



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Juliano de Lima

**Elaboração de Mapa de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico na  
Comunidade da Rocinha com utilização de Modelo Probabilístico e  
Ferramenta Geoestatística**

Rio de Janeiro

2017

Juliano de Lima

**Elaboração de Mapa de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico na Comunidade da Rocinha com utilização de Modelo Probabilístico e Ferramenta Geoestatística**



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Maria Soares Gerscovich

Rio de Janeiro  
2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

L732 Lima, Juliano de.  
Elaboração de mapa de susceptibilidade ao risco geotécnico na comunidade da Rocinha com utilização de modelo probabilístico e ferramenta geoestatística / Juliano de Lima. – 2017.  
262f.

Orientadores: Marcus Peigas Pacheco e Denise Maria Soares Gerscovich.  
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Engenharia geotécnica - Teses. 3. Deslizamento - Teses. 4. Geologia - Métodos estatísticos - Teses. I. Pacheco, Marcus Peigas. II. Gerscovich, Denise Maria Soares. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.13

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Juliano de Lima

**Elaboração de Mapa de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico na Comunidade da Rocinha com utilização de Modelo Probabilístico e Ferramenta Geoestatística**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 4 de Julho de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Denise Maria Soares Gerscovich (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Rogério Luiz Feijó  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Ph.D. Willy Alvarenga Lacerda  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE

---

Geólogo Dr. Ricardo Neiva d'Órsi  
Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro - GEORIO

Rio de Janeiro

2017



## DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. Ao meu Pai (*in memoriam*) por te me ensinado através do próprio exemplo os valores da honestidade, do estudo e do trabalho, a toda a minha família pelo amor incondicional, aos meus amigos queridos e aos meus alunos, enfim, por todos que fazem a vida valer a pena.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores por todo estímulo, transmissão de conhecimento e confiança, e por sempre acreditarem que seria produzido um trabalho pioneiro e com grande utilidade prática para a solução de problemas geotécnicos envolvendo a quantificação de incertezas: Prof. Marcus Pacheco pelos “*insights*” nas escolhas decisivas ao direcionamento da tese, sobretudo quanto aos métodos probabilísticos, e à Prof<sup>a</sup> Denise Gerscovich, pelas discussões sempre avançadas em torno de todos os assuntos envolvendo os problemas geotécnicos relativos à estabilidade de taludes.

A todos os professores do PGECIV, pelos valorosos ensinamentos.

Aos professores de graduação da FEN/UERJ, que despertaram interesse e motivação para a vida profissional e acadêmica, ensinando muito além da ementa das disciplinas: Prof. Rodolfo Suanno, Prof Paulo Frederico Monteiro, Prof Paulo Massa, Prof. Eduardo Barata, Prof.<sup>a</sup> Celina Schmidt, Prof. Nelson Meirim, Prof. Rogério Feijó, e, de modo especial, à Prof<sup>a</sup> Denise Gerscovich, não apenas pela transmissão de sólidos conhecimentos geotécnicos, mas também por ter me acompanhado em todos os níveis de estudo na engenharia civil: graduação, mestrado e doutorado.

À Fundação Instituto de Geotécnica da Cidade do Rio de Janeiro (GEORIO), não apenas pela disponibilização de vasto banco de dados para a pesquisa, mas também pela liberação de todo o tempo necessário para desenvolvimento da tese. Aos colegas da GEORIO, da gerência de projetos e também da gerência de geologia, em especial, ao geólogo Luiz José Brandão, pela colaboração em diversas questões de geologia de engenharia, incluindo proveitosas discussões sobre problemas de campo, além do fornecimento de farto material acadêmico sobre o assunto; à geóloga Raquel Fonseca e à estagiária de geologia Raquel Cristina, pela ajuda imprescindível no programa ArcGis. Às colegas da gerência de projetos engenheiras projetistas Maria Luisa e Mariana: sem a sua colaboração nos momentos em que mais precisei me ausentar seria impossível finalizar esta tese. Ao amigo Marcelo Aldaher pelos esclarecimentos sobre correlações. Ao gerente de projetos Marcus Bergman pelo incentivo, amizade e conhecimento, ao amigão de sempre Geraldo Baptista Filho não apenas pelo espírito solidário como também pelo imenso conhecimento acumulado que faz questão de transmitir a todos, sem distinção e com extrema boa vontade.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), na pessoa do chefe de departamento da engenharia civil, prof José Artur D'Oliveira Mussi pelo incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento científico, e, de modo mais do que especial, a todo corpo discente. Não fosse o interesse e afeição dos alunos pelo aprendizado nas disciplinas de Fundações, Obras de Terra e Geotecnia, certamente o estímulo para realização desta tese não seria o mesmo de minha parte.

Ao meu estimado colega de doutorado Marcos Antonio da Silva, a quem muito admiro, e que tive o prazer de conviver desde às aulas de mestrado até a finalização do doutorado, e com quem inaugurei a 1ª turma de doutorado do PGECIV em engenharia civil com ênfase em geotecnia no ano de 2012. Agradeço pela convivência sempre colaborativa, pela troca de experiências nos recursos computacionais, e, principalmente, pela amizade sincera desde sempre. Aos colegas de doutorado em estruturas do PGECIV Alan e Bruno que, além de compartilhar experiências ao longo de toda esta trajetória acadêmica, assim como eu, venceram o desafio de cursar mestrado e doutorado com dupla jornada, trabalhando na prefeitura de dia e ministrando aulas na universidade no período da noite. À Helena, secretária do PGECIV, que eu conheci desde os tempos de graduação no Departamento de Estruturas e Fundações, sempre prestativa, atenta e bem humorada.

A toda a minha família, meus pais queridos José Augusto – *in memoriam* - e minha mãe Zaida que, além da condição material e afetiva que nunca faltou, me ampararam com sólida formação moral e ética. A minha esposa Débora e aos meus filhos amados Isadora e Pedro, pelo entendimento de minha ausência em diversos momentos ao longo destes quase 5 anos consecutivos de estudo e pesquisa.

