

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA SERRA GAÚCHA – FSG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

RELATÓRIO DE ATIVIDADES TERMO DE COMPROMISSO
PROCESSO ADMINISTRATIVO SAMAE Nº 2016/018397

Dr. TIAGO DE VARGAS

Relatório das atividades desenvolvidas na
Universidade de Derby (UK) – Projeto
Newton fund.

- Setembro de 2017 -

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	2
2.1. OCORRÊNCIAS DE ESCORREGAMENTO DE TERRA NO BRASIL.....	2
3. O DESENVOLVIMENTO DA AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCO NO BRASIL.....	10
3.1. ORGANIZAÇÕES QUE LIDERAM AS AVALIAÇÕES DE ÁREA DE RISCO	10
3.2. O DESENVOLVIMENTO DAS CARTAS GEOTÉCNICAS	10
3.3. AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DE LANDSLIDES	14
4. MONITORAMENTO DE TALUDES	19
4.1. TÉCNICAS E METODOLOGIAS APLICADAS	19
4.2. MONITORAMENTO DE TALUDES UTILIZANDO VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS	23
4.2.1. Veículos aéreos não tripulados de asa fixa	24
4.2.2. Veículos aéreos não tripulados de asa rotativa.....	25
4.3. UTILIZAÇÃO DE PEQUENOS UAVS	27
5. MONITORAMENTO DE TALUDE UNIVERSIDADE DE DERBY	29
5.1. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO HAPPISBURGH.....	29
5.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO SUVA UTILIZADO PELA UNIVERSIDADE DE DERBY.....	31
6. PROBLEMAS DE INSTABILIDADE DE TALUDE EM CAXIAS DO SUL.....	33
6.1. DESCRIÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO	33
6.2. CASOS HISTÓRICOS DE LANDSLIDES	35
6.3. DESCRIÇÃO CLIMÁTICA E HIDROGRÁFICA	37
6.4. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA.....	38
6.5. CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS DOS SOLOS	44
6.5.1. Características geotécnicas dos solos saprolíticos	48
7. TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	54
8. MEDIDAS ADOTADAS	56
9. MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA (FS)	60
10. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	64
11. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	67
12. ANEXO I	80

1. INTRODUÇÃO

Este relatório decorre do Termo de Compromisso firmado entre o Centro Universitário da Serra Gaúcha (FSG) e o Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMA E) que tem como objeto (Cláusula Primeira) a participação do professor Tiago De Vargas, docente dos cursos de Engenharia Civil e Ambiental do Centro Universitário da Serra Gaúcha e servidor público ocupante do cargo de Geólogo, junto ao SAMA E, no projeto “Avaliação e previsão de risco geológico em áreas urbanas não planejadas: monitoramento geotécnico e modelagem de instabilidade de taludes” e apresenta como responsabilidades (Cláusula Segunda) o compromisso do Centro Universitário da Serra Gaúcha em realizar a entrega de um relatório técnico descrevendo as atividades realizadas durante o período de permanência do docente na Universidade de Derby (UK).

O intercâmbio entre os pesquisadores da universidade de Derby e FSG possui como objetivo a qualificação de professores e pesquisadores do quadro docente de ambas as instituições de ensino envolvidas. Para tanto, foi firmado contrato de pesquisa entre a Universidade de Derby e o Newton Fund. A instituição Newton Fund financia o intercâmbio de pesquisadores do Reino Unido com pesquisadores de diferentes países em desenvolvimento através de editais abertos para submissão de projetos que contribuam ao aperfeiçoamento científico para ambos.

O conteúdo deste relatório é referente ao estudo desenvolvido no período de seis meses de permanência do pesquisador Tiago De Vargas na Universidade de Derby (de 01 de fevereiro de 2017 até 01 de agosto de 2017). Portanto, o guia de orientação (Cláusula Segunda) para autoridades municipais sobre áreas de risco em Caxias do Sul será entregue pelo pesquisador Omar Hamza, da Universidade de Derby, após o período de permanência dele na cidade de Caxias do Sul (de 22 de agosto de 2017 até 14 de setembro de 2017).

O objetivo deste relatório é apresentar as técnicas e metodologias observadas na Universidade de Derby que possam ser aplicadas no monitoramento de áreas com risco geotécnico na cidade de Caxias do Sul. Ao longo deste estudo são demonstrados registros nacionais, estaduais e municipais sobre eventos de escorregamentos de terra (*landslides*) e a importância de possuir um monitoramento eficiente nas áreas de expansão urbana não planejadas para evitar prejuízos financeiros e óbitos. Também, são demonstradas as tecnologias mais recentes para monitoramento de *landslides* e uma modelagem comparando

valores do Fator de Segurança resultante do uso de diferentes técnicas aplicadas a um estudo de caso em Caxias do Sul realizado por Rigo (2005), no bairro Kaiser.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Ocorrências de escorregamento de terra no Brasil

Muitos autores relatam a falta de registro dos eventos de escorregamento de terra pelas autoridades públicas. Alguns estudos enumeram os escorregamentos ao longo do tempo, no entanto, acredita-se que o número de eventos ocorridos deva ser muito maior do que foi possível ser elencado por diferentes pesquisadores. Nogueira (2002) realizou uma compilação nacional de eventos envolvendo desastres naturais por deslizamentos de terra até 2002 (Tabela 01), enquanto Marques (2011) demonstrou tais eventos no Estado de Minas Gerais entre 2001 e 2010, onde ocorre o maior número de catástrofes no Brasil (Tabela 02). Os relatórios da defesa civil para os anos de 2011 a 2013 indicaram 71, 37 e 40 eventos de deslizamento de terra no Brasil, respectivamente (BRASIL 2012a, 2012b, 2014). O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) realizou os registros dos movimentos de massa ocorridos de 1988 a 2016, que quantificaram 791 eventos em 243 municípios e resultaram em 3.469 mortes (MACEDO, 2016).

Tabela 01. Registros de acidentes associados a deslizamentos de terra. Modificado por Macedo e Akiossi (1996) e Farah (1998). (Extraído de Nogueira, 2002).

LOCAL / CIDADE	DATA	N.º DE MORTES
Santos (SP)	Março de 1928	80
Vale do Paraíba do Sul (MG/RJ)	Dezembro de 1948	250
Santos (SP)	Março de 1956	64
Santos (SP)	Fevereiro de 1959	5
Rio de Janeiro (RJ)	1966	100
Caraguatatuba (SP)	Março de 1967	120
Serra das Araras, Rio de Janeiro (RJ)	Janeiro de 1967	1700
Salvador (BA)	Maio de 1969	15
Salvador (BA)	Abril de 1971	10
Campos do Jordão (SP)	Agosto de 1972	10
Estância Velha (RS)	Júlio de 1973	10
Maranguape (CE)	Abril de 1974	12
São Gabriel (SC)	Março de 1974	15
Caruru (SC)	Março de 1974	25
Santos (SP)	Dezembro de 1979	13
Rio de Janeiro (RJ)	Dezembro de 1982	6
São Paulo (SP)	Junho de 1983	8
Rio de Janeiro (RJ)	Março de 1983	5

LOCAL / CIDADE	DATA	N.º DE MORTES
São Leopoldo (RS)	Agosto de 1983	6
Rio de Janeiro (RJ)	Outubro de 1983	13
Salvador (BA)	Abril de 1984	17
Angra dos Reis (RJ)	1985	5
Arame (interior do MA)	Fevereiro de 1985	20
Rio de Janeiro (RJ)	Março de 1985	23
Salvador (BA)	Abril de 1985	35
Vitória (ES)	1985	93
Lavrinhas (SP)	Dezembro de 1986	11
Rio de Janeiro (RJ)	Março de 1986	12
Rio de Janeiro (RJ)	Fevereiro de 1988	82
Ubatuba (SP)	Fevereiro de 1988	6
Cubatão (SP)	Janeiro de 1988	10
Perrópolis (RJ)	Fevereiro de 1988	11
Rio de Janeiro (RJ)	Junho de 1989	9
São Paulo (SP)	Março de 1989	6
Recife (PE)	Junho de 1989	8
São Paulo (SP)	Outubro de 1989	14
Salvador (13A)	Junho de 1989	31
Salvador (13A)	Maio de 1989	61
Recife (PE)	Junho de 1990	5
Recife (PE)	Júlio de 1990	10
São Paulo (SP)	Outubro de 1990	10
Blumenau (SC)	Outubro de 1990	14
São José (SC)	Novembro de 1991	5
Teresópolis (RJ)	Março de 1991	6
Perrópolis (RJ)	Janeiro de 1992	6
Rio de Janeiro (RJ)	Março de 1992	7
Corumbá (MS)	Março de 1992	9
Belo Horizonte (MG)	Janeiro/Fevereiro de 1992	10
Salvador (BA)	Março de 1992	11
Estado de Minas Gerais	Janeiro/Fevereiro de 1992	20
Estado da Bahia	Janeiro/Fevereiro de 1992	20
Contagem (MG)	Março de 1992	36
Belo Horizonte (MG)	Dezembro de 1993	5
Perrópolis (RJ)	Março de 1994	6
Camaragibe (PE)	Março de 1994	6
Mangaratiba (RJ)	Março de 1994	8
Recife (PE)	Junho de 1994	8
Salvador (BA)	Abril de 1994	10
Rio de Janeiro (RJ)	Março de 1994	11
Salvador (BA)	Junho de 1995	b8
Rio de Janeiro (RJ)	Fevereiro de 1995	5
São Paulo (SP)	Fevereiro de 1995	9
Siderópolis (SC)	Dezembro de 1995	11
Timbé do Sul (SC)	Dezembro de 1995	14
Rio de Janeiro (RJ)	Fevereiro de 1996	59
Ubatuba (SP)	Fevereiro de 1996	11
Camaragibe (PE)	Abril de 1996	8
Obtida (PE)	Abril de 1996	9
Recife (PE)	Abril de 1996	42
Salvador (BA)	Maio de 1996	10
São Paulo (SP)	Dezembro de 1996	5
Salvador (BA)	Março de 1997	9
Ouro Preto (MG)	Janeiro de 1997	13
Camacã (interior da BA)	Novembro de 1998	5

LOCAL / CIDADE	DATA	N.º DE MORTES
Salvador (BA)	Maio de 1999	8
Campos de Jordão (SP)	Janeiro de 2000	10
Rio de Janeiro (RJ)	Janeiro de 2000	13
São Paulo (SP)	Fevereiro de 2000	13
Estado de Minas Gerais	Fevereiro de 2000	20
Recife (PE)	Júlio de 2000	6
Estado do Rio de Janeiro	Dezembro de 2001/Janeiro de 2002	65
Dom Joaquim (MG)	Janeiro de 2002	5

Tabela 02 - Desastres causados por deslizamentos de terra, durante as chuvas intensas no município de Juiz de Fora - MG no período de janeiro de 2000 / julho de 2010 (BARRETO, 2010). (Extraído de Marques, 2011).

ANO	DESASTRE	CUSTOS HUMANOS				CUSTOS ECONÔMICOS	
	Deslizamentos	Desabrigados	Desalojados	Feridos	Mortes	Desabamentos	Edificação danificadas destruídas
2000	157	NR	1031	0	4	56	79
2001	240	NR	NR	0	0	88	41
2002	373	NR	NR	0	3	75	38
2003	404	NR	NR	0	2	85	47
2004	479	87	3581	3	5	102	755
2005	120	47	170	0	0	38	40
2006	84	22	60	1	1	19	38
2007	548	70	681	8	0	89	180
2008	546	13	888	2	0	102	66
2009	673	11	171	6	2	88	43
2010	408	0	120	2	3	38	67
Total	4032	250	6702	22	20	780	1394

*NR = Nenhum registro encontrado

Alguns exemplos de escorregamento de terra ocorridos no Brasil podem ser visualizados nas figuras 01 a 09.

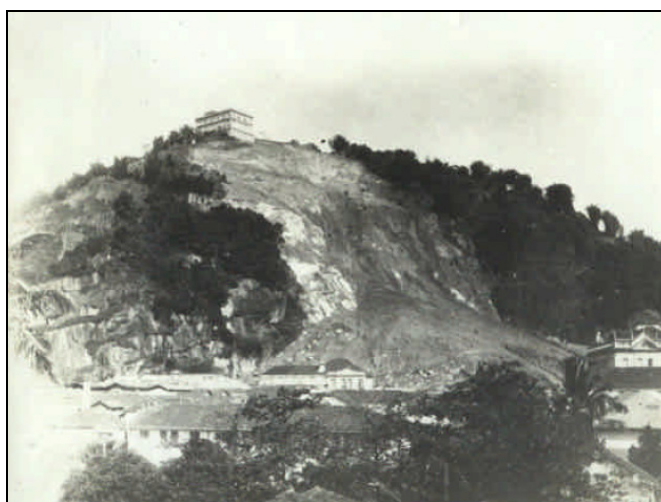


Figura 01. Deslizando no morro Mount Serrat, cidade de Santos, Estado de São Paulo, em março de 1928, mobilizou 130 mil m³ de solo e rocha, destruiu parte do antigo hospital Santa Casa, oito casas e causou mais de 80 mortes. (Arquivo C.Munes). Extraído de Nogueira (2002).



Figura 02. Deslizando no morro do Britador, cidade de Campos do Jordão, Estado de São Paulo, em janeiro de 2000. Como consequência desse episódio pluviométrico de mais de 500 mm acumulado em uma semana, cerca de 450 casas foram destruídas, dezenas de pessoas feridas e dez mortes foram registradas (arquivo DIGEO / IPT). Extraído de Nogueira (2002).



Figura 03. A) Deslizamento na encosta do riacho Boleiro, Nova Descoberta, cidade de Recife, em abril de 1996 (16 óbitos). B) Habitação atingida por deslizamento de terra e rochas na cidade de Caraguatatuba (Estado de São Paulo), 1996. Extraído de Nogueira (2002).

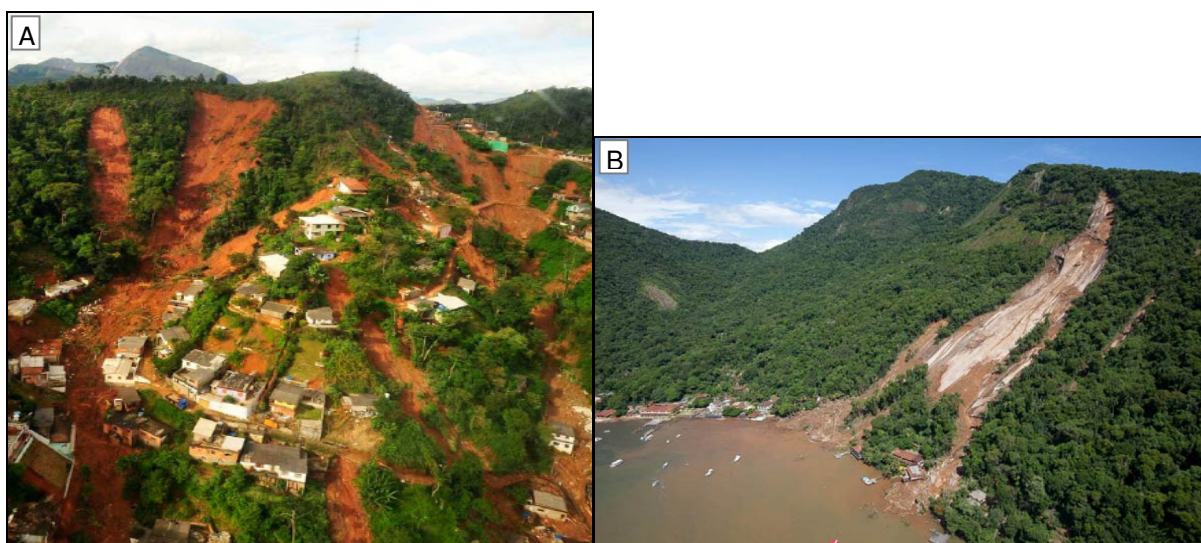


Figura 04. A) Deslizamento na cidade de Nova Friburgo - Estado do Rio de Janeiro, ocorreu em janeiro de 2011 (NEWS ON LINE, 2011). Extraído de Marques (2011). B) Cidade de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro (2010). Extraído de Bressani (2013).



Figura 05. Morro da Carioca, cidade de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro (janeiro de 2010). Deslizamento translacional de solo, tipo superficial. Extraído de Bressani (2013).



Figura 06 - Deslizamento da inclinação da BR-040 Road, Estado de Minas Gerais. Extraído de Parizzi (2014).

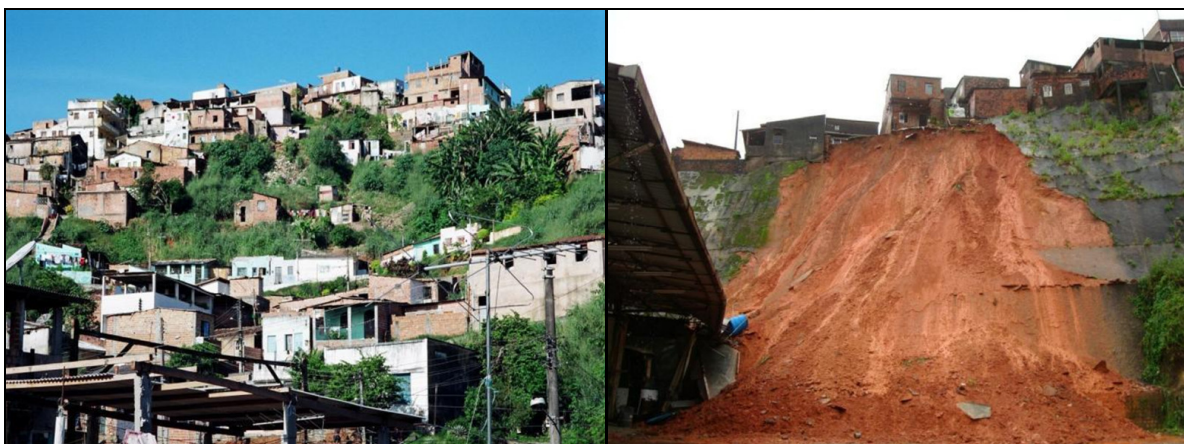


Figura 07. Cidade de Salvador, Estado da Bahia. Extraído de Bressani (2013).



Figura 08. Deslizamento na cidade de Gaspar, estado de Santa Catarina. Extraído de Bressani (2013).



Figura 09. A área urbana da cidade de Blumenau, Estado de Santa Catarina. Extraído de Bressani (2013).

No estado do Rio Grande do Sul, entre 1980 e 2005, houveram 72 eventos de deslizamento (RECKZIEGEL, 2007). O gráfico de distribuição das ocorrências segue o período de 1980 e 2005 (Figura 10).

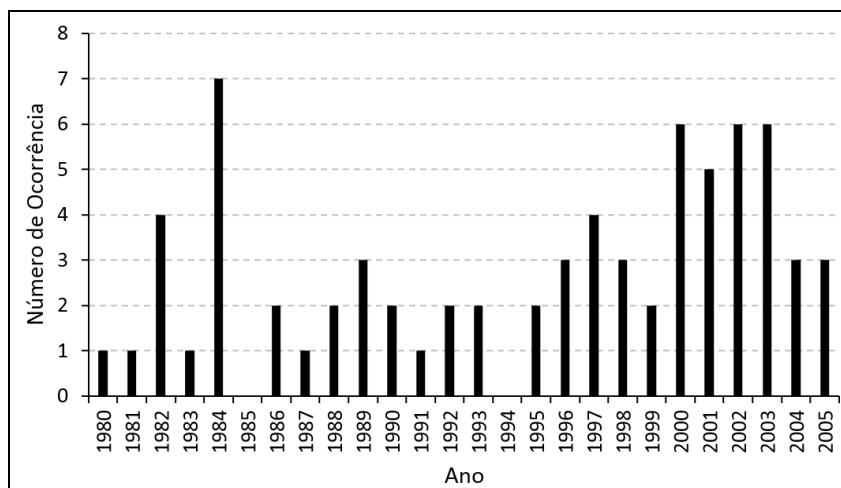


Figura 10. Distribuição anual de catástrofes desencadeadas por deslizamentos registrados no Estado do Rio Grande do Sul de 1980 a 2005. Fonte: Publicações Diárias do Jornal Zero Hora e Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul. Modificado de Reckziegel (2007).

De acordo com Reckziegel (2007), o outono eo inverno foram as estações com o maior número de municípios afetados por deslizamentos de terra, com 25 e 22 ocorrências, respectivamente (Figura 11). Os meses que apresentaram o maior número de eventos foram junho, agosto, maio, julho e outubro (Figura 12). Os municípios com maior número de desastres causados por deslizamentos de terra foram Porto Alegre e Caxias do Sul, com 27 e 7 ocorrências, respectivamente.

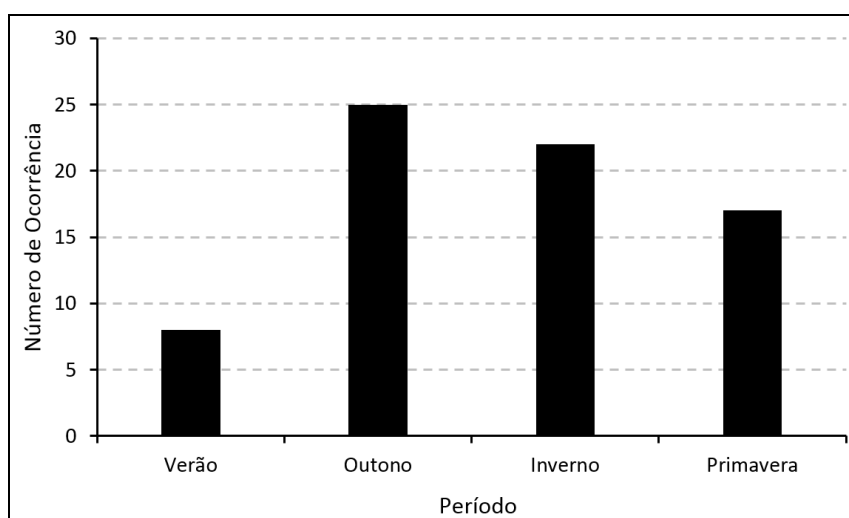


Figura 11. Distribuição sazonal de desastres desencadeados por deslizamentos de terra registrados no Estado do Rio Grande do Sul de 1980 a 2005. Fonte: Publicações Diárias do Jornal Zero Hora e Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul. Modificado de Reckziegel (2007).

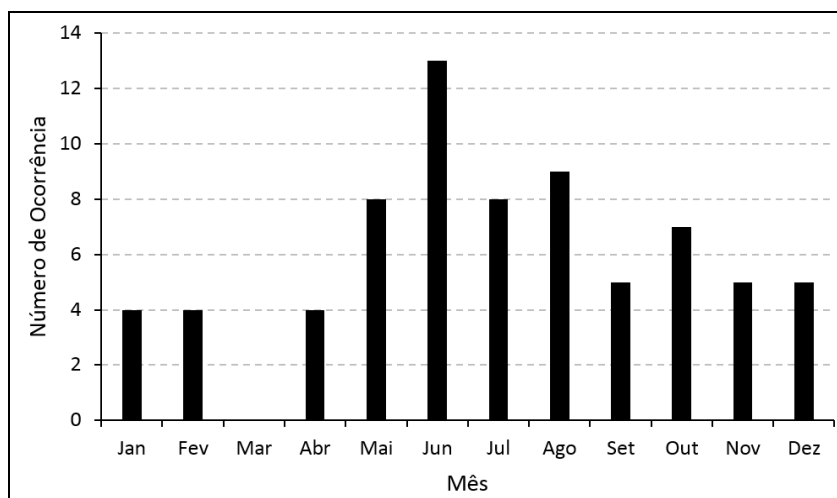


Figura 12. Distribuição mensal de desastres desencadeados por deslizamentos de terra registrados no estado do Rio Grande do Sul de 1980 a 2005. Fonte: Publicações Diárias do Jornal Zero Hora e Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul. Modificado de Reckziegel (2007).

Um evento emblemático de Debris Flow no Rio Grande do Sul ocorreu em dezembro de 2000 (Figura 13). Segundo Azambuja *et al.* (2001), entre os municípios de São Vendelino e Nova Milano ocorreu uma precipitação pluviométrica torrencial, resultando em uma série de escorregamentos de grande porte dos tipos Translacionais (37 eventos) e Debris Flow (10 eventos). Estas movimentações de terra soterraram seis rodovias vicinais e dez pontos da principal rodovia estadual entre a capital Porto Alegre e a cidade de Caxias do Sul (AZAMBUJA *et al.*, 2001).



Figura 13. Escorregamento de terra translacional (AZAMBUJA *et al.*, 2001; BRESSANI, 2013).

3. O DESENVOLVIMENTO DA AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCO NO BRASIL

3.1. Organizações que lideram as avaliações de área de risco

No Brasil, existem estudos sobre áreas afetadas por catástrofes naturais, envolvendo escorregamento do solo, desde o final da década de 1940 (STERNBERG, 1949). Ao longo do tempo, instituições governamentais foram criadas para avaliar áreas de risco e perigo e, juntamente com as universidades, desenvolveram e aplicaram diferentes metodologias para identificar e mapear essas áreas. O governo federal criou a Lei Federal N° 12.608 em abril de 2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa, autorizando a criação do Sistema de Informação e Monitoramento de Desastres. Esta lei obriga todos os municípios em áreas vulneráveis a elaborar carta geotécnica de aptidão à urbanização.

A nível nacional, existe uma instituição federal habilitada a elaborar cartas geotécnicas, o Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). No nível estadual, podemos citar o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG), enquanto à nível municipal podemos observar a Fundação do Instituto Geotécnico da cidade do Rio de Janeiro (GEORIO). Para realizar o monitoramento de desastres naturais, foi criado o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. Aliados a esses órgãos, existem algumas universidades que desenvolvem pesquisas nessas áreas, como a Universidade Federal do Rio de Janeiro, EE-Universidade de São Paulo (São Carlos), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade De Brasília, Universidade Federal de Ouro Preto e etc.

3.2. O desenvolvimento das Cartas Geotécnicas

No Brasil, as cartas geotécnicas iniciaram na década de 1980 em resposta a deslizamentos em áreas urbanas. As metodologias para a elaboração de cartas geotécnicas ainda estão em desenvolvimento. Cerri *et al.* (1996) propuseram o método de detalhamento progressivo com o desenvolvimento do mapeamento geológico-geotécnico em três etapas principais, de modo que cada fase determina os temas técnicos e o nível de aprofundamento

necessário ao desenvolvimento da fase subsequente. Zaine (2000) descreveu os três estágios da seguinte forma:

- a) **estágio geral de mapeamento**, com escala entre 1:50.000 e 1:25.000, abordando principalmente a caracterização do meio físico (Carta Geotécnica de Suscetibilidade);
- b) **estágio intermediário de mapeamento**, em escala entre 1:25.000 e 1:10.000, para áreas de adensamento e/ou de expansão urbana, selecionadas a partir do mapa geológico-geotécnico regional (Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização);
- c) **estágio de mapeamento detalhado**, em escalas maiores que 1:1.000, a partir da identificação de eventuais problemas geológico-geotécnicos selecionados na escala 1:10.000, como suporte a projetos de obras de engenharia para sanar problemas já instalados ou para a implantação de novos empreendimentos. De acordo com Bitar (2015), a etapa “C” resulta da análise de riscos, apontando setores e edificações em situação de maior ou menor risco (ex.: baixa, média e alta suscetibilidade a deslizamento ou inundação). Envolve avaliação de perigo, vulnerabilidade e perdas/danos (Carta Geotécnica de Risco).

