragédia da região serrana do Rio ultrapassou o maior desastre de movimentos de massa da história do País, representado pela deflagração de múltiplos deslizamentos e fluxos de detritos ocorridos em Caraguatatuba em 1967, no qual 436 pessoas morreram. O desastre

também entra para os registros da ONU como o 8.º pior deslizamento da história mundial (Nunes et al, 2013).

A região de Teresópolis foi criticamente atingida pelas chuvas extremas dos dias 11e 12 de janeiro de 2011. Devido a superposição da intensa precipitação, deslizamentos rotacionais nas cabeceiras, deslizamentos translacionais nas cotas mais elevadas que iniciaram os fluxos de detritos (debris flows) ao longo das encostas e drenagens naturais, houve a propagação de ondas de cheia com elevada quantidade de sedimentos, detritos, blocos rochosos, troncos de árvores, alterando as características das calhas de escoamento dos corpos hídricos.

As regiões medianas dos vales foram ocupadas por grande quantidade de pedras e pedregulhos. Nas regiões mais planas, as planícies de inundação, formaram grandes volumes de sedimentos arenosos deixando estas planícies cobertas por extensas faixas de areia. INEA avaliou os principais rios afetados na cidade de Teresópolis, com destaque para a chegada e deslocamento de *debris flows* no canal do Rio Príncipe (Figura 6).

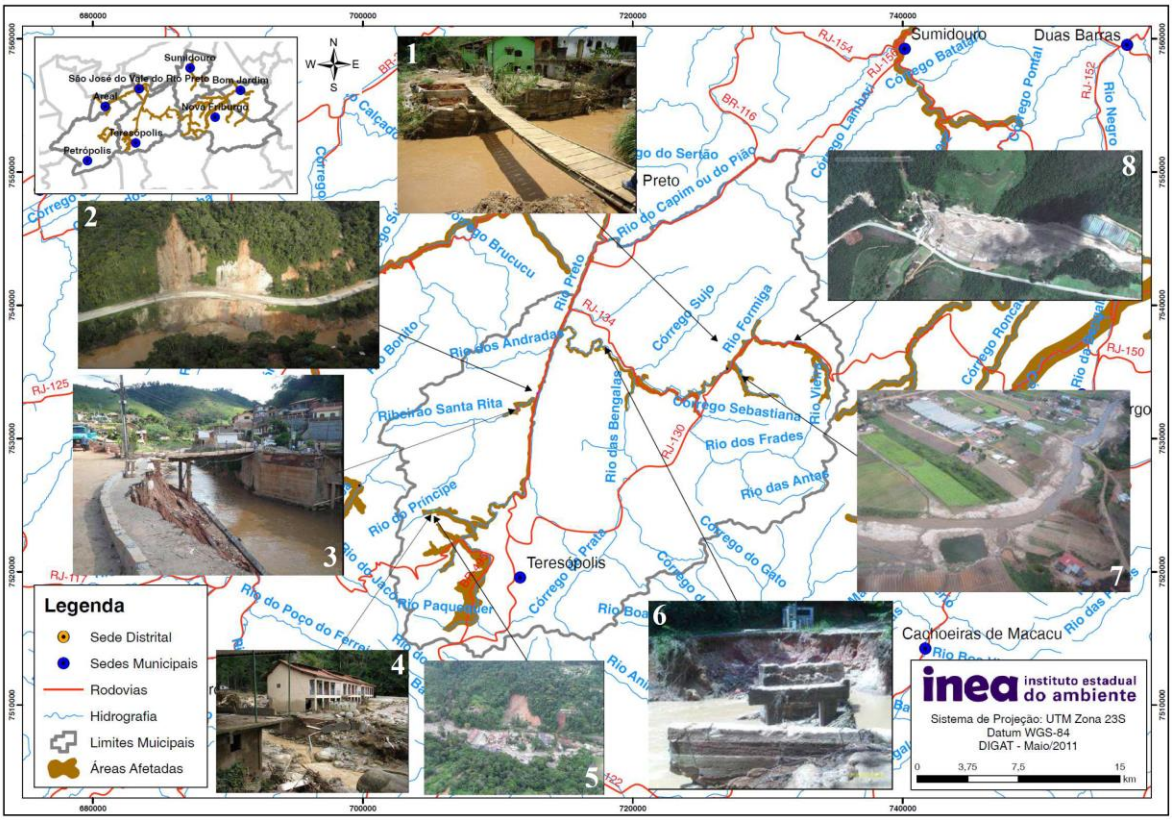


Figura 6. Bacias hidrográficas e principais rios afetados pelo evento de 2011 em Teresópolis (Cavalcante Filho et al, 2011).

3.4 Caraterização do Evento no Rio Príncipe

A área do Rio Príncipe afetada pelo evento extraordinário de janeiro de 2011 abrange todas as encostas do entorno na cabeceira e ao longo da calha do rio. Os movimentos de massa identificados foram diversos: deslizamentos translacionais nos contatos solo-rocha, especialmente nas cotas mais elevadas das encostas, deslizamento rotacionais nos taludes naturais e de cortes nas cotas mais baixas, rupturas planares e em cunha dos maciços fraturados, desprendimentos e quedas de lascas e blocos rochosos, fluxos de detritos (Debris flows), associados à erosão extrema das margens de canais de drenagem naturais e da calha do Rio Príncipe.

A Figura 7 apresenta imagens de satélite registradas antes (03/2010) e depois do evento catastrófico de 2011 (09/2011), destacando-se as cicatrizes das instabilidades das encostas.

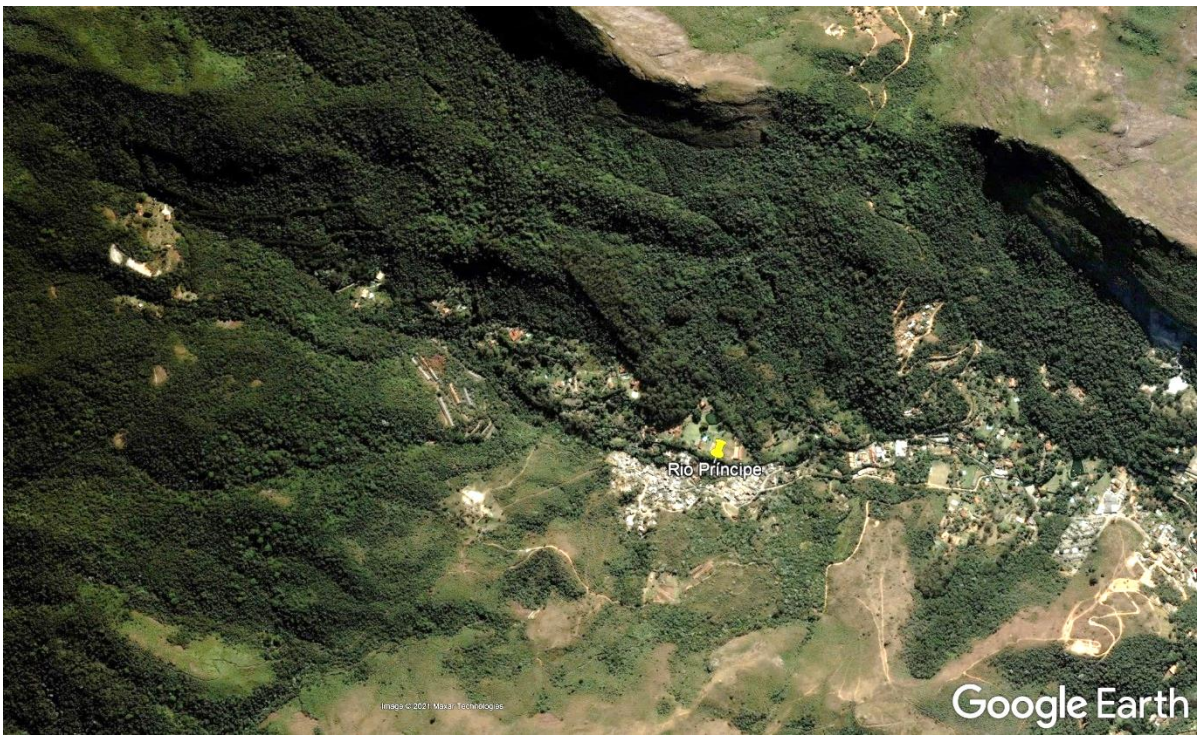
A intensidade e duração das chuvas excepcionais típicos de formação de *cumulus nimbus* foram os gatilhos para os movimentos de massa das encostas e drenagens, configurando um fenômeno de desmonte hidráulico natural.

Este evento é raro, conforme corroborado pelos tempos de recorrência das chuvas (intervalo estimado entre ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural), determinados pelos métodos de Pfafstetter gráfico e de equação ajustada (1957) e Davis & Naguettini (2001). Cálculos realizados para durações de chuvas de 1h, 14h e 24h, considerando os dados de pluviometria da Região Serrana do Rio de Janeiro coletados no período de 1961 a 1990 fornecem os valores resumidos na Tabela 1.

Note-se que para duração de 24 horas, os tempos de recorrência variaram de 129 a 566 anos, confirmando informação pessoal de Canedo (2021) sobre os períodos de retorno excepcionais das chuvas de 2011.

Nunes & Sayão (2014) apresentam o limite superior brasileiro de ocorrência de debris flows em função da intensidade de chuvas, obtidos da análise de 17 casos nacionais e 92 casos internacionais, indicando a precipitação média de 17mm/h em 24horas, significativamente inferior ao ocorrido na Região Serrana do Rio. Ressalte-se ainda que este estudo associa a ocorrência de escorregamentos com os parâmetros dos eventos chuvosos e evidencia que os limiares pluviométricos mais elevados são do Brasil (Motta, 2014), seguidos por Porto Rico (Pando et al., 2004), confirmando a tendência de que limiares regionais são geralmente mais elevados que os globais.

Desta forma, torna-se ainda mais complexa a análise dos movimentos de massa das encostas de Teresópolis, vista a excepcionalidade das chuvas e a simultaneidade das instabilizações.



(a) Registro de 03/2010



(b) Registro de 09/2011

Figura 7. Imagens de satélite da região do Rio Príncipe antes e depois dos eventos de janeiro de 2011 (*Google Earth*).

Tabela 1. Tempos de recorrência das chuvas de 11-12/01/2011 na Região Serrana.

Duração (horas)	Tempo de Recorrência (Anos)		
	Método Davis & Naguettini (2001)	Método Gráfico Pfafstetter (1957)	Método Equação Pfafstetter (1957)
1	14	13	18
14	40	50	50
24	129	339	566

O Rio Príncipe foi o destino final do movimento iniciado nas encostas, sendo os de maior impacto aqueles classificados como debris flows. O fluxo de detritos (debris flow) é um mecanismo de ruptura complexo que pode se manifestar em decorrência do aumento de poropressões nas descontinuidades da rocha provocado por chuvas intensas e prolongadas, ou ainda pela ação de sismos. Os movimentos definidos como fluxos diferenciam-se dos demais devido a características peculiares tais como: mobilização de grandes volumes de solo, rocha, detritos e água, muitas superficíes de deslocamento internas e externas à massa instável, velocidades médias a elevadas, desenvolvimento ao longo das drenagens naturais, alta capacidade de erosão e destruição e transporte de detritos a grandes distâncias em períodos de tempo muito curtos (Nunes & Sayão, 2014).

Trata-se de um movimento de massa que varia de blocos de rocha, galhos e troncos de árvores, cascalho, areia, solo até lama, com concentração de sólidos entre 30 a 70%, conduzido por gravidade e que alcança grande mobilidade. As pressões de impacto variam entre 30 a 1000kPa ou até mais. As vazões de pico dos debris flows podem ser de 10 a 20, ou muito mais, vezes a vazão de cheia.

Nunes & Sayão (2014) reportam 3 zonas de trajetória de debris flows (Figura 8):

i. Zona de iniciação, onde é originado o movimento, geralmente localizada na parte alta da encosta ou na lateral de um talude ou no canal principal (Hungr, 2005; Pelizoni, 2014). A mobilização/início da ruptura representa o processo pelo qual o fluxo de detritos pode se desenvolver a partir do estado estático de uma massa aparentemente rígida de solo, sedimento ou bloco de rocha. A mobilização requer o deslocamento da massa, água suficiente para saturá-la e a transformação de energia potencial gravitacional para energia cinemática capaz de mudar o tipo do movimento de deslocamento para fluxo (Iverson, 1997). Takahashi (1991) reporta que os fluxos de detritos podem ser iniciados de três maneiras: 1. Um deslizamento de solo adquire maior mobilidade e se transforma em um fluxo de detritos; 2. O colapso de uma estrutura ou barreira de solo/sedimento gera um fluxo de detritos; e 3. As

margens do canal se tornam instáveis a partir da ocorrência ou aumento do escoamento superficial;

(ii) Zona de transporte e erosão, onde se desenvolve o movimento e corresponde à área percorrida pelo fluxo de detritos. Usualmente a zona de transporte e erosão encontra-se em locais com declividade maior que 15° (Bathurst et al.,1997; Hungr, 2005). No percurso o movimento de massa pode incrementar seu volume, erodindo o material da zona ou carreando o material depositado em movimentos pretéritos. A taxa de erosão irá depender das características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo;

(iii) Zona de deposição do material, onde a massa mobilizada inicia seu processo de deposição, quando toda a energia cinética é transformada em outra forma de energia (Iverson, 1997). A deposição normalmente resulta da combinação da redução da declividade e da perda do confinamento. Os ângulos de inclinação da zona de deposição são muito variáveis e dependem da geomorfologia da zona de trajetória e a área de deposição disponível.

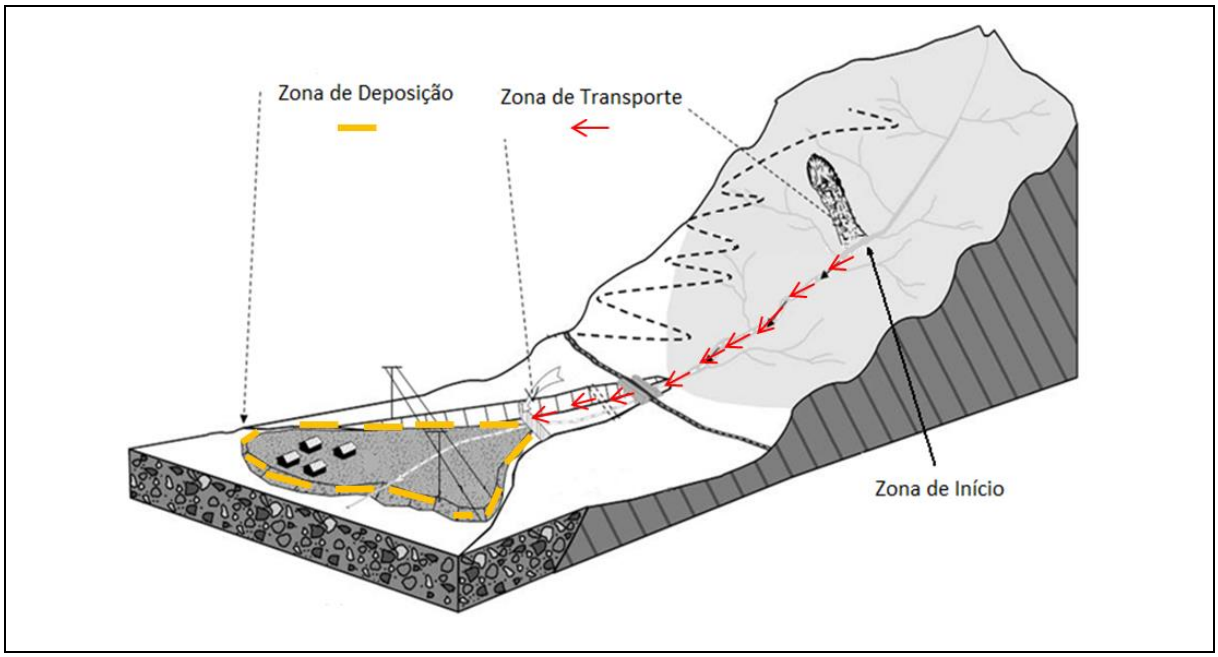


Figura 8. Zonas características de debris flows: Zona de Iniciação, Zona de Transporte e Erosão e Zona de Deposição (Nunes & Sayão, 2014).

A maioria das instabilidades das encostas no entorno da Bacia do Rio Príncipe apresentaram as 3 zonas típicas de iniciação, transporte e deposição, notando-se que o transporte ocorreu tanto ao longo da encosta quanto na calha do rio. A Figura 9 apresenta vista geral do Rio Príncipe e as Figuras 10 a 15 ilustram as instabilidades e movimentos de debris flows nos

trechos indicados de 1 a 5 ao longo do eixo do rio (Figura 9), a partir de registros aéreos tomados no dia 27/01/2011.



Figura 9. Vista geral das instabilidades de encostas a longo do Rio Príncipe em registro aéreo de janeiro de 2011 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 10. Cicatrizes de deslizamentos translacionais nas cristas e de debris flows nos talvegues a montante da cabeceira do Rio Príncipe - Trecho 1 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 11. Cicatrizes de deslizamentos com exposição de superfície rochosa e canal de debris flow com blocos – Trecho 2 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 12. Zonas de transporte e início de deposição do debris flow ao longo do Rio Príncipe – Trecho 3 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 13. Vista de montante para jusante do debris flow – Trecho 3 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 14. Zonas de transporte e deposição dos blocos rochosos do debris flow com cicatrizes de deslizamentos rotacional e translacional das encostas na margem direita – Trecho 4 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 15. Zona de deposição dos blocos rochosos do debris flow – Trecho 5 (Acervo A.L. Nunes).

Os registros fotográficos mostram os seguintes aspectos importantes:

i. As cotas altas das encostas sofreram deslizamentos translacionais e rupturas planares de lascas e blocos formados por juntas de alívio e outras juntas dando início aos movimentos de debris flows;

ii. Os deslocamentos dos debris flows nos talvegues produziram erosão das laterais e fundo dos canais, incorporando mais material ao movimento, inclusive blocos e lascas de rochas de diversos volumes;

iii. Alguns depósitos de blocos foram formados em afloramentos de menor declividade nas cotas médias das encostas;

iv. Blocos rochosos de volumes diversos foram transportados até as cotas mais baixas, iniciando o processo de deposição ao longo da calha e margens destruídas do Rio Príncipe;

v. Os sedimentos finos e blocos de menores dimensões foram transportados até longas distâncias, atingindo extensão de cerca de 4,8km;

vi. Os blocos rochosos em movimento são os maiores responsáveis pela destruição das margens e calhas do Rio Príncipe e das estruturas construídas no entorno. As lamas e sedimentos finos provocaram o assoreamento do canal e inundações, porém produziram danos muito inferiores aos provocados pelos blocos rochosos.

As Figuras 16 a 20 apresentam aspectos dos debris flows que auxiliam a compreender o movimento e esclarecem quanto aos mecanismos atuantes, como por exemplo, a elevada energia cinética dos blocos volumosos que atingiram grandes distâncias de viagem, auxiliados pela redução de atrito basal produzida pela mistura de água e sedimentos finos.

Algumas referências reportam que os blocos rochosos volumosos são resultado da exumação de canais de antigos debris flows e que não sofreram transporte. Isto não se verifica nos registros fotográficos, especialmente os das Figuras 18 a 20, nas quais se observa o depósito de blocos na altura das casas remanescentes ou sobre elas e na própria Estrada da Posse, invadida por blocos de até $10m^3$.



Figura 16. Detalhe da superfície de rocha exposta na cicatriz de ruptura e os blocos produzidos que se depositaram na base da cicatriz – Trecho 1 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 17. Zona de transporte com cicatrizes de rupturas de juntas de alívio produzindo mais blocos e lascas para debris flow – Trecho 2 (Acervo A.L. Nunes).



Figura 18. Zona de deposição dos blocos de rocha transportados pelo debris flow – Trecho 3.



Figura 19. Zona de deposição dos blocos de rocha que soterram diversas casas – Trecho 3.