A UERJ, instituição que me orgulho de ser parte integrante e que forneceu toda a minha formação acadêmica, da graduação ao doutorado, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

Aos meus eternos amigos Dayse, Gigi e Paulo da PMQ e a todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

O desafio não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

LIMA, Juliano de. *Elaboração de mapas de susceptibilidade ao risco na comunidade da Rocinha com utilização de modelo probabilístico e ferramenta geoestatística*. 2017. 262f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Principalmente no período compreendido entre dezembro e início de abril, que abrange basicamente o verão no hemisfério sul, os eventos chuvosos costumam deflagrar movimentos de massa bem conhecidos envolvendo taludes formados por solos e rochas. Nos casos em que as regiões de encostas sujeitas às movimentações são ocupadas por moradias, a importância do estudo dos fenômenos associados aos acidentes geotécnicos deixa de ser meramente formal e científico, devido ao envolvimento de perdas materiais e humanas sem precedentes. O presente trabalho pesquisou, de forma criteriosa, as causas, consequências e os mecanismos de ação de tais acidentes ao longo do tempo e do histórico particularizado de cada região da comunidade da Rocinha, buscando-se conhecer todos os condicionantes envolvidos no processo, desde a sua deflagração até os seus efeitos finais. Em última análise, esta pesquisa procurou estimar, com maior confiabilidade possível, as probabilidades de ocorrências de eventos desfavoráveis decorrentes de deslizamentos de terra em vários pontos distribuídos por todas as vertentes daquela comunidade. Estas estimativas tomaram por base o registro de informações de acidentes geológico-geotécnicos envolvendo logicamente mobilização de solo e/ou rocha em determinados períodos chuvosos considerados relevantes, trazendo, como consequência, danos em diversas escalas de gravidade como, por exemplo, perdas humanas, destruição de moradias e interdição de vias de acesso. Conhecidas as probabilidades de ocorrências geotécnicas pontuais através do conceito de atualização bayesiana, procedeu-se à modelagem das superfícies de probabilidades por toda área do maciço com a utilização de ferramenta geoestatística. Para tanto, obedeceu-se a uma distribuição espacial dos valores de probabilidade de acontecimentos geotécnicos, de modo a respeitar o tratamento regionalizado através do estabelecimento de funções de correlação espacial que lhe são peculiares.

Palavras-chave: Movimentos de massa gravitacionais; Atualização bayesiana; Geoestatística; Mapas de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico.

## ABSTRACT

LIMA, Juliano de. *Elaboration of geotechnical risk susceptibility map in the community of Rocinha using probabilistic model and geostatistical tool*. 2017. 262f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Especially during the period between December and early April, which basically covers summer in the southern hemisphere, rainy events usually trigger well-known mass movements involving slopes formed by soils and rocks. In cases where regions are subject to housing movements, the importance of studying the phenomena associated with geotechnical accidents is no longer merely formal and scientific, due to the unprecedented involvement of materials and humans. The present work investigated, in a judicious manner, the causes, consequences and mechanisms of action of such accidents over time and the particularized history of each region of the community of Rocinha, seeking to know all the constraints involved in the process, from the its definition for its final effects. In the last analysis, this research tried to estimate, with greater reliability, as probabilities of slipping risk in several points distributed by all the slopes of that community. These estimates were based on the recording of information on geological and geotechnical accidents involving logically soil and / or rock mobilization in certain rainy periods in the background, resulting in damages at various severity scales such as human losses, Destruction According to the use of geography tools. Considerations for probabilities of point-to-point geotechnical occurrences through the concept of Bayesian updating, we proceeded to model probability surfaces throughout the area of the massif. For that, a spatial distribution of the probability values of geotechnical events was obeyed, in order to respect the regional treatment, through the establishment of spatial correlation functions that are peculiar.

Keywords: Gravitational Mass Movements; Bayesian update; Geostatistics; Maps of susceptibility to geotechnical risk.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos parâmetros que caracterizam as descontinuidades (Hudson e Harrison, 2007, apud Rocha, 2015).....	38
Figura 2 - Influência do desenvolvimento e orientação das descontinuidades numa fundação em talude rochoso. (adaptado de <a href="http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf">http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf</a> ) .....	39
Figura 3 - Representação de descontinuidades para análise de estabilidade de maciço de rocha (adaptado de <a href="http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf">http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf</a> ) .....	40
Figura 4 - Representação de pontes de rocha , (adaptado de <a href="http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf">http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf</a> ) .....	42
Figura 5 - Critério de ruptura de Patton (1966). Trajetória bilinear de ruptura (Aguilera, 2009) .....	44
Figura 6 - Influência das irregularidades ao longo de superfícies de cisalhamento (Hoek e Bray, 1974, apud Fiori e Carmigiani, 2009) .....	45
Figura 7 - Decomposição dos esforços atuantes em um plano inclinado em relação à falha principal (Fiori e Carmigiani, 2009).....	46
Figura 8 - Perfis de rugosidade para a determinação de coeficientes de rugosidade (Barton e Choubey, 1977, apud Aguilera, 2009). .....	48
Figura 9 - Envoltória de ruptura para superfícies múltiplas .....	50
Figura 10 - Envoltória de ruptura para superfícies múltiplas .....	51
Figura 11 - Correlação entre ângulo de atrito e índice de plasticidade em ensaios de cisalhamento de interfaces solo-rocha. (Fiori e Carmigiani, 2009).....	52
Figura 12 - Representação esquemática de maciços rochosos; a- blocos paralelepípedos; b- blocos irregulares; c-blocos tabulares; d-blocos colunares. (adaptado de Vallejo et al, 2002).....	54
Figura 13 - Representação esquemática das zonas de cisalhamento. ....	55
Figura 14 - Cisalhamento Dúctil (Salamuni, 2006).....	55
Figura 15 - Cisalhamento dúctil-ruptil (foto a) e rúptil (foto b), Salamuni (2006) .....	55
Figura 16 - Zonas de cisalhamento na pedreira Maringá (fotos a e b), e bandas de cisalhamento de gnaiss (foto c), (Salamuni, 2006).....	56

Figura 17 - Dobras geradas em cinturões de cisalhamento rúptil-dúctil (Salamuni, 2006) .....	56
Figura 18 - Comportamento rúptil de quartzito (Salamuni, 2006).....	57
Figura 19 - Exemplo de caracterização morfológica de solo com mais de um horizonte ou camada apresentando transição irregular (IBGE, 2007) .....	63
Figura 20 - Exemplo de caracterização morfológica de solo com ocorrência de lamelas (IBGE, 2007) .....	63
Figura 21 - Delimitação Esquemática dos principais solos brasileiros e do RJ (Adaptado de Atlas Nacional do Brasil, 2000, apud IBGE, 2007).....	65
Figura 22 - Geomorfologia dos colúvios .....	67
Figura 23 - Diferentes formas das vertentes .....	69
Figura 24 - Diferentes formas das vertentes convexo-retilinea-concava .....	70
Figura 25 - Diferentes formas das vertentes de uma encosta .....	71
Figura 26 - Localização das Estações Telepluviométricas Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro (relatório GEORIO/DEP/GPE-Nº 002/2016).....	74
Figura 27 - Localização dos Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio (relatório GEORIO/DEP/GPE-Nº 002/2016).....	75
Figura 28 – Mudança na geometria do talude (Silva, 2016).....	79
Figura 29 - Mapa de susceptibilidade ao escorregamento da cidade do Rio de Janeiro (IPP e GeoRio, 2013) .....	88
Figura 30 Mapa de susceptibilidade ao escorregamento na área de abrangência da Comunidade da Rocinha, ampliado da Figura 29 .....	88
Figura 31 - Mapa de susceptibilidade ao risco no Maciço da Tijuca .....	89
Figura 32- Mapa Susceptibilidade ao risco ampliado nas vertentes Norte e Sul do Maciço da Tijuca .....	89
Figura 33 - Classificação de Perigo proposta pela UM-ISDR (2004) .....	94
Figura 34 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Rocinha elaborado pela Gerência de Geologia da Fundação GEORIO (2014) .....	102
Figura 35 – Carta de setorização de risco da Rocinha (1992) .....	103
Figura 36 – Carta de setorização de risco do Rio de Janeiro (1991) .....	103
Figura 37 - Perfil geológico-geotécnico esquemático da Rocinha.....	105
Figura 38 - Laudo de vistoria adotado pela Defesa Civil Municipal .....	108
Figura 39- Folha 1 do Laudo de vistoria adotado pela GEORIO, até 2009 .....	109
Figura 40 - Folha 2 do Laudo de vistoria adotado pela GEORIO, até 2009 .....	110