Souza e Sobreira (2014), sugerem que para o estágio de mapeamento intermediário, uma escala de 1: 5.000 ou superior seria mais apropriada, com o objetivo de aumentar o detalhe na carta geotécnica de aptidão à urbanização.

A GEORIO preparou um guia de procedimentos e definições para a elaboração das Cartas Geotécnicas da cidade do Rio de Janeiro, utilizando como referência o manual do *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* publicado por Fell (2008). Este manual apresenta uma padronização das nomenclaturas utilizadas no zoneamento de deslizamento de terras e gerenciamento de riscos, e também recomenda métodos para o zoneamento de deslizamentos de terra (susceptibilidade, perigo e risco de deslizamentos de terra) para o planejamento do uso da terra. O guia GEORIO orienta para quantificar a probabilidade e estimar o número de pessoas e moradias no quadro de risco que seria afetado por um evento de deslizamento de terra.

Nos trabalhos de análise e avaliação de riscos existe a predominância de uso da metodologia sugerida pelo Governo Federal através do Ministério das Cidades e Instituto de Pesquisa Tecnológica - IPT (BANDEIRA; COUTINHO, 2008; BANDEIRA *et al.*, 2008; GOBBI *et al.*, 2008; CORREIA; BONAMIGO, 2008; PEREIRA *et al.*, 2008; VARANDA *et*

al., 2008; BRESSANI; BERTUOL, 2010; FARIA; FILHO, 2010; XAVIER *et al.*, 2010; BROLLO *et al.*, 2010; MENDONÇA *et al.*, 2010; NOGUEIRA *et al.*, 2011; ALHEIROS, 2011; CANIL *et al.*, 2011; MACEDO *et al.*, 2011; BROLLO *et al.*, 2011; MARQUES, 2011; LISTO; VIEIRA, 2012). Esta metodologia apresenta oito etapas explicadas da seguinte forma:

1ª etapa – Dados gerais sobre a moradia. São levantados os dados gerais sobre a moradia ou grupo de moradias.

2ª etapa – Caracterização do local. Descreve a caracterização do local da moradia ou grupo de moradias, identificando tipo de talude (natural ou corte), tipo de material (solo, aterro, rocha), presença de materiais (blocos de rocha e matacões, lixo e entulho), inclinação da encosta ou corte e distância da moradia ao topo ou base dos taludes. O ângulo de 17° é mencionado na Lei 6766/79 (Lei Lehman) como referência para os planejadores municipais. De acordo com esta lei, se um terreno tem inclinação maior que 17° o planejamento de intervenção não é permitido sem apresentar um relatório geológico-geotécnico.

3ª etapa – Avaliar a origem e destino das águas observadas na área.

4ª etapa – Descrever a vegetação no talude ou proximidades.

5ª etapa – Sinais de Movimentação (Feições de instabilidade). As feições principais se referem às juntas de alívio, fendas de tração, fraturas de alívio, trincas, e os degraus de abatimento. Outra feição importante é a inclinação de estruturas rígidas como árvores, postes e muros e o “embarrigamento” de muros e paredes. É interessante a avaliação da inclinação de árvores. Essa situação deve ser aproveitada para a observação da geometria do escorregamento (inclinação, espessura, altura, distância percorrida pelo material a partir da base, etc.).

6ª etapa – Tipos de processos de instabilização esperados ou ocorridos. Os processos de instabilização podem ser classificados como rastejo, escorregamento, quedas e corridas de fluxo (FILHO, 1992). Espera-se que com a identificação dos passos 2, 3, 4 e 5 seja possível reconhecer o tipo de processo que pode vir a ocorrer.

7ª etapa – Determinação do grau de risco. Deve-se seguir o critério de determinação de risco descrito na Tabela 03.

Tabela 03. Critérios para determinar a probabilidade de risco. Fonte: Ministério das Cidades do Brasil e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2004); Extraído de Listo e Vieira (2012).

Probabilidade de Risco	Descrição
R1 (Baixo)	1. As condições geológicas e geotécnicas (ângulo de encosta, tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção humana no setor são de baixo potencial para o desenvolvimento de deslizamentos de terra. 2. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. 3. Manter as condições existentes não é provável a ocorrência de deslizamento durante a estação chuvosa regular.
R2 (Médio)	1. As condições geológicas e geotécnicas (ângulo de encosta, tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção humana no setor são de potencial médio para o desenvolvimento de deslizamentos de terra. 2. Presença de alguns indicadores de instabilidade nas encostas, embora incipiente. Processo de desestabilização em estágios iniciais de desenvolvimento. 3. Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano
R3 (Alto)	1. As condições geológicas e geotécnicas (ângulo de encosta, tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção humana no setor são de grande potencial para o desenvolvimento de deslizamentos de terra. 2. Presença significativa de indicadores de instabilidade (rachaduras, árvores inclinadas, postes e paredes, entre outros). Processo de desestabilização em pleno desenvolvimento, mas ainda assim o progresso pode ser monitorado. 3. Mantidas as condições existentes, a ocorrência de deslizamento de terra é altamente possível durante os eventos de chuvas intensas e prolongadas durante a estação chuvosa.
R4 (Muito alto)	1. As condições geológicas e geotécnicas (ângulo de encosta, tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção humana no setor são de grande potencial para o desenvolvimento de deslizamentos de terra. 2. Os indicadores de instabilidade (rachaduras, árvores inclinadas, pólos e paredes, cicatrizes de deslizamentos, entre outros) são significativos e presentes em grande número ou magnitude. O processo de desestabilização está em fase avançada de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo muito difícil monitorar a evolução dos deslizamentos de terra, dado seu alto nível de desenvolvimento. 3. Mantidas as condições existentes, a ocorrência de deslizamento é muito provável durante os eventos de chuvas intensas e prolongadas durante a estação chuvosa.

8ª etapa – Necessidades de remoção. Nesta fase deverá ser informado as autoridades competentes os números de moradias que devem ser monitoradas ou removidas.

De acordo com Sobreira e Souza (2012), o domínio das técnicas e procedimentos de mapeamento para a cartografia geotécnica no Brasil atingiu um nível de excelência e gerou uma diversidade de produtos finais devido às diferentes metodologias e particularidades do ambiente físico.

3.3. Avaliação da suscetibilidade de landslides

As técnicas de identificação e quantificação da suscetibilidade a deslizamentos envolvem metodologias clássicas de inspeção *in loco* e ferramentas de GIS. Os pesquisadores brasileiros estão usando algumas metodologias internacionais em estudos de *landslide*, e adaptando-as a realidade do clima da região. Algumas metodologias utilizam as informações de aspectos morfológicos, vegetação, uso da terra, litologia e geotecnia (HOLLINGSWORTH; KOVACS 1981; MONTGOMERY *et al.*, 1991; CARRARA, 1983; CARRARA *et al.*, 1991; GAO, 1993; LARSEN; TORRES-SANCHEZ, 1998), outras usam modelo hidrológico topograficamente orientado combinado com modelos de estabilidade de declive para prever áreas de alto risco (OKIMURA; ICHIKAWA, 1985; DIETRICH *et al.*, 1993; VAN ASCH *et al.*, 1993; WU; SIDLE, 1995; PACK *et al.*, 1998; IVERSON, 2000; BAUM *et al.*, 2002; SAVAGE *et al.*, 2004; BAUM *et al.*, 2005). A metodologia de modelagem matemática *Shallow Landsliding Stability* (SHALSTAB) é bastante aplicada no Brasil por apresentar bons resultados em climas subtropicais e tropicais (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; BORGA *et al.*, 1998; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; RAFAELLI *et al.*, 2001; RAMOS *et al.*, 2002; GUIMARÃES *et al.*, 2003; FERNANDES *et al.*, 2004; REDIVO *et al.*, 2004; GOMES *et al.*, 2005; VIEIRA, 2007; GOMES *et al.*, 2008; ZAIDAN; FERNANDES, 2009). Esta metodologia apresenta resultados de forma indireta utilizando o Modelo Digital do Terreno, e combinando o modelo hidrológico com o modelo de estabilidade de talude para avaliar a suscetibilidade de áreas à *landslide* (GOMES *et al.*, 2008).

Listo e Vieira (2012), realizaram estudo de análise de probabilidade de risco e Suscetibilidade de *shallow landslides* na bacia do rio limoeiro, cidade de São Paulo, Brasil. Estes autores realizaram a avaliação de risco observando *landslide* em campo e consideraram os fatores naturais e antropogênicos para categorizar o risco (MINISTÉRIO DAS CIDADES; INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2004). Na análise de suscetibilidade utilizaram o modelo matemático *Shallow Landsliding Stability*

(SHALSTAB) e determinaram a distribuição de frequências das classes de suscetibilidade (Figura 14). Por fim, observaram que a combinação destas duas metodologias é adequada para avaliação de deslizamentos rasos em áreas densamente povoadas.

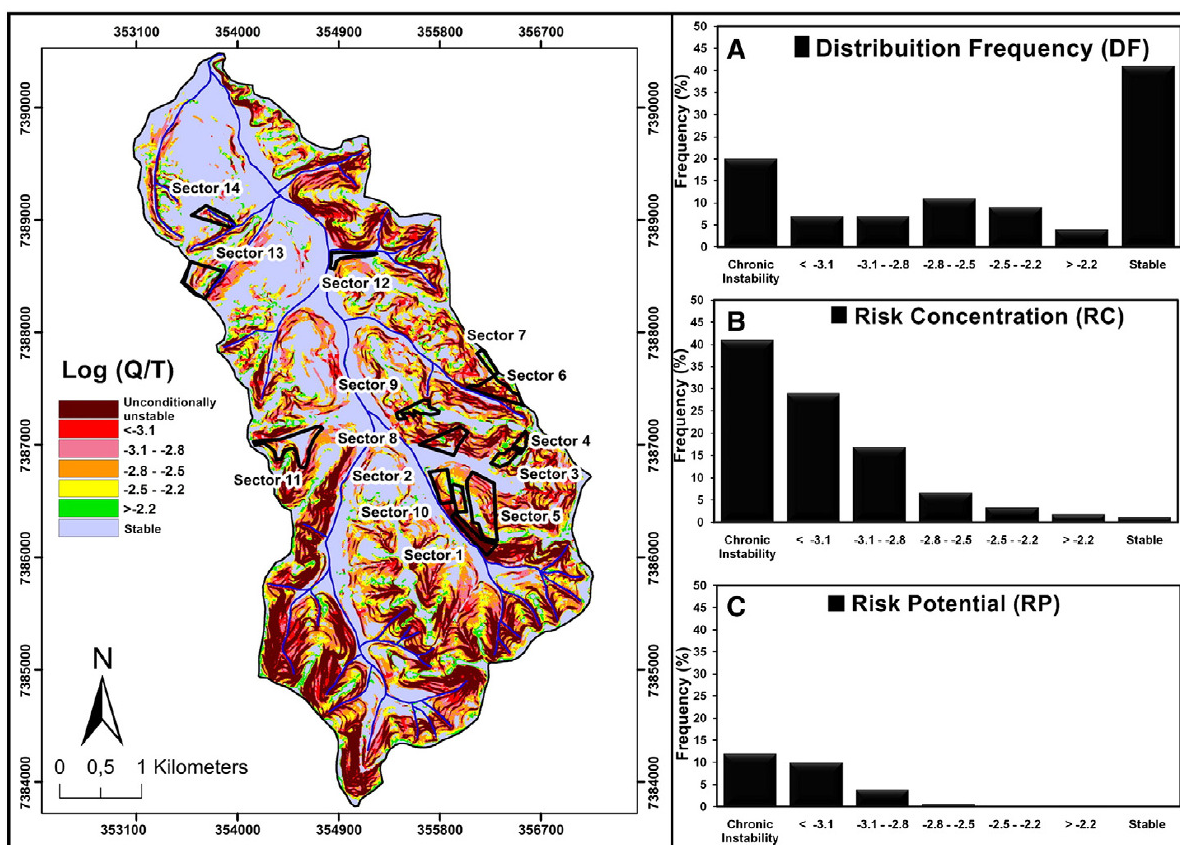


Figura 14. Resultado da aplicação do método SHALSTAB (Extraído de LISTO; VIEIRA, 2012).

Michel *et al.* (2014) estudaram a bacia do rio Cunha, no estado de Santa Catarina (Brasil), devido ao número elevado de eventos de *landslide* no ano de 2008. Estes autores realizaram um comparativo entre as duas técnicas de modelagem SHALSTAB e *Stability Index Mapping* (SINMAP), e verificaram que os modelos apresentam resultados similares, no entanto o SHALSTAB demonstrou-se mais adequado para previsão de deslizamentos na área investigada.

Nas montanhas da Serra do Mar em São Paulo, Vieira *et al.* (2010) avaliaram a predição de escorregamentos por *landslide* raso aplicando a metodologia *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability* (TRIGRS). Esta metodologia associa o modelo hidrológico com um modelo de estabilidade, considerando mudanças transientes de pressão de poros e seus efeitos no Fator de Segurança em diferentes profundidades (VIEIRA *et al.*, 2010).

Outras metodologias e tecnologias para estudos de suscetibilidade a movimentos de massa estão sendo aplicadas a algumas décadas no Brasil, utilizando Sensoriamento Remoto e Sistema Geográfico de Informação (GIS). Estas técnicas de análise estão aliadas aos dados históricos de eventos e condicionantes físicos das regiões.

Vanacôr (2006), elencou um histórico de trabalhos publicados usando essas tecnologias e os aspectos físicos e condicionantes observados (Tabela 04). Ainda este autor realizou estudo aplicando Sensoriamento Remoto e GIS no Estado do Rio Grande do Sul, para determinar áreas com diferentes níveis de suscetibilidade a movimentos de massa (baixa, média, alta e muito alta) utilizando análise estatística e geoestatística (tabulação cruzada, modelo probabilístico *Fuzzy*, análise de processo hierárquico e álgebra de mapas). Estas técnicas também contribuíram para determinar algumas áreas suscetíveis a escorregamentos e risco nos Estados de São Paulo e Espírito Santo (CAMARINHA, 2014; BORTOLOTTI, 2015; DEBORTOLI, 2017).

Tabela 04 - Aspectos físicos e condicionadores usados para estimar a magnitude e probabilidade de movimentos de massa. (Extraído de VANACÔR, 2006).

Autor/autores - Ano	Título do artigo	Aspectos físicos e condicionantes analisados															Objetivos
		Parâmetros Geomorfológicos					Geologia	Estruturas geológicas		Uso do solo	Cobertura vegetal	Hidrogeologia	Pedologia	Drenagem	Pluviometria	Tipologia do movimento	
		Declivida de	Forma da encosta	Altimetria	Orientação da encosta	Espessura do solo		Distância de falhas	Orientação de falhas e fraturas								
Dias e Herrmann (2002)	Análise da suscetibilidade a deslizamentos no bairro Saco Grande, Florianópolis, SC																Análise de suscetibilidade
Donati e Turrini (2002)	An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides whith the gis methodology: aplication to na área of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy)																Classificar a importância dos fatores condicionantes
Femandes et al. (2001)	Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis																Avaliação de condicionantes e previsão de áreas susceptíveis
Silva et al. (2002)	Computação inteligente e SIG na análise espacial: estudo da vulnerabilidade aos movimentos de massa no município de Caraguatatuba-SP através da lógica nebulosa																Estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa
Filho e Wolle (1996)	Cartas de risco a escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP																Elaboração de cartas de risco
Dai e Lee (2001)	Frequency relation and prediction of rainfall-induced landslides																Avaliação da relação do volume e a relação entre tempestades e deslizamentos
Odajima et at. (1998)	Gis and Remote Sensing based analysis of landslides hazards in Cianjur, west Java, Indonesia																Geração de mapa de suscetibilidade
Luiz e Herrmann (2003)	Influência do comportamento das precipitações na análise de suscetibilidade à enchentes e deslizamentos em zonas subtropicais: o caso da região da grande Florianópolis.																Análise a suscetibilidade a deslizamentos e enchentes
Liu et al. (2003)	Landslides hazard assessment in the Three Gorges Area of the Yangtze River using ASTER imagery																Análise de risco à deslizamentos
Raghavan et at. (2004)	Landslides hazard zonation using the grass GIS: a case study in the Ojiva District, Nigata Prefecture, Japan																Zoneamento das áreas de risco a deslizamentos
Phi e Bac (2004)	Landslides hazard mapping using Bayesian approach in GIS — case study in Yangsan Area, Korea																Mapeamento de risco a deslizamentos
Saha et aL (2005)	An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation — with a case in the Himalayas																Análise de suscetibilidade de deslizamentos
Ramakrishnan et a1. (2002)	Landslides disaster management and planning – a GIS based approach																Zoneamento das áreas susceptíveis a deslizamentos

Tabela 04 – Continuação.

Autor/autores - Ano	Título do artigo	Aspectos físicos e condicionantes analisados															Objetivos	
		Parâmetros Geomorfológicos					Geologia	Estruturas geológicas		Uso do solo	Cobertura vegetal	Hidrogeologia	Pedologia	Drenagem	Pluviometria	Tipologia do movimento		
		Declividade	Forma da encosta	Altimetria	Orientação da encosta	Espessura do solo		Distância de falhas	Orientação de falhas e fraturas									
Soares et al. (2002)	Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil																	Análise de suscetibilidade de escorregamentos
Coe et al. (2004)	Landslide suscetibility from topography in Guatemala																	Mapa de suscetibilidade a deslizamentos
Lee et al. (2004)	Probabilistic landslide hazardmapping using GIS and Remote Sensing data at Boun, Korea																	Mapeamento de áreas de perigo a deslizamentos
Sterlacchini et al. (2004)	Spatial integration de thematic data for predictive landslide mapping: a case study from Oltrepo Pavese Área, Italy																	Análise de suscetibilidade a deslizamentos
Zézere et al. (2004)	Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assesstment considering landslides tipology																	Análise de perigo a deslizamentos
Araújo et al. (2004)	Analysis of suscetibility to gravitational mass flovvs base don conditional probability																	Análise de suscetibilidade a fluxos de massa gravitacional
Filho e Magalhães (2004)	Identification of slope instability hazard áreas in the Anchieta — Imigrantes highway system, located in the Serra do Mar mountain rang, São Paulo State, Brazil																	Identificação de areas de perigo à instabilidade de encostas
Bandeira et al. (2004)	Landslide hazard map in an area of Camaragibe city, Pernambuco, Brazil																	Mapa de perigo a deslizamentos
Crepani e Medeiros (2001)	Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo de movimentos de massa no município de Caraguatatuba - SP																	Estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa
Gorsevsk et al. (2001)	Statistical Modeling of Landslides Hazard using GIS																	Zoneamento de areas de risco a deslizamentos
Havenith et al. (2006)	Analysis of landslide susceptibility in the Suusamy region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach																	Análise de suscetibilidade de deslizamentos
Abdallah et al. (2005)	Detecting major terrain parameters relating to mass movements occurrence using GIS, remote sensing and statistical correlations, case study Lebanon																	Análise dos parâmetros relacionados a movimentos de massa
Paudits e Bednárík (2002).	On of landslide susceptibility Using GRASS in evaluation in Handlovská kotlina Basin																	Avaliação da susceptibilidade a deslizamentos

4. MONITORAMENTO DE TALUDES

4.1. Técnicas e metodologias aplicadas

Existem diferentes tipos de *landslide* e em alguns casos é possível realizar o monitoramento do talude pré-movimento e durante o movimento. De acordo com Osasan e Afeni (2010), o monitoramento de taludes passa por cinco etapas: 1) estabelecer os objetivos, as necessidades, as vantagens (vantagens econômicas e de segurança), a investigação de problemas históricos e identificação dos benefícios esperados. 2) estabelecer o projeto da área e de uma avaliação de risco. 3) deverá considerar estas variáveis na concepção do sistema de monitoramento, a instrumentação e a implementação do sistema de monitoramento. 4) realizar a medição real e registro de dados de campo. 5) efetuar a interpretação e a comunicação de dados de monitoramento.

Podem ser aplicadas variadas técnicas e metodologias para monitorar estabilidade de taludes em diferentes situações. Este monitoramento pode ser dividido em três segmentos, tal como, inspeção visual, medições de superfície/subsuperfície e tecnologias de monitoramento remoto (OSASAN; AFENI, 2010). As tecnologias de monitoramento são classificadas, por Zaki *et al.* (2014), em geodésicas (Escaneamento a laser do solo e sistemas de posicionamento global), geotécnicas (Reflectometria no domínio do tempo e sensores de fibra óptica), geofísicas (Técnica de resistividade elétrica e emissão acústica) e sensoriamento remoto (Radar de abertura sintética e sistema de informação geográfica).

O monitoramento visual do talude é a primeira ação que deve ser realizada, avaliando caminhos, paredes altas e crista que apresentam perigo potencial. Inspeções rotineiras realizadas por um engenheiro geotécnico deverão ser comparadas, entre si, para verificar possíveis mudanças na estabilidade do talude (Kayesa, 2006).

As medições de superfície/subsuperfície podem ser compostas por uma rede de levantamento de dados, mapeamento de fissuras por tensão, piezômetros e inclinômetros. De acordo com Osasan e Afeni (2010), a rede de levantamento de dados de taludes em área de mina consiste na inserção de prismas topográficos em torno da área monitorada e de uma a duas estações total para controle. As desvantagens deste tipo de monitoramento são os erros causados por fatores atmosféricos (poeira e neblina), manipulação humana, danos ao prisma ou deslocamento da estação total, que podem afetar a precisão da medição (OSASAN;

AFENI, 2010). O mapeamento de fissuras por tensão deve considerar a identificação e marcação das fissuras já existentes, para facilitar o reconhecimento de novas fendas. A avaliação do sentido de abertura destas fissuras pode ser realizada através do uso de extensômetros portáteis. Segundo Ding *et al.* (1998), o extensômetro é eficiente para medir os movimentos entre os pontos avaliados e pode ser considerado uma técnica econômica de monitoramento. No entanto, o equipamento pode sofrer danos por queda de rochas, aves ou animais selvagens (OSASAN; AFENI, 2010).

Os piezômetros são importantes instrumentos de monitoramento da pressão exercida pela água nos poros dos solos ou limites geológicos. Eles podem auxiliar na avaliação da instabilidade do talude (Ding *et al.*, 1998). O Inclínômetro monitora as forças de deformação em subsuperfície, sendo capaz de gerar informação sobre a profundidade da zona de cisalhamento e ainda, determinar a magnitude, taxa, direção e tipo de deslizamento de terra (STARK; CHOI, 2008).

Outra metodologia que tem sido aplicada é a *Time Domain Reflectometry (TDR)*. Esta metodologia pode localizar e monitorar falhas de declive, aplicando o princípio básico similar do radar (OSASAN; AFENI, 2010). Segundo Osasan e Afeni (2010) o TDR possui vantagens em relação aos inclinômetros tradicionais, tais como, menor custo de instalação, atinge maior profundidade de furo, monitoramento rápido e remoto, determinação imediata da deformação e monitoramento de situações complexas. De acordo com Kayesa (2006), a metodologia TDR pode ser complementada aplicando o método da Emissão Acústica (AE). O método AE monitora o talude através de uma guia instalada em um furo para emissão de ondas ativas (SMITH; DIXON, 2015) e pode indicar deformações pré-desastres (DIXON *et al.*, 2003). Esta técnica também pode ser utilizada no auxílio a levantamentos sísmicos (ZAKI *et al.*, 2014).

Os métodos *Electrical Resistivity Tomography (ERT)* and *Self-Potential tomography (SP)* podem ser alternativas para o monitoramento de *landslides*. Estes métodos apresentam imagens de alta resolução de propriedades elétricas da subsuperfície e combinam custos baixos com procedimentos rápidos de levantamento de campo, sendo possível identificar a profundidade da superfície deslizante do *landslide* e a área de maior concentração de água subterrânea na zona do deslizamento (LAPENNA *et al.*, 2003).

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) pode ser usado como metodologia para monitoramento de estabilidade de taludes. De acordo com Zaki *et al.* (2014), o levantamento é realizado utilizando monumentos como pontos de referência que cobrem a área do talude.

Medições periódicas fornecem o comportamento e taxas de mudanças dos pontos, refletindo a magnitude dos movimentos de declive. Geralmente as informações obtidas pelo GPS são dados geodésicos com alta precisão, no entanto, este método necessita que a antena do GPS obtenha acesso claro a pelo menos quatro satélites comuns (ZAKI *et al.*, 2014).

O *Terrain Laser Scanner (TLS)* tem sido utilizado no monitoramento de taludes devido a capacidade de gerar um modelo digital da inclinação, possibilitando a criação de cenários comparativos entre sucessivos escaneamentos (Figura 15). De acordo com Zaki *et al.* (2014), o TLS detecta as alterações na superfície da inclinação através da diferenciação das coordenadas das nuvens de pontos geradas. Escâners robustos podem detectar pequenos movimentos de 10 milímetros com uma distância de até 1.000 metros, e podem registrar e analisar até 8.000 medições por segundo (OSASAN; AFENI, 2010). O TLS pode ser usado na detecção e caracterização de *landslides*, na avaliação de risco e mapeamento da suscetibilidade, modelagem e monitoramento (AL-RAWABDEH *et al.*, 2015). Algumas vantagens desta metodologia estão no fato de não necessitar de prisma e nem de instalação fixa, e além disso pode cobrir até 2.500 metros de alcance. Contudo, este sistema de análise pode ser prejudicado pelas diferenças na refletividade da rocha, o ângulo da face da rocha, o tempo, a vegetação e outros fatores (OSASAN; AFENI, 2010). De acordo com Zaki *et al.* (2014), o principal inconveniente deste sistema é que não há um padrão para descrever precisão e acurácia.

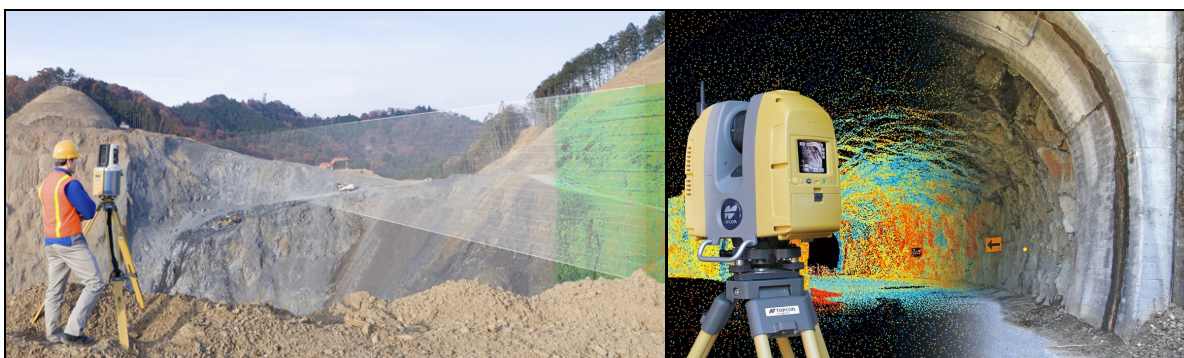


Figura 15. Laser escâner (Fonte: http://www.aig-instrumentos.com/portfolio_item/laser-scanner-terrestre).