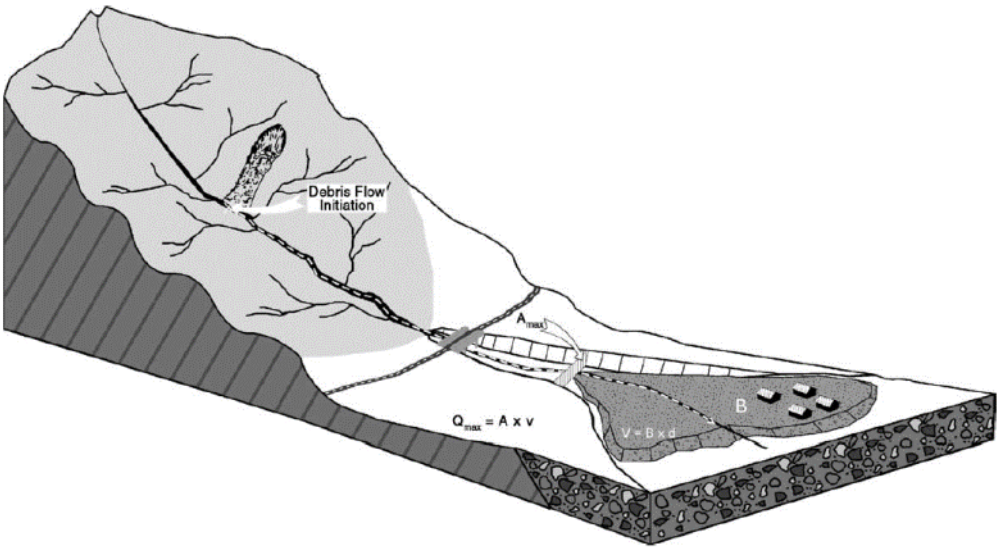
Figura 20. Blocos de rocha volumosos com detalhe do plano de ruptura recente indicando o transporte pelo debris flow na Estrada da Posse.



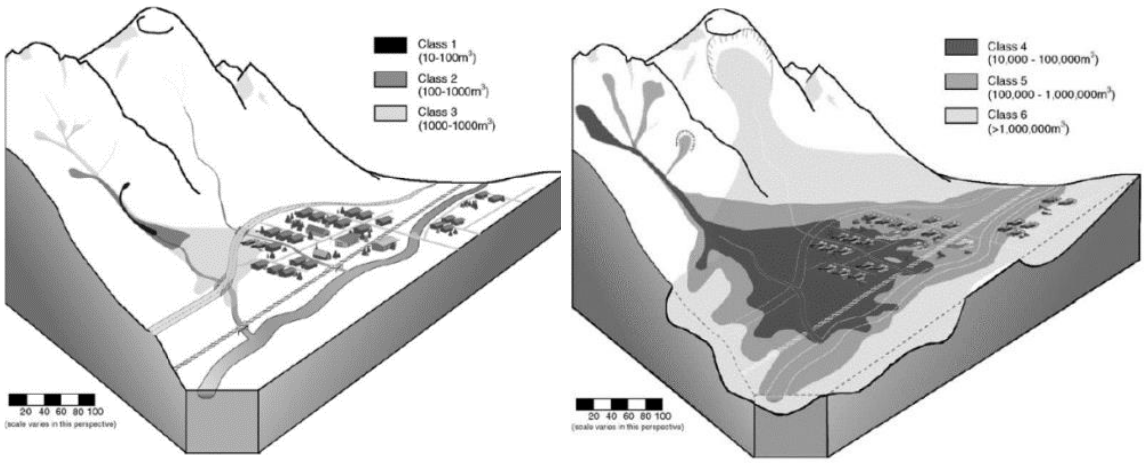
Figura 21. Zona de deposição dos blocos de diversos volumes vistos da Estrada da Posse – Registro de março de 2013.

O fluxo de detritos na área do Rio Príncipe pode ser considerado de Classe 4 na Classificação de Jakob & Hungr (2005) em função do volume, vazão de pico, área de dispersão ou área afetada e possíveis consequências do fluxo de detritos (Figura 24).

A Tabela 2 ilustra a classificação proposta, a qual foi adaptada por Nunes (2013) para fluxos de detritos não vulcânicos, sem ocorrências no Brasil. É interessante observar a relação entre o volume e a vazão de pico, muito explorada nas diversas formulações empíricas de fluxo de detritos e adotadas para estimativa de áreas de alcance e dispersão do movimento.



Modelo conceitual da classificação com os parâmetros adotados: Volume (V), Vazão de pico (Q_{max}), Área de dispersão (B)



Esquema das Classes 1 a 3 Esquema das Classes 4 a 6

Figura 22. Parâmetros e classes de fluxo de detritos da Classificação de Jacob & Hungr (Nunes & Sayão, 2014).

Tabela 2. Classificação de fluxo de detritos em função do volume, vazão, área inundável e consequências (Nunes, 2013).

Classe	Volume (m^3)	Vazão de Pico (m^3/s)	Área Afetada (m^2)	Consequências
1	$< 10^2$	< 5	$< 4.10^2$	Danos localizados. Pode ocasionar a morte de trabalhadores florestais em pequenos talvegues, danos em construções menores
2	10^2 - 10^3	5 - 30	4.10^2 - 2.10^3	Soterramento de carros, destruição de construções de pequeno porte e árvores, descarrilhamento de trens
3	10^3 - 10^4	30 - 200	2.10^3 - 9.10^3	Destruição de edifícios de maior porte, danos em pilares de pontes de concreto, rodovias e dutos
4	10^4 - 10^5	200 - 1.500	9.10^3 - 4.10^4	Destruição de aldeias, corredores de infraestrutura, pontes, obstrução de riachos
5	10^5 - 10^6	1.500 - 12.000	4.10^4 - 2.10^5	Destruição de partes das cidades e florestas de 2 km^2 de área. Obstrução de riachos e pequenos rios
6	10^5 - 10^6	Não observado	$> 2.10^5$	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km^2 de área. Bloqueio de rios
7	10^6 - 10^7	Não observado	Não observado	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km^2 de área. Bloqueio de grandes rios
8	10^7 - 10^8	Não observado	Não observado	Destruição de grandes cidades e inundação de vales até 100 km^2 de área. Bloqueio de grandes rios
9	$> 10^8$	Não observado	Não observado	Vasta e completa destruição de centenas de km^2

3.5 MEDIDAS GEOTÉCNICAS IMPLANTADAS NO RIO PRÍNCIPE

Após o evento catastrófico de janeiro de 2011 diversas intervenções estruturais e não-estruturais foram implementadas na região do Rio Príncipe, tais como a canalização do rio a implantação de 2 barreiras flexíveis.

A bacia hidrográfica do Rio Príncipe foi dividida em uma sub-bacia, sendo formada pelo pelo Córrego do Príncipe no Eixo 2 da bacia com 2 barreiras (Figura 23).

O documento *Elaboração do Projeto para Controle de Inundações e Recuperação Ambiental no Município de Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro - Relatório do Projeto Executivo das Barragens de Proteção Amortizadora de Impactos Rochosos e Acúmulo de Sedimentos no Rio Príncipe - Memorial Descritivo*, emitido por COHIDRO (2016) apresenta o dimensionamento das barreiras a partir das estimativas de velocidades e vazões de fluxo de detritos e consideração das parcelas estática e dinâmica para determinação dos esforços atuantes na estrutura.

A COHIDRO (2016) também considerou o levantamento das cicatrizes de escorregamento do evento de 2011 para obtenção dos volumes mobilizados. Foram identificadas 118 cicatrizes, das quais 61 pertencem à área da sub bacia 1 e 33 são da sub bacia 2, já apresentadas na Figura 26. Os projetistas adotaram a área das cicatrizes com profundidade de 1,0m para a determinação do volume de sólidos, resultando em 174.500m^3 para a sub bacia 1 e 42.200m^3 para sub bacia 2.

De posse dos volumes calculados, os canais foram estudados de forma a reter o maior volume possível e, desta forma definir a locação das barreiras (Figura 24). O dimensionamento das barreiras foi realizado utilizando o *software online* Debflow da Geobrugg AG, sendo selecionadas barreiras com capacidade nominal de 180kN/m^2.

A partir do balanço dos volumes (fluxo de detritos / capacidade de retenção das barreias), os projetistas concluem que as barreiras garantem uma retenção de volume de aproximadamente 30.000m³, que representa proporção significativamente inferior e igual a 15,5% do volume total por eles estimado (187.630m^3).

Estas considerações são essenciais para o desenvolvimento do projeto das novas barreiras flexíveis a serem instaladas no eixo 2 da sub bacia do rio Príncipe.

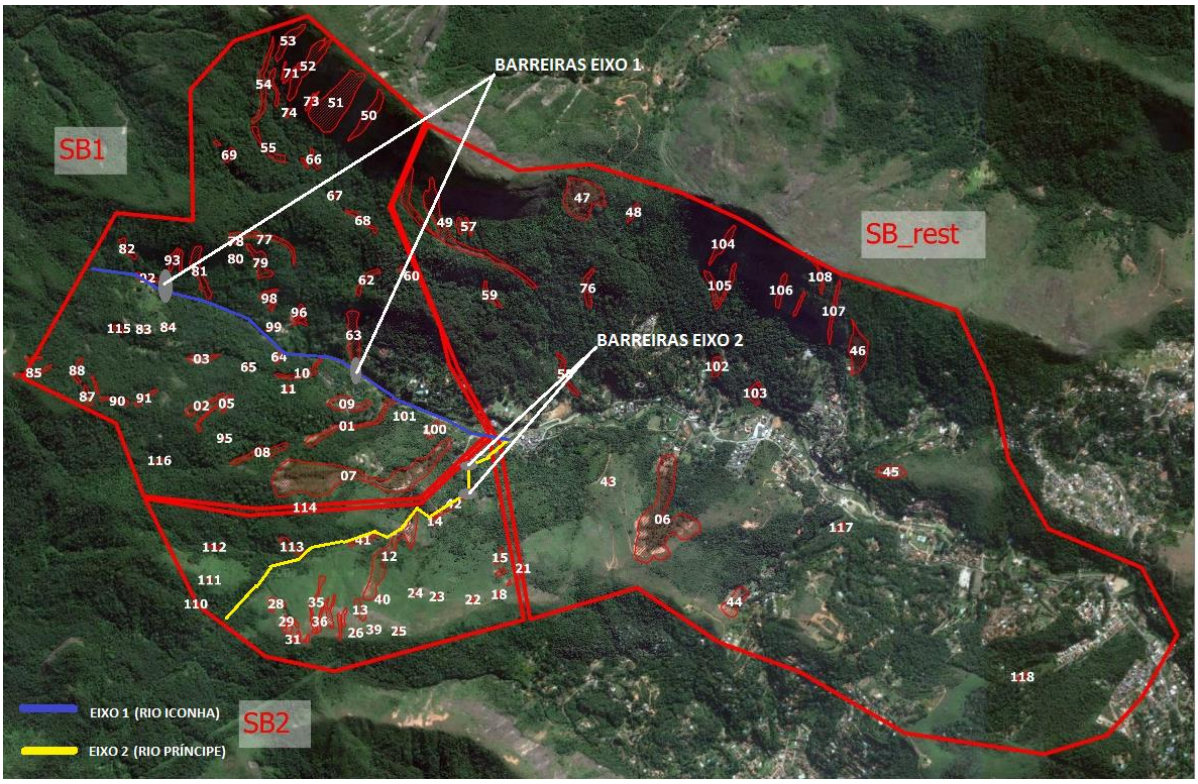
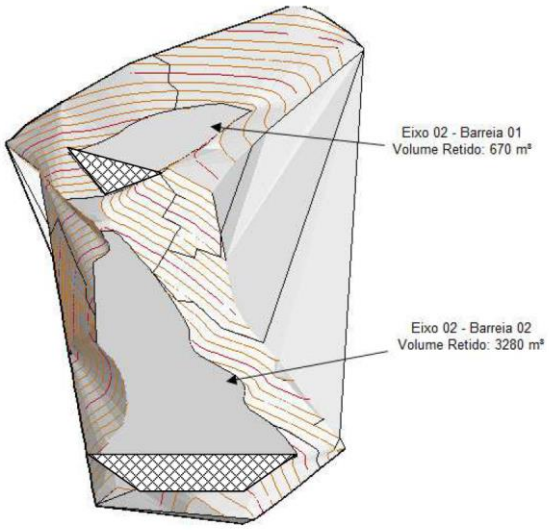


Figura 23. Sub bacias do Rio Iconha (Eixo 1 em azul) e Rio Príncipe (Eixo 2 em amarelo) e com 2 barreiras flexíveis alocadas (INEA, 2016).



(a) Barreiras no Eixo 2 – Rio Príncipe

Figura 24. Locação e volumes retidos pelas 2 barreiras (COHIDRO, 2016).

4 CONDIÇÕES ATUAIS DA ÁREA

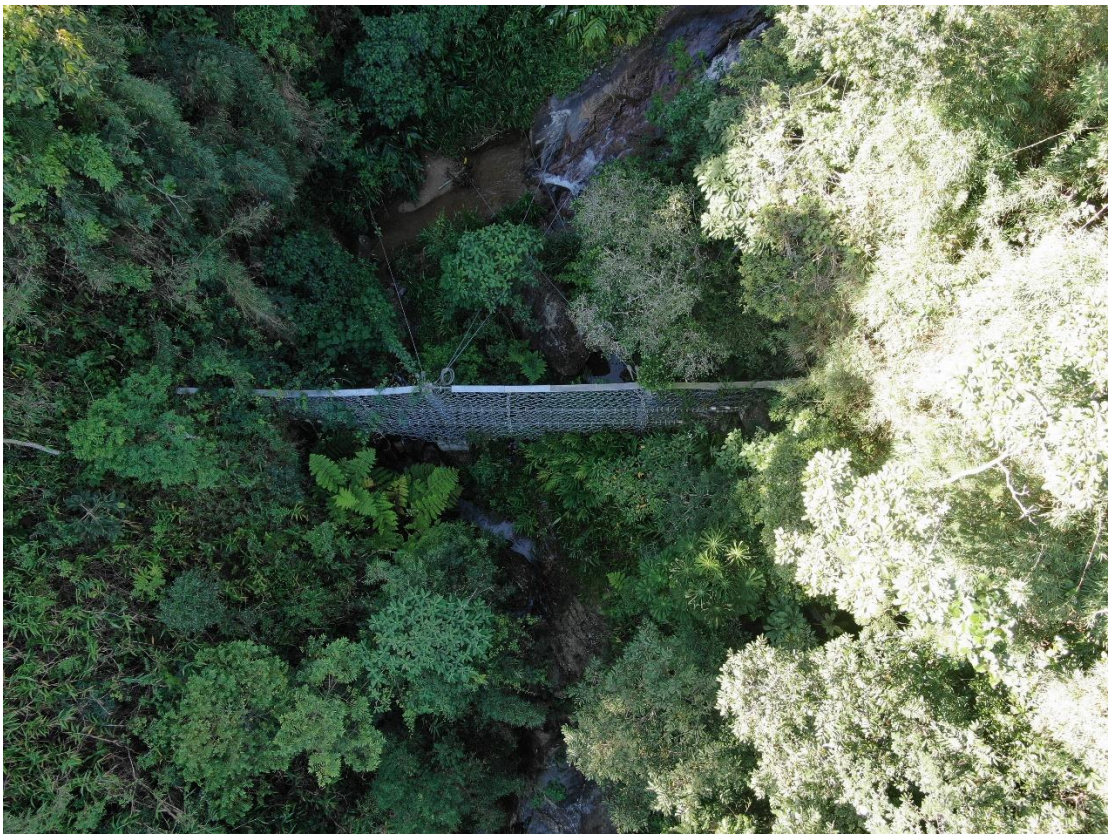
As inspeções de campo realizadas na área do Rio Príncipe permitiram sua caracterização atual e o desenvolvimento da solução geotécnica de proteção com barreiras flexíveis.

Passados 10 anos dos eventos de chuvas e instabilidades de encostas, observa-se que a área foi recuperada, restando poucas moradias condenadas no trecho não canalizado do rio (Figura 28).

As 2 barreiras flexíveis foram instaladas no Rio Príncipe (Figura 29), sendo a primeira barreira BGP-01 locada após inflexão do curso do rio em canal quase fechado, sobre trecho de afloramento rochoso com juntas de alívio e depósito de blocos. A segunda barreira BGP-02 foi instalada em canal aberto a jusante de blocos rochosos muito volumosos (Figura 30). Note-se que esta barreira foi vandalizada com a remoção dos clips de fixação de cabos longitudinais e abertura do painel na região inferior no eixo do rio. A abertura da barreira permite o acesso para o banho de cachoeira a montante da barragem. A área tem sido usada para lazer com vários pontos de churrasqueiras improvisadas.



Figura 25. Obras estruturantes e complementares executadas no Bairro Posse com canalização do Rio Príncipe.



(a) Vista aérea



(b) Vista frontal

Figura 26. Eixo do Rio Príncipe com a 1ª barreira flexível BGP-01 com capacidade de retenção de 670m^3.



(a) Vista aérea



(b) Vista lateral

Figura 27. Eixo do Rio Príncipe com a 2ª barreira flexível BGP-02 com capacidade de retenção de 3280m^3.

5 PROJETO DAS BARREIRAS FLEXÍVEIS

O projeto das barreiras flexíveis para proteção da área do Rio Príncipe foi elaborado considerando o modelo geomecânico representativo das instabilidades e dos condicionantes geológico-geotécnicos e métodos de dimensionamento de barreiras baseados em Nunes (2013), Nunes & Sayão (2014) & Sacoto & Nunes (2018), observando a normativa Brasileira de Estabilidade de Taludes e normativas e recomendações italianas e da Comunidade Europeia referentes à técnica de proteção com barreiras flexíveis.

5.1 Intervenção com Barreiras Flexíveis

As barreiras flexíveis são soluções indicadas para a interceptação de massas instáveis em movimento, tais como debris flows e quedas de blocos, típicos da área de estudo no Rio Príncipe. Este tipo de intervenção apresenta várias vantagens, destacando-se:

i. Capacidade de retenção de lascas/blocos rochosos de volumes variáveis, condicionados à capacidade nominal de energia das barreiras;
ii. Área de dimensões reduzidas para instalação da barreira flexível;
iii. Capacidade de carga do terreno de fundação qualquer, sem exigências;
iv. Facilidade e rapidez de instalação em qualquer tipo de terreno, inclusive os muito irregulares e íngremes;
v. Facilidade de substituição de componentes após impactos com danos;
vi. Elevada durabilidade com vida útil longa;
vii. Área de canteiro de obra reduzida;
viii. Vegetação natural preservada, sem necessidade de remoção de árvores;
ix. Interferência mínima ou nula nas condições naturais do terreno/encosta;
x. Sem interferência no curso do rio;
xi. Integração completa, sem impactos físicos e visuais no meio ambiente.

As barreiras flexíveis são dimensionadas considerando diversos fatores relativos ao tipo de massa instável em movimento, seção transversal crítica e tipo de superfície da encosta, local de origem e volume do bloco instável e, especialmente, a envoltória de energia de movimento do bloco ao longo da encosta.

Os tipos principais de barreiras flexíveis disponíveis comercialmente são:

i. Barreiras de painel confinado com postes e cabos de topo e base, de extensão qualquer, instaladas em áreas abertas ou vales de grandes dimensões (Figura 33);

ii. Barreiras de painel confinado sem postes com cabos longitudinais regularmente espaçados, tipicamente pouco extensas e instaladas em vales, canais fechados e talvegues (Figura 34);

iii. Barreiras de painel livre também chamadas atenuadoras ou barreiras véu de noiva, de extensão qualquer, preferencialmente instaladas em encostas de grande altura e declividade (Figura 35).



Figura 28. Barreira de painel confinado com postes e cabos de topo e base, BR101, Mangaratiba, RJ (Acervo MACCAFERRI Brasil).