Figura 39 - Folha 1 de Fichas de Campo adotadas pela GEORIO .....	111
Figura 42 - Folha 2 de Fichas de Campo adotadas pela GEORIO .....	112
Figura 43 - Folha 1 de Laudos de Vistoria adotadas pela GEORIO.....	113
Figura 44 - Folha 2 de Laudos de Vistoria adotadas pela GEORIO.....	114
Figura 45 – Valores acumulados de ocorrência de cara e gráfico ilustrando visão frequentista em 100 lançamentos de dados (adaptado de Pinheiro et al, 2012)....	118
Figura 46 - Partição do espaço amostral para $m=7$ (Farias et al, 2006).....	121
Figura 47 - Sistema de forças verticais discretas numa viga rígida (Harr, 1987) ....	125
Figura 48 - Apresentação de duas distribuições de frequência com mesmo valor de média e diferentes graus de dispersão. ....	126
Figura 49 - Orientações positiva e negativa do coeficiente de assimetria $\beta(1)$ (Harr, 1987).....	128
Figura 50 - Tipos de achatamento de curvas de frequência definidas por $\beta(2)$ (adaptado de Lopes, 2003) .....	130
Figura 51 - Gráficos sobre o comportamento da função de densidade $f(x)$ .....	130
Figura 52 - Função de probabilidade da Binomial $(n,p)$ (Pinheiro et al, 2012) .....	133
Figura 53 - Curvas da distribuição de Poisson, para valores de $\lambda$ variando de 1 à 10. ....	135
Figura 54 - Curva típica de densidade da distribuição Normal (Chiann, 2009) .....	136
Figura 55 - Curvas de função de densidade de probabilidade $\varphi(x)=f(x)$ por variável $X$ (Brenner, 2015). ....	137
Figura 56 - Gráfico da função de distribuição Normal $(\mu; \sigma^2)$ acumulada .....	138
Figura 57 - Função densidade $f(x) = \Phi(z)$ para distribuição Normal Padrão (Chiann, 2009).....	139
Figura 58 – Funções de densidade da lognormal em função da variação de $\sigma$ e $\mu$ . A $(\mu =0 ; \sigma^2=1)$ , B $(\mu =0,3 ; \sigma^2=1)$ , C $(\mu =1 ; \sigma^2=1)$ , D $(\mu =0 ; \sigma^2=0,1)$ , E $(\mu =0 ; \sigma^2=0,3)$ e F $(\mu =0 ; \sigma^2=1)$ Maia (2003).....	140
Figura 59 - Funções de densidade da distribuição Beta. ....	141
Figura 60 - Ábaco para determinação dos coeficientes $\beta^2(1)$ e $\beta(2)$ em função dos parâmetros $\alpha$ e $\beta$ (Harr, 1987).....	142
Figura 61 - Família de curvas de distribuição de probabilidades de Pearson em função de parâmetros de curtose e assimetria (Pearson & Hartley,1972 apud Harr, 1987). ....	143

Figura 62 - valores de pontos da distribuição Beta (F), para $K=P[x \leq F]$ no intervalo [0,1] necessários ao cálculo de $x(k)=a+F.(b-a)$ de [0,1] (Harr, 1987) .....	144
Figura 63 - valores de pontos da distribuição Beta (F), para $K=P[x \leq F]$ no intervalo [0,1] necessários ao cálculo de $x(k)=a+F.(b-a)$ de [0,1] (Harr, 1987) .....	146
Figura 64 - Distribuição beta para o exemplo.....	149
Figura 65 – Comportamento da distribuição Beta ao varia parâmetros $\alpha$ e $\beta$ .....	150
Figura 66 - Fenômenos espaciais: A) isotrópico e B) anisotrópico (Yamamoto e Landim, 2013) .....	153
Figura 67 - Interpretação geométrica da função semivariograma em um diagrama de dispersão (Journel, 1989, apud Yamamoto e Landim, 2013).....	155
Figura 68 - Relação entre a função variograma e a função covariância (Yamamoto e Landim, 2013) .....	156
Figura 69 - Malha quadrada (A) e retangular (B) e direções ortogonais para definição do variograma experimental (Yamamoto e Landim,2013).....	157
Figura 70 - Reprodução dos pares ordenados de pontos para cálculo de variograma experimental – distancia 0,5.....	159
Figura 71 - Reprodução dos pares ordenados com conectores a cada 0,5 unidades. Os números referem-se ao valor de z em cada ponto. (Adaptado de Yamamoto e Landim, 2013). .....	160
Figura 72 - Variogramas experimentais calculados para direções N-S (direção y-y) e L-O (direção x-x). (Adaptado de Yamamoto e Landim, 2013).....	161
Figura 73 - Variogramas experimentais calculados para direções N-S e L-O (Correa, 2010) .....	163
Figura 74 - Modelos teóricos de variograma com patamar conforme equações disponíveis em Olea (1999), (Olea,1999 apud Yamamoto) .....	164
Figura 75 - Modelos teóricos de variogramas de uma população de insetos em duas épocas do ano , para efeito de exemplificação (Pasini et al, 2011).....	165
Figura 76 - Mapa de localização dos vizinhos próximos ao ponto de coordenadas $(x=23,75; y=31,25)$ .....	171
Figura 77 - Modelos de variograma teórico e experimental .....	172
Figura 78 - Resultado da interpolação por krigagem ordinária e função variograma esférica.....	174
Figura 79 - Locação dos pontos de referência centrais ( $L_n$ ) para ocorrências de... 181	