Outra metodologia aplicada ao monitoramento de taludes é o Radar. Existem alguns modelos como o *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, *Slope Stability Radar (SSR)* e *Movement and Surveying Radar (MSR)*. A tecnologia do SAR é conhecida a bastante tempo e pode fornecer imagens em todos os climas, diurnas e noturnas, de alta resolução da superfície terrestre, gerar mapas de terreno, produzir modelos de elevação digital de alta qualidade

(DEM), detectar distúrbios de superfície ou mudanças na umidade superficial e identificar uma grande área de deslocamento do solo (OSASAN; AFENI, 2010). Segundo Zaki *et al.* (2014), o SAR emite microondas capazes de registrar o eco eletromagnético (EM) retrodifundido da superfície da Terra, cujas dimensões são consideradas como a distância alvo-sensor e a direção de voo da plataforma (azimute). A combinação de imagens do SAR resultou na técnica *Interferometry Synthetic Aperture Radar* (IFSAR ou INSAR), que pode ser utilizada na identificação de deslizamentos de terra. De acordo com Zaki *et al.* (2014), esta metodologia apresenta dificuldades de processamento e interpretação de dados, inibindo até certo ponto a sua popularidade.

As metodologias de monitoramento SSR (Figura 16) e MSR estão localizadas em solo e utilizam a interferometria diferencial para escanear taludes em direções verticais e horizontais, avaliando continuamente as deformações da inclinação durante dia e noite, em praticamente qualquer tempo sem ser afetado por poeira atmosférica ou neblina. Isso possibilita realizar um comparativo entre as medições resultando na determinação da quantidade de movimento do talude. Ambos equipamentos detectam movimentos sub-milimétricos da face da rocha e são geo-referenciados (OSASAN; AFENI, 2010).

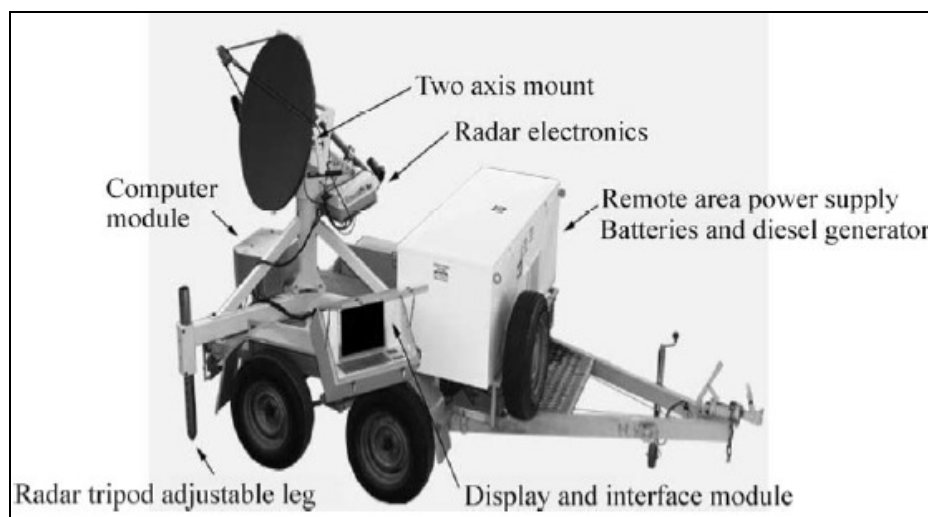


Figura 16. *Slope Stability Radar*. Extraído de Osasan e Afeni (2010).

O Sensoramento Remoto e o Sistema de Informação Geográfica (GIS) tem sido amplamente utilizado como uma ferramenta para avaliação de predição e monitoramento de *landslides*, através de imagens. No entanto, o GIS só adquire dados de movimento horizontal que indicam a expressão topográfica da falha da inclinação, não sendo possível acessar os dados de movimento interno dentro da rocha e solo (ZAKI *et al.*, 2014).

4.2. Monitoramento de taludes utilizando Veículos Aéreos Não Tripulados

Este item apresentará a descrição dos tipos de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) utilizados e suas diferenças, realizando a tradução de alguns trechos publicados nos artigos científicos de Colomina (2014) e Klemas (2015). Também, foram utilizados outros autores para complementar as informações sobre as aplicações da ferramenta, UAV, na engenharia geotécnica.

Os UAVs são aeronaves motorizadas operadas de forma remota ou autônoma com planejamento de voo pré-programado. Os dois principais tipos de configurações de UAV são asas fixas (avião) e asa rotativa (helicóptero). Os UAVs, às vezes conhecidos como drones, oferecem uma alternativa viável às plataformas convencionais para aquisição de dados de sensoriamento remoto de alta resolução a um custo menor, maior flexibilidade operacional e maior versatilidade. As melhorias no projeto de sistemas de controle de voo transformaram essas plataformas em ferramentas de pesquisa capazes de adquirir imagens de alta qualidade e medidas geofísicas/biológicas (HUGENHOLTZ *et al.*, 2012). Também houve avanços no desenvolvimento de sensores miniaturizados, especificamente projetados ou adaptados para cargas úteis de UAV, incluindo imagens hiperespectral, LIDAR, radar de abertura sintética, sensores térmicos e outros.

As aplicações militares da tecnologia de UAV foram transferidas para aplicações civis e de pesquisa, como por exemplo, a área de segurança (Civil, de Fronteira e Costeira); serviços de combate a incêndios e de emergência (detecção e coordenação de incêndios florestais, coordenação de resposta a incidentes importantes, resgate de emergência), setor de energia e redes de comunicação (infra-estrutura de distribuição da indústria de petróleo e gás, redes elétricas, monitoramento da rede ferroviária), silvicultura e pescas (monitoramento ambiental, remoção de colheitas, otimização de recursos); observação do solo e Sensoriamento Remoto (monitoramento climático, fotografia aérea, mapeamento e topografia, monitoramento sísmico, monitoramento de poluição) e comunicações e transmissão (plataformas VHALE como satélites proxy, MALE UAS para cobertura de comunicação, plataformas de câmera).

De acordo com Hugenholtz *et al.* (2012), a Administração Federal de Aviação dividiu os tipos de UAV em cinco categorias por peso, variando de micro (< 0,9 kg) a mini, tática para longa duração em média altitude e longa duração em alta altitude (>13.636 kg). Existe

também uma categoria de pequenos veículos aéreos não tripulados (SUAVs) com peso inferior a 25 kg, que está sendo disponibilizado para operação civil no sistema de espaço aéreo nacional. Dado seu baixo custo, projetos de pesquisa de sensoriamento remoto usaram principalmente UAV nesta categoria.

4.2.1. Veículos aéreos não tripulados de asa fixa

Os UAVs de asa fixa podem sobrevoar as cidades e zonas húmidas para avaliar danos após furacões, inundações e terremotos (Figura 17). Por exemplo, quando a fumaça inviabilizou as outras aeronaves durante um incêndio florestal de 2009 em Circle, AK, um drone Predator forneceu imagens de infravermelho que foram decisivas para que as autoridades determinassem que não era necessária a evacuação. Durante o acidente na usina de energia nuclear japonesa de Fukushima Daiichi, grandes drones analisaram a emergência de alta altitude, enquanto os drones com tamanho de mochilas inspecionaram os reatores incapacitados de perto (CONNIFF; MCCLARAN, 2011).

Esses UAVs são projetados para transportar pequenas cargas úteis e sistemas de controle de voo integrados, dando-lhes capacidades de voo semi-autônomos ou totalmente autônomos. Em UAVs autônomos, a aquisição de dados de sensoriamento remoto é pré-programada com software de planejamento de voos que pode calcular pontos de referência para aquisição de imagens com base na resolução desejada, na quantidade de sobreposição de imagem e na área a ser pesquisada.

As câmeras digitais são geralmente parte da carga útil. Durante o voo, o piloto automático do UAV pode se comunicar através de um link de telemetria para uma estação terrestre com software de controle de voo (HUGENHOLTZ, 2012). Por exemplo, o AeroVironment RQ-14A "Dragon Eye" tem uma envergadura de 110 cm e pesa cerca de 2,5 kg. Lançado à mão ou com um cabo de bungee, o pequeno avião é controlado por coordenadas GPS inseridas em seu sistema de orientação com um computador laptop padrão. Uma vez em alto, pode transmitir imagens de vídeo da paisagem costeira em tempo real (EDWARDS, 2009).



Figura 17. UAVs de asa fixa. Extraído de Colomina (2014).

4.2.2. Veículos aéreos não tripulados de asa rotativa

Os UAVs de asa rotativa são usados em muitos projetos ambientais, incluindo mapeamento de zonas húmidas, batimetria, LIDAR, avaliação de danos causados por inundações/terremotos, estudos urbanos, etc. Os helicópteros têm uma grande vantagem em relação aos aviões de asa fixa, na medida em que podem descer para uma inspeção mais próxima do alvo, e alterar a altitude para fornecer imagens do mapeamento em resoluções espaciais preferenciais. Por exemplo, os helicópteros foram utilizados no resgate dos habitantes de Nova Orleans e avaliar os danos causados à cidade após o furacão (KLEMAS, 2009; NOAA, 2008). Helicópteros também podem ser usados para estimar a extensão de uma mancha de óleo e rastrear o movimento do óleo derramado ou outra pluma de poluição (KLEMAS, 2010; PIKE, 2014).

Os helicópteros não tripulados oferecem vantagens semelhantes, mas a um custo muito mais baixo. Imagens de sensoriamento remoto com resolução espacial muito alta e modelos de elevação digital (MDEs) são amplamente utilizados em aplicações de gerenciamento costeiro. Os MDE também são usados como insumo na modelagem numérica hidrodinâmica. A resolução espacial, precisão e acurácia são parâmetros críticos do MDE. Atualmente, muitos MDEs construídos usando imagens aéreas ou de satélite com uma resolução espacial maior que 50 cm não são suficientemente precisos para a maioria das aplicações.

Um helicóptero fotogramétrico não tripulado (DRELIO) foi desenvolvido para resolver este problema (DELACOURT *et al.*, 2009). DRELIO está equipado com um sistema de piloto automático. Depois de carregar o plano de voo, não são necessárias comunicações terrestres desde a decolagem até a aterrissagem. A altitude do voo pode chegar a 100 m acima do solo. DRELIO pode operar em condições ventosas até 50 km/h. Uma câmera reflex com ótica intercambiável de alta qualidade está a bordo. Dependendo da distância focal e da

altitude de voo, a resolução das imagens varia de 1 a 5 cm com uma cobertura terrestre de cerca de 50 por 75 metros até 250 por 375 metros. Com imagens estereoscópicas e posicionamento GPS de pontos de referência nas imagens, o DRELIO facilita a construção de um MDE e uma imagem ortoretificada com uma resolução espacial melhor que 5 cm. O sistema DRELIO, produz o MDE simultaneamente com LIDARs, parece ser mais flexível e eficiente do que outros UAVs e menos caro do que o LIDAR (DELACOURT *et al.*, 2009).

Os helicópteros não tripulados são apresentados em muitas configurações diferentes. Um design popular e estável é o *quadcopter*, um helicóptero multirotor que é levado e propulsado por quatro rotores. *Quadcopters* usam dois conjuntos de hélices de passo fixo idênticas: duas girando no sentido horário e duas no sentido anti-horário. O controle do movimento do veículo é conseguido alterando a taxa de rotação de um ou mais discos do rotor, alterando assim a carga de torque e as características de impulso/elevação. Os *quadcopters* usam um sistema de controle eletrônico e sensores eletrônicos para estabilizar a aeronave. Eles têm várias vantagens sobre os helicópteros de um único rotor. O design de quatro rotores permite que *quadcopters* sejam relativamente simples em design, mas altamente manobráveis e confiáveis. Eles não requerem ligações mecânicas para variar o ângulo de inclinação da pá do rotor à medida que giram. Isso simplifica o projeto e a manutenção do veículo. Os tempos de voo típicos são de dezenas de minutos, antes da bateria precisar ser recarregada.

A Figura 18 mostra um *quadcopter* Phantom 4 com uma câmera integrada de 14 MP e gravação de vídeo HD de 1080p (vídeo de alta definição com 1.080 linhas horizontais de resolução vertical) em um cartão micro SD (cartão digital seguro), e transmissão de vídeo Wi-Fi em exibição de primeira pessoa em tempo real (FPV) e telemetria para um aplicativo (*Vision*) gratuito para iOS e Android. O Wi-Fi permite streaming de vídeo ao vivo e remoto de até 330 metros de distância. O motor integrado de inclinação da câmera compensa automaticamente o movimento do único eixo do Phantom, inclinando a câmera para um vídeo mais suave. Também é controlável manualmente através de um aplicativo *Vision*. Pode voar até 25 minutos com uma única carga usando a bateria de polímero de lítio incluída que é facilmente removível e contém um indicador de carregamento interno.

A necessidade de aeronaves com maior capacidade de manobra e capacidade de pairar levou a um aumento no uso de *quadcopter* em monitoramento e mapeamento ambiental. Eles são agora amplamente utilizados no mapeamento das zonas húmidas, avaliação de danos causados por inundações, estudos de dinâmica costeira, planejamento urbano, etc. Por

exemplo, M. Madden (comunicação pessoal) usou um *quadcopter* para mapear zonas húmidas na Geórgia. Sua equipe usou um *quadcopter* com duas câmeras embutidas, uma apontada para o vídeo nadir e a outra para a frente. Os registros de vídeo para uma unidade *flash*, e um telefone celular é usado para controle. A maioria dos *quadcopters* pode levar uma câmera pequena, muitos têm uma montagem para uma câmera Go-Pro, com uma carga útil máxima de cerca de 1 kg. *Hexacopters* e *octocopters* podem transportar câmeras mais pesadas, custam dezenas de milhares de dólares, e muitas vezes são usados em aplicações de filmes/TV (Figura 18). Novos sistemas capazes de transportar imagens multispectrais e hiperespectrais estão sendo projetados.

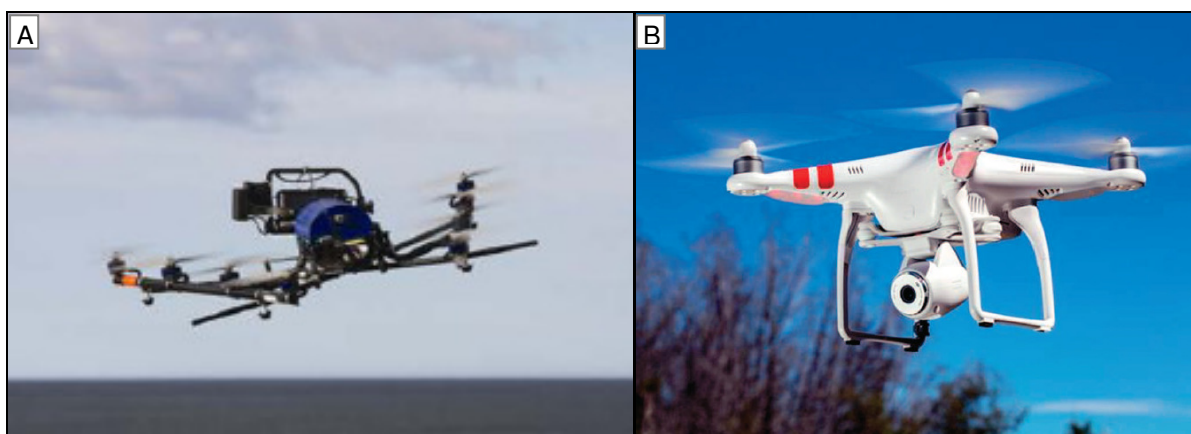


Figura 18. UAVs de asa rotativa. A) Phantom 8 (Colomina, 2014) e B) Phantom 4 (KLEMAS, 2015).

4.3. Utilização de pequenos UAVs

O emprego de *Small Unmanned Aerial Vehicles (SUVA)* tem crescido devido ao baixo custo em relação ao *Aircraft* (KLEMAS, 2015) e resultados satisfatórios em pequenas áreas alvo (AL-RAWABDEH *et al.*, 2015). Os SUAVs guiados por GPS possuem imagens 3D de alta resolução espacial (NIETHAMMER *et al.*, 2011; LINDNER *et al.*, 2015; KLEMAS, 2015; FERNÁNDEZ *et al.*, 2016) com tempos de revisão determinados pelo operador, ao contrário dos satélites (LECHNER *et al.*, 2012), figura 19. De acordo com Klemas (2015), o SUAV adquire dados de sensoriamento remoto de alta resolução com maior flexibilidade operacional e maior versatilidade. Além disso, estão sendo projetados sensores adaptáveis aos SUAVs para imageamento Hiperespectral, LIDAR, Radar de Abertura Sintética e unidades de Infravermelho Térmico (KLEMAS, 2015).

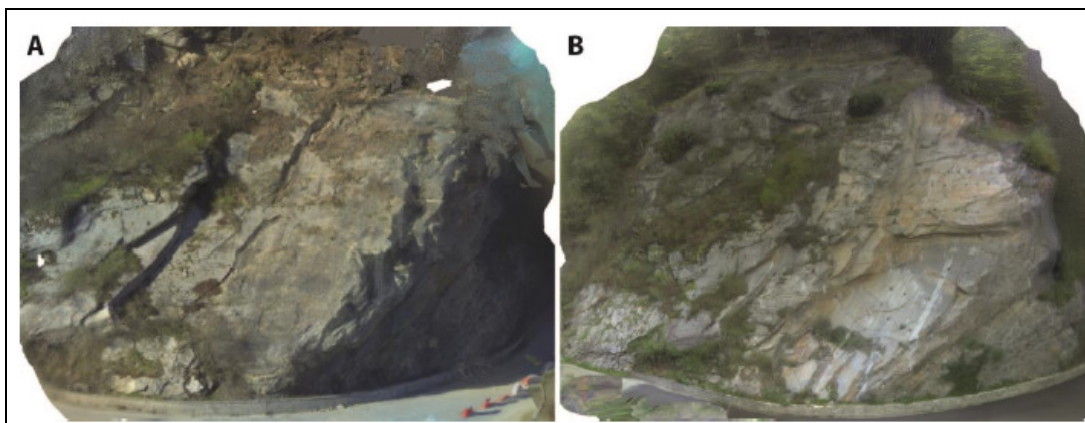


Figura 19. Comparação entre a parede de rocha antes (A) e após (B) o evento de deslizamento de rochas de 7 de março de 2014 (Extraído de GIORDAN, 2015).

Na engenharia geotécnica o SUAV tem sido aplicado para identificação e monitoramento de áreas com instabilidade geotécnica. Contudo, o uso de SUAV é prático para áreas com menos de $0,5 \text{ km}^2$, o que corresponde a deslizamentos de terra relativamente pequenos (GIORDAN *et al.*, 2015). A precisão do levantamento realizado em landslide pode atingir 10 cm (LINDNER *et al.*, 2015; FERNÁNDEZ *et al.*, 2016). A identificação de fissuras e inventário de landslides podem ser realizados através de ortoimages e geração de Modelo Digital de Terreno (FERNÁNDEZ *et al.*, 2016). Estudo desenvolvido por Al-Rawabdeh *et al.* (2016), utilizou SUAV para detecção de escarpas de deslizamento de terra propondo uma nova metodologia (Figura 20). Como resultado foi observado que a principal vantagem da metodologia é permitir a derivação de informações precisas para a caracterização de deslizamentos, ao mesmo tempo em que alivia o risco inerente ao levantamento de áreas perigosas propensas a deslizamentos de terra e reduz os custos incorridos.

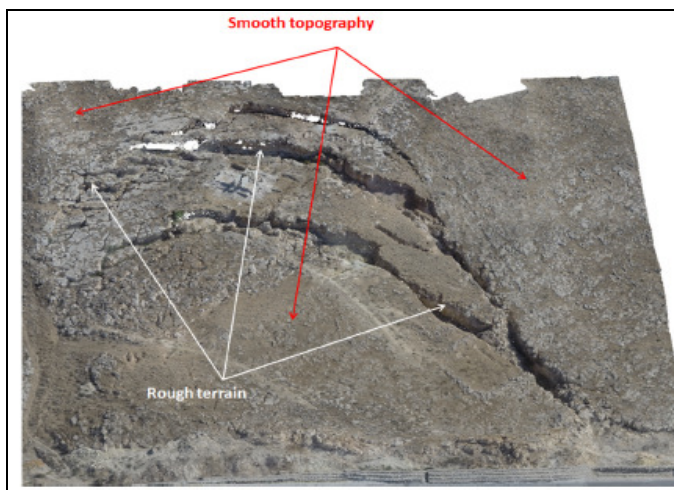


Figura 20. Representação normal superficial da rugosidade da superfície topográfica em um modelo de elevação digital - DEM (extraído de AL-RAWABDEH, 2016).

A implementação de um panorama regulamentar harmonizado foi exigida pelas partes interessadas do SUAV para eliminar as barreiras para a certificação e comercialização em todo o mundo. No entanto, esta questão envolve tecnicismos não triviais e envolve um grande grupo de agentes contribuintes. Em maio de 2013, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) autorizou alguns operadores privados a pilotar SUAV. Até agora, a Polícia Federal era a única organização não militar autorizada a fazê-lo. *X-Mobots* (São Carlos, SP), a primeira empresa privada a se beneficiar da decisão, obteve o Certificado de Autorização de Voo Experimental, CAVE da ANAC. No Anexo I segue uma tabela com descrição dos tipos de SUVAs, softwares utilizados, área de aplicação e características físicas como tipo de câmera, peso, tempo de voo, acurácia e limitações observadas.

5. MONITORAMENTO DE TALUDE UNIVERSIDADE DE DERBY

5.1. Desenvolvimento do projeto Happisburgh

O grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia e Tecnologia da Universidade de Derby está desenvolvendo um estudo de monitoramento de *landslides* nos *Cliffs* de arenito no litoral leste da Inglaterra, na cidade de Happisburgh (Figura 21). No mês de maio de 2017 foi realizada uma visita a esta área pelo pesquisador Tiago De Vargas, para observar *in loco* a aplicação das tecnologias utilizadas pela Universidade de Derby no monitoramento de *landslides*.



Figura 21. Imagem dos *Cliffs* pesquisados pela Universidade de Derby.

Foram aplicadas as tecnologias de escâner a laser e fotogrametria utilizando SUAV no mapeamento. O escaneamento a laser dos *Cliffs* é realizado em solo utilizando equipamento Topcon GLS 1.500, resultando em uma nuvem de pontos georreferenciados que possibilita desenvolver um coparativo entre diferentes campanhas de escaneamento (Figura 22). Já a aerofotogrametria foi realizada pelo SUAV Intel AscTec Falcon 8. O projeto de voo foi criado no *software* Asctec Navigator, onde é configurado o tempo, a altura, escala de zoom, porcentagem de sobreposição das fotos, tempo de registro da foto e a área de sobrevoo (Figura 23). Como resultado da fotogrametria foi gerada uma imagem 3D do terreno através da nuvem de pontos tratada no *software* AscTec (Figura 24).

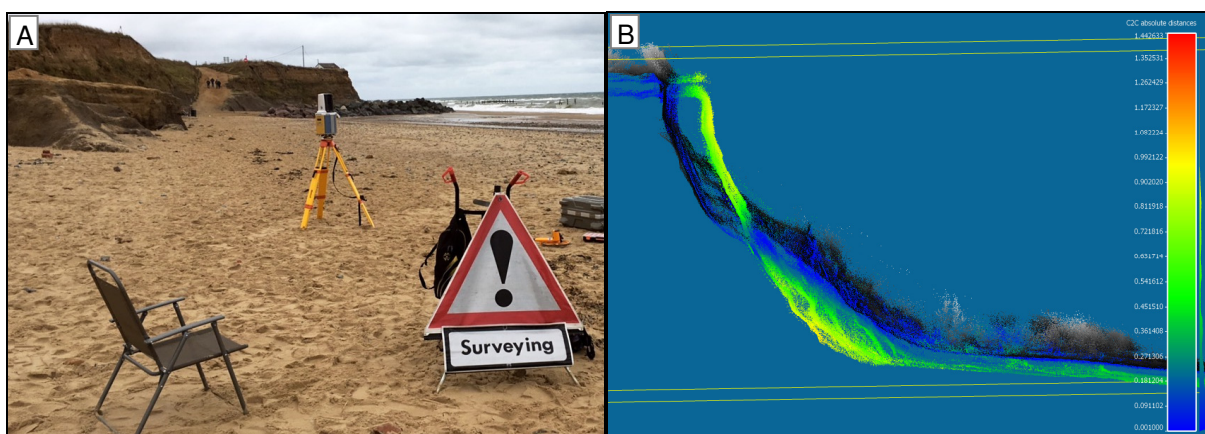


Figura 22. A) Topcon Laser scanner GLS 1.500. B) Comparativo de duas campanhas de escaneamento demonstrando o recuo do *Cliff*. (Fonte: Universidade de Derby).

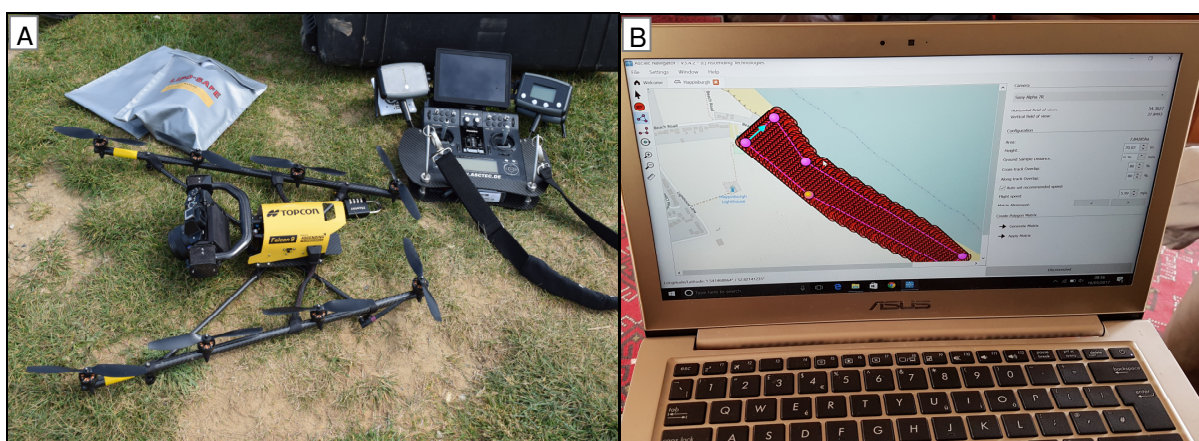


Figura 23. A) UAV Falcon 8, Topcon utilizado em happisburgh. B) Projeto de voo da área de imageamento do UAV.