Figura 29. Barreira de painel confinado sem postes com cabos longitudinais sistemáticos, Itaipava, RJ (Acervo MACCAFERRI Brasil).



Figura 30. Barreira de painel livre, atenuadora ou barreira véu de noiva, Belugno, Itália (Acervo Officine MACCAFERRI Itália).

5.2 Modelo Geomecânico

O modelo geomecânico da área do Rio Príncipe foi desenvolvido a partir das análises dos eventos de instabilidade de janeiro de 2011, as condições anteriores e posteriores ao evento e as condições atuais.

O modelo apresenta as seguintes premissas:

i. O evento de 2011 com chuvas de tempo de recorrência muito elevado (até 566 anos) representa um desmonte hidráulico raro, que associou rupturas por deslizamentos translacional e rotacional, quedas de blocos e debris flows que contribuíram para a destruição da região do Rio Príncipe (Figura 36), com probabilidade de nova ocorrência considerada desprezível para obras de engenharia;

ii. Os movimentos de massa críticos são do tipo queda de blocos e debris flows com predominância de blocos rochosos;

iii. Debris flow do tipo granular com 3 zonas, diferenciadas pelos tamanhos das partículas. A parte frontal (cabeça) com maior porcentagem de blocos de maior diâmetro, seguida pela parte central do fluxo (corpo) com material fino e detritos e parte final (cauda) com maior porcentagem de água do que de sedimentos, similar a um fluxo de lama, porém turbulento (Figura 37);

iv. Blocos rochosos são pouco ou não alterados com peso específico de 27kN/m^3 e volumes variando até 5m^3;

v. A movimentação do fluxo de detritos pelo canal com deposição canalizada, na qual o depósito tende a assumir a forma do canal e livre com depósito em forma de leque ou cunha dependendo da topografia (Nunes & Sayão, 2014), conforme indicado na Figuras 38 a 40;

vi. As trajetórias preferenciais críticas dos debris flows com blocos rochosos correspondem aos talvegues/calhas do Rio Príncipe com deposição progressiva dos blocos ao longo do eixo da calha. Após a movimentação nos talvegues de cotas altas, a cabeça do debris flow atinge as cotas baixas e inicia a deposição dos blocos volumosos, seguida pela deposição dos blocos de menores volumes e finalizada pela deposição da lama com sedimentos e fragmentos menores. Depósitos são formados em trechos de transição retilíneo-curvo e de estrangulamento da calha original do rio;

vii. Área de intervenção limitada pela barreira BGP-02 (2ª barreira do eixo do Rio Príncipe) e início da canalização do Rio Príncipe, compreendendo as sub bacias 1 e 2 (SB1 e SB2, conforme definição da INEA 2016).

Importante ressaltar que as premissas do modelo geomecânico são corroboradas pelos registros fotográficos já apresentados no Item 3.4.

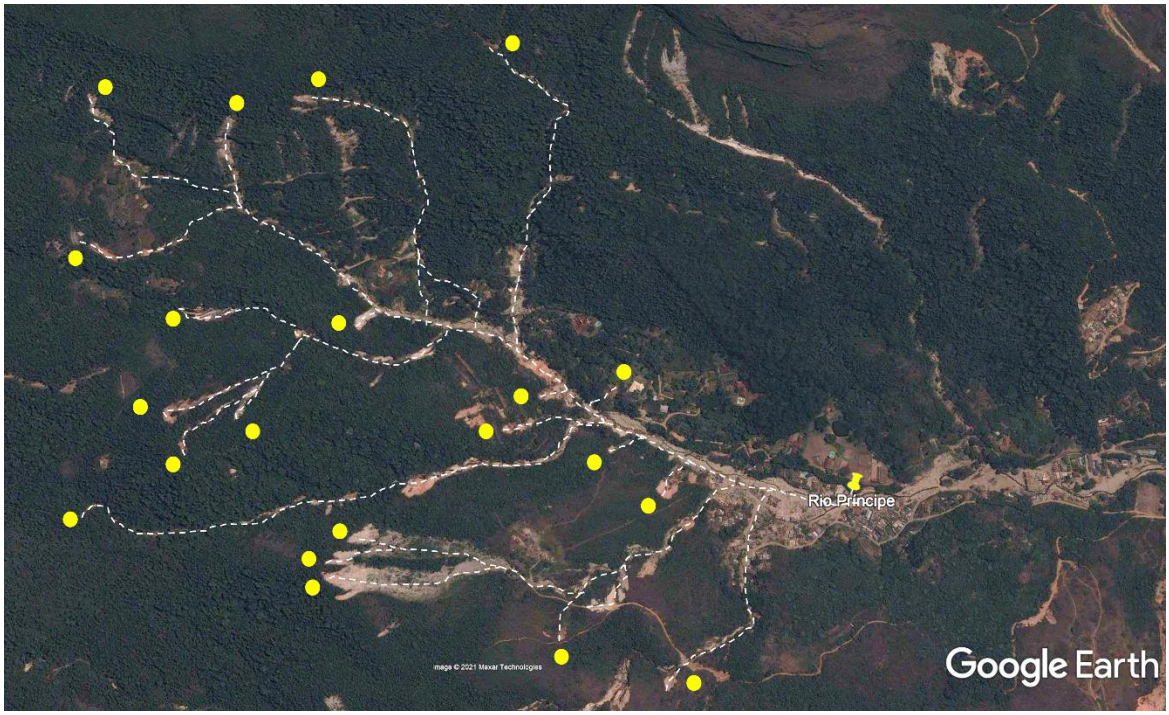


Figura 31. Movimentos de massa em 2011 que atingiram a região do Rio Príncipe antes da junção com Rio Iconha (Adapt. Google Earth, registro de 09/2011).

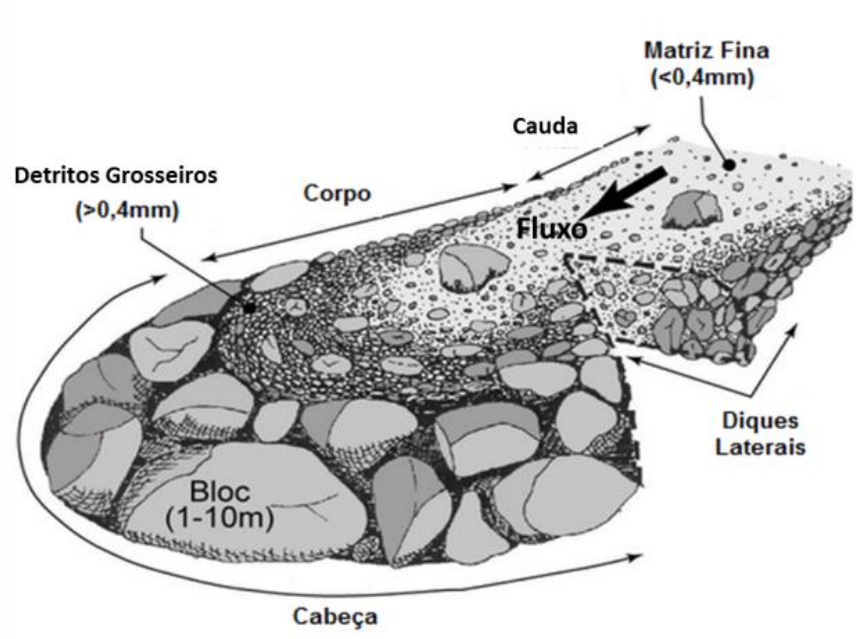
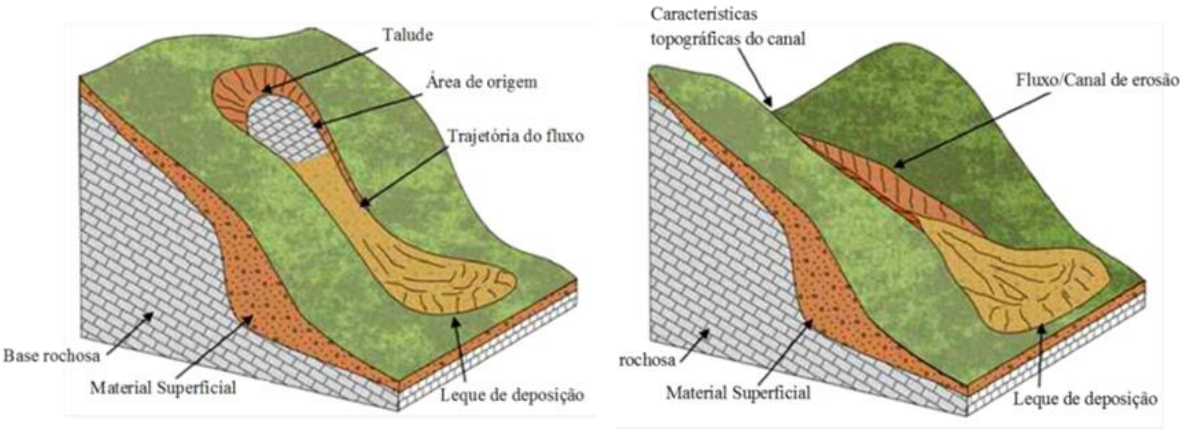


Figura 32. Perfil esquemático de fluxo de detritos com frente granular (Nunes & Sayão, 2014).



(a) Deposição canalizada (b) Deposição livre em leque

Figura 33. Tipos de depósitos de fluxo de detritos (Nunes & Sayão, 2014).



Figura 34. Depósitos livres em leque após junção dos Rios Iconha e Príncipe (Acervo A.L. Nunes).

5.3 Métodos de Dimensionamento das Barreiras Flexíveis

As forças de impacto geradas pelos fluxos de detritos são muito difíceis de estimar, principalmente porque dependem de muitos fatores de determinação complexa. A literatura técnica indica que os modelos de forças de impacto podem ser classificados em: (i) Hidráulicos, subdivididos em Hidrostáticos e Hidrodinâmicos; (ii) Ondas de colisão; (iii) Impacto de corpos sólidos; e (iv) Empíricos.

Sacoto & Nunes (2018) reportam que os modelos hidráulicos têm sido atualmente os mais usados para analisar as forças de impacto nas estruturas de retenção/proteção. O primeiro modelo hidráulico hidrostático para fluxos de detritos foi desenvolvido por Lichtenhahn (1973) e ainda é empregado com frequência, devido à sua simplicidade, visto que considera a força de impacto como uma força hidrostática, exigindo apenas a altura do fluxo de detritos. Saliente-se que normalmente as estruturas de proteção são dimensionadas especificamente como alturas dos fluxos de detritos (Hubl et al., 2009).

Modelos hidráulicos mistos (hidrostáticos e hidrodinâmicos) também têm sido adotados para o dimensionamento de barreiras destacando-se Segalini et al. (2013), que considera 3 componentes de forças aplicadas em barreiras flexíveis, as quais são geradas em sequência após o impacto do fluxo de detritos: (i) Força dinâmica produzida pelo impacto do fluxo de detritos na barreira, calculada com o modelo hidrodinâmico; (ii) Força estática produzida pelo acúmulo de detritos na barreira, calculada com o modelo hidrostático; e (iii) Força de arraste produzida quando o fluxo de detritos passa por cima da barreira (galgamento da barreira).

Entretanto, a grande maioria dos modelos hidráulicos hidrostáticos e hidrodinâmicos foram desenvolvidos considerando que a massa do debris flow é dominada pelos sedimentos, detritos e lama. Isto não ocorreu na região do Rio Príncipe em 2011, tampouco no Caleme também em Teresópolis ou os debris flows de Córrego D'Antas e Hospital São Lucas, conforme os estudos do GRUPO DEBRIS FLOWS sob a coordenação de Anna Laura Nunes (COPPE-UFRJ) e Alberto Sayão (PUC-Rio). São mais de 15 publicações sobre o assunto (Nunes & Rios Filho, 2009; Estrada Polanco, 2010; Nunes, 2013; Nunes et al, 2013; Motta, 2014; Pelizoni, 2014; Nunes & Sayão, 2014; Xavier Silva, 2015; Valverde Sancho, 2016; Valverde et al, 2016; Pelizoni & Nunes, 2016; Teixeira Silva, 2016; Sacoto, 2017; Sacoto & Nunes, 2018a e b; Magalhães, 2021).

Os debris flows da Região Serrana Fluminense foram dominados pelo transporte de blocos rochosos de dimensões expressivas, os maiores responsáveis pela destruição ao alongo da corrida. Em geral, os blocos são os primeiros a produzir o impacto, seguido dos outros materiais que formam os fluxos de detritos. O depósito dos detritos que atingem a barreira nos primeiros momentos promove uma redução progressiva das forças de impacto dos fluxos de detritos subsequentes (Vandine, Sacoto & Nunes, 2018).

O impacto dos blocos pode ser muito mais importante que o do fluxo, visto que os esforços gerados podem ser maiores (Mizuyama, 1979; Hungr et al., 1984; Yamaguchi, 1985; Zhang, 1993; Lien, 2002; Huang et al., 2007; He, 2010; He et al., 2016; Sacoto & Nunes, 2018). A força de impacto depende principalmente da velocidade e do diâmetro do bloco e pode ser expressa por:

$$F = A \cdot R^2 \cdot V^{1,2} \quad [1]$$

Onde F é a força de impacto do bloco, R é o raio do bloco, V é a velocidade do bloco e A é o coeficiente de ajuste da relação. Este coeficiente pode ser obtido por meio da teoria da colisão elástica, variando de 80,8 (Lien, 2002) a 426 (Yamaguchi, 1985) e igual a 241 conforme Mizuyama (1979). Os coeficientes determinados em ensaios de campo indicam valores muito inferiores, variando de 30,8 (Huang et al., 2007) a 50 (Yamaguchi, 1985) e igual a 48,2 proposto por Mizuyama (1979).

A proposta de Mizuyama (1979) modificada por resultados de investigações de campo tem representado consistentemente o impacto dos blocos é a adotada neste projeto para as análises de força de impacto de bloco e, portanto, expressa por:

$$F = 48{,}2 \cdot R^2 \cdot V^{1,2} \quad [2]$$

O impacto dos fluxos de detritos pode ocorrer de diferentes formas. Alguns fluxos de detritos se desenvolvem em vários pulsos, e assim múltiplos ciclos de carga devem ser considerados para garantir a estabilidade e o desempenho das barreiras de proteção. A Figura 41 apresenta os diferentes cenários possíveis para impactos dos detritos, baseados em Kwan (2012).

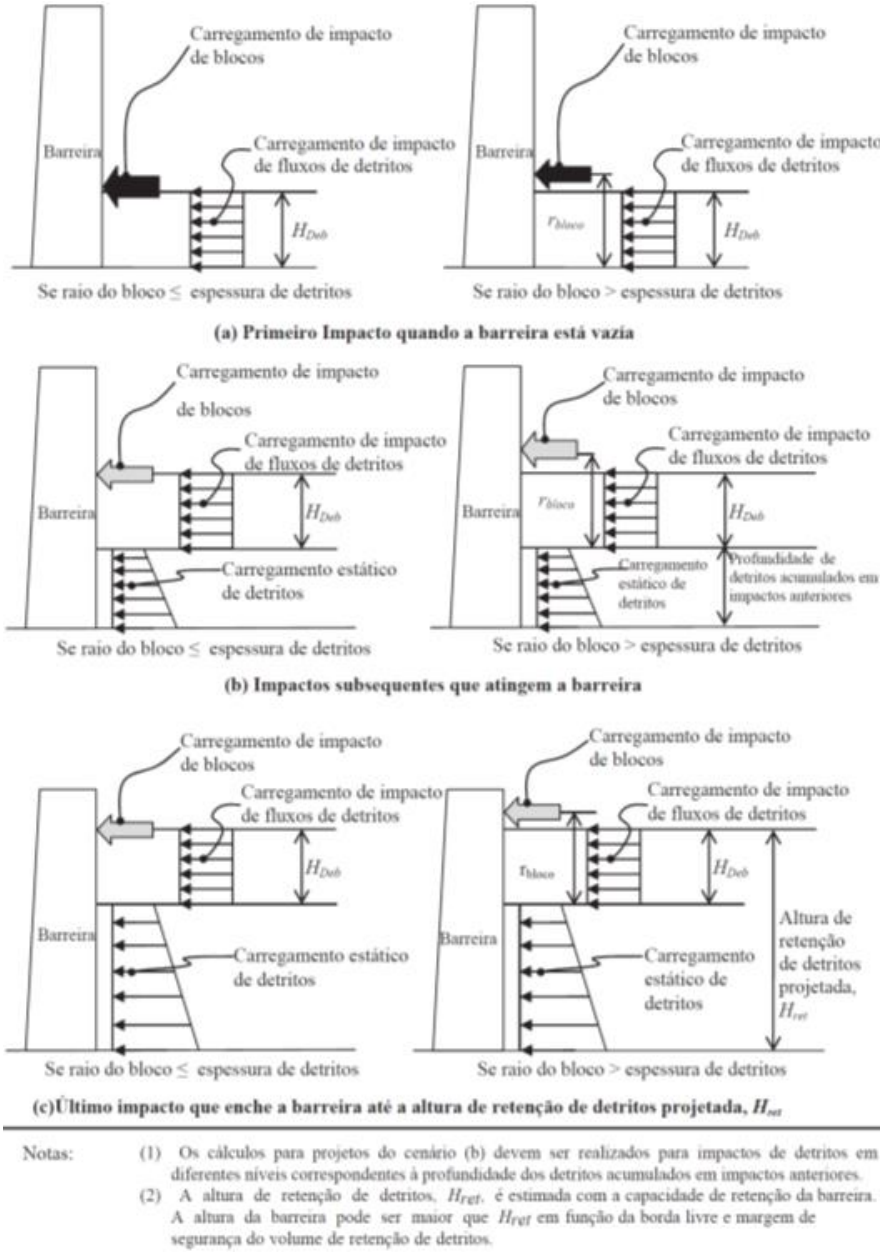


Figura 35. Cenários de dimensionamento de barreiras com múltiplos impactos dos detritos (Sacoto & Nunes, 2018).

Neste projeto considerou-se que o primeiro impacto de fluxo de detritos com blocos rochosos é o mais relevante para a determinação da força e energia de impacto, visto ser de maior magnitude e, portanto, mais crítico para o dimensionamento de estruturas de proteção. Vale ainda mencionar que as barreiras flexíveis permitem uma redução dos efeitos dos blocos devido à grande área de contato entre a barreira e o bloco (Canelli et al., 2012).

As barreiras são posicionadas e dimensionadas em função das trajetórias possíveis de blocos e de fluxo de detritos. A definição correta da trajetória do bloco e características tais como distância, altura, velocidade e energia do material em movimento são muito importantes. Nunes (2013) apresenta os aspectos básicos a serem considerados para o dimensionamento das barreiras: (i) Tipo de ruptura; (ii) Seção do talude; (iii) Localização do bloco; (iv) Peso e

forma do bloco; (v) Energia de impacto; (vi) Velocidade de movimento; (vii) Velocidade de impacto; (viii) Altura de impacto; (ix) Distância da infraestrutura; (x) Facilidades de acesso; e (xi) Manutenção.

O programa considera o bloco como uma massa pontual e os diferentes tipos de movimentos, tais como deslizamento, rolamento, tombamento, queda livre e trajetória parabólica. Esses movimentos são calculados usando as leis do movimento e as leis referentes às colisões de partículas.

A reprodução analítica da trajetória do movimento de queda de blocos de rocha associa diversos fatores, tais como as propriedades dos blocos, as condições iniciais do movimento e as propriedades dos materiais das encostas. Exige a determinação das características geométricas e físicas da encosta, do bloco e do fluxo de detritos. As características geométricas principais correspondem à topografia do talude e do talvegue de movimento do fluxo de detritos, tamanho, peso e forma do bloco, volume, densidade e vazão do fluxo de detritos.

Outras características relevantes são a velocidade inicial do movimento do bloco e do fluxo de detritos, os coeficientes de restituição da superfície da encosta e do canal e o coeficiente de atrito relativo ao movimento do bloco/fluxo de detritos na superfície rochosa, cujos valores podem ser definidos a partir de retro-análise de eventos de massa já ocorridos.