Figura 80 - Distribuição espacial de pontos de referência centrais, em torno dos quais concentram-se todas ocorrências geotécnicas da Rocinha entre 1996-2014 .....	182
Figura 81 –Distribuição de confiabilidade de 4 sucessos e 6 insucessos ou falhas	185
Figura 82 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas no ano de 1996 .....	195
Figura 83 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas no ano de 2010 .....	196
Figura 84 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha à partir de dados de ocorrência geotécnica registradas entre 2011 e 2014 .....	197
Figura 85 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas e acumuladas nos períodos chuvosos de 1996 e 2010 .....	201
Figura 86 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas e acumuladas nos períodos chuvosos de 1996, 2010 e 2011-14 .....	202
Figura 87 – Foto de escarpa rochosa da face esquerda do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega .....	204
Figura 88 - Foto de escarpa rochosa da face central do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega .....	204
Figura 89 - Foto de escarpa rochosa da face direita do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega .....	205
Figura 90 – Canaleta pluvial chumbada na rocha .....	206
Figura 91 – Ação antrópica contribuindo para instabilidade .....	207
Figura 92- Presença de blocos de rocha.....	208
Figura 93- Lixo e detritos em geral e lançamento de efluentes no solo <i>in natura</i> ...	209
Figura 94- Impedimento à drenagem superficial .....	210
Figura 95- Ocupação intensa e desordenada .....	211
Figura 96- Vista geral da escarpa rochosa.....	212
Figura 97. Detalhe da canaleta na base da escarpa .....	212
Figura 98- Cobertura vegetal na crista do talude rochoso.....	213
Figura 99- Massa de solo coluvionar instável.....	213
Figura 100 – Fraturas no macico rochoso .....	214
Figura 101- Vertente do Morro Dois Irmãos voltada para a Rocinha .....	215

Figura 102- Porção superior da Vertente do Morro Dois Irmãos voltada para a Rocinha .....	216
Figura 103- Lançamento de aterro <i>in natura</i> .....	216
Figura 104- obra de contenção em cortina ancorada.....	217
Figura 105- Capa de solo coluvionar contida indevidamente por alvenaria .....	218
Figura 106- Vista de talude de corte em condições instáveis .....	218
Figura 107- Pequeno bloco fruto de rolamento do talude à montante.....	219
Figura 108. Lançamento de lixo e entulho .....	220
Figura 109- Obras de mitigação de risco .....	221
Figura 110- Modelo probabilístico com inclusão de pontos virtuais.....	223
Figura 111 - Mapa de Risco da Comunidade da Rocinha com utilização de modelo empírico (fornecido pela GEORIO, 2014) .....	226
Figura 112 - Mapa de susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha com utilização de modelo probabilístico.....	226

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Principais grupos de fatores que influenciam nas ocorrências de movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Cruden e Varnes, 1996, apud Ahrendt, 2005).....	30
Tabela 2– Fatores condicionantes dos movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Oliveira, 2009).....	32
Tabela 3– Relação agentes/causas dos escorregamentos proposta por Guidicini & Nieble (1983), apud Benessiuti (2011).....	34
Tabela 4 – Classificação das descontinuidades de um maciço rochoso quanto à persistência (ISRM,1983).....	41
Tabela 5 – Classificação das descontinuidades de um maciço rochoso quanto à persistência (ISRM,1983).....	53
Tabela 6 – Designação da litologia (adaptado de ISRM, 1981; FRASCA & SARTORI, 1998, apud Rodriguez, 2005).....	58
Tabela 7 - Proposta de Varnes (1978) para classificação dos movimentos de massa gravitacionais (Brabb,1991, apud Conti,2012) .....	81
Tabela 8 - Proposta de Augusto Filho (1992) para classificação dos movimentos de massa em encostas (Augusto Filho, apud Tominaga, 2009).....	82
Tabela 9 - Proposta de classificação de Hutchinson (1988) para classificação dos movimentos de massa em encostas gravitacionais (apud Ahrendt, 2005).....	83
Tabela 10 - Elementos significativos na descrição dos movimentos de massa .....	85
Tabela 11 – Estilo do escorregamento.....	85
Tabela 12 – Classificação da velocidade de deslocamento .....	86
Tabela 13 – Estado de atividade do escorregamento .....	86
Tabela 14 - Classificação de Perigo proposta pela UM-ISDR (2004).....	92
Tabela 15 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014) .....	96
Tabela 16 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014) .....	96
Tabela 17 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014) .....	97
Tabela 18 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014) .....	98
Tabela 19 – Probabilidades de escorregamento em cada vertente em condições de chuva com índices menor que 100mm/h.....	123

Tabela 20 – Classificação da intensidade da assimetria (adaptado de Lopes, 2003)	129
Tabela 21 – Tabela de distribuição Normal acumulada	139
Tabela 22– Principais grupos de fatores que influenciam nas ocorrências de movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Cruden e Varnes, 1996, apud Harr, 1987).	145
Tabela 23 - Tabela de pares ordenados da amostra experimental com as suas respectivas alturas (adaptado de Cava,1985 e Landim, Soares e Pumputis,1998)	158
Tabela 24 - Valores de variogramas em função da distância h entre os pares ordenados com apresentação do nº de pontos dos vértices de cada malha quadrada	161
Tabela 25 - Modelos teóricos de variograma com patamar (Olea,1999 apud Yamamoto)	163
Tabela 26 - Apresentação das coordenadas dos pontos vizinhos ao ponto que se deseja obter coordenada z por interpolação com utilização da krigagem da média	172
Tabela 27 - Critérios para estabelecimento da classe de susceptibilidade ao risco com base na avaliação dos laudos de ocorrências propostos nesta tese (Figura 37 a Figura 42)	177
Tabela 28 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos em 1996	186
Tabela 29 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos em 2010	187
Tabela 30 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos entre 2011 e 2014	188
Tabela 31 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade $Pr_1$ , $Pr_2$ e $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de 1996	191
Tabela 32 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade $Pr_1$ , $Pr_2$ e $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de 2010	192
Tabela 33 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade $Pr_1$ , $Pr_2$ e $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de entre 2011 e 2014	193
Tabela 34 – Número de ocorrências acumuladas por período	198

Tabelas 35a e 35b- Valores de Probabilidade para diferentes pontos de localização .....	199
Tabela 36 - Quadro comparativo entre Método Empírico x Método Probabilístico para definição de Mapas de Risco Geotécnico .....	227

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B.O.	Boletim de ocorrência
DFL	Diretoria de Fiscalização e Licenciamento
GEORIO	Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISRM	International Society for Rock Mechanics
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
IPP	Instituto Pereira Passos
ISDR	<i>International Strategy for Disaste Redution</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico
UTM	Universal Transversa de Mercato



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$	coeficiente de assimetria
$c$	coesão
$C_d$	comprimento total do segmento
$cf$	fator de correção
$C_{int}$	somatório dos comprimentos dos segmentos intactos
$c_j$	coesão aparente da junta
$i$	inclinação da aspereza da superfície
$L_n$	ponto de referência central
$P$	probabilidade de ocorrência de um evento
$R_s$	Risco específico
$R_t$	Risco total
$\alpha$	média dos logaritmos
$\gamma(h)$	variograma
$\lambda$	taxa de ocorrência média
$\mu$	média dos desvios
$\sigma_n$	tensão normal ao plano
$\tau_p$	resistência última ao cisalhamento
$\varphi$	ângulo de atrito
$\varphi_b$	ângulo de atrito básico da superfície
$\varphi_r$	ângulo de atrito residual
$\Psi_f$	inclinação da face do talude em relação ao plano horizontal
$\Psi_p$	inclinação com o plano horizontal
$\Omega$	Espaço amostral finito uniforme