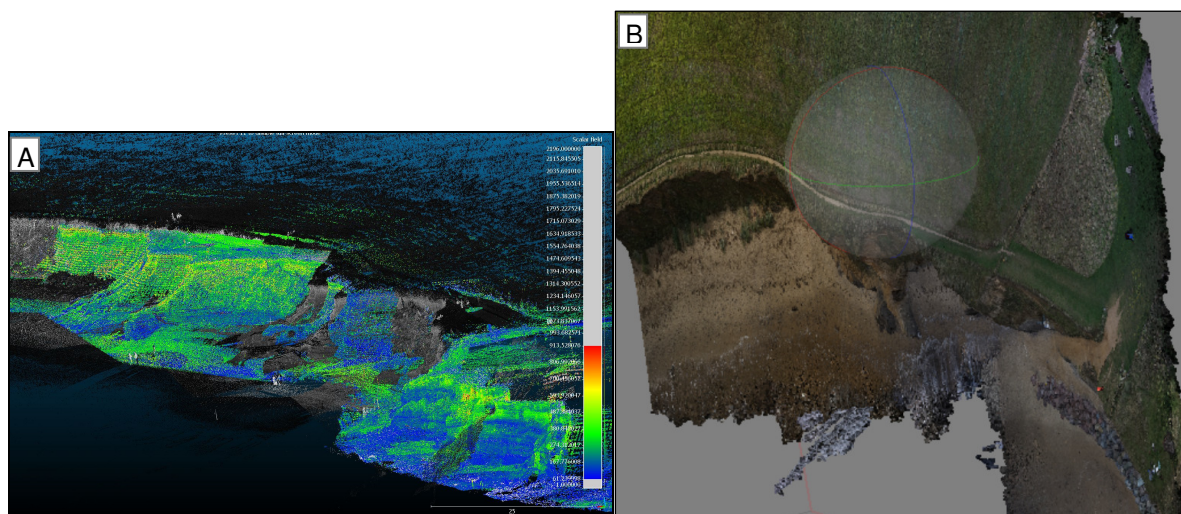


Figura 24. A) Nuvem de pontos gerados pela fotogrametria. B) Imagem 3D do terreno investigado. (Fonte: Universidade de Derby).

5.2. Descrição do equipamento SUVA utilizado pela Universidade de Derby

A Universidade de Derby (Reino Unido) utiliza o SUVA Intel AscTec Falcon 8 para desenvolver pesquisas englobando monitoramento de taludes. Este modelo de SUVA é usado principalmente para fins comerciais, tais como, medições volumétricas em 3D, informações georreferenciadas 2D e 3D, levantamento de edifícios e modelagem. O Falcon 8 é um *octocopter* avançado (SUVA com 8 hélices) projetado com segurança, desempenho, precisão e com possibilidade de fornecer integração com novos sensores. Segundo Intel latest commercial drone (2016), o drone Falcon 8 oferece o melhor desempenho, peso-para-carga e uma excepcional estabilidade, mesmo em condições difíceis.

O equipamento AscTec Falcon 8 possui câmera HD com resolução de 36 megapixels, qualidade de imagem cristalina. A velocidade pode atingir 34 mph. A bateria possui o equilíbrio automático, o modo de armazenamento, o carregamento e os LEDs que exibem a duração restante da bateria. Estas baterias inteligentes do Intel Powerpack carregam o Intel Falcon 8 e o Intel Cockpit. O *cockpit* possui uma interface de usuário robusto e resistente à água, podendo ser usado em ambientes externos agressivos. O Intel Cockpit integra recursos de controle e segurança independentes com vídeo digital de baixa latência, 5.1Ghz a 5.8Ghz. Ele suporta cargas úteis com até 1.080p e fornece a visão de tempo real (Figura 25).

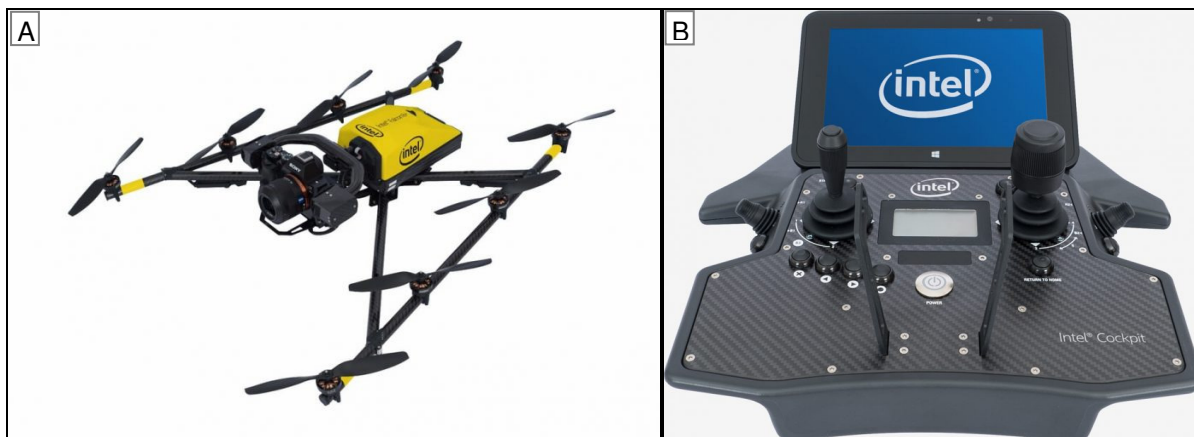


Figura 25. A) UVA Intel AscTec Falcon 8 e B) Intel Cockpit. Extraído de Intel latest commercial drone (2016).

A empresa fornecedora do drone (Intel) cita algumas vantagens do equipamento, tais como:

- a) Fornece acesso rápido às imagens de alta resolução, bem como pode ser utilizado sem muito treinamento. O AscTec Falcon 8 é capaz de suportar ventos até 10 metros por segundo. No entanto, o tempo de chuva limita as capacidades do drone.
- b) O drone possui uma câmera de imagem térmica, que pode ajudar na identificação de pessoas em escombros, no rastreamento de corpos após os desastres naturais como tsunamis, inundações, terremotos, deslizamento de terra.
- c) A capacidade máxima de voo são 26 minutos, e pode voar até 4.000 metros de altura acima do nível do mar.
- d) Possui soluções automáticas de detecção aérea com sensores a bordo precisos.
- e) É melhor aplicado a projetos de menor escala, pois oferece decolagem e pouso flexíveis.
- f) É adequado para mapeamento e inspeção de projetos de até 35 hectares que requerem imagens de alta resolução.
- g) Oferece uma automação consistente do *waypoint* que permite voos exatamente reproduzíveis para uma valiosa análise estrutural.
- h) Piloto automático redundante triplo com três unidades de medição inercial que compensa as falhas de *hardware*, influências externas, como campos eletromagnéticos e ventos fortes.

Este equipamento, também, torna-se interessante pelo dinamismo de aplicações como levantamentos e mapeamentos, inspeção e monitoramento, pesquisa eficiente em represas e paredes, captura e análise de geodados, arqueologia e geologia, progresso e mapeamento de construções, inspeção visual de integridade estrutural, menos riscos e despesas do que os métodos convencionais de investigação, tempo de inatividade minimizado e paradas mais seguras, imagens HD de alta qualidade, vídeos térmicos e RGB, análise precisa da estrutura e detecção rápida de danos, baixo ruído e emissões, e para finalizar, funcionalidade robusta em campos eletromagnéticos.

O custo deste equipamento completo está anunciado pela empresa Intel em aproximadamente 35.000 dólares (<http://www.bestflyingdrone.com/falcon-8-review/>).

6. PROBLEMAS DE INSTABILIDADE DE TALUDE EM CAXIAS DO SUL

A cidade de Caxias do Sul tem sido considerada neste estudo como um exemplo dos problemas típicos da estabilidade de talude no sul do Brasil. Os fatores que podem ter influenciado a condição de estabilidade como clima, precipitação, geomorfologia e geologia também são discutidos.

6.1. Descrição da localização e geomorfologia do município

A cidade de Caxias do Sul está localizada no Estado do Rio Grande do Sul e apresenta uma posição geográfica entre as coordenadas de longitude 51°18'00"W - 50°42'00"W e latitude 29°20'00"S - 28°48'00"S (Figura 26). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia (2010), a população total do município são 435.482 habitantes, sendo 419.321 habitantes considerados como população urbana e 16.161 habitantes formando a população rural. O Município de Caxias do Sul possui uma área territorial de 1.643,91 km².

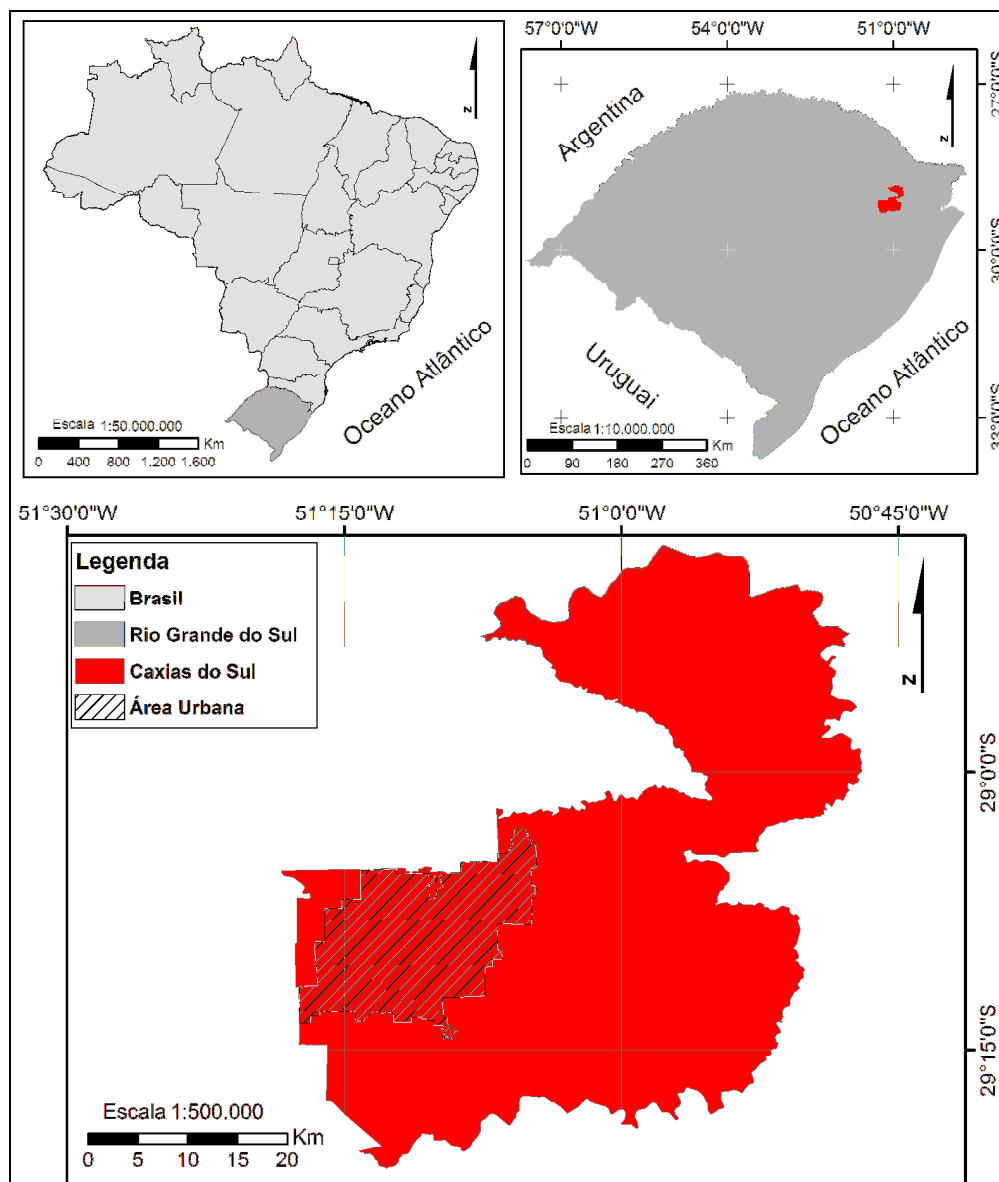


Figura 26. Localização da cidade de Caxias do Sul.

O contexto geomorfológico da Bacia do Paraná estudado por Almeida (1956), foi definido como unidades geomorfológicas do Planalto Basáltico (Bacia do Alto Paraná, Planalto das Araucárias, Zona das Missões e "Cuesta" do Haedo) e zonas adjacentes (Núcleo de Curitiba, Núcleo Riograndense, Depressão do Paraguai e Bacia do Pampa). De acordo com Almeida (1956), na geomorfologia regional da área de estudo observa-se o Planalto das Araucárias, compartimentado em Planalto dos Campos Gerais, Serra Geral, Aparados da Serra, Patamares da Serra Geral, Planalto Dissecado do Rio Pelotas e Planalto de Lages.

No território da cidade de Caxias do Sul são observadas duas unidades geomorfológicas denominadas Planalto dos Campos Gerais e Serra Geral. A unidade do Planalto de Campos Gerais é predominante no município e apresenta um mergulho de relevo

na direção S - SW, sendo observado em Caxias do Sul a altimetria máxima de 942 metros. Na região de maior elevação, o relevo é achatado, não dissecado, com vales de fundo plano, muitas nascentes e banhados associados a lineamentos estruturais, predominância de campos com manto de alteração espesso intercalados com áreas pedregosas e solos pouco espessos (LISBOA *et al.*, 2003).

O domínio geomorfológico Serra Geral possui terminais escarpados com orientação Leste – Oeste, e está identificado nas áreas escarpadas dos vales dos rios Caí e Antas. O relevo se desenvolve no topo, com vertentes rochosas abruptas subverticais em vulcanitos ácidos, onde ocorrem frequentes quedas de blocos. Já na parte intermediária existe a predominância de basaltos com expressivos depósitos de tálus e colúvio, sede de diversos movimentos de massa, que encobrem na base os arenitos da Formação Botucatu (LISBOA *et al.*, 2003).

6.2. Casos históricos de *landslides*

Conforme Argenta *et al.* (2009), ocorreram 31 deslizamentos no Município de Caxias do Sul entre 1980 e 2007. Este autor observou que o maior número de eventos ocorreu nos anos de 1993 e 2007 (Figura 27) e que a maior concentração de deslizamentos aconteceu nos meses de junho, julho e agosto, coincidindo com o período de aumento da precipitação no município (Figura 28).

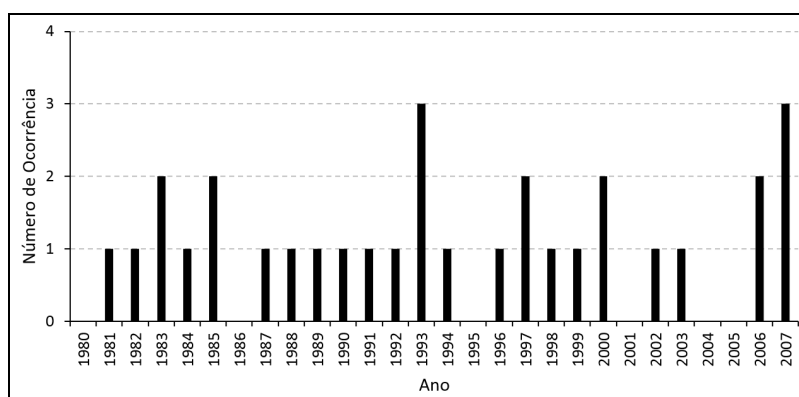


Figura 27. Representação gráfica da distribuição anual da ocorrência de deslizamentos de terras na cidade de Caxias do Sul, de 1980 a 2007 (modificado de ARGENTA *et al.*, 2009).

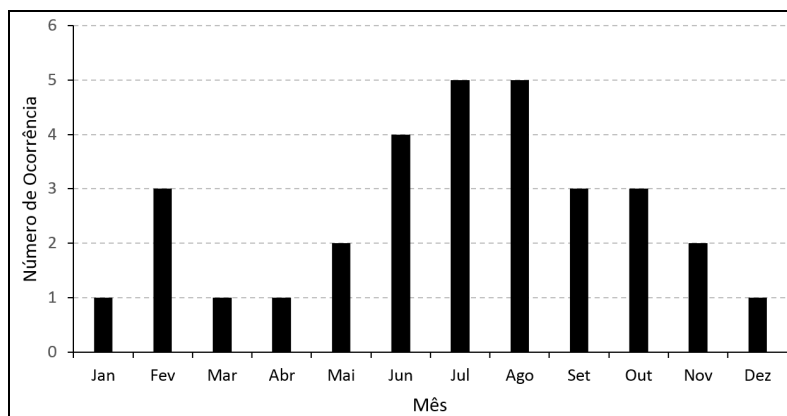


Figura 28. Representação gráfica da distribuição mensal da ocorrência de deslizamentos de terras no Município de Caxias do Sul, de 1980 a 2007 (Modificado de ARGENTA *et al.*, 2009).

Wiggers (2014), complementou os registros de Argenta (2009) até o ano de 2011, informando um total de 49 ocorrências de deslizamento. No entanto não disponibilizou os eventos em formato de tabela ou gráfico na publicação. O estudo de Wiggers (2014), foi direcionado a criação de um mapa de risco para a cidade de Caxias do Sul. Este mapa apontou áreas suscetíveis a risco em 44 dos 65 bairros do município.

Alguns exemplos de deslizamento de terra em Caxias do Sul podem ser vistos nas figuras 29 a 31.



Figura 29. Estrada BR-116, bairro Vila Cristina, outubro/2000. Extraído de Bressani (2010b).



Figura 30. Deslizamento misto, em rocha descontínua, no bairro Kaiser. Extraído de Bressani (2013).

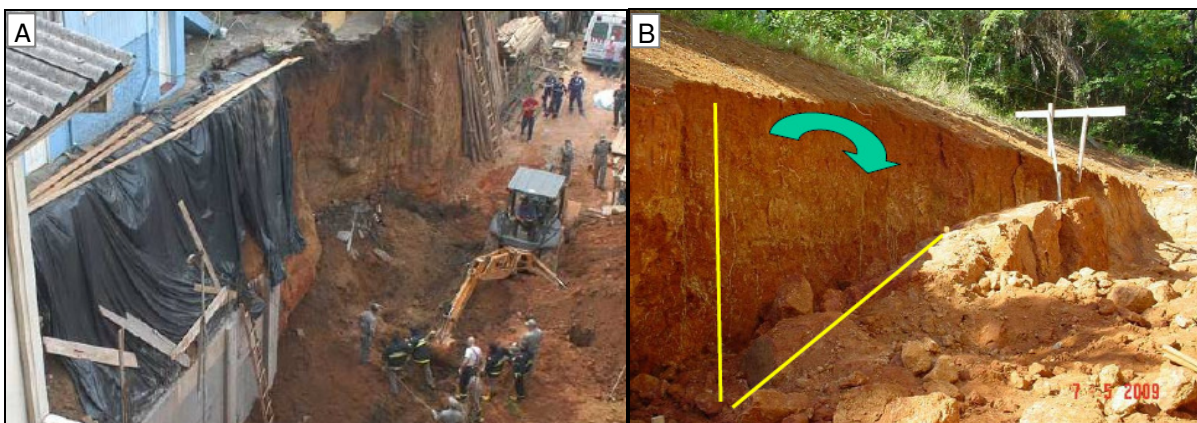


Figura 31. A) Deslizamento/queda da escavação urbana em área urbana em Caxias do Sul (outubro de 2009) - 2 mortes. B) Queda do solo em 3 trabalhadores (2 óbitos) - Abril de 2009. Extraído de Bressani (2010b).

6.3. Descrição climática e hidrográfica

Segundo o sistema Köppen, o Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada ou "C" e no tipo fundamental "Cf" ou temperado úmido. No Estado, o tipo "Cf" se subdivide em duas variedades específicas "Cfb" e "Cfa". A primeira variedade se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C e a temperatura média do mês mais frio entre -3°C a 18°C. A segunda variedade também apresenta chuvas durante todos os meses do ano, mas manifesta a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, enquanto que a temperatura média do mês mais frio mantém-se a mesma da primeira variedade (CAMARGO, 1991). Na subdivisão "Cfb", a simbologia "b" representa restrição do clima ao planalto basáltico superior e ao

escudo sul-rio-grandense, enquanto que a subdivisão "Cfa" a simbologia "a" retrata as demais áreas "Cf" (Figura 14).

No Rio Grande do Sul o valor de umidade relativa do ar é muito elevado, pois os valores médios variam de 75% a 85%. No verão e primavera os valores oscilam de 68% a 85%, já no outono e inverno estão entre 76% e 90%, sendo relativamente estável durante as diferentes estações do ano. A umidade relativa anual média na região de Caxias do Sul é de 79% (FEPAGRO, 2011).

A região na qual está inserido o Município de Caxias do Sul foi definida como Cfb, que corresponde a um clima do tipo temperado quente. A temperatura média anual é de 17,2°C, enquanto que a média anual das temperaturas máximas e mínimas são 28,9°C e 12,9°C, respectivamente. Contudo, a ocorrência de geadas severas é frequente, concentrando-se num período médio de ocorrência de 10 a 25 dias anualmente. A umidade relativa média anual está em 76%, enquanto que a insolação registrada está em cerca de 2.240 horas do total anual de brilho solar.

A precipitação média acumulada é de 1.915mm. O comportamento da média da precipitação histórica do município de Caxias do Sul mostra dois períodos de maior chuva, entre agosto e outubro, atingindo um valor ligeiramente superior a 170 mm e no mês de janeiro que apresenta uma quantidade de 150 mm (Figura 32).

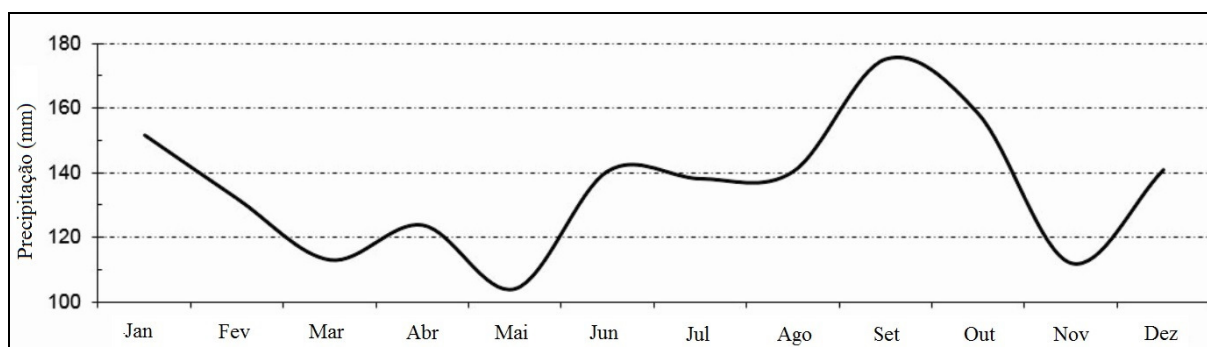


Figura 32. Precipitação mensal média de 1948 a 2004, com falha de 1979 a 1985. Fonte: Aeroporto Municipal de Caxias do Sul e FEPAGRO.

6.4. Descrição geológica

A região de Caxias do Sul está inserida na bacia intracratônica da província do Paraná, que contém o Grupo São Bento, constituído pelas unidades sedimentares das formações Guará e Botucatu, e o pacote vulcânico da Formação Serra Geral relacionado à abertura do Oceano

Atlântico Sul. As rochas vulcânicas toleíticas são representadas por basaltos a andesi-basaltos na sequência inferior e uma sequência ácida de riolitos a riodacitos na parte superior. Segundo Roisenberg e Viero (2000), estas rochas vulcânicas apresentam duas fácies, Palmas (afírica a levemente microporfirítica) e Chapecó (porfirítico), ambas formando camadas tabulares classificadas como ignimbritos (Figura 33).

Ambos os ignimbrites, Palmas e Chapecó, contêm microfenocristais e fenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio, imersos em uma matriz com intercrescimentos quartzo-feldspáticos. Micrólitos de plagioclásio, piroxênio, anfibólio e magnetita também aparecem na matriz da rocha. A região de Caxias do Sul é coberta principalmente por unidades ácidas do tipo Palmas, com uma espessura total de 300 m, enquanto os basaltos e andesi-basaltos ocorrem nos níveis mais baixos, ao longo dos vales, e raramente são intercalados com ignimbritos ácidos.

A análise de imagens de satélites em várias bandas permite demonstrar que a tectônica rígida da região é intensa, com lineamentos cuja direção predominante é NE-SW, sendo os lineamentos de NW-SE e E-W menos expressivos (BETIOLLO, 2006). Todos os lineamentos tectônicos verificados na área metropolitana de Caxias do Sul relacionam-se a eventos de natureza distensional e são ressaltados na disposição das redes de drenagem que ocorrem neles encaixadas e exibem quedas bruscas de curso. Estruturas representadas por lineamentos com orientação N40E estão relacionadas geneticamente com os padrões estruturais do Cinturão Móvel Dom Feliciano e com o sistema de falhas NE-SW (FRASCA; LISBOA, 1993). A Falha Caxias transpassa os limites da cidade, possuindo direção NNE/SSW e extensão aproximada de 70 km. Os lineamentos mapeados são, em geral, de pequeno porte, sendo observada uma estrutura de grande porte (Falha Caxias), que atravessa a cidade.