Dentre os parâmetros envolvidos, os coeficientes de restituição normal e tangencial (Kn e Kt) são certamente os mais importantes e difíceis de serem obtidos. Sua determinação exige medidas específicas realizadas em lançamentos experimentais de blocos in situ ou por retro análise de movimentos já ocorridos.

Os coeficientes de restituição correspondem à energia cinética dissipada em sucessivos impactos e podem ser obtidos pela razão entre as velocidades depois e antes do impacto do bloco. As colisões podem ser classificadas pela capacidade de conservação de energia cinética no choque. Normalmente, um bloco em movimento ao se chocar com a superfície do talude perde parte de sua energia cinética. Para este comportamento é dado o nome de Colisão Parcialmente Inelástica, onde o coeficiente de restituição (K) possui valor entre zero e a unidade.

Neste projeto os coeficientes de restituição normal e tangencial (Kn e Kt) foram determinados a partir de retro análise dos movimentos de fluxos de detritos na região do Rio Príncipe, considerando blocos rochosos sãos com peso específico de 27kN/m^3 e volumes variando de 0,5m^3 a 5m^3, com trajetórias de deslocamento nas seções críticas, definidas pelas calhas dos Rios Príncipe. Foram avaliados os pontos de parada dos blocos rochosos resultantes das simulações numéricas e comparados com os depósitos de blocos reais dos movimentos de massa, definidos pela imagem de satélite de 09/2011 da área de estudo.

5.4 Análise das Trajetórias de Queda de Blocos

A Tabela 3 resume os parâmetros geotécnicos adotados para as análises e dimensionamento das barreiras flexíveis

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos adotados para as análises e dimensionamento de barreira flexível.

Parâmetro	Valor
Inclinação da seção transversal	Levantamento topográfico
Volume do bloco instável	5,0 m^3
Massa do bloco instável	13500,0 Kg
Peso específico da rocha	27,0 kN/m^3
Coeficiente de restituição normal	0,53 (± 0,02)
Coeficiente de restituição tangencial	0,97 (± 0,02)
Rugosidade da superfície do talude	0
Ângulo de atrito da superfície do talude	10º
Velocidade horizontal inicial	0,1 m/s
Velocidade vertical inicial	0 m/s
Velocidade angular inicial	0 rad/s

Portanto, as análises de trajetória e energia cinética total foram realizadas considerando um total de lançamentos de 10.000 blocos para cada seção transversal e os resultados são em função das seções críticas do Rio Príncipe.

Os resultados das análises de trajetórias dos blocos para a seção transversal do Rio Príncipe são apresentados nas Figuras 42 a 44, destacando a concentração das paradas de blocos (depósitos) em projeção horizontal, a envoltória de velocidade de movimento com máximo de 35m/s e a envoltória de energia cinética total dos blocos com valor máximo de 10000kJoules.

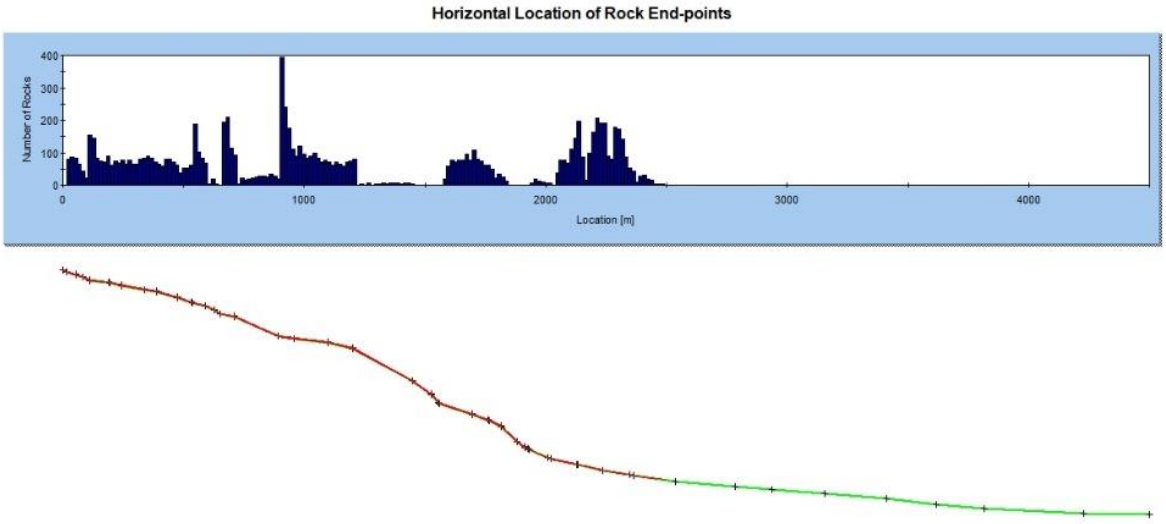


Figura 36. Histograma da concentração de blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica - Rio Príncipe.

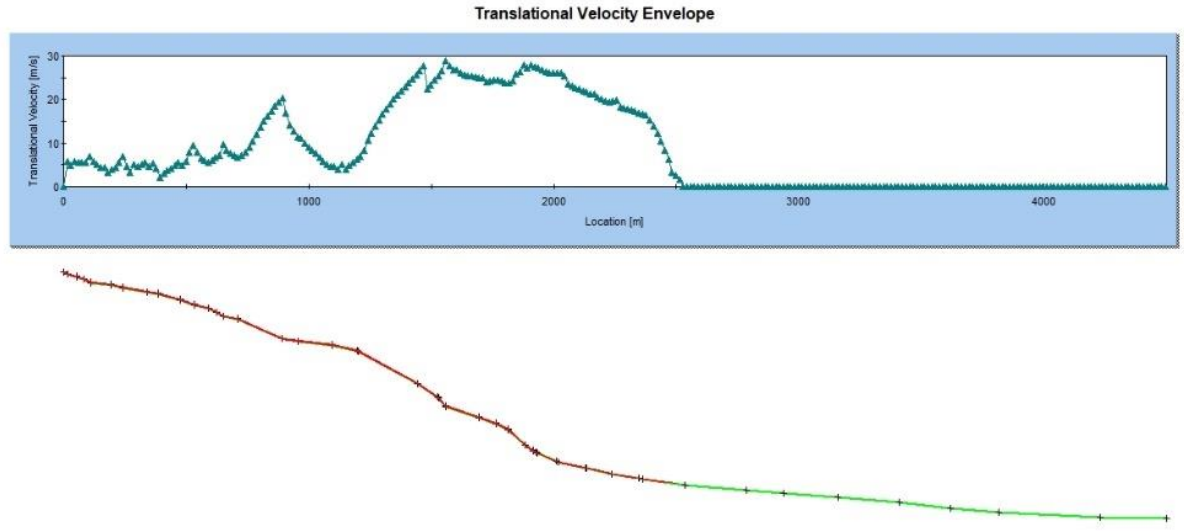


Figura 37. Envoltória de velocidades dos blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica - Rio Príncipe.

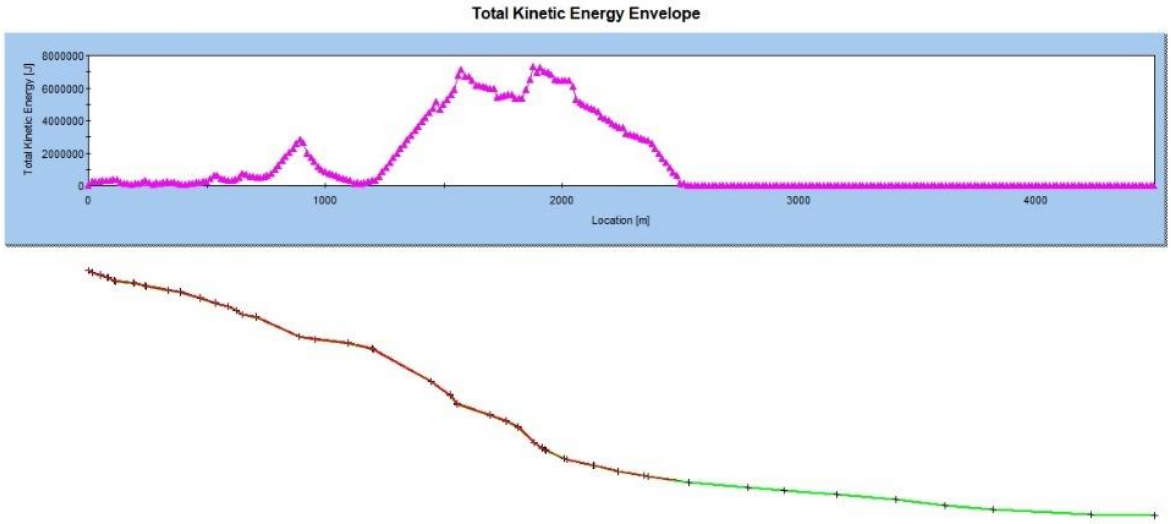


Figura 38. Envoltória de energia de queda de blocos ao longo da seção crítica – Rio Príncipe.

5.5 Locação das Barreiras e Análise das Envoltórias de Energia de Impacto

As envoltórias de energia e de velocidade de movimento dos blocos nas seções críticas dos Rio Príncipe associadas às características topográficas possibilitam o posicionamento otimizado das barreiras flexíveis de controle e proteção.

As linhas de barreiras posicionadas no eixo do rio são analisadas em relação às energias de impacto de blocos, de forma análoga à determinação das envoltórias de energia de movimento sem barreira.

A configuração final dos estudos desenvolvidos para a determinação das linhas de barreiras mais adequadas para retenção dos blocos considera energias de impacto reduzidas e atende às condições de instalação das barreiras, tais como, distorção mínima de painéis, manutenção dos painéis numa mesma curva de nível, afastamento de declives, entre outros fatores construtivos. A Figura 45 apresenta a locação das 2 barreiras BMP-01 e BMP-02 no eixo do Rio Príncipe.

Com o programa ROCFALL, as barreiras são posicionadas nas seções transversais e novamente são lançados 10.000 blocos de 5,0m^3 para análise do desempenho das barreiras em relação ao impacto dos blocos. Importante ressaltar que as barreiras são avaliadas sem a contribuição das barreiras existentes e sem a contribuição da barreira a montante BMP-01 no caso da Barreira BMP-02, favorecendo um cenário de solicitação mais conservador, que inclui a perda potencial das barreiras a montante.

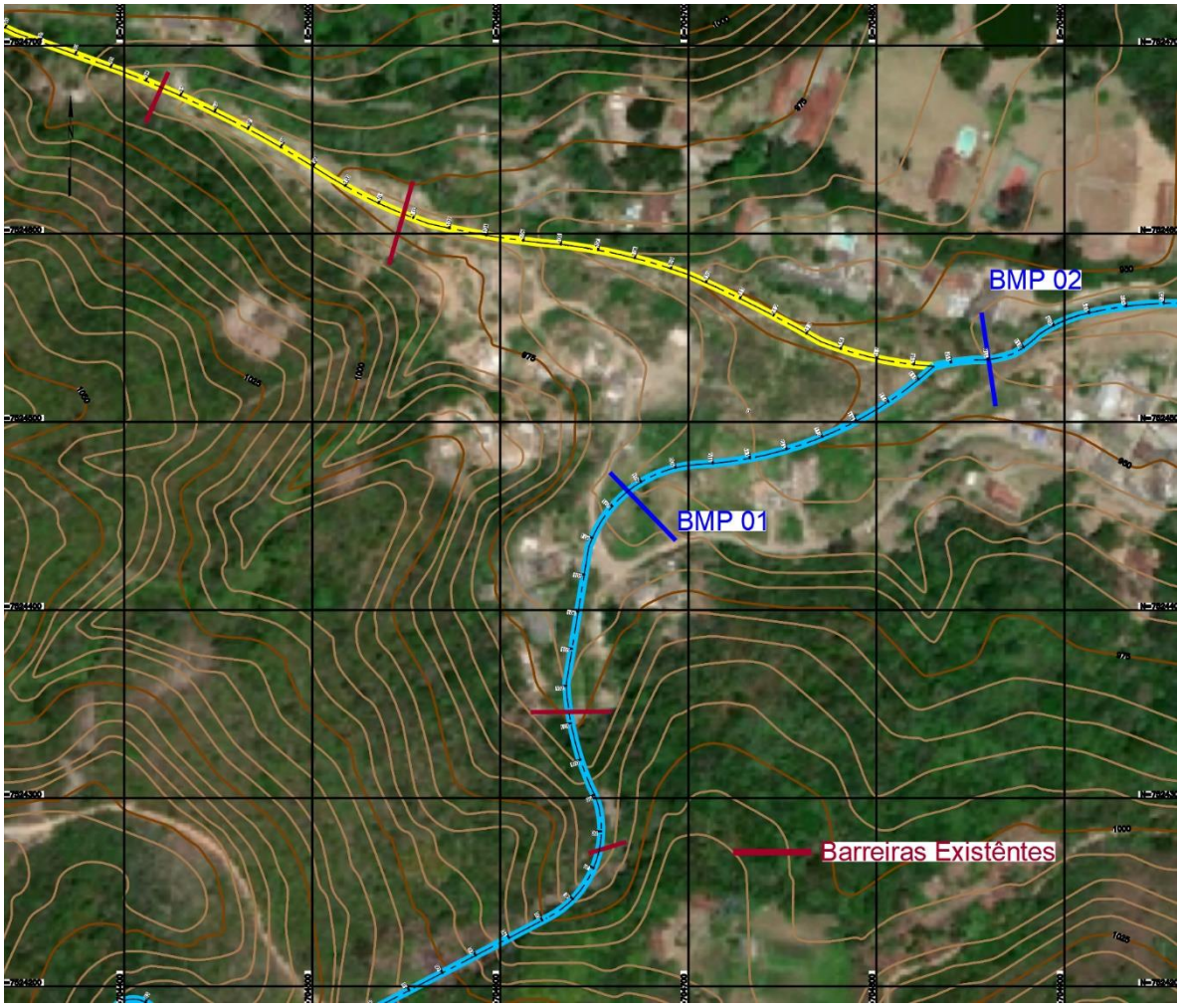


Figura 39. Locação das Barreiras BMP-01 e BMP-02 no Rio Príncipe.

Os resultados das análises de trajetórias dos blocos para a seção transversal do Rio Príncipe com a Barreira BMP-01 são apresentados nas Figuras 46 a 50 e com a Barreira BMP-02 nas Figuras 51 a 55, em função de:

i. Concentração das paradas de blocos (depósitos) em projeção horizontal;

ii. Envoltória de velocidade de movimento com velocidade de impacto na barreira;

iii. Envoltória de energia cinética total e energia de impacto na barreira;

iv. Histograma de número de blocos e energias de impacto na barreira;

v. Histograma de número de blocos e velocidades de impacto na barreira.

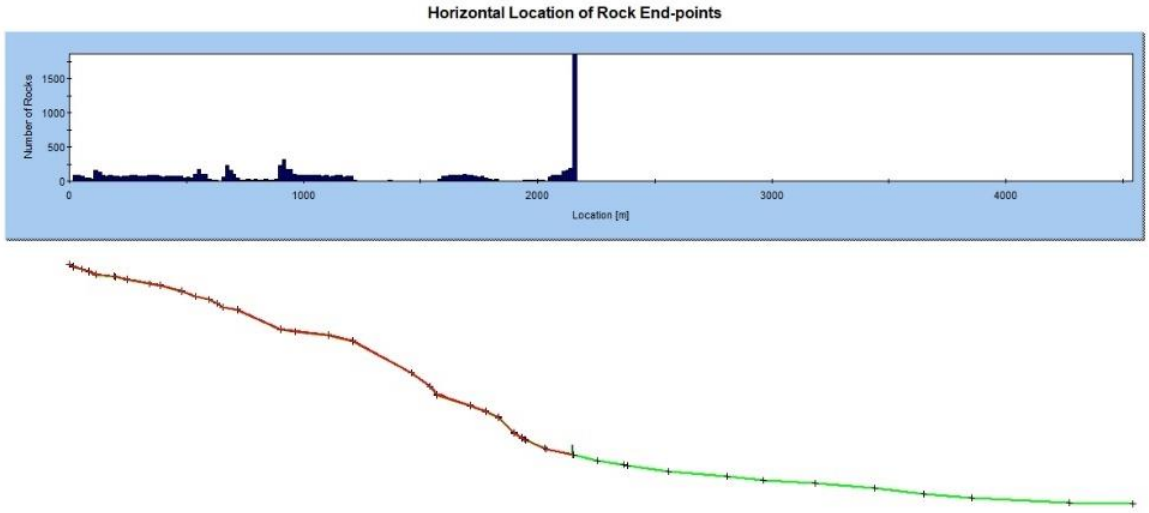


Figura 40. Histograma da concentração de blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica - Rio Príncipe com Barreira BMP-01.

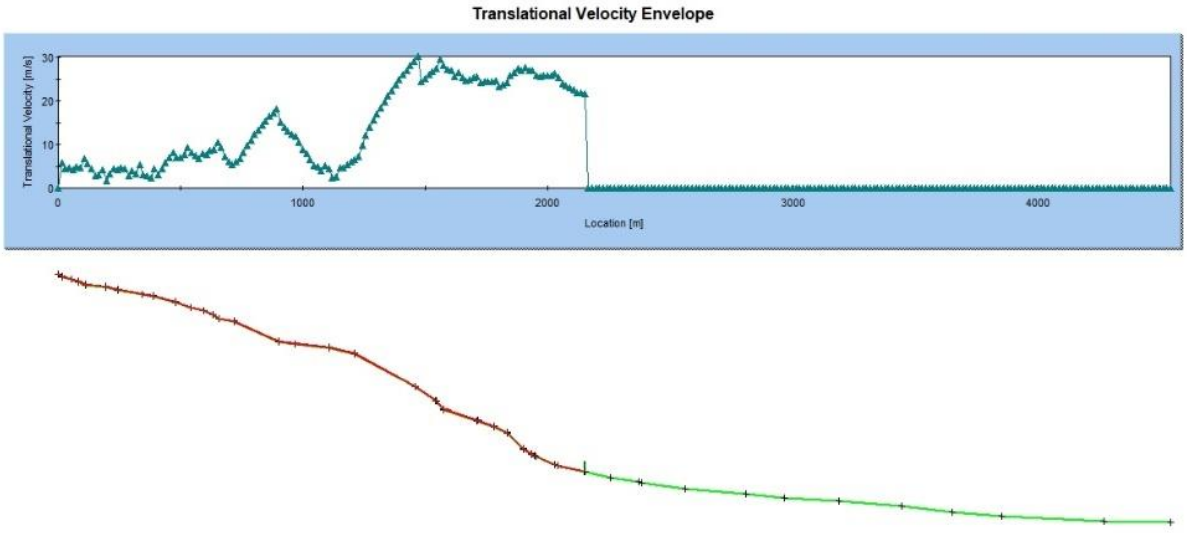


Figura 41. Envoltória de velocidades dos blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica e velocidade de impacto na barreira - Rio Príncipe com Barreira BMP-01.