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>Objetivo</b> .....	<b>23</b>
<b>Relevância do Tema</b> .....	<b>24</b>
<b>1 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS RELATIVOS À ESTABILIDADE DE TALUDES</b> .....	<b>27</b>
<b>1.1 Movimentos de massa gravitacionais</b> .....	<b>27</b>
1.1.1 Introdução .....	27
1.1.2 Descrição dos principais condicionantes dos movimentos de massa .....	28
1.1.2.1 Condicionantes geológico-estruturais .....	34
1.1.2.2 Condicionantes litológicos .....	54
1.1.2.3 Condicionantes pedológicos .....	59
1.1.2.4 Condicionantes geomorfológicos .....	65
1.1.2.5 Condicionantes climáticos-ambientais e hidrológicos .....	71
1.1.2.6 Condicionantes antrópicos .....	78
1.1.3 Tipologia dos Movimentos de Massa .....	80
1.1.4 Metodologias para caracterização dos movimentos de massa .....	84
<b>1.2 Mapas de Risco e Mapas de Susceptibilidade</b> .....	<b>86</b>
1.2.1 Introdução .....	86
1.2.2 Propostas para elaboração de mapas de risco e terminologias .....	90
1.2.3 Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Rocinha .....	100
<b>1.3 Caracterização Geológico-Geotécnica da Comunidade da Rocinha</b> .....	<b>104</b>
<b>1.4 Elaboração de laudos de vistoria de acidentes geotécnicos</b> .....	<b>106</b>
1.4.1 Introdução .....	106
1.4.2 Apresentação de laudos de vistoria .....	107
<b>2 FUNDAMENTOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA</b> .....	<b>115</b>
<b>2.1 Introdução</b> .....	<b>115</b>
<b>2.2 Breve histórico sobre Probabilidades</b> .....	<b>116</b>
<b>2.3 Conceituação Clássica, de Frequência e Subjetiva</b> .....	<b>117</b>
<b>2.4 Axiomas de Komogorov, consequências e propriedades da probabilidade</b> .....	<b>119</b>
<b>2.5 Probabilidade condicional</b> .....	<b>120</b>

<b>2.6 Teorema da Probabilidade Total .....</b>	<b>120</b>
<b>2.7 Teorema da Bayes: fundamentação teórica e aplicação prática .....</b>	<b>121</b>
<b>2.8 Fundamentos de Estatística.....</b>	<b>124</b>
2.8.1 Parâmetro de centralidade: Média, valor esperado ou esperança .....	125
2.8.2 Parâmetros de dispersão: a variância, o desvio padrão, e coeficientes de variação, assimetria e curtose. ....	126
2.8.2.1 Variância.....	126
2.8.2.2 Desvio Padrão $\sigma$ .....	127
2.8.2.3 Coeficiente de Assimetria $\beta_1$ .....	128
2.8.2.4 Coeficiente de Curtose $\beta_2$ .....	129
<b>2.9 Principais distribuições teóricas de probabilidade.....</b>	<b>130</b>
2.9.1 Distribuição Binomial.....	131
2.9.2 Distribuição de Poisson.....	134
2.9.3 Distribuição Normal.....	135
2.9.4 Distribuição Lognormal.....	139
2.9.5 Distribuição Beta .....	140
<b>2.10 Modelo de Atualização Bayseana (Harr, 1987) .....</b>	<b>147</b>
<b>3 FUNDAMENTOS DE GEOESTATISTICA .....</b>	<b>151</b>
<b>3.1 Inferência espacial .....</b>	<b>151</b>
<b>3.2 Modelagem variográfica .....</b>	<b>156</b>
<b>3.3 Tipos de variogramas e suas propriedades típicas .....</b>	<b>162</b>
<b>3.4 Estimativas geoestatísticas.....</b>	<b>165</b>
3.4.1 Krigagem simples ou estacionária.....	166
3.4.2 Krigagem da média .....	169
<b>4 MODELAGEM DO MAPA DE SUSCEPTILIDADE AO RISCO DA COMUNIDADE DA ROCINHA.....</b>	<b>175</b>
<b>4.1 Critério de seleção de laudos de ocorrência e eventos chuvosos .....</b>	<b>175</b>
<b>4.2 Classificação do risco geotécnico.....</b>	<b>177</b>
<b>4.3 Distribuição espacial das ocorrências .....</b>	<b>178</b>
<b>4.4 Cálculo das probabilidades de danos associados aos escorregamentos. 183</b>	
<b>4.5 Mapas de susceptibilidade de Risco a partir das probabilidades calculadas .....</b>	<b>189</b>
4.5.1 Correções do mapa de susceptibilidade ao risco através de avaliação <i>in loco</i> em áreas específicas .....	203

<b>5 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MAPAS DE RISCO .....</b>	<b>224</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>228</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>232</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>246</b>
<b>Mapa geológico da Rocinha .....</b>	<b>246</b>
<b>Mapa geomorfológico da Rocinha .....</b>	<b>247</b>
<b>Mapa de declividades da Rocinha .....</b>	<b>248</b>
<b>Mapa de risco com base empírica da Rocinha .....</b>	<b>249</b>
<b>Mapa de intervenções de obras civis para mitigação do risco geotécnico da Rocinha.....</b>	<b>250</b>
<b>Mapa de risco com base empírica do Maciço da Tijuca .....</b>	<b>251</b>
<b>Relatório fotográfico (fotos aéreas).....</b>	<b>252</b>
<b>Laudos de vistoria.....</b>	<b>253</b>
<b>Informações do registro de ocorrências e classificação de risco de todos os laudos nos períodos de estudo .....</b>	<b>254</b>

## INTRODUÇÃO

### Objetivo

O presente trabalho de pesquisa trata da elaboração de Mapas de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico na Comunidade da Rocinha com utilização de modelo probabilístico, estimativas geoestatísticas para interpolação espacial de dados e atualização bayesiana de probabilidades. A comunidade da Rocinha integra parte da vertente sul do Maciço da Tijuca e concentra a maior população em área favelizada do país, onde vivem aproximadamente 120 mil pessoas, muitas delas em condições de risco geotécnico.

A proposta é fundamentada a partir da seleção de diversos laudos de ocorrência de acidentes geotécnicos (período de 1996 à 2014) em diferentes níveis de gravidade, distribuídos espacialmente por quatro vertentes voltadas para os bairros de São Conrado e Gávea.