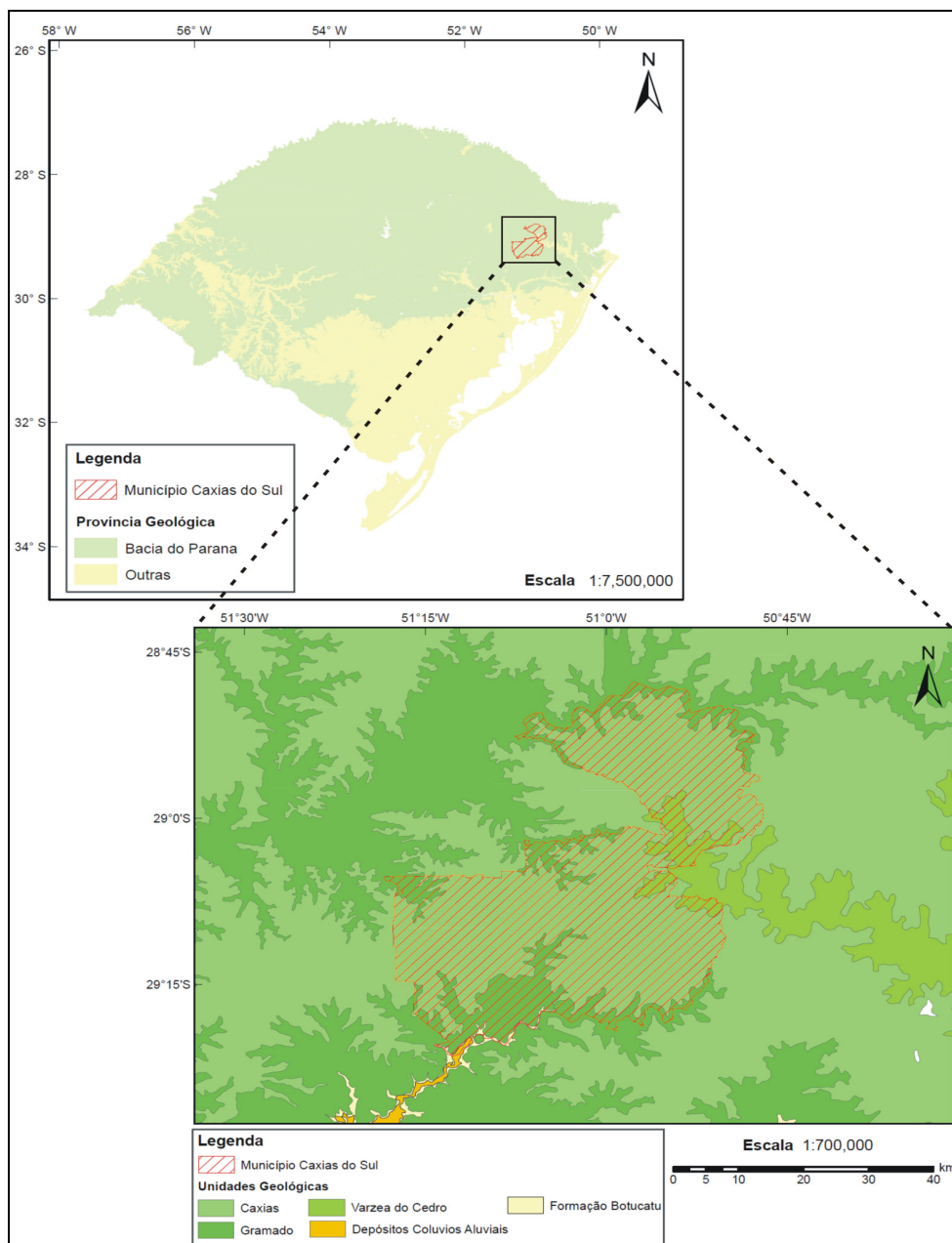


Figura 33. Mapa geológico da região de Caxias do Sul (VARGAS, 2016).

O estudo geológico-geotécnico da área urbana classificou as rochas ácidas Tipo Fácies Palmas como derrames dacíticos (BRESSANI *et al.*, 2004). Esse autor realizou mapeamento geológico, petrografia e análise química em amostras de rocha, segregando os derrames ácidos (Fácies Palmas) em quatro diferentes unidades. Analisando da base para o topo da sequência vulcânica ácida foram definidas as seguintes unidades: Dacito Galópolis, Dacito Canyon, Dacito Carijó e Dacito Ana Rech (Tabela 05).

Tabela 05. Coluna estratigráfica altimétrica das litologias que compõem o arcabouço geológico do Município de Caxias do Sul em que é indicada a espessura de cada unidade vulcânica e os respectivos solos derivados da alteração destas rochas. Modificado de Bressani *et al.* (2005).

Período	Idade (Ma)	Unidade Litoestratigráfica	Rochas		Espessura (metros)	Solos
Cretáceo Inferior	128	Formação Serra Geral	Tipo Caxias	Dacito Ana Rech	80	Ana Rech
				Dacito Caxias / Carijó	170	Forqueta Caxias/Carijó
				Dacito Canyon	70	Canyon
				Dacito Galópolis	70	Galópolis
			Basaltos e Andesi-basaltos Tipo Gramado		450	
Jurássico	138	Formação Botucatu	Arenito Eólico		160	

A estratigrafia da sequência ácida apresenta no topo vitrófiros de coloração preta e constituição mineralógica com fenocristais e micrdeenocristais de plagioclásio e piroxênio numa matriz vítrea (LISBOA *et al.* 2003). As áreas de maior ocorrência dessas rochas abrangem a zona rural do município, destacando-se o distrito de Criúva, e as localidades Ilhéus e São Jorge da Mulada. Segundo Lisboa *et al.* (op. cit), essas rochas são relativamente suscetíveis à alteração intempérica gerando solos do tipo latossolo amarelo e, normalmente, afloram acima da cota altimétrica 920 metros. Observando a correlação estratigráfica, em zona urbana, Bressani *et al.* (2005) caracterizou o Dacito Ana Rech, que demonstra marcada estratificação horizontalizada em toda a sua área de ocorrência e aflora na região administrativa de Ana Rech, atingindo a cota 900 metros.

A rocha classificada Dacito Carijó/Caxias por Bressani *et al.* (2005), manifesta coloração predominantemente cinza oliva clara e estrutura maciça ou bandamento de fluxo. Conforme Roisenberg e Viero (2000), as porções centrais desses derrames possuem tamanho de grão maior, consequência do maior tempo de cristalização, e mostram típica textura granofírica caracterizada pelo intercrescimento micrográfico de quartzo e sanidina associados ao plagioclásio, piroxênio e opacos. A porção inferior e superior dessa unidade litológica apresenta intenso diaclasamento tabular horizontal, subparalelo às estruturas de fluxo magmático, que ocasionalmente estão preenchidos por finas vênulas de quartzo, albita e zeolitas, enquanto que a porção central é maciça ou apresenta fraturamento vertical (Figuras 34 a 36).

Na área urbana de Caxias do Sul Bressani *et al.* (2005), descreve a zona maciça contendo 30 metros de espessura, e os estratos tabulares sub-horizontais na porção basal, conferindo espessura de 5 a 30 centímetros. Essas rochas são predominantemente afíricas,

constituídas de poucos fenocristais e microfenocristais de piroxênio, plagioclásio, opacos, com ou sem quartzo residual. No topo do derrame é observada a presença de zonas vesiculares e amigdalares centimétricas preenchidas por quartzo, calcita e eventualmente zeolitas. Em lâmina delgada identificou-se magnetita disseminada na matriz, e como inclusão nos fenocristais de plagioclásio e piroxênio. Os fenocristais de plagioclásio apresentam processo de ilitização e substituição por calcita, enquanto que os piroxênios expressão processo de cloritização e substituição por actinolita (ROISENBERG; VIERO, 2000).

O Dacito Carijó confere altimetria regional entre as cotas 750 e 920 metros. De acordo com Bressani *et al.* (2005), o topo deste dacito apresenta características vítreas tão importantes que recebeu a nomenclatura Vitrófiro Forqueta. Esses vulcanitos demonstram fluxo verticalizado, associação com autobrechas e presença abundante de vesículas e amígdalas nas porções mais superiores. Sua presença mais característica é na região administrativa de Forqueta, mas ocupa diversas áreas mais planificadas da cidade que são topos de erosão como a região do aeroporto. Devido à origem, as cotas de ocorrência acompanham as do Dacito Caxias/Carijó (BRESSANI *et al.*, 2005). Em específico na região de Caxias do Sul o vitrófiro possui variação altimétrica de 658 a 808 metros.

A unidade estratigráfica definida como Dacito Canyon normalmente ocorre entre as cotas altimétricas 680 e 750 metros. São rochas ácidas marcadas por estruturas tabulares, bandas com coloração variando de cinza escura a marrom-avermelhada, textura afírica, microfenocristais de plagioclásio e piroxênio, opacos e quartzo residual numa matriz a base de micrólitos dos mesmos minerais, além de vidro parcialmente recristalizado (LISBOA *et al.*, 2003; BRESSANI *et al.*, 2005). Localmente apresenta fraturas paralelas à laminação, preenchidas por calcedônia fibrosa e por carbonatos. Nos espaços intersticiais da matriz existem minerais opacos demonstrando hábito dendróide a acicular e oxidação total, esta última sendo responsável pela coloração avermelhada característica da rocha (BRESSANI *et al.*, 2005). Segundo Lisboa *et al.* (2003), a cor avermelhada da rocha provém de agregados de grãos de hematita finíssimos que substituem parcialmente ou integralmente a matriz (Figuras 37 a 39).

Na base da sequência dos derrames ácidos, abaixo da unidade de rochas vulcânicas avermelhadas observa-se novamente a sequência ácida cinza. Essa unidade possui características semelhantes a das ácidas cinza descritas anteriormente e classificadas como dacito Carijó/Caxias, na área urbana. Segundo Bressani *et al.* (2005), na região de Galópolis existem dois pacotes vulcânicos dacíticos que ocorrem de forma bem característica, porém os

mesmos foram agrupados numa unidade devido à semelhança de comportamento dos solos plásticos derivados e à declividade do local, sendo classificado como Dacito Galópolis (Figuras 40 e 41). Esse é individualizado por apresentar uma espessura da ordem de 70 metros, destacando-se o intervalo basal do vulcanito pela presença de vidro vulcânico característico (LISBOA *et al.*, 2003; BRESSANI *et al.*, 2004).



Figura 34. Alteração intempérica tipo esferoidal.



Figura 35. Dacito Carijó São.



Figura 36. Estrutura sub-horizontal Dacito Carijó.



Figura 37. Estrutura de fluxo vertical Dacito Canyon.



Figura 38. Estruturas de fluxo, amostra macro Canyon.



Figura 39. Dacito Canyon alterado, avermelhado.



Figura 40. Dacito Galópolis.



Figura 41. Estruturas sub-horizontais Dacito Galópolis.

6.5. Condições geotécnicas dos solos

A equipe de campo que realizou a avaliação geotécnica dos solos identificados na área urbana de Caxias do Sul, através do Contrato n.º. 2615.000386-97/2004 (prefeitura de Caxias do Sul), considerou aspectos como topografia, cor de materiais expostos, comportamento contra erosão hidráulica ou fenômenos de modelagem de terreno, afloramentos de água e mudanças na vegetação. A comparação de dados laboratoriais e observações de campo levou à caracterização de cinco tipos de solos na área urbana, que foram agrupados em cinco unidades geotécnicas principais (solos de Ana Rech, Forqueta, Caxias/Carijó, Canyon e Galópolis).

O Dacito Ana Rech apresenta um padrão mineralógico-estrutural que origina solos de características arenosas a granulares grosseiros. Este material encontra-se em regiões aplainadas, nas cotas mais altas (entre 780m e cerca de 900m). Isto favorece a drenagem e a oxidação, formando solos Bruno-amarelados com excelente resistência ao cisalhamento (BREISSANI *et al.*, 2005). Geralmente não apresenta problemas geotécnicos, exceto nas transições com o solo Forqueta posicionado imediatamente abaixo na topografia. Nestes casos, a topografia fica bastante íngreme e pode gerar situações de risco devido a relativa baixa resistência do material inferior.

São solos que tem uma textura grosseira com predominância da fração areia e silte (Figura 42). O solo denominado como Ana Rech é caracterizado como não-plástico e originado do Dacito Ana Rech. Incluem horizontes B incipientes e solos saprolíticos.

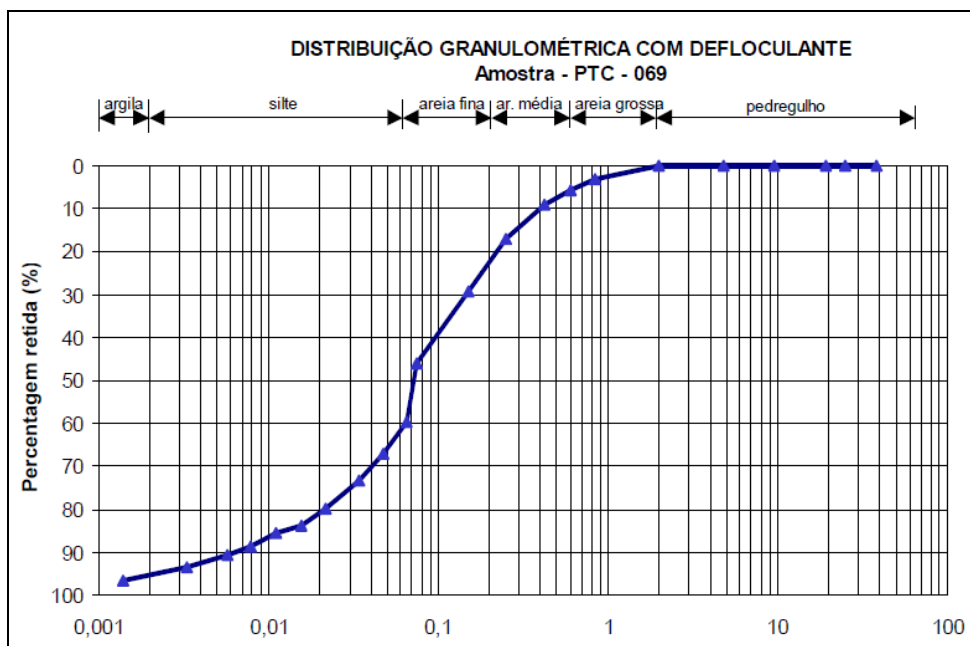


Figura 42. Curva de distribuição granulométrica de solo saprolítico de dacito com estrutura em estratos horizontalizados centimétricos a métricos do Bairro Ana Rech, cota 828m (Extraído de BRESSANI *et al.*, 2005).

O Dacito Caxias/Carijó apresenta na sua porção de topo uma estrutura diferenciada da parte mediana, identificadas como estruturas de fluxo similares às apresentadas pelo Dacito Canyon. Isto causa uma aceleração do intemperismo químico, levando à formação de um solo plástico. Nas zonas em que este material está no topo da região topográfica e há boa drenagem, desenvolvem-se solos espessos e com características mais evoluídas pedologicamente, por exemplo, na região do aeroporto, do bairro Desvio Rizzo e bairro Forqueta. São solos plásticos que podem evoluir para solos de média plasticidade, vermelhos com bandas de alteração e originados, na sua maioria, da porção superior vítrea do Dacito Caxias/Carijó (BRESSANI *et al.*, 2005). Este solo recebe o nome de Solo Forqueta.

O Solo Caxias/Carijó desenvolve-se a partir da porção mediana da rocha Dacito Caxias/Carijó, formando espessos pacotes de solo saprolítico, de características silto-arenosas e apresenta um bom comportamento geotécnico, sendo um bom material de construção. Sua granulometria apresenta-se bastante dependente do grau de intemperismo, podendo ter agregados frágeis de grãos. Este solo caracteriza-se como saprolítico pouco ou não-plástico, cinza a levemente avermelhado, com estruturas estratificadas horizontais geralmente bem visíveis, originados da alteração da porção mediana do Dacito Caxias/Carijó (BRESSANI *et al.*, 2005).

São considerados não-plásticos os solos provenientes do Dacito Caxias/Carijó que apresentam curva granulométrica variando de areia fina a média. Segundo Bressani *et al.* (op.

cit.), a granulometria identificada está refletida diretamente nos índices de plasticidade, já que todas as amostras ensaiadas demonstraram comportamento não-plástico (Figura 43).

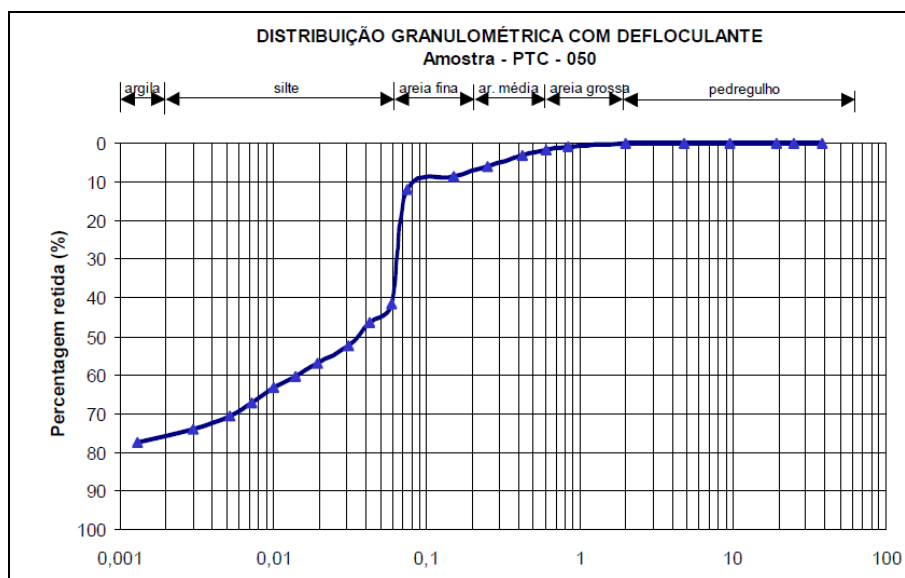


Figura 43. Curva de distribuição granulométrica de solo saprolítico de Dacito com estrutura em estratos horizontais centimétricos a métricos do Bairro Vila Lobos, cota 582m. (Extraído de BRESSANI *et al.*, 2005).

Observação: Exemplos de perfil do solo tipo Caxias/Carijó (Figuras 44 e 45).



Figura 44. Solo levemente avermelhado.



Figura 45. Estratificação marcada no solo.

O Solo Canyon caracteriza-se como plástico a muito plástico, de cor vermelha a bruno-avermelhada, ocorrendo em uma área extensa da região de Caxias do Sul. Este solo pode apresentar grande espessura e minerais argilosos de grande atividade, sendo propício a acidentes geotécnicos. Este solo pode conter argilas expansivas originadas da decomposição da espessa porção superior vítrea do Dacito Canyon (Figura 46).

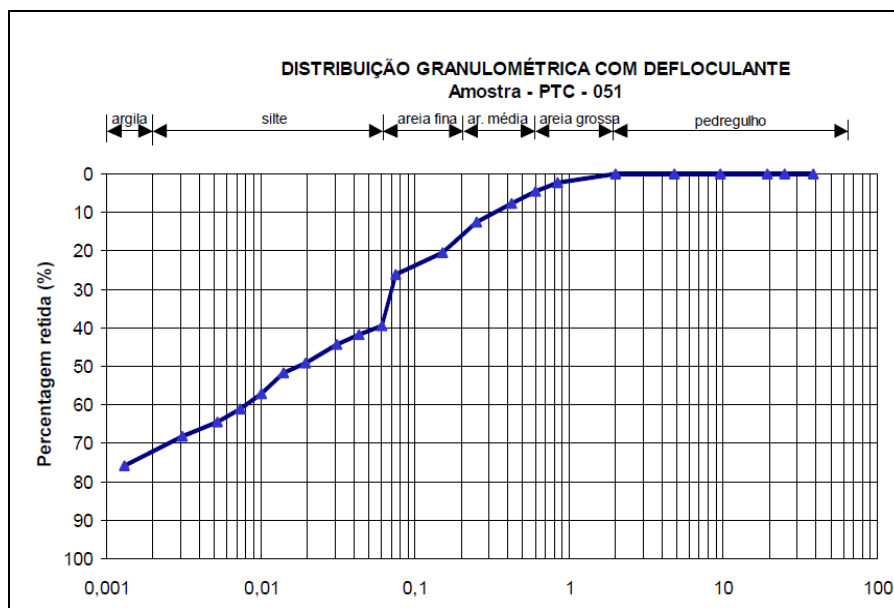


Figura 46. Curva de distribuição granulométrica de solo saprolítico de Dacito com estrutura de fluxo sub-vertical, do Bairro Vila Lobos, cota 654m. (Extraído de BRESSANI *et al.*, 2005).

Observação: Exemplos de perfil do solo tipo Canyon (Figura 47 e 48).



Figura 47. Solo com cor avermelhada.



Figura 48. Afloramento espesso do Solo Cânion.

Os solos do tipo Galópolis são geralmente encontrados em depósitos de encosta (ou colúvios) formados por escorregamento ou arraste de partículas de solo das cotas superiores para os níveis de deposição. Os dacitos presentes nos vales de cotas inferiores (470m a 600m) apresentam um grau de intemperismo acentuado devido a sua mineralogia especial, ou pelas condições favoráveis de umidade que ocorrem nestas regiões. São solos plásticos originados do Dacito Galópolis geralmente observados em mistura com materiais transportados de cotas superiores. Em planta baixa observa-se a presença de solos com horizonte B e solos saprolíticos em grande proximidade com depósitos de colúvios (BRESSANI *et al.*, 2005).

Observação: Exemplos de perfil do solo tipo Galópolis (Figuras 49 e 50).



Figura 49. Solo com presença de horizonte B.



Figura 50. Solo saprolítico próximo à área de colúvio.

6.5.1. Características geotécnicas dos solos saprolíticos

Observando as características geotécnicas dos solos saprolíticos presentes na área urbana do município de Caxias do Sul definiram-se dois tipos de materiais, plásticos e não-plásticos. De acordo com Bressani *et al.* (op. cit.), os solos plásticos conferindo porcentagem de argila entre 29 e 38%, contextualizando a granulometria tipo silte e argila entre 70 e 80%. Em relação à plasticidade os valores do Índice de Plasticidade (IP) variaram entre 18 e 22,5, enquanto que o Limite de Liquidez (LL) estão entre 58 e 71. Estes solos estão representados pelos tipos Forqueta, Canyon e Galópolis. De acordo com Bressani *et al.* (2005), a amostra PTC-050 apresenta um comportamento de transição típico entre um solo plástico evoluído pedologicamente e a rocha de origem alterada (saprolito). Com base no British Standard 5930 (1999 *apud* CRAIG, 2004), os dados de plasticidade do solo de rochas ácidas estão classificados abaixo (Tabela 06, Figura 51).

Tabela 06. Resumo dos resultados dos testes geotécnicos de material geotécnico 1 (Modificado de BRESSANI *et al.*, 2005).

Amostras	Granulometria (%)			Índices de plasticidade			Classificação
	Argila	Silte	Areia	LL	LP	IP	
PTC-031 (B.S.Catarina)	38	42	20	71	48,5	22,5	MV - SILT
PTC-033 (B.S.Gabriel)	36	29	35	58	37	21	MH - SILT
PTC-051 (Vila Lobos- B.S. Filho)	29	31	40	71	52,5	18,5	MV - SILT
PTC-062 (R.Forqueta)	-	-	-	66	48	18	MH - SILT
PTC-107 (B.S.Catarina)	-	-	-	68	45,5	22,5	MH - SILT
PTC-050 (Vila Lobos — S. Saprol.)	24	46	30	NP	NP	NP	-----

*NP = Não Plásticos

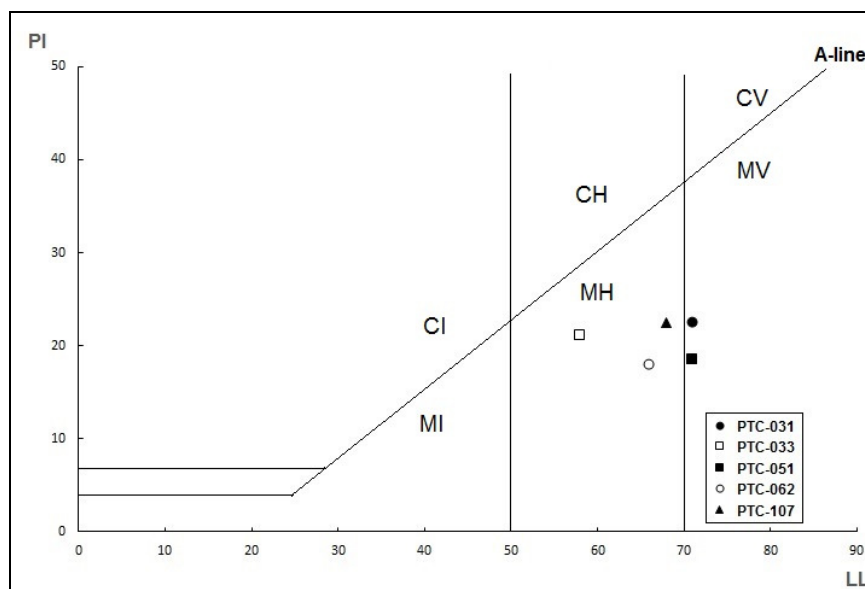


Figura 51. Carta de plasticidade para solos saprolíticos de material geotécnico 1 (Fonte: Tabela 06).

Um estudo realizado na formação geológica Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul avaliou as propriedades e o comportamento geotécnico dos solos saprolíticos formados a partir das rochas vulcânicas básicas e ácidas. Na região de Caxias do Sul, há predominância de rochas ácidas e uma das amostras do estudo foi coletada em Caxias do Sul, no bairro Kaiser. O local de coleta desta amostra de solo do saprólito tem uma área de 200 metros de comprimento e 30 metros de altura, em coordenadas geográficas $29^{\circ}11'00,8''S/51^{\circ}11'32,8''W$ e altimetria de 715 metros. Esta área teve um movimento devido a descontinuidades com inclinações desfavoráveis, que são preenchidas por argila vermelha que controla o comportamento mecânico (Figuras 52 a 55 extraídas de RIGO, 2005). Rigo (2005) estudou o comportamento geotécnico do solo saprolítico (Kaiser SS) e a argila vermelha (Kaiser AV) observada no bairro Kaiser. Este autor caracterizou o solo amostrado como uma matriz argilosa com alguns minerais e pseudomorfoses imersas.

De acordo com Azambuja *et al.* (2001), a área amostrada no bairro Kaiser possui 3 diferentes planos de descontinuidade F_1 , F_2 e F_3 . A direção do mergulho F_1 é predominantemente Sul e com inclinação suave, enquanto que os planos F_2 e F_3 são controlados pelas tectônicas regionais com orientações Nordeste e Noroeste, respectivamente. O plano de descontinuidade F_3 facilita a entrada de água na massa de rocha e o plano F_1 está diretamente associado ao movimento do talude que ocorreu na área (AZAMBUJA *et al.*, 2001).



Figura 52. Área estudada.



Figura 53. Ponto de amostragem.

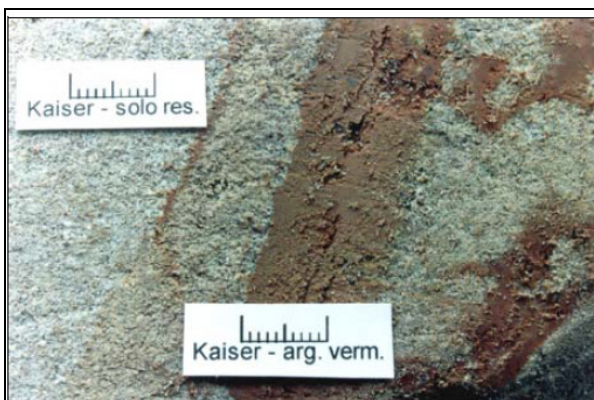


Figura 54. Textura Kaiser SS e AV.



Figura 55. Textura Kaiser AV, no plano de ruptura.