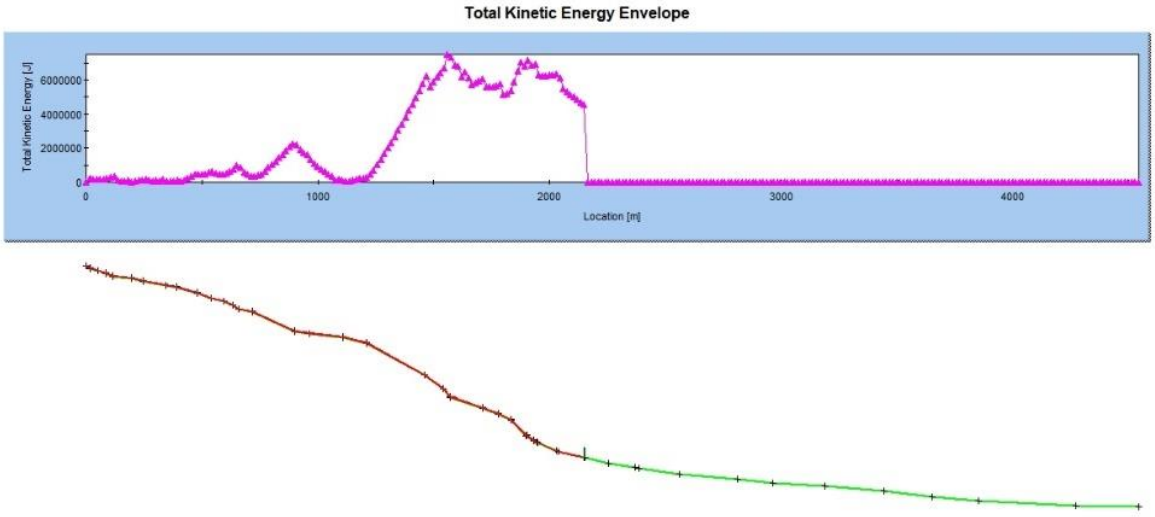


Figura 42. Envoltória de energia cinética total ao longo da seção crítica e energia de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-01.

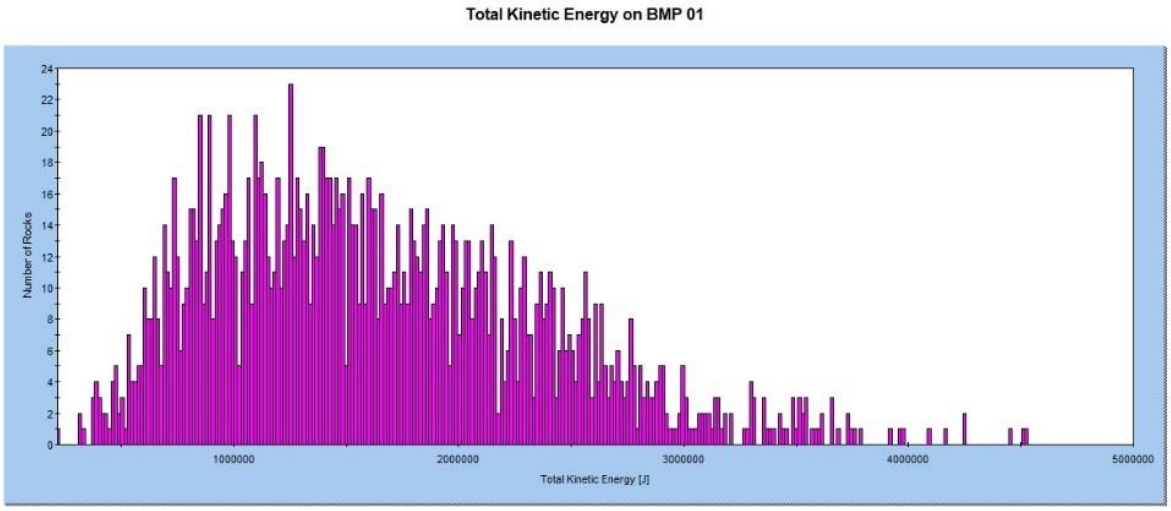


Figura 43. Histograma de número de blocos e energia de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-01.

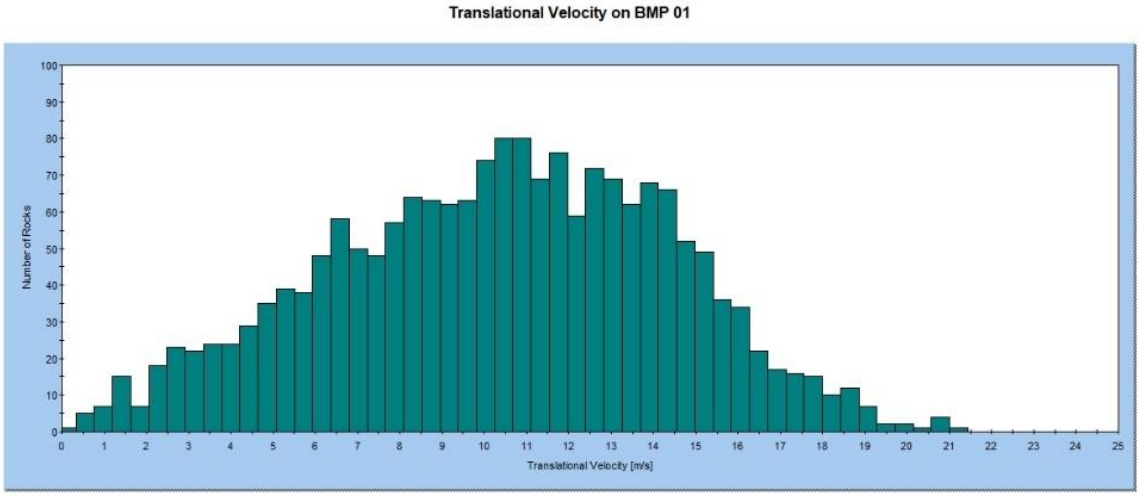


Figura 44. Histograma de número de blocos e velocidades de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-01.

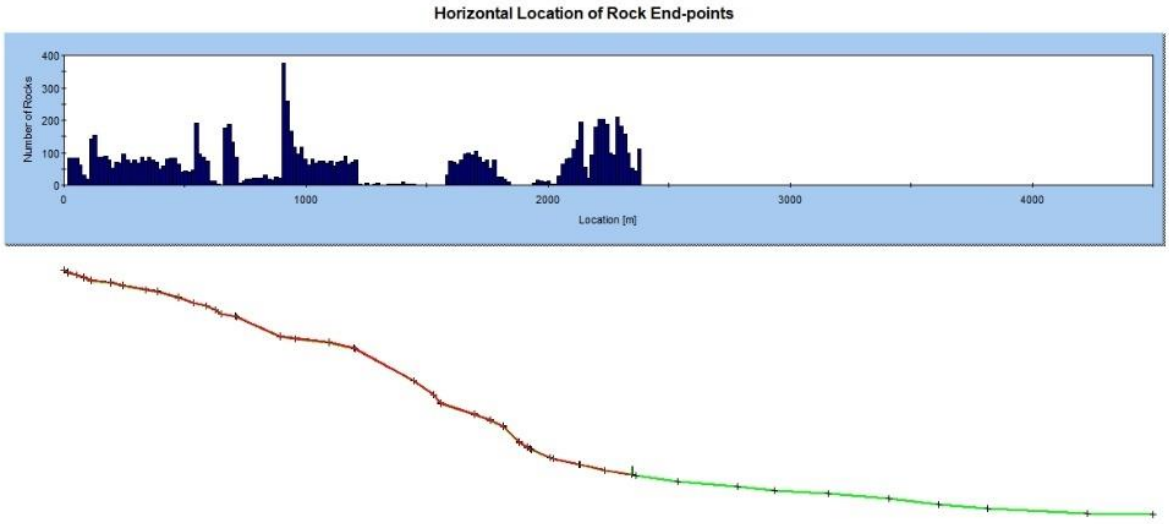


Figura 45. Histograma da concentração de blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica – Rio Príncipe com Barreira BMP-02.

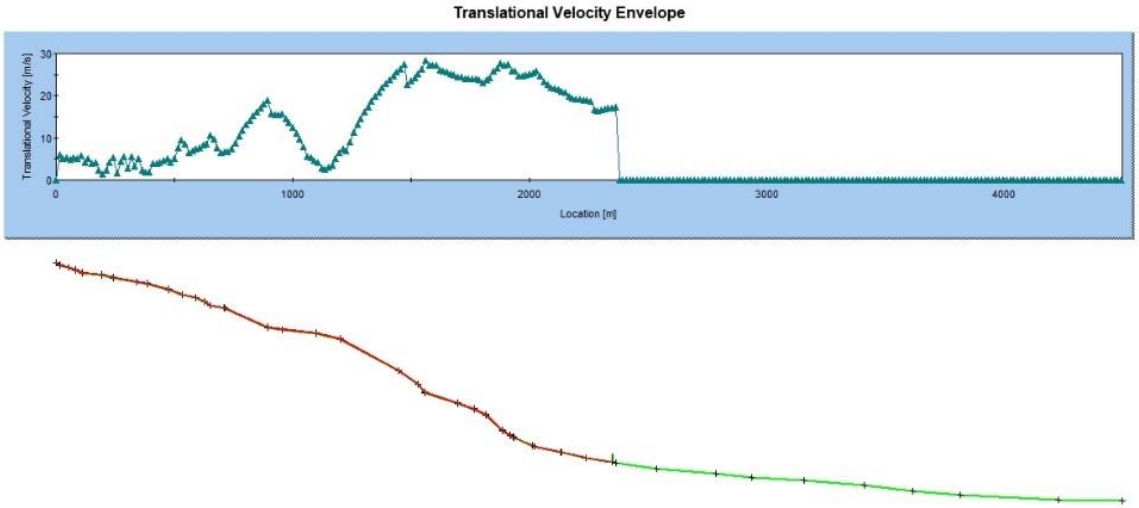


Figura 46. Envoltória de velocidades dos blocos ao longo da projeção horizontal da seção transversal crítica e velocidade de impacto na barreira - Rio Príncipe com Barreira BMP-02.

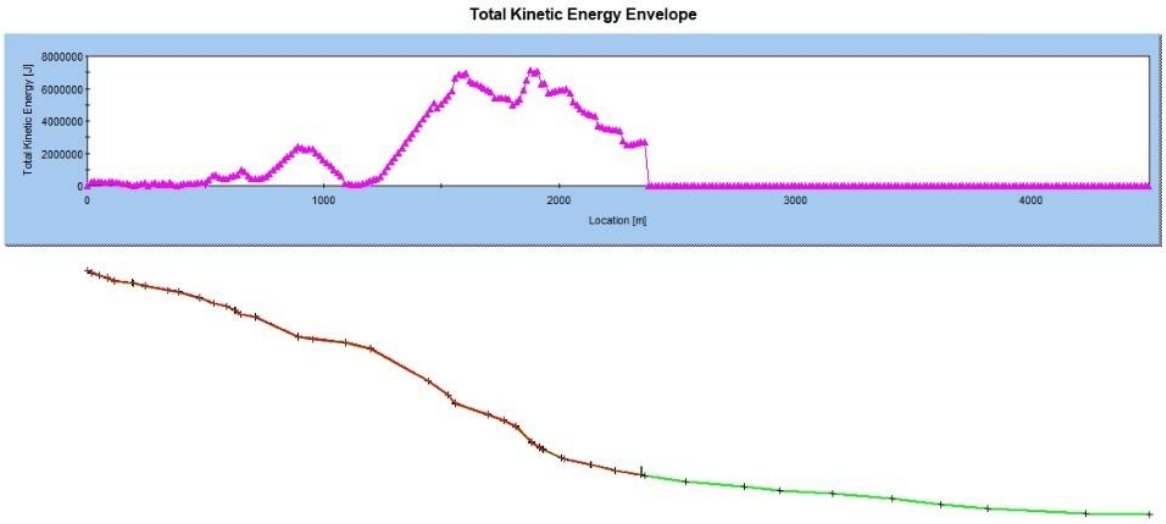


Figura 47. Envoltória de energia cinética total ao longo da seção crítica e energia de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-02.

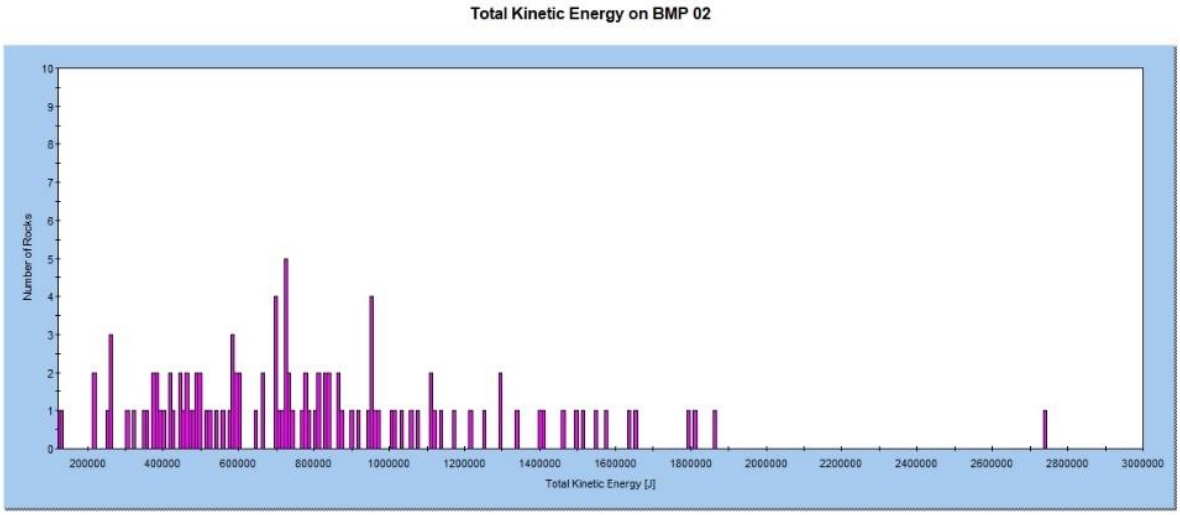


Figura 48. Histograma de número de blocos e energia de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-02.

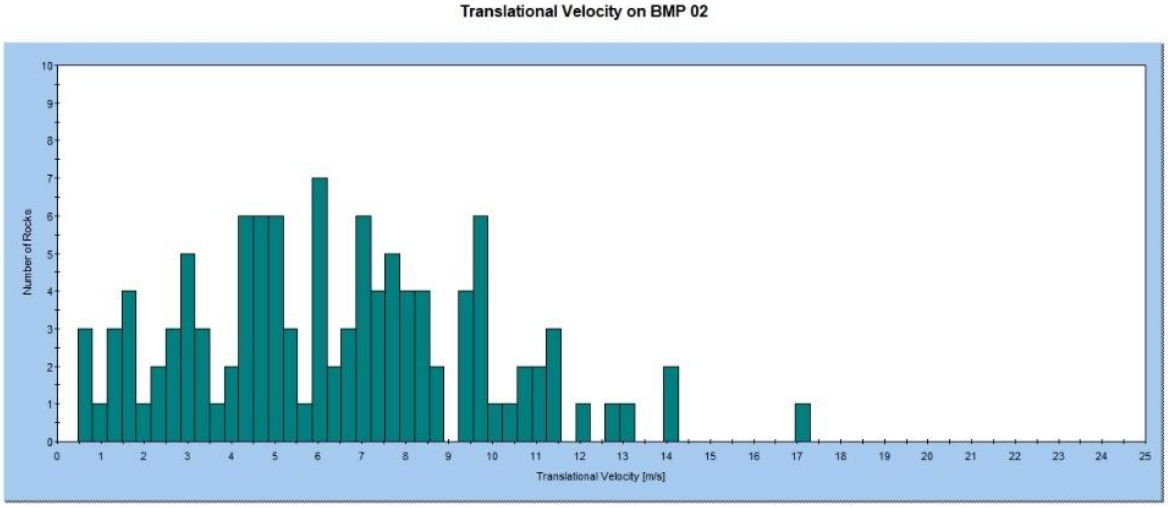


Figura 49. Histograma de número de blocos e velocidades de impacto na barreira – Rio Príncipe com Barreira BMP-02.

Os resultados obtidos mostram que as barreiras BMP-01 e BMP-02 permanecem intactas após os impactos dos blocos. Na Barreira BMP-01 apenas 1 bloco dentre os 10.000 lançados impacta a barreira com energia de 4537kJoules e velocidade máxima de 20,2m/s, o que representa 0,01% do total de blocos analisados na simulação. Na Barreira BMP-02 também ocorre o impacto de 1 único bloco com energia máxima de 2868kJoules e 2 blocos com velocidade de impacto máxima de 16,6m/s. A Tabela 4 resume os valores dos parâmetros de impacto obtidos das análises numéricas das Barreiras BMP-01 e BMP-02.

Tabela 4. Parâmetros das simulações das trajetórias de impacto nas barreiras flexíveis – Rio Príncipe.

Parâmetro	Valores	
	Barreira BMP-01	Barreira BMP-02
Energia cinética de impacto máxima na barreira	4537 kJoules	2868 kJoules
Velocidade de impacto máxima na barreira	21,4 m/s	16,6 m/s
Altura de impacto máxima na barreira	2,30 m	1,36 m

Obs.: Volume do bloco = 5,0m^3; Simulação de 10.000 quedas de blocos; Desnível máximo entre superfície do terreno e base da barreira = 0,5m.

5.6 Seleção e Verificação das Barreiras Flexíveis

Os valores de energia de impacto dos blocos determinados por meio das simulações de queda com as barreiras posicionadas nas seções transversais críticas no eixo do Rio Príncipe permite a escolha do tipo de estrutura a ser adotada em projeto.

A barreira pode ser selecionada em função do Estado Limite Último (MEL, *Maximum Energy Level*) ou do Estado Limite de Serviço (SEL, *Service Energy Level*).

O dimensionamento no estado MEL considera o máximo nível de energia da barreira, determinado em ensaio de impacto, normatizado pela ETAG 027. Desta forma, o dimensionamento é realizado com a capacidade máxima da barreira, especificada pelo fabricante e a ocorrência de um único impacto de bloco. O dimensionamento MEL envolve inspeções frequentes da barreira e é recomendado para condições nas quais as manutenções são convenientes e fáceis. Geralmente este tipo de dimensionamento é adotado para circunstâncias nas quais o interessado tem dificuldades financeiras de aquisição da barreira e facilidade de orçamento para as manutenções frequentes.

O dimensionamento no Estado Limite de Serviço SEL é realizado com o nível de energia correspondente a 1/3 da capacidade máxima da barreira. Nesta condição não são admitidos danos na barreira, a qual pode ser solicitada por 3 ou mais impactos de blocos, sem qualquer tipo de manutenção. O dimensionamento SEL é recomendado para situações nas quais são difíceis as inspeções e manutenções frequentes. Ao contrário do projeto no estado MEL, o dimensionamento no estado SEL é adotado quando o interessado não tem dificuldades financeiras de aquisição da barreira, mas tem problemas para executar e pagar inspeções e manutenções frequentes.

Desta forma, as barreiras flexíveis a serem instaladas no eixo do Rio Príncipe foram dimensionadas no Estado Limite Último MEL, sendo favorecida pela área privilegiada mais plana para captação e dissipação de energia dos blocos em queda, além da maior facilidade de manutenção da barreira.

Considerando o máximo valor de energia de impacto igual a 890kJoules, a barreira flexível selecionada é a de capacidade de energia nominal de, no mínimo, 5000kJoules.

A partir das características e custos de barreiras fornecidos pelos fabricantes, é possível selecionar o tipo mais adequado para a proteção contra queda de blocos na encosta. A barreira previamente selecionada corresponde à Barreira EPFM 5000, composta por um painel de retenção contínuo formado por anéis de aço e tela secundária DT, com capacidade nominal de 5500kJoules, com altura nominal igual a 6,0m, alongamento máximo de 8,25m e altura residual superior a 50% da altura nominal, correspondendo à barreira Classe A da ETAG 027. Esta barreira é certificada pela Comunidade Europeia com controle ETA n.14/0268.

Importante ressaltar que os componentes dessa barreira são fabricados com revestimentos especiais, capazes de aumentar a resistência à corrosão, o que representa um fator importante quando o sistema é instalado em ambientes particularmente agressivos.

Ressalte-se que o dimensionamento e a verificação de barreiras flexíveis representam uma situação particular, na qual não é possível generalizar os cálculos para barreiras consideradas similares. Isto se deve ao fato das barreiras de mesma capacidade nominal, porém fornecidas por fabricantes diferentes, apresentarem características distintas e desempenhos diferentes.

Desta forma, o projeto de barreiras flexíveis não pode ser generalizado para qualquer tipo de barreira de mesma capacidade nominal. Assim sendo, a verificação da barreira exige a definição do tipo e/ou fabricante e suas especificações técnicas (fornecidas pelo fabricante em função dos ensaios de certificação da Comunidade Europeia).