Além da distribuição espacial, o estudo também considera a distribuição temporal dos acidentes geotécnicos, uma vez que são estudadas as probabilidades de ocorrência de movimentos de massa ao longo de períodos de tempo pré-estabelecidos, em função de sua importância histórica, marcados por desastres naturais nas encostas, deflagrados, em geral, por elevadas precipitações pluviométricas.

Conhecidas as localizações de ocorrências de escorregamentos progressivos em diversos pontos, esta pesquisa propõe critérios de classificação de danos visando estabelecer probabilidades de escorregamento para cada ponto de referência, levando-se em conta aspectos qualitativos e quantitativos na ocasião da avaliação de cada laudo. A variação das probabilidades de deslizamento na área de estudo é interpretada como um parâmetro capaz de quantificar a susceptibilidade ao risco geotécnico.

Com a utilização da Teoria de Bayes, é possível calcular as probabilidades de escorregamento relacionadas aos danos, classificados de acordo com as premissas propostas. Através da atualização bayesiana, o modelo probabilístico permite recalcular valores de probabilidade condicional,

levando-se em conta o histórico de eventos precedentes e de novos eventos, resultando na atualização contínua e na redução da incerteza no cálculo das probabilidades.

Uma vez definidas as probabilidades de ruptura em diversos pontos conhecidos da comunidade, de modo particularizado para cada período chuvoso, buscou-se a idealização de um modelo geoestatístico capaz de simular a variabilidade espacial das probabilidades por toda região do maciço que constitui a comunidade da Rocinha.

De modo resumido, objetivou-se elaborar um Mapa de Susceptibilidade de Risco para a comunidade da Rocinha, capaz de minimizar interpretações individuais e subjetivas, visando auxiliar na prevenção de riscos, tomando por base conceitos de probabilidade e de estatística, além de recursos de interpolação por estimativa geoestatística através de software que incorpora ferramenta GIS (*Global Information System*).

Por fim, comparou-se o modelo analítico e computacional com o modelo tradicional e empírico existente e utilizado pela fundação GEORIO para elaboração dos Mapas de Susceptibilidade ao Risco Geotécnico.

#### Relevância do Tema

A cidade do Rio de Janeiro apresenta muitas características não apenas fisiográficas como também em termos de ocupação social, que são suficientes para ser considerada vulnerável aos desastres naturais, notadamente aqueles associados aos movimentos de massa gravitacionais.

Podem-se citar algumas dessas características naturais e antrópicas que favorecem escorregamentos nas encostas naturais em regiões metropolitanas, nos períodos de elevada intensidade pluviométrica:

- i) Taludes íngremes revestidos por capa de solo coluvionar instável depositada sobre superfície de rocha ou camada rígida de solo residual, sobre as quais se apoiam blocos rochosos, situados a montante de moradias precárias;

- ii) Existência de moradias situadas nas cristas e/ou no sopé de taludes instáveis, e em regiões de talvegues, sujeitas não apenas ao fluxo de águas e detritos, como também a inundações;
- iii) Ausência de infraestrutura básica de coleta de lixo ou esgotamento sanitário, cujo lançamento *in natura* no solo favorece a diminuição da resistência ao cisalhamento dos solos, tornando os taludes mais susceptíveis às movimentações;
- iv) Rompimento de tubulações de água de abastecimento, galerias de águas pluviais ou redes improvisadas de esgoto e águas pluviais, que podem igualmente reduzir a resistência dos solos principalmente pelo acréscimo de poropressão, além de aumentar a sobrecarga nos maciços, ocasionando redução do fator segurança das encostas.
- v) Execução de taludes de aterro e/ou corte indevidos e sem controle técnico, provocados por ações antrópicas em áreas de encostas, modificando a condição de equilíbrio natural dos taludes;
- vi) Ações de desmatamentos nos taludes, favorecendo a erosão superficial (*run off*), o aumento da vulnerabilidade e do perigo não somente aos moradores dos morros, como também de áreas formais à jusante das comunidades, dependendo da proximidade entre elas.
- vii) Presença de moradias próximas ao sopé de escarpas rochosas com elevado grau de fraturamento, susceptíveis a queda, rolamento de blocos ou ainda desprendimento de lascas e fragmentos de rocha encosta abaixo.

Um estudo mais aprofundado é apresentado no item 2.1 desta pesquisa, que trata, além do relevo e dos aspectos relativos a ocupação desordenada, outros condicionantes como clima, vegetação, pluviosidade, hidrogeologia, características geoestruturais e geológico-geotécnicas dos taludes, além da própria geomorfologia em seu sentido mais amplo, que vai além da simples conformação do relevo.

A combinação de todos estes fatores definem a possibilidade de ruptura local ou global dos taludes que revestem os maciços de solo e rocha e, uma vez

conhecidos os mecanismos que regem estes fenômenos, é possível prever o risco das movimentações que podem ocasionar danos humanos e materiais.

O conhecimento dos mecanismos físicos que desencadeiam movimentos de massa é importante na medida em que se pretende elaborar planos de gerenciamento de riscos que objetivam reduzir ou eliminar os danos gerados. Sem conhecer bem as causas não se torna possível combater os seus efeitos de modo eficaz, nem, tampouco, elaborar planos de prevenção de acidentes relacionados aos desastres naturais.



# 1 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS RELATIVOS À ESTABILIDADE DE TALUDES

## 1.1 Movimentos de massa gravitacionais

### 1.1.1 Introdução

Este item aborda a influência dos principais agentes predisponentes dos movimentos de massa gravitacionais, apresentando as suas características e os seus mecanismos relacionados com processos de instabilização dos taludes.

O termo movimentos de massa gravitacionais é usado para descrever os processos relacionados a movimentos descendentes de solo e rochas nas encostas, induzidos pelo campo de tensão gravitacional (Patton e Hendron Jr., 1974; Selby, 1993, apud Oliveira, 2009).

De um modo geral, movimentos de massa gravitacionais são constituídos pelo deslocamento de solo, rocha ou material composto encosta abaixo pela força da gravidade, podendo ou não ser potencializados pela atuação da água ou do gelo. A água contribui através da redução significativa da resistência dos materiais não consolidados e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos. (adaptado de Tominaga, 2009 *et al*).

Consistem os movimentos de massa em importante processo natural que atua na dinâmica das vertentes, fazendo parte da evolução geomorfológica dos relevos, uma vez que são importantes agentes modeladores da superfície terrestre. (adaptado de Bigarella e Passos.,2003).

Os movimentos de massa gravitacionais, seguidos das enchentes, são considerados os eventos associados aos desastres naturais que mais atingem a população brasileira. Além disso, representam um dos tipos de desastres mais recorrentes do mundo, afetando principalmente cidades cercadas por relevo acidentado, em geral ocupados por moradias precárias que concentram-se justamente em áreas vulneráveis aos escorregamentos de terra. Neste caso, os danos ambientais e socioeconômicos são consideráveis, podendo atingir níveis catastróficos, dependendo da magnitude do fenômeno.