A caracterização geotécnica mostrou índices físicos, e limites de consistência e atividade dos saprólitos analisados em rochas ácidas, incluindo o bairro Kaiser. Na tabela 07 são demonstrados os valores dos índices físicos observados nas amostras de Caxias do Sul (Kaiser SS e Kaiser AV) e são demonstradas as demais amostras coletadas em rochas ácidas na região da Formação Serra Geral. Os valores dos índices físicos para o peso específico real de grão observado nas amostras Kaiser SS e Kaiser AV foram 26,68 e 26,16 (γ_s – KN/m³), respectivamente. Os outros índices foram realizados apenas para a amostra Kaiser SS, apresentando peso específico aparente úmido médio de 16,42 (γ_t – KN/m³) e porosidade média de 52,38 (n-%).

Tabela 07. Índices físicos das amostras de solo de rochas ácidas (Extraído de RIGO, 2005).

ÍNDICE	Kaiser SS			Kaiser AV			km 51+400 Riolito			km 51+400 Riodacito			km 51+400 Dacito		
	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd
Peso específico real dos grãos (γ_s – KN/m ³)	26,68	-	26,68	26,16	-	26,16	26,40	-	26,40	26,54	-	26,54	26,78	-	26,78
Densidade real dos grãos (G)	2,72	-	2,72	2,67	-	2,67	2,69	-	2,69	2,71	-	2,71	2,73	-	2,73
Peso específico aparente úmido (γ_t – KN/m ³)	15,43	18,44	16,42	-	-	-	16,60	17,00	16,84	15,40	16,05	15,67	14,41	15,90	15,30
Peso específico aparente seco (γ_d – KN/m ³)	11,91	14,56	12,94	-	-	-	11,26	11,69	11,47	9,96	10,81	10,35	8,89	11,31	9,93
Teor de umidade (w - %)	22,84	29,61	27,02	-	-	-	45,22	49,15	46,82	48,33	55,50	51,54	40,65	62,89	54,58
Grau de saturação (S - %)	59,65	83,52	67,11	-	-	-	91,47	98,40	94,03	82,44	90,56	86,68	78,44	90,90	84,70
Índice de vazios (e)	0,87	1,29	1,10	-	-	-	1,29	1,39	1,34	1,46	1,72	1,61	1,41	2,07	1,76
Porosidade (n - %)	46,52	56,33	52,38	-	-	-	56,33	58,16	57,26	59,35	63,24	61,69	58,51	67,43	63,77

De acordo com Rigo (2005), a amostra Kaiser SS não demonstrou plasticidade e foi classificada como ML (Silte arenoso). No entanto, a amostra Kaiser AV apresentou valores do Índice de plasticidade (IP) de 42, Limite de liquidez (LL) de 87 e Limite de plasticidade (LP) de 45, sendo classificados como MH (Silte elástico com areia). A granulometria da amostra Kaiser SS mostrou predominância de silte e areia, enquanto que o Kaiser AV predominou a argila. Os limites de consistência, atividade e a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solo (USCS), das outras amostras são mostrados abaixo (Tabela 08 e Figura 56).

Tabela 08. Limites de consistência e atividade (Extraído e modificado de Rigo, 2005).

SOIL	LL	PL	PI	A	CLASSIFICATION
Kaiser SS	-	-	NP	-	ML – Sandy silt
Kaiser AV	87	45	42	0,69	MH – Elastic silt with sand
km 51+400 Rhyolite	59	42	17	3,40	MH – Elastic silt with sand
km 51+400 Rhyodacite	58	45	13	1,63	MH – Sandy elastic silt
km 51+400 Dacite	58	39	19	1,27	MH – Sandy elastic silt

*NP = Não plástico

A = Atividade

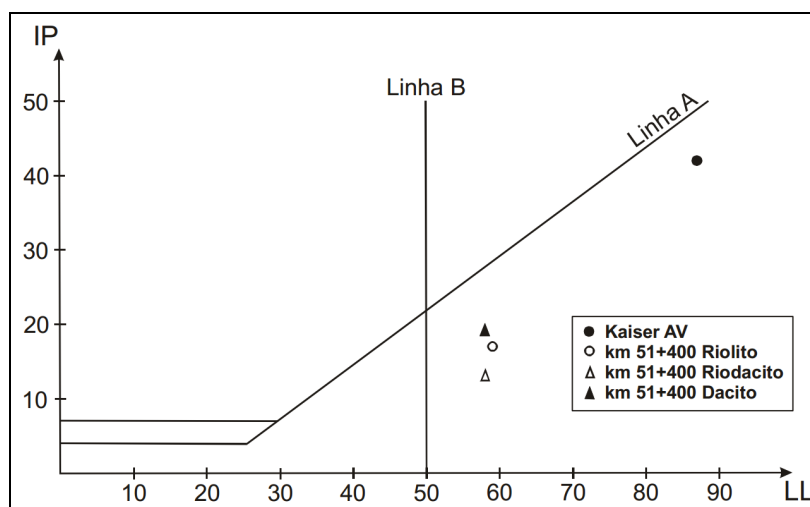


Figura 56. Carta de plasticidade para solos do saprolito de rochas ácidas (Extraído de RIGO, 2005).

A granulometria de amostras de rochas ácidas foi analisada com defloculante e sem defloculante (Tabela 09).

Tabela 09. Classificação granulométrica de amostras de solo de rochas ácidas (Extraído de RIGO, 2005).

SOLO	FRAÇÃO	SÉRIES GR1		SÉRIES GR2	
		Sem defloc.	Com defloc.	Sem defloc.	Com defloc.
		(%)	(%)	(%)	(%)
Kaiser SS	Areia	24	28	48	48
	Silte	76	65	52	45
	Argila	0	7	0	7
Kaiser AV	Areia	8	7	16	16
	Silte	92	32	84	23
	Argila	0	61	0	61
km 51+400 Riolito	Areia	7	7	18	18
	Silte	93	88	82	77
	Argila	0	5	0	5
km 51+400 Riodacito	Cascalho	1	1	1	1
	Areia	25	25	37	37
	Silte	74	66	62	54
	Argila	0	8	0	8
km 51+400 Dacito	Cascalho	8	8	8	8
	Areia	8	9	24	24
	Silte	84	68	68	53
	Argila	0	15	0	15

Os solos não-plásticos apresentaram resultados homogêneos entre eles, com granulometria de solo-arenoso ou ligeiramente arenoso. Estes foram observados na porção do meio do Dacito Caxias/Carijó e Dacito Ana Rech. Esses materiais apresentam uma textura arenosa ou bastante arenosa, demonstrando uma predominância de frações granulométricas variando de areia fina a média (BRESSANI *et al.*, 2005). A tabela 10 mostra os valores de granulometria observados em algumas amostras de solos não-plásticos.

Tabela 10. Resumo dos resultados do teste geotécnico do material geotécnico 2 (Extraído de BRESSANI *et al.*, 2005).

Amostra	Granulometria (%)			Índices de Plasticidade	
	Argila	Silte	Areia	LL	IP
PTC-069	05	45	50	NP	NP
PTC-045	08	16	76	NP	NP
PTC-154	-	-	-	NP	NP
PTC-071	-	-	-	NP	NP
PTC-101	-	-	-	NP	NP

* NP = Não Plástico

Nas amostras estudadas por Rigo (2005), foram realizados testes de cisalhamento (Reversões Múltiplas - CDRM e CDI) e Ring Shear para determinar o ângulo de fricção (Tabela 11 a 13).

Tabela 11. Parâmetros de força de cisalhamento de pico e residual do solo Kaiser SS. Metodologia CDRM (Extraído RIGO, 2005).

SOLO	ENVOLTÓRIA	EQUAÇÃO	ϕ' (°)	c' (kPa)
Kaiser SS	Envoltória de pico (única)	$\tau = 0,697. \sigma'_n + 52,3$ ($R^2=0,976718$)	34,9	52,3
	Envoltória residual (única)	$\tau = 0,560. \sigma'_n + 32,7$ ($R^2=0,983848$)	29,3	32,7
	Envoltória de pico (bilinear)	$\tau = 1,066. \sigma'_n + 6,9$ ($R^2=0,9805$)	46,8	6,9
	$\sigma'_n = 0$ a 180 kPa $\sigma'_n = 180$ a 600 kPa	$\tau = 0,612. \sigma'_n + 89,7$ ($R^2=0,999979$)	31,5	89,7
	Envoltória residual (bilinear)	$\tau = 0,996. \sigma'_n$ ($R^2=0,999956$)	44,9	0,0
	$\sigma'_n = 0$ a 80 kPa $\sigma'_n = 80$ a 600 kPa	$\tau = 0,544. \sigma'_n + 39,3$ ($R^2=0,982722$)	28,6	39,3

Tabela 12. Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual dos solos Kaiser SS e AV. Metodologia CDI (Extraído de RIGO, 2005).

SOLO	ENVOLTÓRIA	EQUAÇÃO	ϕ' (graus)	c' (KPa)
Kaiser SS	Melhor ajuste aos pontos experimentais passando pela origem	$\tau = 0,450 \cdot \sigma'_n$ ($R^2=0,997035$)	24,2	-
Kaiser AV	Melhor ajuste aos pontos experimentais	$\tau = 0,315 \cdot \sigma'_n + 6,7$ ($R^2=0,996886$)	17,5	6,7
	Passando pela origem	$\tau = 0,332 \cdot \sigma'_n$ ($R^2=0,997418$)	18,4	-

Tabela 13. Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual dos solos Kaiser SS e AV. Metodologia de Ring Shear (Extraído de RIGO, 2005).

SOLO	ENVOLTÓRIA	EQUAÇÃO	ϕ' (graus)	c' (KPa)
Kaiser SS	Melhor ajuste aos pontos experimentais	$\tau = 0,497 \cdot \sigma'_n + 6,5$ ($R^2=0,999096$)	26,4	6,5
	Passando pela origem	$\tau = 0,513 \cdot \sigma'_n$ ($R^2=0,99908$)	27,2	-
Kaiser AV	Melhor ajuste aos pontos experimentais	$\tau = 0,313 \cdot \sigma'_n + 9,0$ ($R^2=0,998484$)	17,4	9,0
	Passando pela origem	$\tau = 0,334 \cdot \sigma'_n$ ($R^2=0,996224$)	18,5	-

7. TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa mais comuns no Brasil foram identificados por Filho e Wolle (1996), sendo estes os processos de rastejo, deslizamentos, quedas e fluxos. Os deslizamentos de terra podem ser classificados como tipos translacionais ou planares, circulares ou rotacionais e cunha. Enquanto que os processos do tipo queda podem ser identificados como queda de blocos, tombamento de blocos e deslocamento.

Segundo Brasil (2004), escorregamentos translacionais em solo ocorrem com frequência nas encostas serranas brasileiras, onde predomina solos pouco desenvolvidos e altas declividades, e pode ser associado a solos saprolíticos, saprolitos e rocha, condicionados por um plano de fraqueza desfavorável à estabilidade, relacionado a estruturas geológicas diversas. Já, os movimentos de queda envolvem volumes pequenos de rocha, associados a encostas íngremes, abruptas ou taludes de escavação, tais como, cortes em rocha e frente da lavra (BRASIL, 2004).

Na cidade de Caxias do Sul não existem muitos registros identificando os tipos de movimentos de massa ocorridos nos acidentes geotécnicos. No entanto, avaliações pontuais realizadas para a prefeitura municipal indicam predominância do processo de escorregamento translacional e de forma subordinada o movimento de queda (rochas fraturadas com padrão conjugado), rolamentos (blocos de rochas envolvidas por solos), tombamento (estruturas colunares) e cunhas (Figura 57).

Azambuja *et al.* (2001), classificaram dois casos representativos de movimentos de massa em Caxias do Sul. O primeiro foi identificado como movimento translacional conjugado de um maciço rochoso segundo um plano de descontinuidade, que ocorreu no saprólito refletindo danos em uma escola, sete casas, no sistema viário e também o desalojamento de trinta famílias. Este movimento estava acontecendo a quatro anos e ocorreu aumento da velocidade de deslizamento no período de elevação da precipitação (AZAMBUJA *et al.*, 2001). O Segundo caso foi reconhecido como tombamento de blocos, decorrente do alívio de tensões laterais na encosta. O tombamento de blocos ocorreu na parte mediana e superior do talude, que apresentam solos saprolíticos e porções de rocha mais íntegras na forma de blocos (AZAMBUJA *et al.*, 2001). Outros estudos pontuais foram realizados na área urbana e identificaram a ocorrência de instabilização por rolamento e queda de blocos em talude (PONTEL *et al.*, 2013; BAIOTTO *et al.*, 2015).

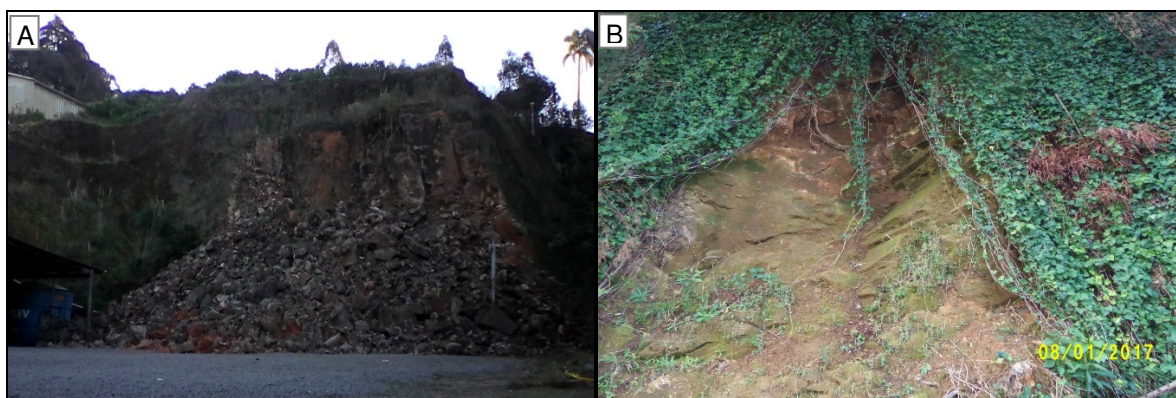


Figura 57. A) Tipo tombamento de blocos. B) Tipo cunha (Fonte: GEOL. FERNANDO EDUARDO BOFF).

8. MEDIDAS ADOTADAS

A cidade de Caxias do Sul realizou a setorização das áreas de risco na área urbana no ano de 2006 (PROFIL, 2006). No entanto, efetivou somente uma fração das medidas recomendadas no relatório referente a setorização das áreas de risco. Do ano de 2006 até o presente momento ocorreu a expansão urbana do município e consequentemente o aumento da população nas áreas de risco que já haviam sido identificadas, e em novas áreas. Normalmente este avanço em áreas com suscetibilidade a desastres naturais, ocorrem em loteamentos irregulares, sem infraestrutura mínima.

A elaboração do mapa de risco da cidade considerou as nomenclaturas Áreas de Risco (área suscetível a processos destrutivos) e Setor de Risco (subárea dentro de uma área de risco, compreendendo uma subdivisão de acordo com o tipo de risco). A avaliação do Risco geotécnico levou em consideração o tipo de solo e a inclinação do terreno. Os parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento dos solos da região (Ana Rech, Forqueta, Caxias/Carijó, Canyon e Galópolis) foram determinados (Tabela 14) com base na bibliografia de ensaios realizados na região de Caxias do Sul (RIGO, 2005; PERAZZOLLO, 2003; BRESSANI *et al.*, 2001; AZAMBUJA *et al.*, 2001; SOARES *et al.*, 2001, PINHEIRO *et al.*, 1997; ABRAMENTO; PINTO, 1993).

Tabela 14 - Análise estatística dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de alguns solos da Formação Serra Geral (Extraído e modificado de PROFIL, 2006).

Serará (Extraído e modificado de FROHL, 2008).					
Tipo de Solo	Parâmetros Estimados				Classificação
	ϕ' (°)		c' (kPa)		
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Galópolis	19	10	15	10	Plástico - Silte
Ana Rech and Caxias Carijó	33	9	30	25	Não Plástico
Canyon and Forqueta	20	12	7	7	Plástico - Silte

A determinação das declividades críticas foi realizada com base em análises paramétricas de estabilidade de taludes. Para um talude de 20 metros de altura, era variada a inclinação da face e determinado o fator de segurança mínimo a ruptura. A altura do talude utilizado no modelo (20m) foi escolhida por duas razões: (i) por representar a altura de taludes que ocorrem com frequência no município de Caxias do Sul e (ii) devido à precisão da altimetria fornecida para realização do trabalho (com curvas de nível a cada 2m) (PROFIL, 2006).

Para considerar a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, conforme apresentado acima (Tabela 14), foi utilizado o método probabilístico de Monte Carlo, que consiste em aplicar a variação dos parâmetros na análise da superfície de ruptura crítica. Nestas análises, foi adicionado ainda o efeito da poro-pressão, por meio do parâmetro de poro-pressão Ru_1 , cujo valor médio adotado foi de 0,1, com desvio padrão de 0,1. O produto gerado pelas análises consistiu em curvas de probabilidade de ruptura versus inclinação do talude para cada tipo de solo, como demonstra a Figura 58 (PROFIL, 2006).

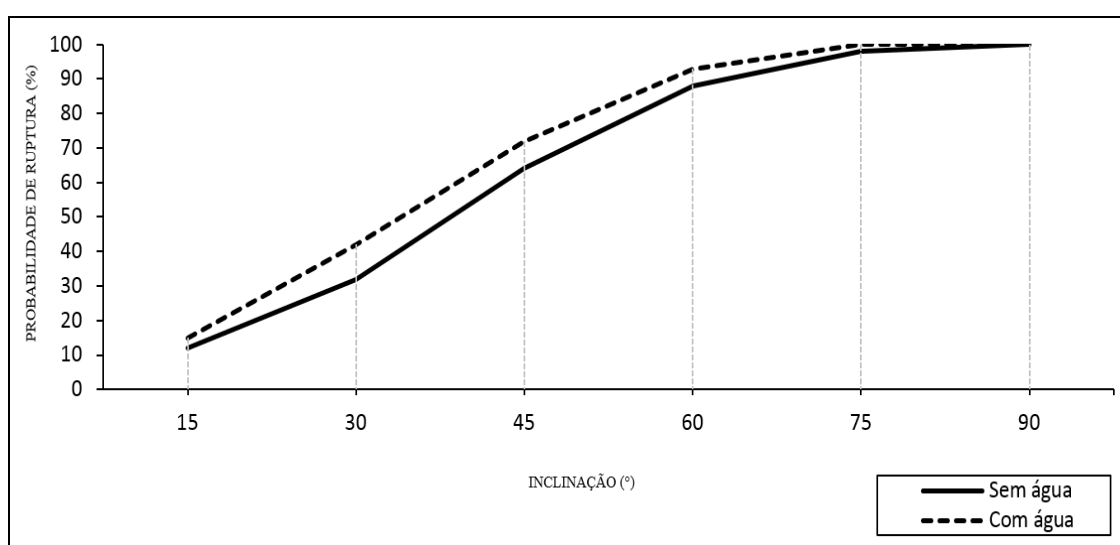


Figura 58. Gráfico da variação da probabilidade de ruptura pela inclinação do terreno para o grupo de parâmetros adotados para o solo Galópolis. (Extraído de PROFIL, 2006).

Três categorias de inclinações foram definidas:

- (i) Alta: inclinação acima da qual existe probabilidade de ruptura maior ou igual a 50% para o talude utilizado no modelo.
- (ii) Média: intervalo de inclinação correspondente ao intervalo entre 25% e 50% de probabilidade de ruptura para o talude utilizado no modelo.
- (iii) Baixa: inclinação abaixo da qual há probabilidade de ruptura menor ou igual a 25%.

Os níveis de inclinação críticos obtidos, para cada tipo de solo, são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Níveis de inclinação críticos para taludes de 20 m de altura de acordo com o tipo de solo (Extraído de PROFIL, 2006).

Tipo de Solo	Nível de Inclinação do Talude		
	Baixo	Médio	Alto
Galópolis	< 20°	20° - 35°	> 35°
Ana Rech and Caxias Carijó	< 45°	45° - 65°	> 65°
Canyon and Forqueta	< 17°	17° - 30°	> 30°

Este trabalho também considerou o histórico de ocorrências de deslizamento e a verificação de 345 pontos em campo. A indicação dos setores de risco (Graus de probabilidade para risco de escorregamento) foi baseada na metodologia do Ministério das Cidades. Após a setorização de risco foi realizada a hierarquização dos setores de risco em relação ao seu Risco Efetivo, para indicar os quarenta setores de maior risco efetivo.

Depois de delimitados os setores de risco e avaliados quanto ao grau de probabilidade de ocorrência de risco, que é a suscetibilidade de ocorrência de determinado evento, foram determinadas as consequências potenciais da ocorrência dos eventos em cada setor de risco. Para este trabalho, as consequências potenciais foram determinadas de acordo com os três níveis, conforme apresentado abaixo:

- **Nível alto:** o processo destrutivo afeta mais de 15 habitações ou afeta severamente a infra-estrutura urbana implantada;
- **Nível médio:** o processo destrutivo afeta de 5 a 15 habitações ou afeta moderadamente a infra-estrutura urbana implantada;
- **Nível baixo:** o processo destrutivo afeta de 1 a 5 habitações ou afeta de forma pouco significativa a infra-estrutura urbana implantada.

O Risco Efetivo consiste no cruzamento de informações sobre o grau de probabilidade de ocorrência de determinado evento e as consequências potenciais geradas por este evento. A determinação do risco efetivo é realizada com o cruzamento apresentado no quadro 3.5, que define uma escala de risco efetivo entre 1 e 12, sendo 12 o maior risco e 1 o menor risco (Tabela 16).

Tabela 16 – Determinação do risco efetivo (Extraído de PROFIL, 2006).

Graus de Probabilidade	Consequências Potenciais	Risco Efetivo
R1	Baixo	1
	Médio	2
	Alto	3
R2	Baixo	4
	Médio	5
	Alto	6
R3	Baixo	7
	Médio	8
	Alto	9
R4	Baixo	10
	Médio	11
	Alto	12

A hierarquia dos setores de risco identificou 184 áreas dentro do perímetro urbano de Caxias do Sul, sujeitas a deslizamentos de terra e eventos de inundação, dos quais 163 foram considerados como risco por deslizamento de terra, 20 por inundação e 1 sujeito a ocorrer os dois tipos de eventos (PROFIL, 2006). Observa-se que o nível de risco 6 é o mais representativo (43 áreas), enquanto que o risco 12 (mais elevado) está presente em 13 áreas. Abaixo está representado um gráfico com a quantidade de áreas correspondente a cada nível de risco efetivo (Figura 59).

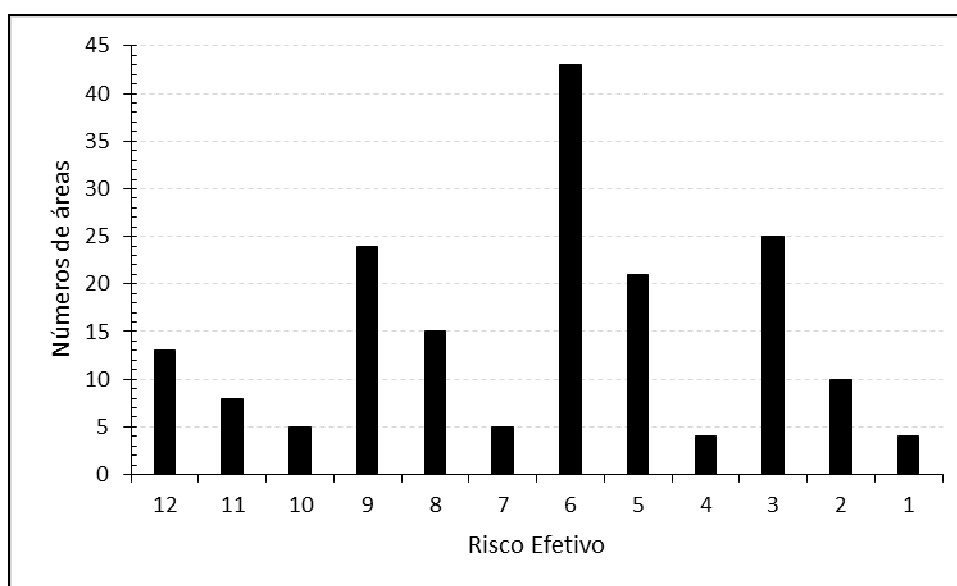


Figura 59. Demonstrativo do número de áreas identificadas para cada risco efetivo.

9. MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA (FS)

As encostas de terra podem ser naturais ou construídas. As encostas naturais são aquelas que são formadas por causas naturais e normalmente estão presentes em áreas de relevo acentuado, por exemplo regiões montanhosas. Os cortes de taludes e aterros construídos para estradas, linhas ferroviárias, canais e barragens são exemplos de taludes artificiais (MURTHY, 2002). Estas encostas podem ser definidas como inclinações infinitas ou finitas. O termo inclinação infinita é usado para designar uma inclinação constante de extensão infinita, enquanto as inclinações finitas são limitadas em extensão. As encostas de aterros e barragens são exemplos de taludes finitos. A estabilidade da inclinação é uma consideração extremamente importante porque a desestabilização do talude pode ser catastrófica, envolvendo a perda de propriedades consideráveis e muitas vidas (MURTHY, 2002).

Os fatores que causam instabilidade em uma inclinação e levam à falha do talude são a força gravitacional, a poro-pressão devido à infiltração de água, erosão da superfície das encostas devido à água corrente, a subida súbita da água adjacente a uma inclinação e forças devido a terremotos (MURTHY, 2002). Para entender a estabilidade de uma encosta podem ser realizadas algumas análises em amostras para determinar a coesão e o ângulo de fricção interno, além dos índices físicos do solo.

O Fator de Segurança (FS) é um importante método determinista de avaliação da estabilidade de taludes. O FS mensura a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Em geral, as análises são realizadas comparando-se as tensões cisalhantes mobilizadas com resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2008). Com isso define-se o FS da seguinte forma:

$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = 1$	FS > 1,0 ⇒ obra estável FS = 1,0 ⇒ ocorre a ruptura por escorregamento FS < 1,0 ⇒ não tem significado físico
--------------------------------------	---

A modelagem do FS construída neste relatório aplicou a metodologia de talude natural infinito em solo argiloso saturado para simular o comportamento da estabilidade de encosta com o tipo de solo Kaiser SS. O objetivo desta modelagem é demonstrar os diferentes FS

observados devido a variação dos ângulos de inclinação e espessura do talude, e principalmente devido a observação dos diferentes valores do ângulo de atrito (ϕ) e intercepto coesivo (c') obtidos pela aplicação de múltiplas técnicas executadas por Rigo (2005), conforme demonstrado no subitem 6.5.1. A fórmula utilizada para determinação do FS segue abaixo:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} \cdot h \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\gamma' \cdot \tan \phi}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta}$$

Onde: c' = intercepto coesivo, γ_{sat} = unidade de peso do solo saturado, h = altura do talude, β = ângulo do talude, γ' = unidade efetiva de peso do solo (submerso), ϕ = ângulo de atrito, $\cos$ = cosseno, $\tan$ = tangente. Para a obtenção do γ_{sat} foram aplicados valores médios (Tabela 07)

obtidos por Rigo (2005), utilizando a fórmula $\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e}$, onde $\gamma_s = 26,68$, $e = 1,1$, $\gamma_w =$

9,81, enquanto que para obtenção de γ' aplica-se a equação $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ou $\frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$.