Por esta razão, este projeto apresenta especificamente o dimensionamento e verificação da barreira flexível EPFM 5000, cujas especificações técnicas são reportadas no Anexo 2.

Caso seja adotada uma barreira de 5000kJoules similar de outro fabricante, o dimensionamento e verificação apresentados nesta Memória de Cálculo não serão válidos e, por consequência, um novo projeto deverá ser desenvolvido considerando as características técnicas específicas da nova barreira flexível.

A verificação e validação da barreira selecionada é realizada através dos critérios e Normas de Construção da Itália e Normas e Recomendações da União Europeia em função de (Nunes, 2013):

i. Energia de impacto;

ii. Velocidade de impacto;

iii. Altura de impacto.

A validação da energia da barreira é realizada por meio da condição seguinte:

$$\left(E_{projeto} - E_{BTE,barreira}/F1\right) \leq 0 \quad [3]$$

Onde: $E_{projeto}$: Energia calculada por simulação numérica majorada por fator de segurança (1,2); e igual a 1068kJ;

E_{BTE}, barreira: Energia de impacto medida no ensaio de impacto (*crash test*) MEL e igual a 5500kJ (Dado do fabricante, certificado pela CE, ETA n.14/0268);

F1: Fator de segurança relativo à energia do ensaio de impacto igual a 1,15 na condição MEL.

A verificação da velocidade de impacto do bloco é dada por:

$$V_{bloco} = V_i \,.F1\,.F2 \leq 25m/s \quad [4]$$

Onde: V_{bloco}: Velocidade de impacto do bloco de projeto;

V_i: Velocidade de impacto do bloco na barreira determinada por simulação numérica igual a 21,0m/s;

F1, F2: Fatores de segurança relativos à trajetória determinada por simulação bidimensional com retroanálise (1,05) e ao talude discretizado com precisão reduzida (1,10).

A validação do sistema de retenção de blocos através do critério de altura da barreira é expressa pela condição seguinte:

$$h_{ip} = h_i \,.\; F1\,.\; F2 + h_{borda\ livre} \;\leq\; h_{barreira} \quad [5]$$

Onde, h_{ip}: Altura de impacto do bloco de projeto;

h_i: Altura de impacto do bloco na barreira determinada por simulação numérica e igual a 2,98m;

$h_{borda\ livre}$: Altura da zona livre ou borda livre, correspondente à área livre de impacto de bloco e definida pelo fabricante (mínimo recomendado de 0,5m);

F1, F2: Fatores de segurança relativos à trajetória determinada por simulação bidimensional (1,1) e ao talude discretizado com precisão reduzida (1,05).

5.7 Dimensionamento das Ancoragens

O sistema de fixação das barreiras ao terreno de fundação é composto pelas ancoragens laterais (4 unidades por painel), ancoragens de fundação de jusante (1 unidade por poste e 1 unidade por painel), ancoragens de fundação de montante (1 unidade por poste) e micro estaca de fundação (1 unidade por painel).

As ancoragens são compostas por barras de aço tratadas à corrosão com tensão de escoamento do aço de 500MPa, carga de trabalho de aço de 210kN, executadas em furos de diâmetro de 100mm.

O terreno de fundação indicado pelas sondagens SM-01 a SM-08 (boletins apresentados no Anexo 1) varia de aluvião com espessuras de até 5,0m, solo residual maduro com blocos de rocha e rocha pouco fraturada a são. As resistências ao arrancamento foram estimadas considerando dados de literatura e a experiência da projetista com este tipo de perfil fluminense e são iguais a 180kPa para solo e 300kPa para rocha.

O comprimento de ancoragem do chumbador (L_a) é determinado conforme Bustamante & Doix (1985):

$$L_a = \frac{T.k}{D.\pi.q_s}$$

Onde:

T : carga axial máxima mobilizada no chumbador;

D : diâmetro do furo do chumbador;

k : Fator de majoração da carga axial do chumbador;

q_s : resistência do contato argamassa-rocha/solo (qs = 180kPa para solo e qs = 300kPa para rocha).

A Tabela 6 apresenta os valores de cargas mobilizadas pela barreira EPMF 5000 conforme as especificações do fabricante e os valores de comprimento mínimo de ancoragem em solo e rocha para os 4 tipos de fixação. O Anexo 3 apresenta especificações para a execução das ancoragens passivas, injetadas com nata de cimento com fck de 20MPa, em processo de bainha e reinjeção pelo método ascendente, do fundo para a boca do furo.

Tabela 7. Comprimentos das ancoragens das barreiras flexíveis EPMF 5000.

Parâmetro	Ancoragem			
	Lateral	Jusante	Montante	Fundação
Força máxima (kN)	286,8	348,6	37,0	192,1
Comprimento ancorado em solo (m)	7,0	8,0	2,5	5,0
Comprimento ancorado em rocha (m)	4,0	5,0	1,5	3,0

5.8 Resumo das Intervenções Geotécnicas

A Tabela 7 resume as principais características das intervenções geotécnicas dimensionadas para a região do Rio Príncipe.

Tabela 7. Resumo das intervenções geotécnicas.

Parâmetro	**Tipo ou Valor**
Barreira	EPFM 5000
Capacidade de energia nominal	5500 kJoules
Distância entre postes	10,0 m
Altura nominal	6,0 m
Altura residual mínima (Classe A - Etag 027)	> 3,0 m
Alongamento máximo	8,2 m
Tipo de fundação	solo/rocha
Distância entre postes	10,0 m
Extensão das barreiras (BMP-01 e BMP-02)	50,0 m

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões e recomendações desta memória de cálculo são:

1. A proteção e controle de danos provocados por movimentos de massa do tipo debris flows e queda de blocos rochosos na área do Rio Príncipe a correspondem à instalação de 2 linhas de barreiras flexíveis com capacidade de suportar blocos de até 5,0m^3 e sedimentos, permitindo a passagem da fase água (de princípio análogo às *check dams*, barragens permeáveis);

2. A área analisada para a instalação das barreiras compreende a região delimitada pelas barragens existentes a jusante do Rio Príncipe e o início da canalização do Rio Príncipe;

3. As barreiras do tipo abertas, adequadas para a instalação em áreas planas sem presença de canal, são solicitadas por esforços dinâmicos e estáticos, sendo os esforços críticos representados pelas cargas de impacto dinâmicas dos blocos rochosos de até 5,0m^3, para os quais a barreiras foram dimensionadas;

4. As 2 linhas de barreiras flexíveis são constituídas por Barreiras EPFM 5000, com capacidade de energia nominal de 5500kJoules, altura de 6,0m, distância entre postes de 10,0m e extensão de 50,0m para cada linha de barreiras no eixo do Rio Príncipe (BMP-01 e BMP-02), conforme especificações de projeto;

5. Recomenda-se fortemente o monitoramento das barreiras flexíveis com o sistema HELLOMAC, capaz de detectar deslocamentos e avisar em tempo real os órgãos responsáveis pela segurança e manutenção da área, tal como Defesa Civil, Associação de moradores e afins. As especificações técnicas do Sistema HELLOMAC, são apresentadas no Anexo 4.

Recomenda-se a completa execução das obras conforme o projeto e o detalhamento apresentados nos desenhos para a garantia da proteção e controle da área do Rio Príncipe. As intervenções de proteção e controle por meio das barreiras flexíveis visam reduzir/eliminar o movimento da fase granular dos fluxos de detritos, garantindo a segurança das infraestruturas e pessoas residentes na área a jusante das barreiras.

7 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

A elaboração do presente documento considerou os seguintes documentos:

ABNT (2021) NBR 16920-2. Muros e taludes em solos reforçados, Parte 2: Solos grampeados.

ABNT (2009) NBR 11682:2009. Estabilidade de encostas.

ABNT (2018) NBR 5629:2018. Execução de Tirantes Ancorados no Terreno.

ABNT (1983) NBR 8044:1983. Projeto geotécnico - Procedimento.

Bathurst, J. C., Burton, A., And Ward, T. J. (1997) Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. Journal of Hydraulic Engineering, 123, 410–419, 1997.

Bustamante, M.; Doix, B. (1985) Une méthode pour le calcul des tyrants et des micropieux injectées. Bulletin des Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, no 140Canedo, P. (2021) Cominucação pessoal em 30/04/2021.

Canelli, L.; Ferrero, M.; Migliazza, M.; Segalini, A. (2012) Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers - Experimental tests and impact analysis. Nat Hazards Earth Syst Sci 12:1693–1699.

Cavalcante Filho, E.C.; Vidal, D.H.F.; Farias Jr, J.E.F.; Pereira, V.S.A.; Ferreira, M.A.; Santos, M.O.R.; Johnsson, R.M.F. (2011) Tragédia Climática e Ambiental na Região Serrana/Rj 2011: Diagnóstico, Desafios e Ações. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRHidro, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Maceió, 18 p.

Chau, K.T.; Wong, R.H.C.; Lee, C.F. (1996) Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, V. 35, Section 4-5, pp.662-663.

COHIDRO (2016) Elaboração do Projeto para Controle de Inundações e Recuperação Ambiental no Município de Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro - Relatório do Projeto Executivo das Barragens de Proteção Amortizadora de Impactos Rochosos e Acúmulo de Sedimentos no Rio Príncipe - Memorial Descritivo, CPHIDRO Consultoria Estudos e Projetos, 51p.

Clouterre (1991) Projet National Clouterre, Recomendations Clouterre 1991. Presses de l' Ecole National des Ponts et chaussees, Paris, France.

CPRM (2011) Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:1.000.000. Serviço Geológico do Brasil.

Davis, E. G.; Naghettini, M. C. (2001) Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro. CPRM, 140 p.

GEORIO (2000) Manual de Encostas, 1ª ed. Ortigão, J.A & Sayão, A.S.F.J.

Giani, G.P. (1992) Rock Slope Stability Analysis. Rotterdam, Balkema.

Hungr, O.; Evans, S.G. (1988) Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lusanne, Vol. 1, pp. 685-690.

Pfeiffer, T.J.; Bowen, T.D. (1989) Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of Association of Engineering Geologists, V. 26, No. 1, pp.135-146.

Estrada Polanco, L.S. (2010) Correlações Empíricas para Fluxos de Detritos, Dissertação MSc, Programa de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, RJ, 111p.

EUROCODE (2004) EN 1997-1:2004, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rule.

EUROCODE (2007) EN 1997-2:2007, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing

ETAG 027 (2008) Guideline for European technical approval of falling rock protection kits.

Jakob, M.; Hungr, O. (2005) Debris-flow Hazards and Related Phenomena, 1sted. Springer-Praxis Publishing, Chichester, UK, 770 p.

He, S.; Liu, W.; Li, X. (2016) Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. Environmental Earth Science, 75:298, Pp 8.

Huang, H.; Yang, K.; Lai, S. (2007) Impact force of debris flow on filter dam. Geophys. Res. Abst., V.9, 03218, Pp 32.

Hubl J.; Suda, J.; Proske, D.; Kaitna, R.; Scheidl, C. (2009) Debris flow impact estimation. Popovska C, Jovanovski M (eds), 11th international symposium on water management and hydraulic Engineering, vol 1, pp 137–148.

Hungr, O. (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, n. 32, p. 610-623, 1995.

Hungr, O.; Morgan, G.C.; Kellerhals, R. (1984) Quantitative analysis of debris flow torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal, 21:663–677.

INEA (2016) Execução de Obras Complementares para Controle de Inundação e Recuperação Ambiental no Município de Teresópolis no Estado do Rio De Janeiro - Implantação de Barreiras Flexíveis, Termo de Referência.

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flow. Review of Geophysics, vol. 35, nº 3, p. 245-296.

Kwan, J.S.H. (2012) Supplementary Technical Guindance on Design of Rigid Debris-Resisting Barriers. Geo Report 270, Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

Kwan, J. S. H.; Chan, I. S. L.; Cheuk, J. C. Y.; Koo, I. R. C. H. (2014) A case study on an open hillside landslide impacting on a flexible rockfall barrier at Jordan Valley, Hong Kong. Landslides, Vol. 11, Issue 6, pp. 1037-1050.

Lichtenhahn, C. (1973) Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. Kolloquim uber Wildbach-sperren Mitteilungen der FOrstlichen Bundesanstalt, Wien, Heft 102/1973, pp.91-127.

Lien, H. P. (2002) Study on Treatments of Debris Flow. Soil and Water Conservation Bureau, COA, Taiwan.

Magalhães, P.M.C. (2021) Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com base em modelo GIS, Dissertação MSc, Depto de Engenharia Civil, PUC-Rio, 138 p.

Mizuyama, T. (1979) Evaluation of Impact of Debris Flow on Check Dams. J. Japan Soc. Engng, V.32, No.1, pp. 40–49.

Motta, H. P. G. (2014) Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 263p.

Nunes, A.L.L.S. (2013) Convivência com Rupturas – Barreiras contra Quedas de Blocos, 6ª Conferência Brasileira de Encostas – COBRAE 2013, Angra dos Reis, pp. 41-73.

Nunes, A.L.L.S.; Rios Filho, M.G. (2009) Barreiras Flexíveis para Mitigação de Fluxo de Detritos, 5a Conf. Bras. Estabilidade de Encostas, ABMS, SP, 8p.

Nunes, A.L. L.S.; Sayão, A.S.F.J.; Rios Filho; M.G.; Dias, P.H.V. (2013) Desastres e Ações nas Encostas do Rio de Janeiro, 6ª Conferência Brasileira de Encostas – COBRAE 2013, Angra dos Reis, pp. 74-96.

Nunes, A.L.L.S.; Sayão, A.S.F.J. (2014) Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência. 14CNG, Congresso Nacional de Geotecnia, Geotecnia nas infraestruturas, Covilhã, Portugal, pp. 83 – 123.

Ortigão, J.A.R.; Sayão, A.S.F.J. (2004) Handbook of Slope Stabilisation, Springer-Verlag, 540p.

Pando, M. A.; Ruiz, M. E.; Larsen, M. C. (2004). Rainfall induced landslides in Puerto Rico: an overview. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestrutura Civil, V 4, p. 53-66.

Pelizoni, A. B. (2014) Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 141 p.

Pelizoni, A. B.; Nunes, A. L. L. S. (2016) Análises de Fluxos de Detritos na Região Serrana do Rio De Janeiro, Brasil. 15CNG, Congresso Nacional de Geotecnia, Geotecnia e os Desafios Societais, Porto, Portugal.

Pfafstetter, O. (1982) Chuvas Intensas no Brasil: Relação entre Precipitação, Duração e Frequência de Chuvas, Registradas com Pluviógrafos, em 98 Postos Meteorológicos. Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 2ª ed., 426 p.

Pfeiffer, T.J.; Higgens, J.D. (1990) Rockfall Hazard Analysis Using the Colorado Rockfall Simulation. Transportation Research Record 1288, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp117-126.

Sacoto, C. A. (2017) Análise dos Esforços de Impacto de Debris Flows. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 179 p.

Sacoto, C. A. G.; Nunes, A. L. L. S. (2018) Análises de Forças de Impacto de Fluxos de Detritos, 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Açores, Portugal, 12 p.

Sacoto, C. A. G.; Nunes, A. L. L. S. (2018) Análise de Modelos de Forças de Impacto de Fluxos de Detritos – Área de Testes Pieve di Alpago e Veltheim, XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2018, Salvador, Brasil, 10p.

Segalini, A.; Brughenti, R.; Ferrero, A.; Umili, G. (2013) Comparison between the mechanical behavior of barriers against rock fall vs debris flows. GRock Mechanics for Resources, energy and Environment, pp. 690-696.

Takahashi, T. (1991). Debris Flow. Monograph Series, International Association for Hydraulics Research, 165p.

Takahashi, T. (2007). Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis Group, Londres 448 p.

Teixeira Silva, D. T. (2016) Contribuições sobre previsão de fluxo de detritos. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 125p.

Teixeira, W.; Sabaté, P.; Barbosa, J.; Noce, C.M.; Carneiro, M.A. (2000) Archean and Paleoproteroizoic Tectonic Evolution of the São Francisco Craton. Eds Cordani et al, Tectonic Evolution of South America, Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Produção Mineral, p.101-137.

Valverde Sancho, A. M. (2016) Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais. Dissertação de Mestrado, Depto de Engenharia Civil, PUC-RIO, 146p.

Valverde Sancho, A.M.; Sayão, A.S.F.J.; Nunes, A.L.L.S. (2016) Análise Dinâmica do Fluxo de Detritos em Lajas, Costa Rica, 15 CNG – Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, Portugal, 13p.

Vandine, D. F. (1996) Debris flow control structures for forest engineering. Ministry of Forests Research Program, Victoria, British Columbia, Canadá, 68 p.

Robotham, M.E.; Wang, H.; Walton, G. (1995) Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes. Institution of Mining and Metallurgy, Section A -104, pp. A25-A33.

UNI 11437 (2012) Rockfall Protection Measures: Tests on Meshes for Slope Coverage. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Italia.

Waldherr, F.R.; Tupinambá, M. (2015) A Dinâmica dos Depósitos Pretéritos na Deflagração de Corridas de Detritos em Eventos Catastróficos: A Bacia de Drenagem do Córrego do Príncipe, Teresópolis – RJ, VIII Simp. Latimoamericano de Geografia Física, IV Simp. Iberoamericano de Geografia Física, p.1185-1192.

Waldherr, F.R.; Tupinambá, M.; Motta, M.; Amaral, C.; Fraifeld, F.; Paixão, R. (2001) Megadesastre '11 da Serra Fluminense: Zonas de Estrangulamento durante Corrida de Detritos no Córrego do Príncipe, em Teresópolis, 16º Simpósio de Geologia de MG; 12º Simpósiso de Geologia do Sudeste, 2p.

Wu, S. (1985) Rockfall evaluation by computer simulation. Transportation Research Records, V. 1031, pp. 1-5.

Wyllie, D.C. (2014) Rock Fall Engineering: Development and Calibration of an Improved Model for Analysis of Fall Hazards on Highways and Railways, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 254 p.

Xavier Silva, J. (2015) Análise numérica 3D do fluxo de detritos do Córrego D'Antas. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 151p.

Yamaguchi, I. (1985) Erosion Control Engineering. ISBN: 4-8049-5064-8.

Zhang, S. (1993) A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in china. Nat Hazards 7:1–23.