No Brasil, os grandes desastres naturais envolvendo movimentos de massa gravitacionais que se tem notícia e que motivaram a pesquisa sobre estes fenômenos foram: Morro de Santa Terezinha e o bairro Marapé na cidade de Santos, em 1956, diversas localidades da cidade de Caraguatatuba (SP) em 1967, Rio de Janeiro (RJ) em 1966 e 1967, Tubarão (SC) em 1974 e, mais recentemente, no Vale do Itajaí,(SC) em 2008 e na região serrana do Rio (RJ) em 2011. Em todos estes locais registraram-se avalanches de detritos vitimando dezenas, e até centenas e até milhares de pessoas. No caso de Santos foram contabilizados aproximadamente 500 mortos e, na região serrana do Rio (notadamente em Nova Friburgo e Teresópolis) mais de 1000 vítimas em decorrência das corridas de detritos em diferentes vertentes dos maciços que envolvem os municípios afetados.

Apesar dos movimentos gravitacionais não ocorrerem exclusivamente em áreas ocupadas por população de baixa renda, a ocupação inadequada das encostas nas grandes cidades é, ainda, um dos principais fatores responsáveis pela sua ocorrência (adaptado de Ahrendt, 2005).

#### 1.1.2 Descrição dos principais condicionantes dos movimentos de massa

Os processos capazes de deflagrar movimentos de massa gravitacionais são formados pela associação de diversos fatores naturais e antrópicos ou, ainda, pela combinação destes. De acordo com Drew (1986), as movimentações dos taludes variam principalmente em função da natureza do material, da topografia, do clima e da vegetação, podendo ser tão lentos os movimentos que se tornam imperceptíveis (creep ou fluência) ou até mesmo bruscos e repentinos (desabamento ou desmoronamento). (Adaptado de Pinto, 2013).

Terzaghi (1950) dividiu as causas das instabilizações de taludes em externas e internas. As causas externas são aquelas que provocam aumento nas tensões cisalhantes ao longo da superfície potencial de ruptura, enquanto que as causas internas provocam a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo. Como exemplo de causas externas pode-se citar a sobrecarga na parte superior do talude, escavações que modificam a geometria ou inclinação do talude e ações naturais como a chuva, derretimento de neve e demais eventos

climáticos. Como causas internas, podem-se citar perda de resistência pela ação do intemperismo, elevação de poropressão na superfície de ruptura, terremotos, vulcanismos ou levantamento tectônico, etc. (adaptado de Suzuki, 2004).

Com relação aos mecanismos desencadeadores da instabilidades dos taludes de solo ou rocha, Fiori e Carmignani (2009) explicam que a força da gravidade origina tensões cisalhantes no interior do manto de alteração ao longo das vertentes, as quais aumentam com a inclinação e altura das encostas, com o peso específico do solo sobrejacente e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no solo.

Ao saturar o solo a água se acumula nos planos potenciais de ruptura, ocasionando a redução da resistência ao cisalhamento do solo pelo efeito da poropressão e redução da superfície específica de contato no arcaibouço sólido, favorecendo assim o deslizamento na superfície provável de ruptura.

Cabe ressaltar ainda que a infiltração persistente de água nas encostas durante as chuvas extremas reduz e, até mesmo, pode eliminar a parcela resistente do solo devido aos efeitos da perda da sucção nas camadas inicialmente não saturadas.

Na realidade, são diversos os condicionantes capazes de deflagrar movimentos de massa, que podem atuar separadamente ou em conjunto, entre os quais pode-se citar os principais:

- aspectos litológicos e pedológicos;
- vegetação;
- taxa de ocupação das encostas;
- condicionantes geomorfológicos;
- clima, pluviosidade e aspectos hidrológicos;
- aspectos geológico-estruturais.

Augusto Filho e Virgili (1998) definiram como principais condicionantes para movimentos de massa nas encostas brasileiras:

- características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- propriedades dos materiais que compõem o substrato de solos e rochas, incluindo todas as feições geológico-geotécnicas;
- padrões geomorfológicos;
- regime das águas de superfície e subsuperfície;

- tipos de uso e ocupação do solo, incluindo formas de ações antrópicas nas encostas.

Tratando ainda sobre os fatores que influenciam a ocorrência dos movimentos de massa, Cruden e Varnes (1996) propõem classificação por grupos de agentes condicionantes, como apresentado na tabela 1.

**Tabela 1– Principais grupos de fatores que influenciam nas ocorrências de movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Cruden e Varnes, 1996, apud Ahrendt, 2005)**

<i>Agentes Geológicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiais alterados, enfraquecidos ou intemperizados</li> <li>- Materiais cisalhados, fissurados ou fraturados (descontinuidades)</li> <li>- Contrastes na permeabilidade</li> <li>- Contrastes na espessura (material espesso e denso sobreposto a materiais plásticos)</li> </ul>
<i>Agentes Morfológicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tectonismo ou vulcanismo</li> <li>- Qualquer tipo de erosão</li> <li>- Deposição no topo ou na base da encosta</li> <li>- Remoção da vegetação</li> </ul>
<i>Agentes Físicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chuva intensa ou excepcionalmente prolongada</li> <li>- Degelo repentino</li> <li>- Intemperismo por congelamento e degelo</li> <li>- Abalo sísmico</li> <li>- Erupção vulcânica</li> <li>- Intemperismo de material expansivo</li> </ul>
<i>Agentes Antrópicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escavação da encosta ou da sua base (remoção do suporte)-Urbanização</li> <li>- Sobrecarga no topo ou na encosta</li> <li>- Diminuição do nível dos reservatórios</li> <li>- Desmatamento</li> <li>- Irrigação</li> <li>- Mineração</li> <li>- Vibração artificial</li> <li>- Vazamentos</li> </ul>

Nos problemas de estabilidade de taludes nas encostas do Rio de Janeiro, mais precisamente do Maciço da Tijuca, onde se situa a comunidade da Rocinha, pode-se afirmar que, entre as subdivisões apresentadas na Tabela 1, os agentes

físicos, representados por chuvas intensas ou excepcionalmente prolongadas, combinados aos agentes antrópicos, através de escavações indevidas, governam quase que na sua totalidade os movimentos de massa gravitacionais de maior ocorrência.

Dentro deste contexto, Guidicini & Nieble (1976) afirmam que os fatores condicionantes dos escorregamentos correspondem principalmente aos elementos do meio físico e, secundariamente, do meio biótico, os quais contribuem para o desencadeamento dos processos. Estes elementos são parte da própria dinâmica dos processos naturais, aos quais podem ser denominados agentes predisponentes. No entanto, a ação humana exerce forte influência favorecendo a ocorrência de processos ou minimizando os seus efeitos. (Tominaga *et al*, 2009)

Os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de condições geológicas, topográficas e ambientais da área onde se desenvolve o movimento de massa, representando condições naturais intrínsecas dos materiais, sem ação antrópica. Por outro lado, agentes efetivos referem-se ao conjunto de fatores diretamente responsáveis pelo desencadeamento dos movimentos de massa, onde se enquadram ações antrópicas (adaptado de Tominaga *et al*, 2009).