Os gráficos que serão discutidos estão modelando os FS de quatro diferentes ângulos de inclinação (17, 25, 30 e 45) em relação ao aumento da altura do talude (de 1 a 30 metros). Os ângulos de inclinação foram determinados, em parte, com base nas porcentagens de inclinação constante no Termo de Referência para Licença Prévia de Obras Cíveis em Geral (CÓD. TR08) da Secretaria Municipal do Meio Ambiente – SEMMA. A inclinação de 17° representa 30% e o ângulo de 45° será equivalente a 100% de inclinação, foram escolhidos estes ângulos para ter uma correlação com a realidade dos licenciamentos realizados no município.

Dentre as metodologias aplicadas por Rigo (2005), foram selecionados os resultados obtidos através dos ensaios de Cisalhamento Direto (CDRM) e Ring Shear. Este autor faz uma discussão detalhada sobre os valores identificados nos testes, relatando as possíveis interpretações sobre o comportamento mecânico do solo analisado.

A figura 60 mostra que todos os gráficos apresentam redução do FS com o aumento do ângulo de inclinação e da elevação da altura do talude. O valor 1 do FS está marcado por uma linha contínua para identificar o momento em que o talude torna-se inseguro na modelagem, $FS = 1$ ou $FS < 0$. Na figura 60A é possível visualizar que a inclinação de 45° é instável em

todas as alturas, já os ângulos de 25° e 30° apresentam $FS > 1$ até 2 m e 1,7m, respectivamente. Desta forma, a inclinação de 17° demonstrou estabilidade até a altura de 5 metros do talude. Os valores do FS observados na figura 60A foram baseados nos resultados obtidos na aplicação do método Ring Shear (residual), quando comparados aos valores do método CDRM (residual único e bilinear), nas Figuras 60B e 60C, demonstram um maior conservadorismo.

Dentre os gráficos gerados com resultados oriundos da metodologia de CDRM (pico), observa-se que a figura 60E apresenta um comportamento diferenciado em relação às figuras 60D e 60F. A figura 60E demonstra valores iniciais do FS menores, porém sem queda abrupta com o aumento da altura do talude. Também, observa-se que os ângulos de 17° e 25° mantem-se com valores do $FS > 1$ até a altura de 30 metros, enquanto que os gráficos das figuras 60D e 60F apresentam uma diminuição acentuada do FS até aos 15 metros de altura do talude, onde somente a inclinação de 17° mantém o $FS > 1$. O comportamento do gráfico na figura 60E, em relação aos outros dois gráficos, pode estar relacionado aos valores de tensão aplicados. Segundo Rigo (2005), verificou-se uma menor redução de resistência ao cisalhamento com o aumento dos deslocamentos que ocorre nos ensaios com tensões normais inferiores a 150 KPa, enquanto que tensões normais superiores a 150 KPa a redução de resistência ao cisalhamento entre o fim do primeiro e último estágio de cisalhamento é maior.

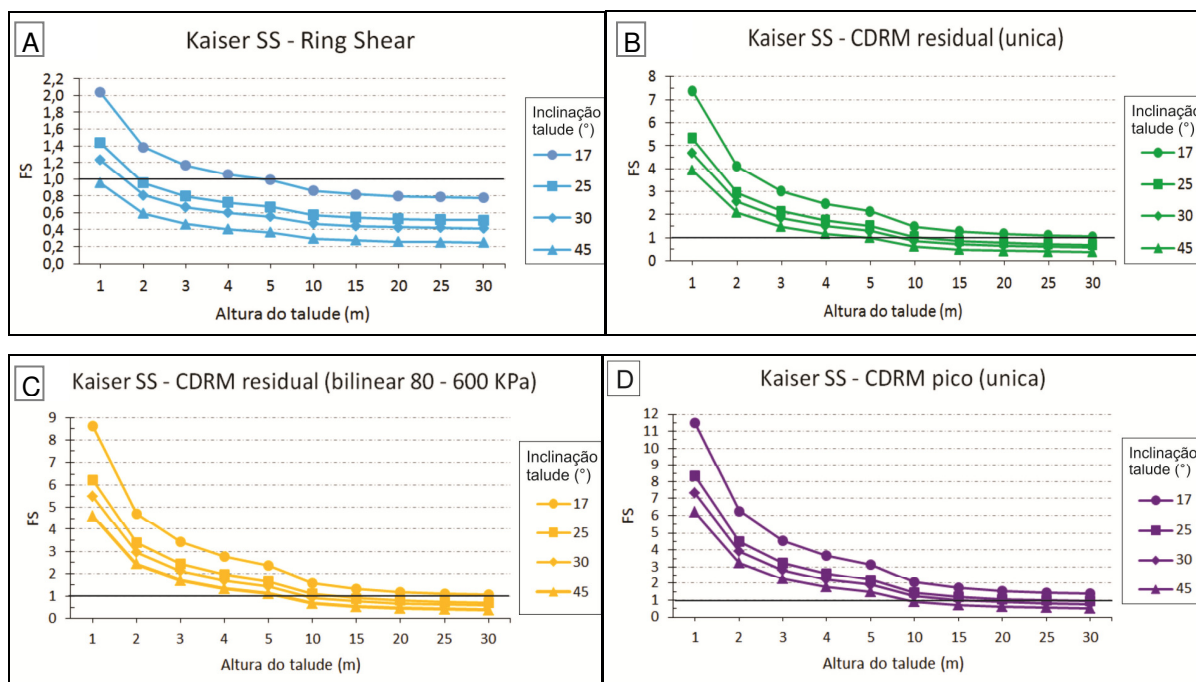


Figura 60. Comparativo do FS no solo Kaiser utilizando diferentes ângulos de inclinação e alturas do talude.

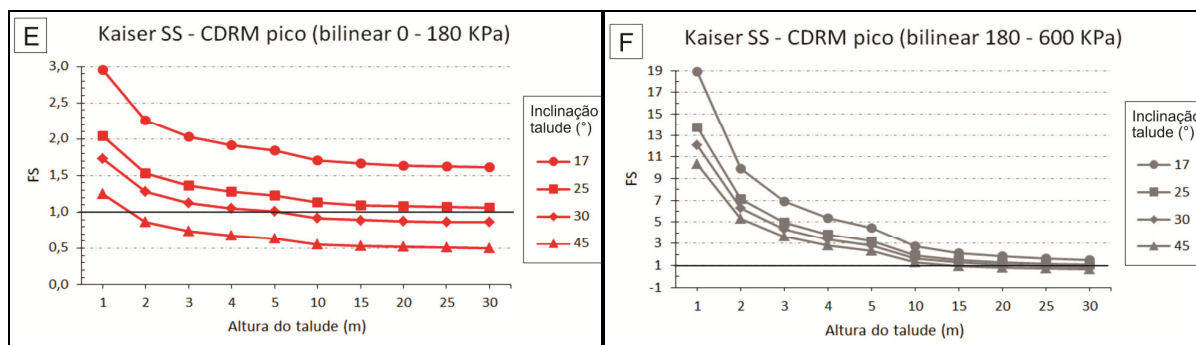


Figura 60. Comparativo do FS no solo Kaiser utilizando diferentes ângulos de inclinação e alturas do talude (Continuação).

Abaixo seguem gráficos comparativos entre as técnicas de Ring Shear (RS) e Cisalhamento Direto (CDRM) demonstrando o comportamento do FS em relação a altura do talude, aplicando o mesmo ângulo de inclinação (Figura 61). Todos os gráficos mostram a mesma hierarquia entre as diferentes técnicas, apresentam o método de Ring Shear com valores de FS mais restritivo, enquanto o método de CDRM (pico 180 – 600 KPa) demonstra FS menos conservadores. Observa-se na sequência dos gráficos que ao aumentar o ângulo de inclinação do talude, todas as metodologias apresentam o mesmo comportamento de redução da altura do talude no momento de intercepto do FS = 1 (Figura 61). Ringo (2005), realizou uma análise comparativa entre os métodos RS e CDRM para os resultados de resistência residual na amostra do solo Kaiser SS. Este autor verificou que os ensaios de CDRM possuem os maiores valores de resistência residual do que os ensaios de RS, e que para os valores de σ'_n superiores a 100KPa, a resistência residual medida no ensaio de CDRM tende a se aproximar da medida no ensaio de RS. Esta interpretação contribui para o comportamento do FS observado entre a curva representante do RS (residual) e a do CDRM residual (único e bilinear 80 – 600KPa).

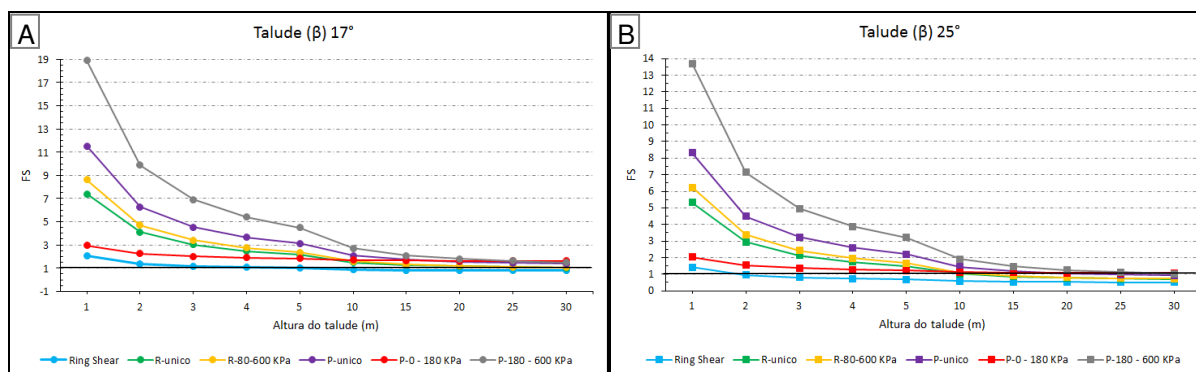


Figura 61. Comportamento do FS em relação as diferentes técnicas, mantendo o mesmo ângulo de inclinação.

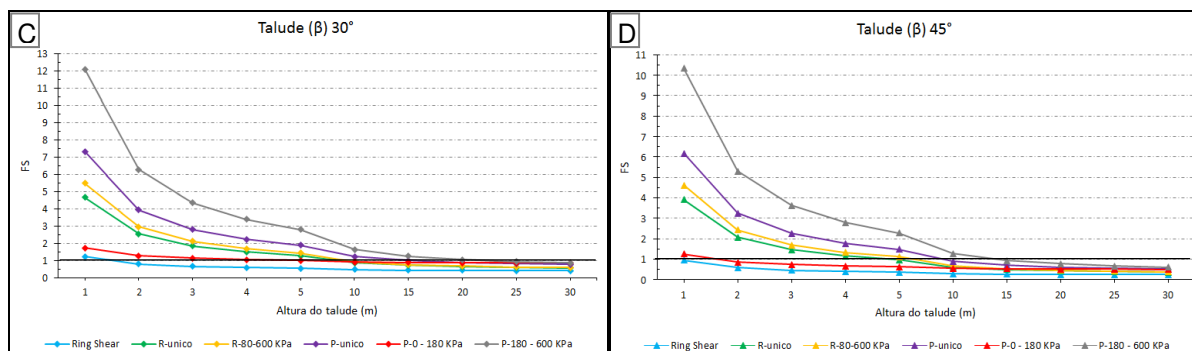


Figura 61. Comportamento do FS em relação as diferentes técnicas, mantendo o mesmo ângulo de inclinação (Continuação).

10. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O Brasil é um país continental com uma enorme variedade geológica e geomorfológica, inserido no contexto climático tropical e sub-tropical. As elevadas taxas de precipitação pluviométrica aliadas a falta de planejamento urbano contribuem para o aumento dos desastres naturais. No entanto, as metodologias para elaboração de cartas geotécnicas são bem desenvolvidas e adaptadas a realidade do país. Institutos de pesquisa e Universidades tem promovido a dissiminação da importância das cartas geotécnicas e suas metodologias através de guias e artigos. Existe a Lei Federal 12.608 de abril de 2012 que determina a elaboração de cartas geotécnicas nos municípios vulneráveis a desastres naturais, porém a aplicação dela não está sendo realizada por todos os municípios elencados como vulneráveis.

A aplicabilidade das cartas geotécnicas é importante para o planejamento e a gestão urbana das áreas consolidadas e em expansão nos municípios. Além disso, elas identificam as áreas com alto potencial de perigo, indicando a necessidade de intervenções ou monitoramentos com objetivo de evitar eventos catastróficos que causem óbitos e danos financeiros. Contudo, ainda é necessário melhorar os registros de eventos relacionados aos desastres naturais. Apesar de existir históricos sobre *landslides* ocorridos, estes quantitativos não representam a realidade. Os municípios e alguns Estados não possuem a estrutura adequada para identificar e registrar eventos geotécnicos, consequentemente perde-se a eficiência em identificar áreas suscetíveis aos desastres. É necessária uma maior conscientização dos poderes públicos estaduais e municipais em relação a identificação das áreas que apresentam perigo, e a aplicação de medidas estruturais ou de monitoramento que garantem a segurança da população.

Alguns Estados apresentam guias que descrevem técnicas clássicas de monitoramento geotécnico de taludes, entretanto estes guias ainda não estão difundidos nas centenas de prefeituras municipais que compõem o país. Também, são poucas as publicações nacionais abordando este tópico e demonstrando as novas tecnologias que estão sendo aplicadas no entorno do mundo. Conforme demonstrado neste relatório, algumas tecnologias como radar, escâners a laser e SUAVs são bastante eficientes na identificação e monitoramento de *landslides*. Desta forma, seria interessante as universidades, aliadas ao poder público, considerarem o desenvolvimento de projetos relacionados a estas novas tecnologias.

A utilização dos SUAVs torna-se interessante ao Município de Caxias do Sul devido a praticidade e ao baixo custo para realizar a fotogrametria em áreas de até 0,5 km², quando comparado a um levantamento com aeronaves tripuladas de grande porte. Estas pequenas aeronaves adquirem imagens 3D em alta resolução espacial com maior flexibilidade operacional e versatilidade. O SUAV fornece informações precisas para a caracterização de deslizamentos, ao mesmo tempo em que alivia o risco inerente ao levantamento de áreas perigosas propensas a deslizamentos de terra e reduz os custos ocorridos.

A modelagem do Fator de Segurança (FS) do solo kaiser mostrou que os resultados obtidos pelo método Ring Shear são mais restritivos que os observados nas demais metodologias. Também, verificou-se que ao aumentar o ângulo de inclinação do talude, todas as metodologias apresentam o mesmo comportamento de redução da altura do talude no momento de intercepto do FS = 1. Portanto, é importante que as Secretarias do Município de Caxias do Sul, responsáveis pela avaliação dos projetos de estabilidade de taludes, dispõem de um Termo de Referência descrevendo os métodos investigativos e procedimentos de análise mais adequados para garantir a uniformidade e segurança na mensuração da estabilidade do talude.

A experiência de caso da cidade de Caxias do Sul (RS) demonstrou a realidade da maioria das cidades brasileiras, pouca densidade de informação geotécnica e relatórios desatualizados. Foram realizados alguns estudos com significativas contribuições para o conhecimento geotécnico da área urbana da cidade, dentre eles a elaboração de um mapa geotécnico de solos e um relatório técnico para redução de risco no ano de 2006. Apesar do esforço por acadêmicos para quantificar os parâmetros geotécnicos dos solos observados, ainda é necessária uma densificação de dados para aumentar a confiabilidade de aplicação dos valores identificados e a criação de modelagens demonstrando fatores de segurança dos solos identificados na região, principalmente nos solos plásticos. Em geral, os estudos sobre rochas

e solos com relação às características geotécnicas e, principalmente, a propriedade espacial e layout das descontinuidades, poderiam adicionar informações importantes para elaboração de gráficos de susceptibilidade.

O relatório técnico de 2006 está desatualizado, visto que nos últimos anos houve um grande aumento de edificações na área urbana e assim, modificando o contexto de risco geotécnico observado na época de elaboração do relatório. É indicado ao município de Caxias do Sul realizar um novo mapeamento com elaboração de Cartas Geotécnicas em escalas previstas nas metodologias atuais. A carta geotécnica de Aptidão à Urbanização deve estar inserida no Plano Diretor Municipal e desempenhar a função de auxiliar a prefeitura no gerenciamento da expansão urbana, delimitando as áreas aptas e os locais que necessitam maior detalhamento geotécnico. Este detalhamento pode ser realizado através das Cartas de Risco, que são instrumentos adequados para indicar os locais que necessitam intervenções por obras de engenharia ou aplicação de monitoramento da estabilidade de taludes.

Após o município adquirir a cartografia geotécnica adequada, torna-se sugestivo a estruturação de uma equipe municipal de técnicos capacitados a realizarem avaliações de intervenção e monitoramento de áreas propícias a desastres geotécnicos, desta forma, situações similares ao exemplo do bairro Kaiser poderiam ser monitoradas e quando necessárias, serem realizadas as obras adequadas para evitar acidentes geotécnicos. Esta equipe poderia definir qual tecnologia seria apropriada para avaliar cada situação específica, por exemplo, a utilização de SUAVs ou escâners para observar a progressão dos movimentos vinculados a *landslides*. A equipe municipal também seria importante para manter as cartas de risco atualizadas e discutir sobre as metodologias utilizadas para determinação do Fator de Segurança (FS) em projetos de taludes. Como observado neste relatório o FS varia de acordo com a técnica utilizada para aquisição dos parâmetros físicos e de estresse do solo. Outro ponto relevante estaria em realizar os registros de todos os eventos de acidentes geotécnicos utilizando um fichário padrão que caracterize o evento de forma técnica.

Geól. Tiago De Vargas
Doutor em Geociências

11. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRAMENTO, M.; PINTO, CS. (1993). Resistência ao cisalhamento de solo coluvionar não saturado das encostas da Serra do Mar. **Solos e Rochas**, v. 16, n. 3, p. 145-158.

ALHEIROS, M. M. Contexto histórico e cenário atual da gestão de riscos e desastres no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 13. 2011-b, São Paulo, SP **Anais...** São Paulo, ABGE, 2011, 1 CD-ROM.

ALMEIDA, F. F. M. O Planalto Basáltico da Bacia do Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**. nº 24, São Paulo, Brasil. 1956.

AL-RAWABDEH, A; HE, F; MOUSSA, A; EL-SHEIMY, N; HABIB, A. Using an Unmanned Aerial Vehicle-Based Digital Imaging System to Derive a 3D Point Cloud for Landslide Scarp Recognition. **Remote Sens**. 2016, 8, 95; doi:10.3390/rs8020095.

ARGENTA, G.; KORMANN, T. C.; ROBAINA, L. E. S. Levantamento da ocorrência de desastres naturais no Município de Caxias do Sul – RS. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. **Anais...** Viçosa, 2009.

AZAMBUJA, E.; NANNI, A. S.; BRESSANI, L. A.; RIGO, M. L. Casos históricos de dois movimentos de rochas em encostas associadas à Formação Serra Geral. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 3. 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 2001. p. 271-278.

BAIOTTO, C.Z.; PEREIRA, I.V.; VISENTIN, J.M.; ALBERTI, K.; BDEF, F.E. (2015) Áreas de risco devido a declividade de taludes e eventos pluviométricos: Estudo de caso na cidade de Caxias do Sul. **Atividade de Pesquisa Supervisionada (APS)**. Faculdade da Serra Gaúcha (FSG).

BANDEIRA, A. P. C.; COUTINHO, R. Q. Gerenciamento de Risco de Escorregamentos de Encostas na Região Metropolitana do Recife – PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

BANDEIRA, A. P. C.; ALHEIROS, M. M.; COUTINHO, R. Q. Metodologia de Análise e Mapeamento de Áreas de Riscos em Encostas Aplicada na Região Metropolitana do Recife In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

BAUM RL, SAVAGE WZ GODT JW. (2002) TRIGRS-A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. US Geological Survey Open-File **Report** 02-0424.

BAUM RL, COE JA, GODT JW, HARP EL, REID ME, SAVAGE WZ, SCHULZ WH, BRIEN DL, CHLEBORAD AF, MCKENNA JP, MICHAEL JA. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. **Landslide** 2:266–279 (2005).

BETIOLLO, L.M. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil.** 2006. Dissertação de mestrado. UFRGS. Instituto de Geociências. Porto Alegre, 2006.

BITAR, O.Y. **Guia Cartas geotécnicas [livro eletrônico]: orientações básicas aos municípios.** São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2015. ISBN 978-85-09001841.

BORGA M, DALLA FONTANA G, DA ROS D, MARÇOI L. (1998) Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. **Environ Geol** 35(2–3):81–88.

BORTOLOTI, F. D.; CASTRO JUNIOR, R. M.; ARAÚJO, L. C.; MORAIS, M. G. B. Preliminary landslide susceptibility zonation using GIS-based fuzzy logic in Vitória, Brazil. **Environ Earth Sci** (2015) 74:2125–2141.

BRASIL. 2004. Manual de treinamento de técnicos municipais para o mapeamento e gerenciamento de áreas urbanas com risco de escorregamentos, enchentes e inundações. MINISTÉRIO DAS CIDADES e IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia do Estado de São Paulo) CPRM/SGB, Rio de Janeiro. (193 pp.).

BRASIL (a). **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011.** Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012. 80 p.: il. color.; 30 cm.

BRASIL (b). **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012.** Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012. 84 p.: il. color.; 30 cm.

BRASIL. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013**. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. – Brasília: CENAD, 2014. 106p.: il. color; 29,7cm.

BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D.; PINHEIRO, R. J. B. Residual shear strength de some tropical soils from Rio Grande do Sul. **Solos e Rochas**, v. 24, n. 2, p. 103-113, 2001.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F.; **Relatório e Mapa Final**. Contrato nº. 2615.000386-97/2004. Programa Habitar Brasil. Desenvolvimento de estudos de engenharia geotécnica/geologia com vista à geração de relatório e mapa geotécnico dos solos e rochas superficiais da área urbana da cidade de Caxias do Sul. 2005.

BRESSANI, L. A.; BERTUOL, F. Alguns escorregamentos do RS e SC e a avaliação de susceptibilidade e risco de encostas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15. 2010, Gramado, RS. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2010a. 1 CD-ROM.

BRESSANI, L. DESLIZAMENTOS DE TERRA: estudos de casos e cuidados durante as ações de salvamento. IV Seminário Contra Incêndio e de Atendimento a Desastres. **Apresentação Oral**. 2010b.

BRESSANI, L. Identificação e caracterização de cenários de riscos movimentos de massa e outros riscos. 14º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Apresentação Oral**. 2013.

BROLLO, M. J.; TOMINAGA, L. K.; PENTEADO, D. R.; AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R.; GUEDES, A. C. M. Desastres naturais e riscos em São Luiz do Paraitinga (SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7., 2010, Maringá/PR. **Anais...**

BROLLO, M. J.; FERREIRA, C. J.; TOMINAGA, L. K.; VEDOVELLO, R.; SILVA, P. C. F.; ANDRADE, E.; GUEDES, A. C. M. Situação dos desastres e riscos no Estado de São Paulo e instrumentos de gerenciamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 13. 2011, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, ABGE, 2011, 1 CD-ROM.

CAMARGO, A.P. **Classificação climática para zoneamento de aptidão agroclimática**. Viçosa, MG. UFV, 1991.

CAMARINHA, P. I. M.; CANAVESI, V.; ALVALÁ, R. C. S. Shallow landslide prediction and analysis with risk assessment using a spatial model in a coastal region in the state de São Paulo, Brazil. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 14, 2449–2468, 2014.

CANIL, K.; OGURA, A. T.; BLANCO, M. J.; CORSI, A. C.; CAMPOS JÚNIOR, E.; CARVALHO, E. Subsídios para elaboração de um plano de gerenciamento de áreas de risco do município de Caraguatatuba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 13. 2011b, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, ABGE, 2011, 1 CD-ROM.

CARRARA, AA (1983) Multivariate model for landslide hazard evaluation. **Math Geol** 15(3):403–426.

CARRARA, ACM, Detti R, Guzzetti F, Pasqui V, Reichenbach P (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. **Earth Surf Proc Land** 16(5):427–445.

CERRI, L. E. S.; AKIOSSI, A.; AGOSTOO FILHO, O.; ZAINÉ, J. E. Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 1996, v.2, p. 537-548.

CONNIFF, R. AND MCCLARAN, R., 2011. Ready for takedef: Aerial drones are not just for the military any more. **Smithsonian**, Junho 2011, 41– 54.

CORREIA, A. C. S., BONAMIGO, C. J. Identificação e Classificação de Áreas de Risco na Área Urbana de Porto Velho/RO In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

CRAIG, R.F. **Craig's soil mechanics**. p447. 7th ed. 2004.

DEBORTOLI, N.S.; CAMARINHA, P.I.M.; MARENGO, J.A.; RODRIGUES, R.R. An index de Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context de climate change. **Nat Hazards** (2017) 86:557–582.

DELACOURT, C.; ALLEMAND, P.; JAUD, M.; GRANDJEAN, P.; DESCHAMPS, A.; AMMANN, J.; CUQ, V., AND SUANEZ, S., 2009. DRELIO: An unmanned helicopter for imaging coastal areas. In: DA SILVA, C.P. (ed.), **Proceedings** de the ICS, Journal de Coastal Research, Special Issue No. 56, pp. 1489–1493.

DIETRICH, WE; MONTGOMERY, DR. (1998) SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI Technical **Report**, 29 pp.

DING, X; MONTGOMERY, S. B; TSAKIRI, M. Integrated Monitoring Systems for Open Pit Wall Deformation, Australian Centre for Geomechanics, MERIWA Project **Report** No. 186, PP4 (1998).

DIXON, N., HILL, R., KAVANAGH, J., 2003. Acoustic emission monitoring de slope instability: development de an active waveguide system. Proc. Instit. Civil Eng.: **Geotech. Engin.** 156 (2), 83–95.

DOWNING, C.H; SU, M.B; O'CONNOR, K.M. "Measurement de rock mass deformation with grouted coaxial antenna cable," **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 22 (1989).

EDWARDS, O., 2009. Under the radar with unmanned aerial vehicles. **Smithsonian Magazine**, Março 2009, 26–27.

FARIA, D. G. M.; FILHO, O. A.. Mapeamento de perigo associado a escorregamentos em encostas urbanas utilizando o processo de análise hierárquica (AHP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7., 2010, Maringá/PR. **Anais...**

FELL, R; COROMINAS, J; BONNARD, C; CASCINI, L; LEROI, E; SAVAGE, W. Manual para o zoneamento de susceptibilidade de perigo e risco de escorregamento para o planejamento de uso do solo. **Engineering Geology** 102(2008): 85-98; doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022.

FERNANDES, N.F., GUIMARÃES, R.F., GOMES, R.A.T., VIEIRA, B.C., MONTGOMERY, D.R., GREENBERG, M.H., 2004. Topographic controls de landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **Catena**. 55, 163–181.