ANEXOS

ANEXO 1 BOLETINS DE SONDAGENS

ANEXO 2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – BARREIRA FLEXÍVEL EPFM 5000

ANEXO 3 MÉTODO EXECUTIVO DO CHUMBADOR – INJEÇÃO DE CIMENTO

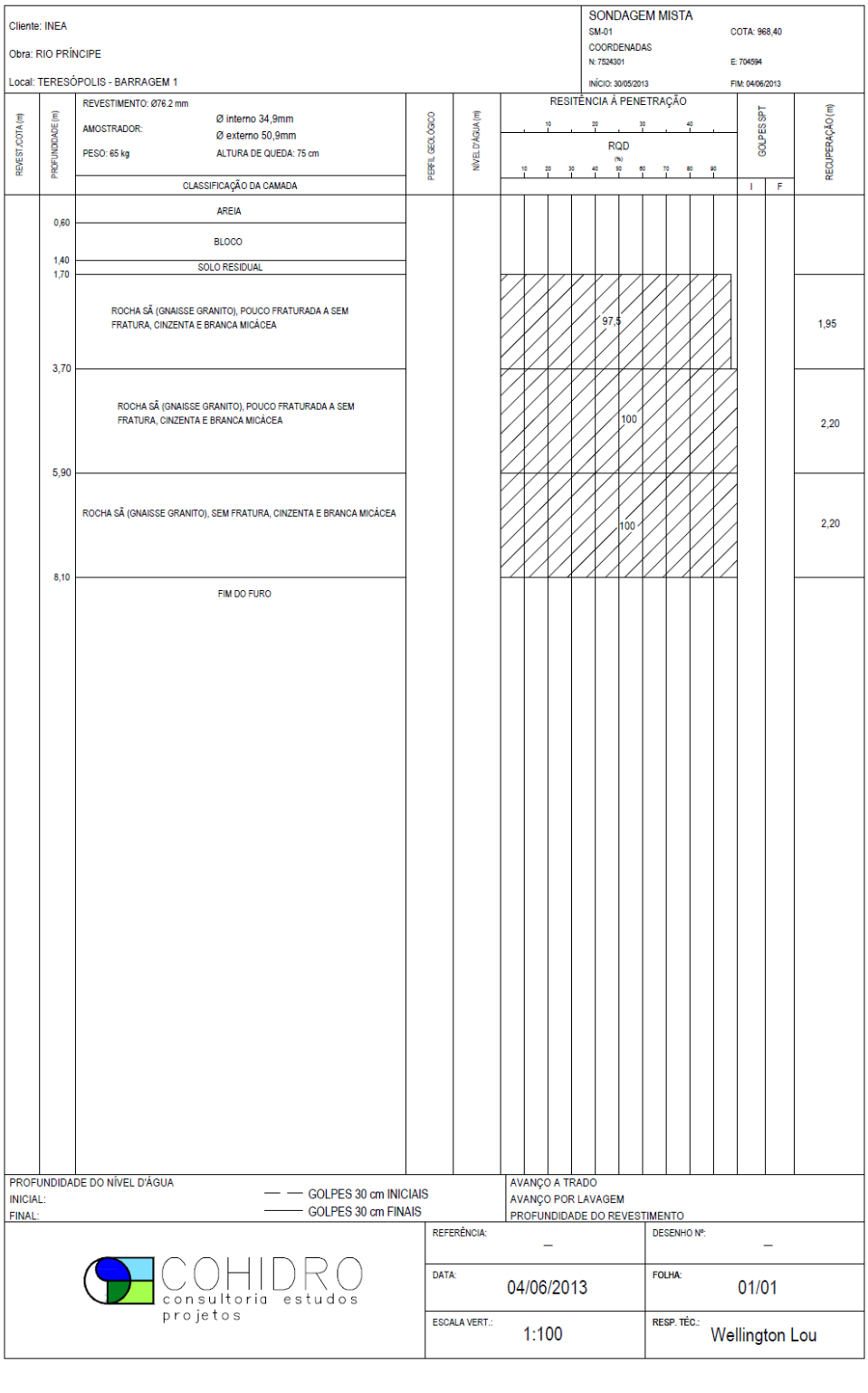
ANEXO 4 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SISTEMA DE ALERTA HELLOMAC

ANEXO 1 BOLETINS DE SONDAGENS

Anexo 1 Boletins de Sondagens

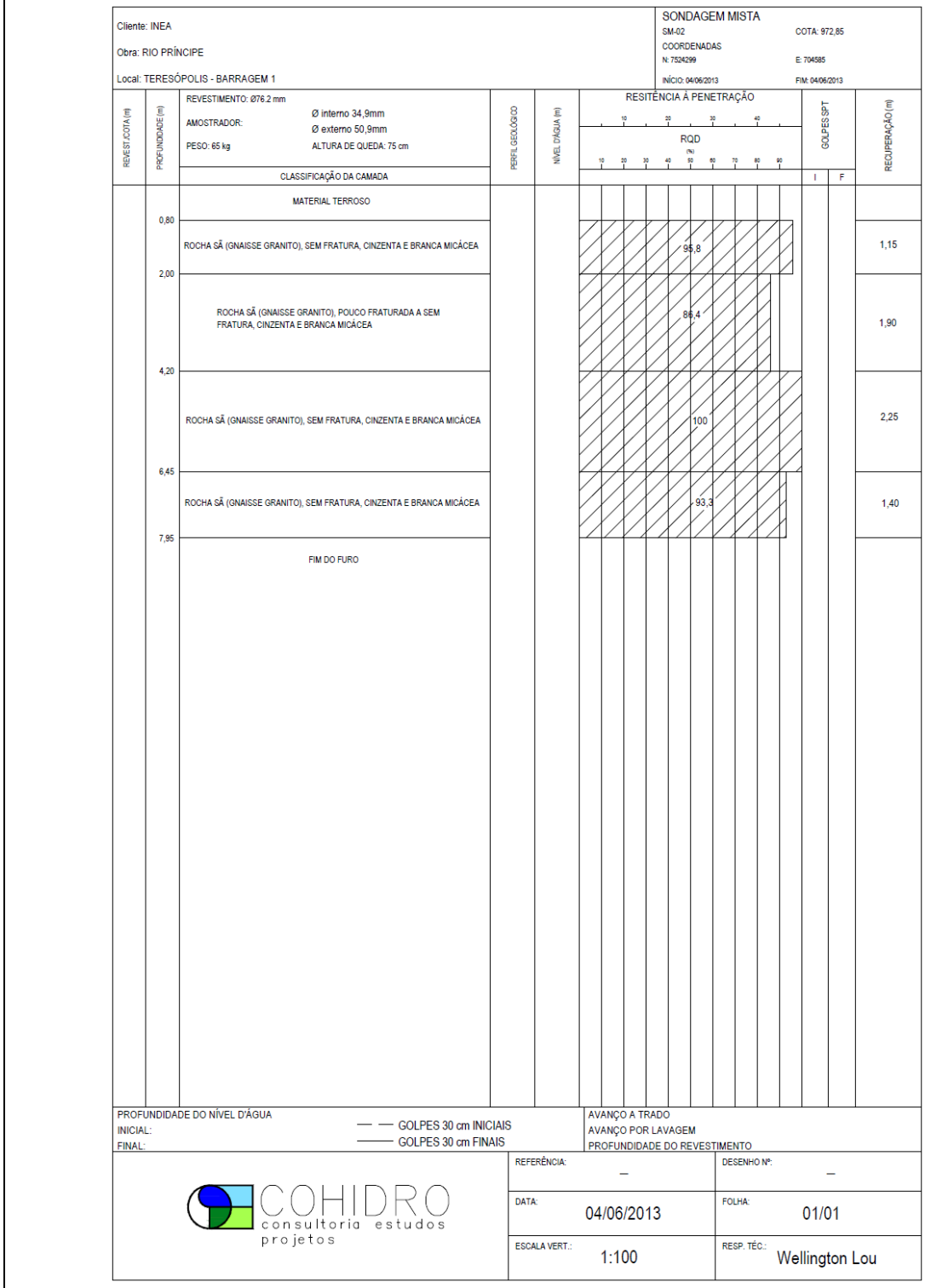
Foram realizadas 7 sondagens mistas na área de estudo, cujos boletins são apresentados nos Quadros A1.1 a A1.8.

Quadro A1.1. Boletim de sondagem – SM-01



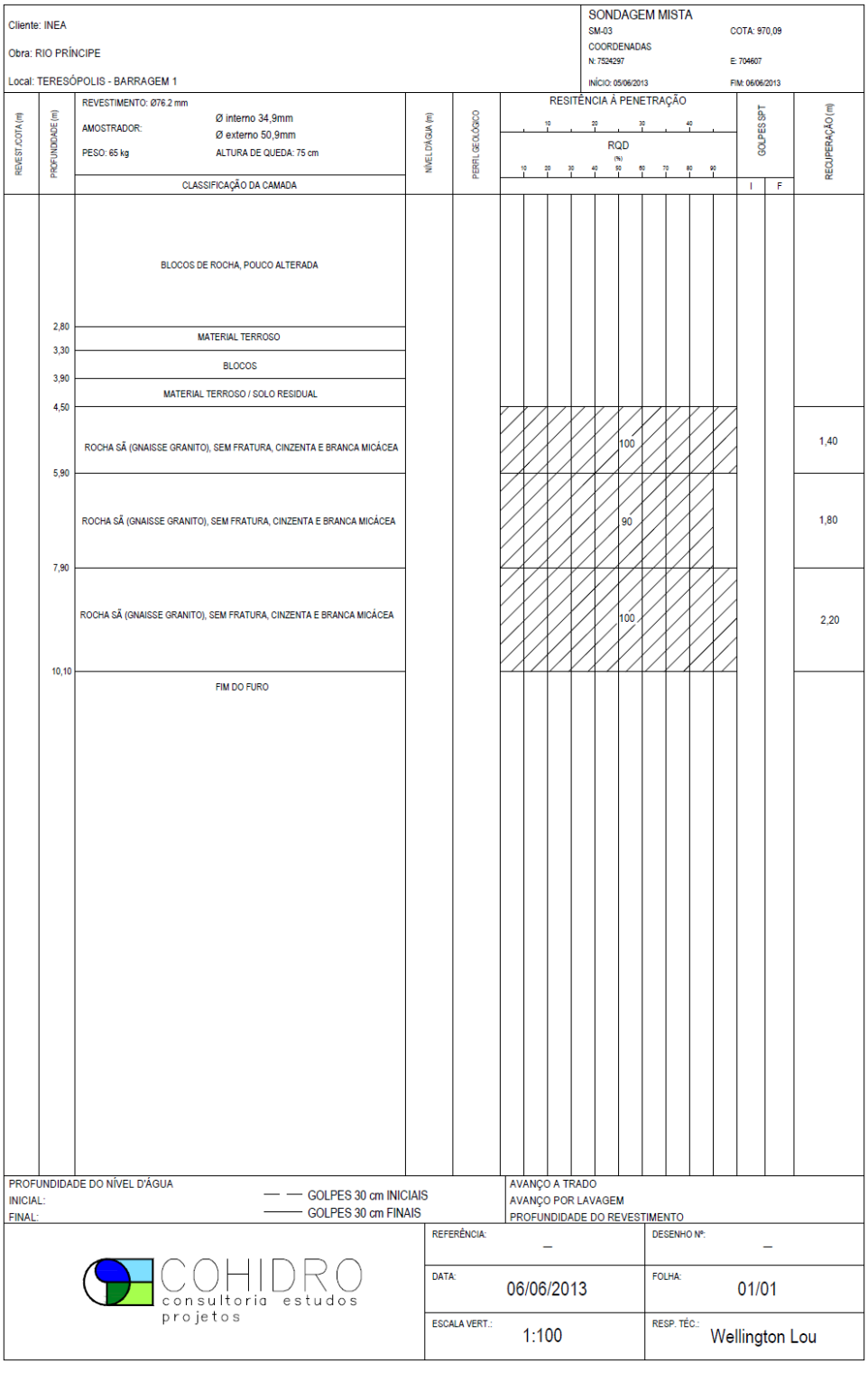
Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.2. Boletim de sondagem – SM-02



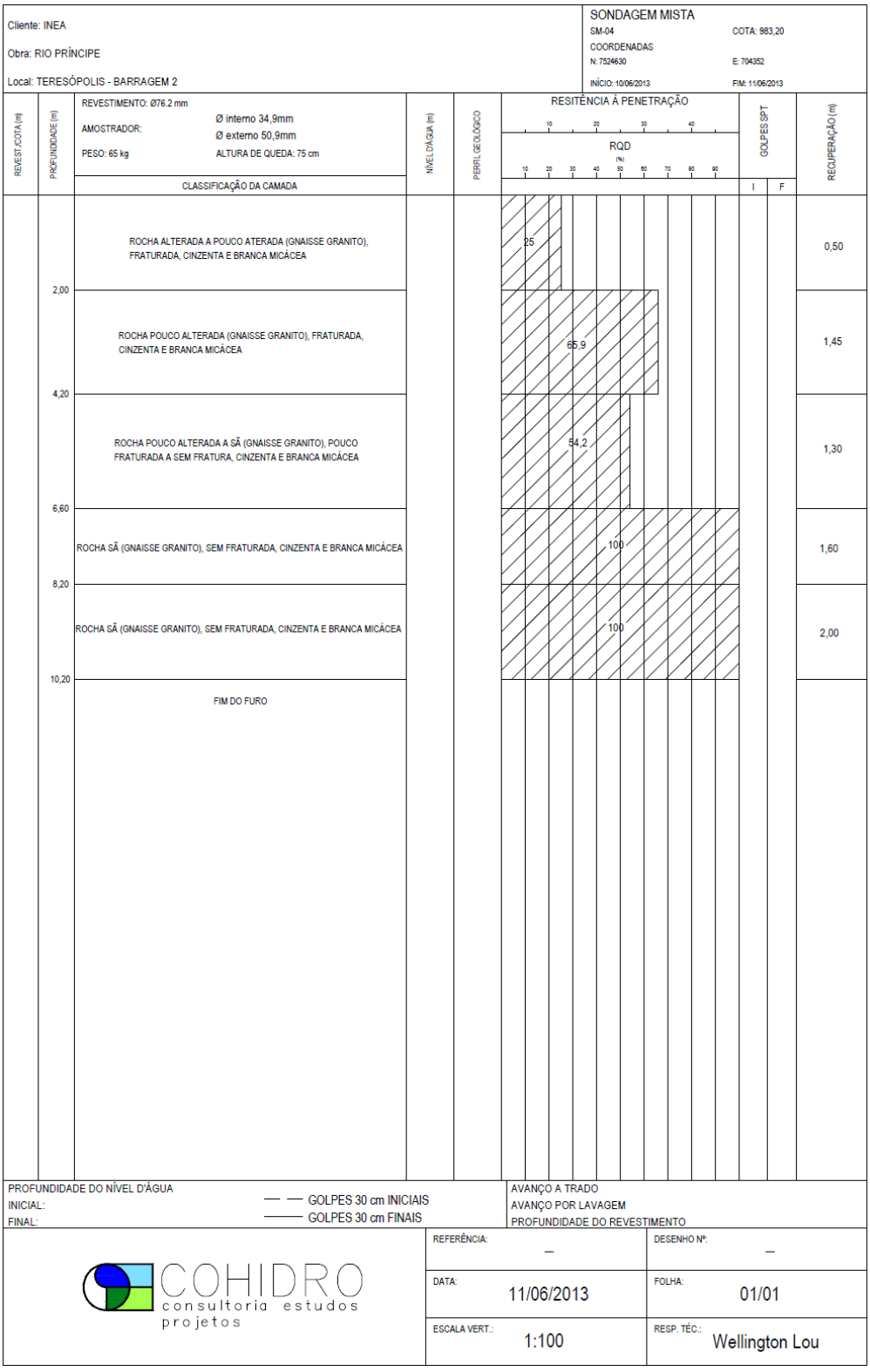
Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.3. Boletim de sondagem – SM-03



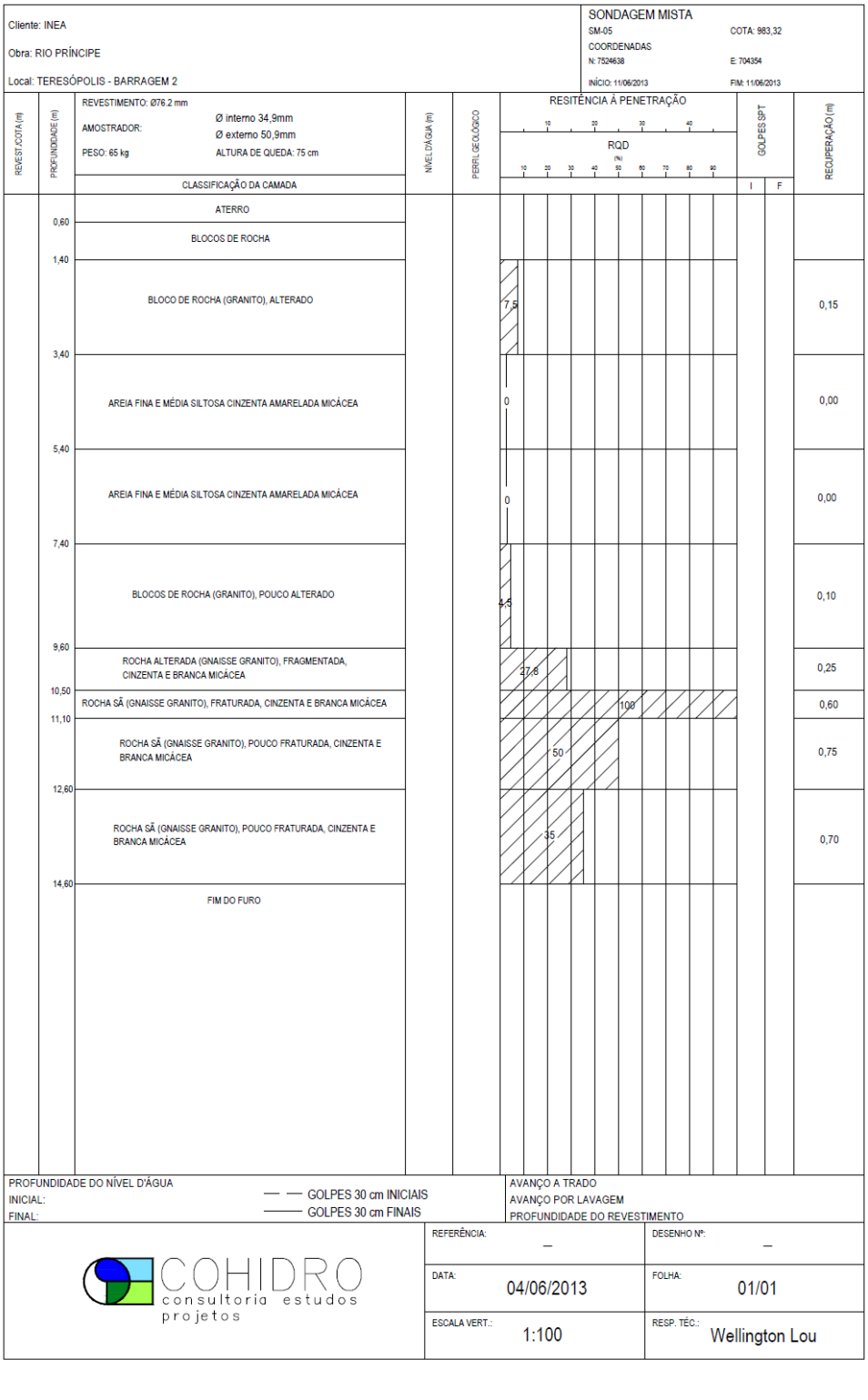
Anexo 1 Boletins de Sondagen

Quadro A1.4. Boletim de sondagem – SM-04



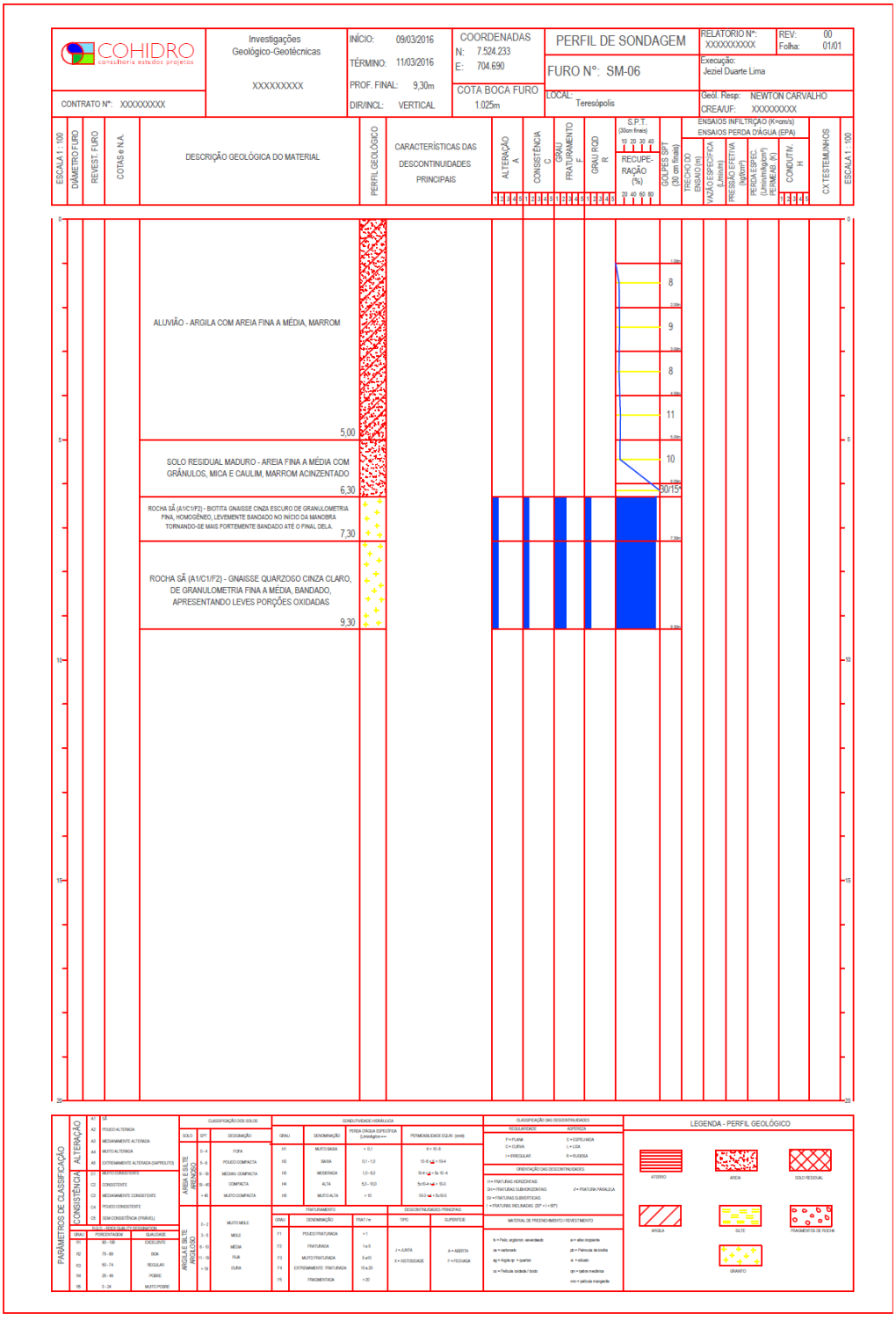
Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.5. Boletim de sondagem – SM-05



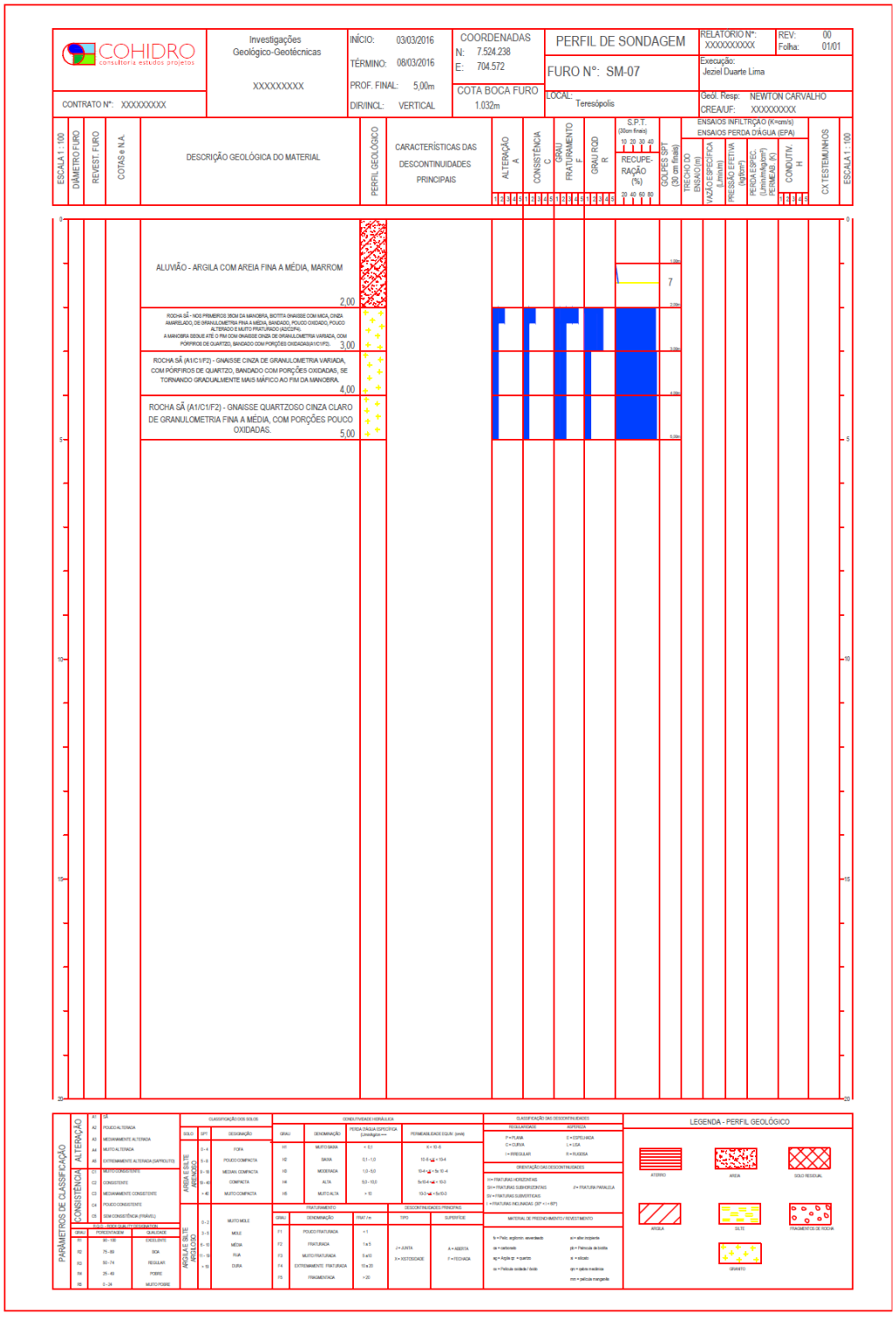
Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.6. Boletim de sondagem – SM-06



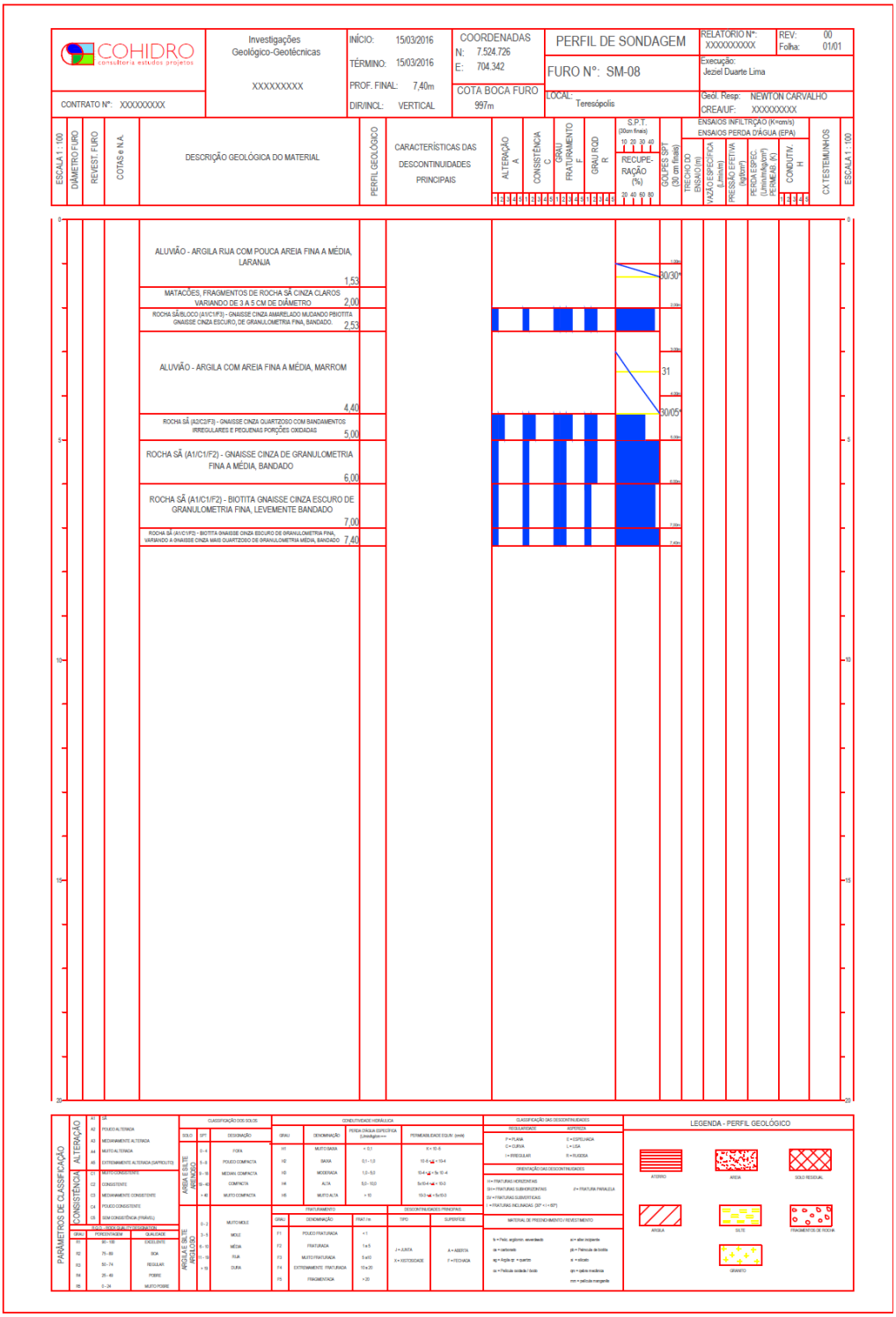
Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.7. Boletim de sondagem – SM-07



Anexo 1 Boletins de Sondagens

Quadro A1.8. Boletim de sondagem – SM-08



ANEXO 2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – BARREIRA EPFM 5000

ANEXO 2 Especificações Técnicas – Barreira Flexível EPFM 5000

MACCAFERRI

TECHNICAL DATA SHEET
Rev. 02 Date 15.01.2019

MAC.RO™ SYSTEM - EPFM 5000 - 5000 kJ
HIGH RESISTANCE ROCKFALL BARRIER

The **EPFM 5000** rockfall barrier is capable of withstanding the impact of a rock block with energy levels in excess of 5000 kJ.

Standards and reference guidelines:
ETAG 027 "Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits"

Standard on materials:
EN 10219 "Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels"
EN 10025-2 "Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels"
EN ISO 1461 "Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles - Specifications and test"
EN 12385 "Steel wire ropes - Safety"
EN 10264-2 "Steel wire and wire products - Steel wire for ropes - Part 2: Cold drawn non alloy steel wire for ropes for general applications"
EN 10244-2 "Steel wire and wire products - Non ferrous metallic coatings on steel wire - Zinc or zinc-alloy coatings"

System technology
The retaining mesh panel is placed on the downslope side of the barrier. Posts act independently of the net. If a post is hit by a falling rock and damaged, the adjacent posts take the additional forces, ensuring that the catching performance of the system is not compromised.
The retaining layer is made of continuous steel ring panels. During an impact, the system ensures that the energy of the falling rock is dissipated, and the rock is prevented from moving any further.
The energy dissipating devices absorb the applied energy by deformation and not by friction, thereby guaranteeing a better and longer lasting performance.
The rockfall barrier meets quality certification standard EN ISO 9001 at each step of design and manufacturing.

Main barrier features
The barrier can be installed on any rock and soil type and profile. The barrier layout makes it ideal for use on rugged slope.
Due to the system geometry and layout, the bracing cables require smaller pull out resistance, therefore shorter anchor lengths are needed to restrain the cables.
The system is easy to install, even under severe environmental conditions; the installation can be completed in a short time span.
The system requires minimal maintenance.
The main interception structure consists of steel ring panels.



Design
The optimum barrier length is between 30 m and 100 m. Variations are anyway possible after consulting the manufacturer.
Foundation design depends on the forces acting at the base of the posts and on the cables, and the soil type.

When ordering, declare the type of foundation (for rocky soil or loose soil).

Tests performed and main data
Dynamic impact test on a full scale barrier sample carried out following the instructions provided in the document "ETAG 027 – Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits".

MEL (Maximum Energy Level) test results:
Energy: 5500 kJ
Maximum Barrier Elongation: 8.25 m
Barrier Residual Height > 50 % of the Nominal Height
Category A of ETAG 027

ETA n. 14/0268

CE
1301 - CPR - 1013

© COPYRIGHT MACCAFERRI

WARNING: Install the product in accordance with National Security Requirements! If the job is done with suspension or security ropes, personal protective equipment against fall risk must be connected with anchor points in agreement with EN 795.

Maccaferri reserves the right to amend product specifications without notice and specifiers are requested to check as to the validity of the specifications they are using.

Officine Maccaferri Italia S.r.l.
Via JF Kennedy 10, 40069 Zola Predosa (BO) - Italy
T: (+39) 051 643 6000 F: (+39) 051 643 6201
E: info@it.maccaferri.com www.maccaferri.com/it

Bureau Veritas Certified Quality System Company with Accredia's and UKAS' s accreditation.

ANEXO 3 MÉTODO EXECUTIVO DO CHUMBADOR – INJEÇÃO DE CIMENTO

ANEXO 3 Método Executivo do Chumbador – Injeção de Nata de Cimento

Os chumbadores ou ancoragens dimensionados neste projeto deverão ser executados conforme as recomendações descritas neste Anexo:

1. Os chumbadores são compostos por barra de aço nervurada tipo GEWI, com tensão de escoamento de 550MPa, carga de trabalho de 200kN, com tratamento anticorrosivo e diâmetro nominal e comprimento conforme especificações de projeto.

2. Cada chumbador deverá apresentar, no mínimo, 2 espaçadores distribuídos uniformemente ao longo da barra, do tipo carambola ou similar e 1 mangueira de re-injeção com válvulas de injeção (manchete) a cada 0,50m. A mangueira de re-injeção deve ser executada com tubo de polietileno de 0,010m de diâmetro e 1mm de espessura, fixada ao longo da barra de aço. As válvulas manchete são executadas por meio de um pequeno corte, com alicate, na mangueira, e vedação com fita crepe, dando-se apenas uma volta no diâmetro. Com a pressão da re-injeção estas fitas são rompidas, permitindo a passagem da nata de cimento. Observa-se que a mangueira de injeção é um tubo perdido.

3. Os chumbadores serão instalados em furo de diâmetro e comprimento iguais aos especificados em projeto, inclinados de 10º com a horizontal e executados com perfuratriz rotativa hidráulica por via seca.

4. Após a perfuração, executa-se a limpeza do furo com ar e imediatamente antes da introdução da barra, deve- se proceder à limpeza com água (hidratação do furo).

5. Após a introdução da barra de aço, realiza-se a primeira injeção (bainha). O método de injeção (bainha) é ascendente, correspondendo à injeção de fluido realizada do fundo do furo para cima, por meio de tubulação acessória cuja extremidade é posicionada na parte inferior da perfuração. O bombeamento da nata é realizado até a drenagem pela boca do furo. A mangueira de injeção é removida após o procedimento de injeção (bainha).

6. A re-njeção é realizada pelo tubo de polietileno com a mesma nata de cimento, após 3 horas da primeira injeção.

7. As operações de injeção (bainha) e re-injeção do chumbador são realizadas com nata de cimento cujo Fator Água/Cimento (em peso) é igual a 0,5, sob pressão de aproximadamente 50 a 100kPa.

ANEXO 4 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – SISTEMA DE ALERTA HELLOMAC

ANEXO 4 Especificações Técnicas – Sistema de Alerta HELLOMAC

TECHNICAL DATA SHEET

HELLOMAC

MACCAFERRI

HELLOMAC is an alert system developed to monitor our rockfall protections, also in remote areas. Get an alert when a rockfall event occurs.

Hello Mac is a patented, compact and robust device specifically designed for the alert in rockfall protection systems such as rockfall and debris flow barriers, simple and secured draperies, etc. The structure and the special metal alloy makes Hello Mac suitable to be installed and operate in any environmental conditions, even the most extreme ones. Hello Mac has been designed and developed modular for detecting rockfall events (deformations, impacts, failures, etc.) on single or multiple portions of protection systems and from different directions.

The activation of the rockfall alerting system at SEL, MEL or customized requirements (i.e. for rockfall barriers), is guaranteed by a series of redundant electronic sensors which immediately send the alarm signal. Hello Mac sends also a control signal every day for communicating the system status.

Control and alarm signals are transmitted using the most modern technologies: IoT, GPRS/UMTS or satellite. In this way Hello Mac can be installed in remote areas with limited or no coverage, without any radio repeaters.

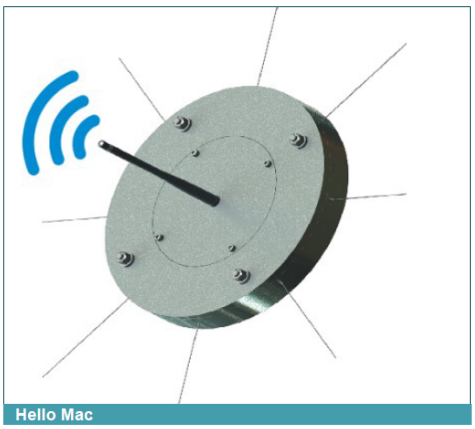
A sophisticated electronic solution inside the device guarantees to Hello Mac an autonomy of several years with an internal battery only, no auxiliary power supply systems are required.

The internal GPS allows Hello Mac to identify the event location(s), also mapping the alarmed areas (land registry).

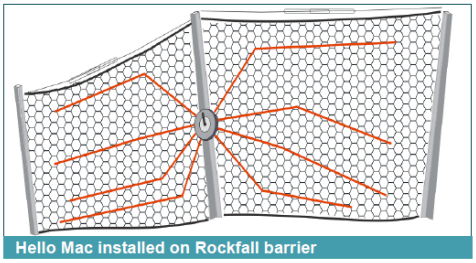
Extremely simple to install (no skilled/trained workers required), it does not need any configurations and calibrations on site, and it can be installed on existing structures too. Maintenance and replacing are very quick and easy as well.

Hello Mac is an external device installed on the rockfall protection systems without affecting in any way the systems certifications.

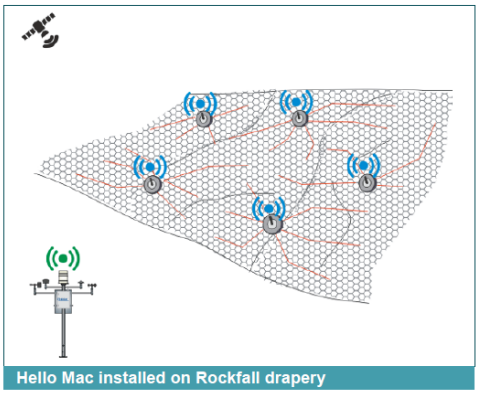
Technical specifications	
Sensors	1÷8 electro-mechanical detection sensors
Minimum sensitivity	Adjustable from minimum barrier energy level of 100 N
Response time	<5 s
Power supply	Standard lithium polymer AA battery (5 years autonomy)
Frequency	868 MHz (Europe) - 915 MHz outside Europe
Status and control signal	Control signal on daily basis
Info transmission	Alarm signals, device status, battery level and location
Working temperatures	-40°C ÷ +60°C
Material	Ergal and aluminum alloy
Dimensions and weight	30 cm diameter, 8 kg
Maintenance	None
Rockfall barriers energy levels	Maccaferri Rockfall Barriers (SEL or MEL)



Hello Mac



Hello Mac installed on Rockfall barrier



Hello Mac installed on Rockfall drapery

© 2020 Maccaferri. All rights reserved. Maccaferri will enforce Copyright.

Last Revision Date 24.03.2020

Maccaferri reserves the right to amend product specifications without notice and specifiers are requested to check as to the validity of the specifications they are using.

Officine Maccaferri S.p.A.
Via JF Kennedy 10, 40069 Zola Predosa (BO) - Italy
T: (+39) 051 643 6000 F: (+39) 051 643 6201
E: info@it.maccaferri.com www.maccaferri.com

Bureau Veritas Certified Quality System Company with Accredia's and UKAS' s accreditation.