FERNÁNDEZ, T; PÉREZ, J.L; CARDENAL, J; GÓMEZ, J.G; COLOMO, C; DELGADO, J. Analysis de Landslide Evolution Affecting Olive Groves Using UAV and Photogrammetric Techniques. **Remote Sens**. 2016, 8, 837; doi:10.3390/rs8100837.

FILHO, O.A. 1992. Caracterização geológicogeotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p. 721-733.

FILHO, O.A.; WOLLE, C.M. (1996). Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP. São Paulo: ABGE, **Revista Solos e Rochas**, v.19, n.1, p.45-62.

GAO, J. (1993) Identification de topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surf Proc Land** 18:579–591.

GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de taludes**. Faculdade de Engenharia Departamento de Estruturas e Fundações. UERJ. 2008.

GIORDAN, D; MANCONI, A; TANNANT, D.T; ALLASIA, P. UAV: low-cost remote sensing for high-resolution investigation de landslides. **IGARSS** 2015. 978-1-4799-7929-5/15/\$31.00 ©2015 IEEE.

GOBBI, F.; BRESSANI, L. A.; RIGO, M.L.; BORTOLI, C.; PEREIRA, A.; Identificação de Áreas com Suscetibilidade a Instabilidade Geotécnica com Base em Geoprocessamento – Estudo de Caso de Caxias do Sul/RS In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

GOMES RAT, GUIMARÃES RF, CARVALHO JR OA, FERNANDES NF (2005) Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (Shalstab) em diferentes escalas cartográficas. **Rev. Solos e Rocha** 28(1):85–97.

GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, CARVALHO JR, R. F.; VARGAS JR, O. A.; E. A.; MARTINS, É. S. Identification de the affected areas by mass movement through a physically based model de landslide hazard combined with an empirical model de debris flow. **Nat Hazards** (2008) 45:197–209.

WIGGERS, M.M; ROBAINA, L.E.S. Zoneamento das áreas de risco a movimentos de massa na área urbana do município de Caxias do Sul (RS). **Bgg** 41, v. 1 - págs. 260-279 - Jan. de 2014.

GUIMARÃES, R.F; MONTGOMERY, D.R; GREENBERG, H.M; FERNANDES, N.F; GOMES, R.A.T; CARVALHO, JR.O.A. (2003) Parameterization de soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Eng Geol** 69(1–2):99–108.

HOLLINGSWORTH, R; KOVACS, G.S. (1981) Soil slumps and debris flows: prediction and protection. **Bull Assoc Eng Geol** 18:17–28.

HUGENHOLTZ, C.H.; MOORMAN, B.J.; RIDDELL, K., AND WHITEHEAD, K., 2012. Small unmanned aircraft systems for remote sensing and Earth science research. **Eos**, Transactions de the American Geophysical Union, 93(25), 236.

INTEL LATEST COMMERCIAL DRONE. Bestflyingdrone. (2016). Disponível em: <http://www.bestflyingdrone.com/falcon-8-review/>

IVERSON, R.M. (2000) Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resour Res** 36(7):1897–1910.

KANE, W.F. Time Domain Reflectometry, **KANE GeoTech, Inc.** (1998). Available at: ourworld.compuserve.com/homepages/wkane/tdr.htm.

KAYESA, G. “Prediction de slope failure at Letlhakane Mine with the Geomos Slope Monitoring System,” in: Proceedings de the International Symposium on Stability de Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations, **Series S44**, South Africa (2006).

KLEMAS, V., 2009. The role de remote sensing in predicting and determining coastal storm impacts. **Journal de Coastal Research**, 25(6), 1264–1275.

KLEMAS, V., 2010. Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies de the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills. **Journal de Coastal Research**, 26(5), 789–797.

KLEMAS, V.V., 2015. Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. **Journal de Coastal Research**, 31(5), 1260–1267. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

KLICHE, C. Rock Slope Stability, Society for Mining, Metallurgy and Explorations, Inc. (1999).

LAPENNA, V; LORENZO, P; PERRONE, A; SDAO, S.P.F; RIZZO, E. High-resolution geoelectrical tomographies in the study de Giarrossa landslide (southern Italy). **Bull Eng Geol Env** (2003) 62:259–268. DOI 10.1007/s10064-002-0184-z.

LARSEN, M.C; TORRES-SANCHEZ, A.J. (1998) The frequency and distribution de recent landslides in three montane tropical regions de Puerto Rico. **Geomorphology** 24:309–331.

LISTO, F.L.R. & VIEIRA, B. C. Mapping de risk and susceptibility de shallow-landslide in the city de São Paulo, Brazil. **Geomorphology** 169–170 (2012) 30–44.

LECHNER, A.M.; FLETCHER, A.; JOHANSEN, K., AND ERSKINE, P., 2012. Characterizing upland swamps using object-based classification methods and hyper-spatial resolution imagery derived from an unmanned aerial vehicle. **Proceedings** de the XXII ISPRS Congress Annals de the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I–4 (Melbourne, Australia, ISPRS), pp. 101–106.

LINDNER, G; SCHRAML, K; MANSBERGER, R; HÜBL, J. UAV monitoring and documentation de a large landslide. **Appl Geomat** (2016) 8:1–11. DOI:10.1007/s12518-015-0165-0.

LISBOA, N.A.; REMUS, M. V. D.; DANI, N.; CASTRO, J. W.; NETO, F. T. Estudo geológico e hidrogeológico para o aproveitamento de água do Aquífero Guarani no Município de Caxias do Sul. Relatório Final. Caxias do Sul, 2003. p.72.

MACEDO, E.; SANTOS, L. P.; KANIL, K.; SILVA, F. C.; LANÇONE, R. B.; MIRANDOLA, F. A.; COSTA, R. N. Mapeamento de risco em assentamentos precários no município de São Paulo (SP) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 13. 2011-b, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, ABGE, 2011, 1 CD-ROM.

MARQUES, J. A. P. **Estudo de metodologia de avaliação de risco a escorregamento de terra em área urbana : o caso do município de Juiz de Fora - MG / Janezete Aparecida Purgato Marques.** – 2011. 144 f.: il. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído)– Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MENDONÇA, M. B.; PIMENTEL, J.; SARAMAGO, R.P. Reflexões Sobre Planos Municipais de Redução de Riscos Associados a Deslizamentos de Terra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15., 2010, Gramado,RS. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2010. 1 CDROM.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis de SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **J Soils Sediments** (2014) 14:1266–1277.

MONTGOMERY DR, WRIGHT RH, BOOTH T. (1991) Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales. **Bull Assoc Eng Geol** 28:303–323.

MONTGOMERY DR, DIETRICH WE. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resour Res** 30:1153–1171.

MONTGOMERY DR, SULLIVAN K, GREENBERG MH. (1998) Regional test de a model for shallow landsliding. **Hydrol Proc** 12:943–955.

MURTHY, V.N.S. **Geotechnical engineering: principles and practices de soil mechanics and foundation engineering**. 2002. ISBN 9780824708733.

NIETHAMMER, U; JAMES, M.R; ROTHMUND, S; TRAVELLETTI, J; JOSWIG, M. UAV-based remote sensing de the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology** 128 (2012) 2–11. doi:10.1016/j.enggeo.2011.03.012.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2008. Hurricane Katrina. Disponível em: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/research/2005/katrina.html>.

NOGUEIRA, F. R. **Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal**. Rio Claro : [s.n.], 2002 x, 268 f. : il. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

NOGUEIRA, F. R.; SOUZA, L. A.; FUKUMOTO, M. M.; BONGIOVANNI, L. A. Plano municipal de redução de riscos de São Bernardo do Campo, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 13. 2011b, São Paulo, SP **Anais...** São Paulo, ABGE, 2011, 1 CD-ROM.

OKIMURA T, ICHIKAWA R. (1985) A prediction method for surface failures by movements de infiltrated water in a surface soil layer. **Nat Disaster Sci** 7:41–51.

OSASANA, KS and AFENI, TB. Review de surface mine slope monitoring techniques. **Journal de Mining Science**, Vol. 46, No. 2, 2010.

PACK RT, TARBOTON DG, GOODWIN CN. (1998) Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00. **Terratech Consulting Report** 4114-0.

PARIZZI, M.G. Desastres naturais e induzidos e o risco urbano. **Geonomos**, 22(1), 1-9, 2014.

PEREIRA, A.; GOBBI, F.; BRESSANI, L. A.; RIGO, M. L.; BORTOLI, C. R. Metodologia de Classificação de Áreas de Risco de Deslizamento de Encostas no Município de Caxias do Sul/RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

PERAZZOLO, L. **Estudo geotécnico de dois taludes da Formação Serra Geral, RS**. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PIKE, D., 2014. Ocean Eye oil spill aerial tracking. *Maritime Journal*, 23 Janeiro 2014. Disponível em: <http://www.maritimejournal.com/news101/pollution-control/ocean-eye-oil-spill-aerial-racking>.

PINHEIRO, R. J. B.; BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D. A study on the residual shear strength of two unstable slopes in the state of Rio Grande do Sul. In: PANAMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, BRASILIAN CONFERENCE ON SLOPE STABILITY, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997. 2v., v. 1, p. 443-452.

PONTEL, A.L.; STEFANI, A.; BEDINOT, J.; MORELATTO, S.; BDEF, F.E. (2013) Avaliação da condição de instabilidade de taludes com determinação de medidas de contenção. **Atividade de Pesquisa Supervisionada (APS)**. Faculdade da Serra Gaúcha (FSG).

PROFIL ENGENHARIA E AMBIENTE. Plano Municipal de Redução de Risco para o Município de Caxias do Sul. Programa: Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários. Contrato de Repasse nº 0164957-13/2004. Mapeamento de Risco **Relatório Parcial - Etapa 2A**. Setembro/2006.

RAFAELLI SG, MONTGOMERY DR, GREENBERG HM. (2001). A comparison of thematic mapping of erosional intensity to GIS-driven process models in an Andean drainage basin. **J Hydrol** 244(1-2):33-42.

RAMOS VM, GUIMARÃES RF, REDIVO AL, GOMES RAT, FERNANDES NF, CARVALHO JR OA. (2002) Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente Arcview, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na região do Quadrilátero Ferrífero – MG. **Rev Espaço Geografia** 5(1):49-67.

REDIVO, A. L.; RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; JÚNIOR, O. A. D. C. e GOMES, R. A. T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na Br 256 no município de Ouro Preto - MG. **Ciência e Natura** - UFSM, p.31-46, 2004.

RECKZIEGEL, B. W. **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005.** Centro de Ciências Naturais e Exatas Programa de Pós-Graduação em Geografia, Dissertação de Mestrado, UFSM (2007).

RIGO, M. L. **Mineralogia, Intemperismo e Comportamento Geotécnico de Solos Sapolíticos de Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral.** Tese de doutorado. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005. 348 p.

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P., 2000. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Org.). **Geologia do Rio Grande do Sul.** 2ª ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS, V. 01, p. 355-374.

SAVAGE WZ, GODT JW, BAUM RL. (2004). Modeling time-dependent aerial slope stability. In: Lacerda WA, Erlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) **Landslides-evaluation and stabilization. Proceedings** de the 9th international symposium on landslides, vol 1. Balkema, London, pp 23–36.

SMITH, A and DIXON, N. Quantification de landslide velocity from active waveguide-generated acoustic emission. Can. **Geotech. J.** 52: 413–425 (2015) [dx.doi.org/10.1139/cgj-2014-0226](https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0226).

SOARES, J.M.D.; PINHEIRO, R.J.B; MACIEL FILHO, C.L.; ROBAINA, L.A.; BICA, A.V.D.; BRESSANI, L.A. (2001). Estudo da estabilidade de encosta em área urbana no município de Santa Maria – RS. 3ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), Rio de Janeiro. **Anais: ABMS**, p. 199-206.

SOBREIRA, F.G. & SOUZA, L.A. 2012. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 2: 79-97.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. (2014). **Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais.** 68 pag. ISBN: 978-85-917793-0-7.

STARK, TD; CHOI, H. Slope inclinometers for landslides. **Landslides** (2008) 5:339–350. DOI 10.1007/s10346-008-0126-3.

STERNBERG, H. O. Enchentes e movimentos coletivos do solo no vale do Paraíba em Dezembro de 1948. Influência da exploração destrutiva das terras. **Revista Brasileira de Geografia**, v.11, n.2, p.223-261, 1949.

VAN ASCH T, KUIPERS B, VAN DER ZANDEN DJ. (1993) An information system for large scale quantitative hazard analyses de landslide. **Z Geomorphol** 87:133–140.

VANACÔR, R. N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de mestrado, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Graduate Course in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, (132p.), september de 2006.

VARANDA, E.; MAHLER, C. F.; OLIVEIRA, L. C. D. Modelo de Análise Quantitativa de Risco a Escorregamentos com Emprego de Sistema de Informações Geográficas - SIG In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios, RJ. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2008. 1 CD-ROM.

VARGAS, T. **Aplicação da geoquímica multielementar e isotópica para gestão das bacias de captação utilizadas no abastecimento público do Município de Caxias do Sul, RS.** Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS. 103 fls. 2016.

VIEIRA, B.C., 2007. **Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas.** Ph.D. Tese de doutorado, universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 193 pp.

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N. F.; FILHO, O. A. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 10, 1829–1837, 2010.

WU W, SIDLE RC (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. **Water Resour Res** 31(8):2097–2110.

XAVIER, F. F.; POZZOBON, M.; CARREIRÃO, H. M. C.; BALEN, A. Caracterização dos acidentes geológicos e carta de uso recomendado do solo do bairro Valparaíso, Blumenau/SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7., 2010, Maringá/PR. **Anais...**

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro (SP), 2000.** 149 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

ZAIDAN, R.T., FERNANDES, N.F., 2009. Zoneamento de suscetibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência – Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia** 10, 57–76.

ZAKI, A; CHAI, HK; RAZAK, HA; SHIOTANI, T. Monitoring and evaluating the stability of soil slopes: A review on various available methods and feasibility of acoustic emission technique. **C. R. Geoscience** 346 (2014) 223–232.

12. ANEXO I

Título/Autor	Tipo de Drone	Uso do Drone	Configuração de Câmera	Configuração de voo, tempo e peso	Software utilizado no processamento de dados	Problemas limitantes e acurácia
Accuracy assessment of a uav-based landslide monitoring system. M. V. Peppas, J. P. Mills, P. Moore, P. E. Miller, J. E. Chambers	UAV Mini com asa fixa (Quest UAV 300)	Identificar os erros gerados pela programação automática de voo UAV através do processo de ajuste do pacote de auto-calibração. Como resultado da análise, a sensibilidade de medida vertical (precisão) é quantificada para um deslizamento de terra real ao longo de um período de dois anos.	A câmera de bordo é uma Panasonic Lumix DMC-LX5 com lente Leica de foco nominal de 5,0 mm para aquisição de imagem visível. A câmera possui um sensor CCD de 1 / 1.63 "(8.07 x 5.56 mm) com tamanho de pixel de 2 x 2µm, criando uma imagem de 3648 x 2736 pixels.	Carga útil máxima de 5 kg e uma duração de voo de aproximadamente 15 minutos utilizando uma bateria de polímero de lítio. O voo estava em altura entre 90 e 109 m acima do terreno.	PhotoScan software; TerraSolid TerraScan utilizado para limpar ainda mais a nuvem de pontos densos reconstruídos; Orientação e Processamento de Dados de Varredura a Laser Aerotransportada (OPALS) software para gerar um modelo de elevação; Cloud Compare software.	Influência da vegetação sazonal (grama, árvores e sebes) criou diferenças de elevação. Esta pesquisa obteve um valor de ± 9 cm de sensibilidade vertical para a medida de voo automático programado SfM.
Analysis of Landslide Evolution Affecting Olive Groves Using UAV and Photogrammetric Techniques. Tomás Fernández, José Luis Pérez, Javier Cardenal, José Miguel Gómez, Carlos Colomo, Jorge Delgado.	Falcon 8 Asctec e FV-8 Atyges.	Realizar uma análise multitemporal de um fluxo de terra que afeta uma plantação de oliveiras. As missões de orientação do piloto automático permitiram a observação detalhada e o mapeamento das características do terreno.	Falcon 8 = Sony Nex 5N (formato APS-C, 16 Mpx, tamanho de pixel 4.9 µm). A lente utilizada era uma distância focal fixa Sony E 16 mm f / 2.8 (24 mm em formato equivalente de 35 mm). FV-8 Atyges = câmera Canon Powershot G12 (sensor CCD 1 / 1.7, 10 Mpx, tamanho de pixel 2 µm). A lente utilizada foi uma lente de zoom de 6.1-30,5 mm f / 2.8 (28-140 mm em formato equivalente de 35 mm), embora apenas a posição grande angular tenha sido definida.	Falcon 8 = peso (MTOW) de 2,3 kg e velocidade na faixa de 4,5 a 15 m/s dependendo do modo de voo (manual, altura ou modo GPS). Os tempos de voo foram de até 20 min. FV-8 Atyges = voo por até 30 min e a carga útil é de até 2 kg. O voo estava em altura entre 100 e 120 m acima do terreno.	AscTec Navigator para o Falcon 8 e o software livre MikroKopter-Tool para o ATN0ges FV-8 drone. A abordagem usa as nuvens de pontos densas geradas com o PhotoScan, que são classificadas na suíte de software LAsTools.	Ocorreram algumas dificuldades de identificação automática e correspondência de pontos entre imagens multitemporais devido a mudanças na vegetação, iluminação do sol e o próprio movimento de deslizamento, os pontos foram selecionados manualmente, mas uma abordagem também foi testada para o cálculo semi-automático de deslocamentos das oliveiras que cobrem a maior parte da área estudada. Precisão de cerca de 10 cm em XY e 15 cm em Z.

Título/Autor	Tipo de Drone	Uso do Drone	Configuração de Câmera	Configuração de voo, tempo e peso	Software utilizado no processamento de dados	Problemas limitantes e acurácia
Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry. John Barlow, Jamie Gilham, Ignacio Ibarra Cofrã.	DJI S1000 octocopter	Usado para digitalizar características estruturais, como juntas, falhas e planos de camadas para análise cinemática das falésias do mar em Telscombe, no Reino Unido. Também para análise volumétrica da erosão através do uso de dados de levantamento sequencial.	A câmera Nikon D810 FX DSLR de 36 mega-pixels foi utilizada para as pesquisas com uma lente AF Nikkor 24 mm f / 2.8D, abertura f / 8, ISO 1250 e velocidade do obturador 0,002 (1/5000) seg.	O percurso de voo automatizado foi criado com uma altitude de voo em aproximadamente 21 m de altura do meio do penhasco. Durante o voo, as imagens foram captadas em um intervalo de tempo de 5 segundos, com o UAV voando a uma velocidade constante de 3 m/s, resultando em uma captura de imagem a cada 15 m seguindo um plano de tiragem. O tempo total de voo para cada pesquisa foi de 8 min.	ADAM 3DM Technology Mine Mapping Suite software.	A pesquisa indica que é necessária uma câmera de quadro completo com uma lente principal, de modo que seja necessário um UAV maior para levantar o sensor. Os sistemas UAV que utilizam este método são mais pesados e, portanto, menos portáteis do que aqueles adequados à SfM. A densidade e precisão do ponto é semelhante àqueles produzidos usando TLS.
Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. Arko Lucieer, Steven M. de Jong, Darren Turner.	OktoKopter	Para ilustrar um fluxo de trabalho (deslizamento de terra) que mostra como as imagens adquiridas pelo UAV podem ser processadas em DEMs de alta resolução e ortomosaicos usados para quantificar a dinâmica do deslizamento de terras com base na correlação de imagens multitemporal.	Câmera Canon 550D DSLR em um suporte com compensação de movimento. Lente Canon 18-55 mm f 3.5-5.6. Comprimento focal de 18 mm com uma velocidade de obtenção rápida de 1/1200 e o ISO foi ajustado para 200. A câmera foi acionada pelo controlador de voo a cada 1,5 segundos por um cabo de gatilho personalizado.	A altitude média de voo foi de 40 m acima do nível do solo (AGL) guiada pelo piloto automático. Peso total de 3 kg.	Pacote Agisoft PhotoScan Professional versão 0.85.2. GeoSetter freeware (www.GeoSetter.de) para escrever as coordenadas GPS do UAV para os cabeçalhos JPEG EXIF correspondentes, ou seja, geotagging.	A precisão da técnica SfM foi testada com 39 pontos de controle de terra DGPS, resultando em um RMSE horizontal de 7,4 cm e um RMSE vertical de 6,2 cm. O algoritmo conseguiu quantificar com sucesso os movimentos de material de terra, manchas de vegetação e as línguas do deslizamento de terra, mas foi menos bem sucedido no mapeamento do recuo da escarpa principal.

Título/Autor	Tipo de Drone	Uso do Drone	Configuração de Câmera	Configuração de voo, tempo e peso	Software utilizado no processamento de dados	Problemas limitantes e acurácia
Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Darren Turner, Arko Lucieer, Steven M. de Jong.	Oktokopter (Oito élices) multi-rotor micro-UAV	Para aplicar as técnicas de correlação de imagem para detecção de movimento de superfície que descrevemos pela primeira vez em Lucieer <i>et al.</i> (2013) para um conjunto de dados multi-temporal de imagens de UAV.	Canon 550D Digital Single Lens Reflex (DSLR) câmera (18 Megapixel, 5184 × 3456 pixels, com Canon EF-S 18-55 mm F / 3.5-5.6 IS lente. Velocidade do obturador (tipicamente 1 / 1250-1 / 1600 s).	O Oktokopter tem uma capacidade de carga útil de cerca de 2 kg, uma duração de voo de 5-10 min. Alta sobreposição (60% -80%).	Photoscan software.	Os valores típicos de RMSE são de cerca de 4-5 cm na direção horizontal (XY) e 3-4 cm na direção vertical (Z). Erros de co-registro entre DSMs subsequentes com base na comparação de áreas não-ativas do deslizamento de terras, minimizando o erro de alinhamento para $\pm 0,07$ m em média.
UAV monitoring and documentation of a large landslide. Gerald Lindner, Klaus Schraml, Reinfried Mansberger, Johannes Hübl	MikroKopter OktoXL	O UAV foi usado para adquirir imagens de alta resolução de três bandas para monitorar um grande deslizamento de terra. Para duas áreas, vários voos foram realizados durante um período de 6 semanas e 4 meses, respectivamente.	Canon EOS 650D câmera DSLR. Esta câmera tem uma resolução de 18 megapixels (MP) e uma distância focal fixa de 20 mm (equivalente a uma lente de formato completo de 32 mm devido ao fator de coleta).	Tem um peso decrescente de cerca de 4,9 kg. A resistência do voo foi de 12 min. A altitude média do voo foi ajustada para 80-100 m. Uma sobreposição para frente de 90% e uma sobreposição lateral de 70%. Uma velocidade média de 2 m/s e a câmera foi ajustada para 1/320 s	O software de controle de voo MikroKopterTool. Agisoft PhotoScan (Agisoft 2014), as imagens foram georreferenciadas por meio dos GCP fornecidos pela WLV.	A comparação de ambos os modelos (referenciados por GCP versus comparação multicêntrica) mostrou um desvio de $11,3 \text{ m} \pm 1,6 \text{ m}$. A principal restrição do monitoramento de UAV é a duração da bateria. Ao aumentar a duração da bateria, seria possível cobrir áreas maiores sem ter a necessidade de dividi-las em pequenas áreas, cada uma coberta com uma nova bateria, que custa tempo (aterrissagem, troca de baterias, partida) e cria muitos dados redundantes (Caminhos de voo iguais). Outra restrição é a disponibilidade de satélites GNSS para voos controlados automaticamente, o que deve ser verificado antes de começar.

Título/Autor	Tipo de Drone	Uso do Drone	Configuração de Câmera	Configuração de voo, tempo e peso	Software utilizado no processamento de dados	Problemas limitantes e acurácia
UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. U. Niethammer, M.R. James, S. Rothmund, J. Travelletti, M. Joswig.	Sistema Quad-rotor. Sistema derivado de projeto com fonte aberta (Mikrokopter, 2010).	Investigar o uso de veículos aéreos não tripulados (UAVs) controlados por rádio para fazer tais medidas de alta resolução de deslizamentos de terra.	Câmera (Praktica Luxmedia 8213). O zoom e a abertura foram ajustados para valores fixos para atingir os tempos de exposição b1 / 800 e o maior ângulo visual. Todas as fotografias foram tiradas em um modo automático de série de imagens, adquirindo uma imagem a cada 3 s para garantir cobertura total.	A resistência de voo (tempo de suspensão do sistema UAV) é de até 12 min usando uma bateria de polímero de lítio com uma capacidade de ~ 5,0 Ah. Peso 2,1 kg e carga útil 500 g.	Software OrthoVista (OrthoVista, 2010). A geração de MDT foi realizada usando o software de fotogrametria de proximidade VMS (VMS, 2010) e um algoritmo de correspondência de imagem, GOTCHA (Gruen Otto-Chau) do University College London (Otto e Chau, 1989).	Os procedimentos manuais de aquisição e processamento de dados utilizados requerem uma quantidade significativa de tempo. Apesar da alta resolução das imagens, os erros resultantes da retificação de plano degradam a precisão de georreferência para ~ 0,5 m durante a maior parte do deslizamento de terra. Embora aceitável ao calcular taxas de deslocamento ao longo de períodos de um ano, os erros dessa magnitude seriam restritivos para as análises em intervalos mais curtos e, portanto, poderiam limitar a utilidade da capacidade do UAV de adquirir regularmente dados.
Using an Unmanned Aerial Vehicle-Based Digital Imaging System to Derive a 3D Point Cloud for Landslide Scarp Recognition. Abdulla Al-Rawabdeh, Fangning He, Adel Moussa, Naser El-Sheimy, Ayman Habib	DJI Phantom 2 (UAV).	Abordagens automatizadas para detectar e extrair as características geomorfológicas das escarpas de deslizamentos.	LFOV câmera digital (GoPro Hero 3 câmera)	O plano de voo de missão para a imagem norte-sul com 80% se sobrepõem e 60% de obstáculos. Também caminhos de voo com 50% de sobreposição e 30% de suspensão. Altura média de voo (AGL) de 50 m e velocidade 5 m / s. Tempo de voo de 12,73 min.	Os resultados experimentais foram examinados utilizando a Calibração Analítica Multi-quadro Simultânea dos Estados Unidos Geological Survey (USGS) (SMAC). Para gerar uma nuvem pontual baseada em imagem 3D densa, as técnicas estrutura de movimento (SfM) e SGM são utilizadas.	Os valores de RMSE (avaliação de precisão) relação de Eigenvalue, topografia da inclinação do talude, e métodos de topografia dos índices de rugosidade da superfície são de 11,98 cm, 9,05 cm e 10,45 cm, respectivamente. Devido às distorções inerentes excessivas da lente no sistema de imagem utilizado, o GoPro Hero 3+ Black Edition, um procedimento de análise de estabilidade e calibração da câmera é essencial.