Com relação aos eventos catastróficos, Guidicini e Nieble (1976) são categóricos em afirmar que a ocorrência de chuvas intensas de curta duração são indiscutivelmente os agentes deflagradores dos escorregamentos quando, por exemplo, nas estações de verão, algumas frentes frias originadas no Círculo Polar Antártico encontram as massas de ar quente tropicais ao longo da costa sudeste brasileira. Entretanto, cabe ressaltar que, nos casos de solos menos permeáveis, somente as chuvas prolongadas, independente de sua intensidade, são capazes de saturar espessas camadas de solo para redução dos fatores de segurança.

As condições que favorecem os movimentos de massa dependem principalmente da estrutura geológica, da declividade da vertente (forma topográfica), do regime de chuvas, da perda de vegetação e da atividade antrópica, bem como pela existência de espessos mantos de intemperismo, além da presença de níveis ou faixas impermeáveis que atuam como planos de deslizamento (Bigarella e Passos, 2003, apud Pinto *et al*, 2012).

Oliveira (2009) investigou processos e fenômenos associados aos movimentos de massa gravitacionais, citando Selby (1993) que enfatiza que para que recebam esta denominação (movimento de massa) basta que exista movimento de solos ou rochas encosta abaixo sob influência da gravidade, sem a contribuição direta de outros fatores como água ou ar.

Ainda segundo Oliveira (2009), as ocorrências dos movimentos de massa se devem à susceptibilidade do terreno segundo fatores predisponentes, associados à ação de atributos deflagradores/modificadores, que se relacionam de modo dinâmico (temporal e espacial), através de uma composição global, de acordo com as particularidades locais.

Os atributos considerados por Oliveira (2009) como predisponentes dos movimentos de massa, bem como os seus agentes modificadores e deflagradores são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2– Fatores condicionantes dos movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Oliveira, 2009)**

Atributos predisponentes	Geologia
	Pedologia
	Hidrogeologia
	Hidrografia e Drenagem
	Geomorfologia
Agente modificador (natureza tecnogênica)	Intervenção antrópica sobre meio ambiente e ao padrão de ocupação do espaço urbano
Agente deflagrador (origem natural)	Pluviosidade, chuvas extremas e sua distribuição espacial e temporal

Após revisão da literatura sobre aspectos teóricos de fluxos não saturados e a sua influência na estabilidade de taludes, Franch (2008) sugere a divisão dos fatores condicionantes em 3 níveis, a saber:

- Fatores externos à superfície do terreno, notadamente os climáticos;

- Fatores atuantes na interface entre meio externo e meio poroso, representado pelo revestimento superficial do terreno, e
- Fatores internos, relativos às propriedades do solo que compõem o maciço.

Outros apontamentos importantes e mais detalhados a este respeito são tratados no item referente à influência das precipitações pluviométricas nos mecanismos de estabilidade, no curso deste capítulo.

Rico & Castillo (1978), apud Benessiuti (2011), apresentam uma divisão de variáveis que influenciam na estabilidade de taludes muito semelhante àquela proposta por Franch (2008), supracitada. Eles propõem três categorias de variáveis:

- Fatores geomorfológicos: associados à topografia local e à geometria do talude;
- Fatores internos: relativos às propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos e
- Fatores climáticos: aspectos externos representados pela precipitação, temperatura e pressão.

A Tabela 3 apresenta a relação de agentes efetivos e predisponentes com as causas internas, externas e intermediárias, segundo Guidicini & Nieble (1983). Nas causas está implícita a relação resistência x sollicitação, de acordo com o conceito de fator de segurança à estabilidade dos taludes.

**Tabela 3– Relação agentes/causas dos escorregamentos proposta por Guidicini & Nieble (1983), apud Benessiuti (2011)**

AGENTES/CAUSAS DOS ESCORREGAMENTOS			
AGENTES	PREDISPONENTES	Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climático-hidroológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação original	
	EFETIVOS	PREPARATÓRIOS	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação de nível de lagos, marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desflorestamento
		IMEDIATOS	Chuvas intensas, fusão do gelo e neve, erosão, terremotos, ondas, ventos, ação do homem
CAUSAS	INTERNAS	Efeito das oscilações térmicas, redução dos parâmetros de resistência por intemperismo	
	EXTERNAS	Mudança na geometria do sistema, efeitos de vibração, mudanças naturais na inclinação das camadas	
	INTERMEDIÁRIAS	Elevação do nível piezométrico em massas "homogêneas", elevação da coluna da água em descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático, erosão subterrânea retrogressiva ("piping"), diminuição do efeito de coesão aparente	

#### 1.1.2.1 Condicionantes geológico-estruturais

Diversos autores consideram os aspectos geológicos, sob ação de diferentes meio morfoclimáticos, como sendo os condicionantes que mais influenciam nos processos de instabilização dos taludes de rochas, não apenas quanto às suas propriedades mecânicas, mas também devido à composição física e química das rochas.

Bigarella e Passos. (2003) consideram entre os fatores geológicos desencadeantes desses eventos: os aspectos litológicos; os padrões de fraturas



e diáclases; o manto de intemperismo; a coesão e o peso específico do material formador das vertentes; a circulação das águas e os esforços de cisalhamento.

Os mesmos autores afirmam que a facilidade de deslocamento dos maciços nas encostas têm forte relação com o grau de intemperização das rochas que, por sua vez, dependem, entre outros fatores, das características das descontinuidades destas rochas, em função dos padrões de diáclases e fraturas.

A constante e persistente infiltração e percolação de água pelas descontinuidades, além de lixiviar o material cimentante, exerce pressões laterais nos planos de fratura, acentuando o processo de enfraquecimento do maciço e, conseqüentemente, tornado-o mais vulnerável aos movimentos de massa. Este fenômeno é mais significativo e rápido onde a rede de diaclasamento é mais concentrada e profunda.

Ainda neste contexto, sobre a influência do manto de intemperismo nos movimentos de massa, Picanço (2010) e Bigarella e Passos. (2003) observam que a espessura daquele exerce influência nos mecanismos de movimentação dos maciços nos taludes:

- Na porção superior das vertentes onde, em geral, as declividades são maiores, o manto de intemperismo é pouco espesso e menos evoluído porque as águas escoam mais rapidamente e a ação gravitacional é maior sobre os materiais consolidados, de modo que o movimento de massa é constituído essencialmente por rolamento de blocos de rocha e desprendimento de lascas.

- Por outro lado, nas cotas inferiores das vertentes, caso a superfície do relevo seja côncava e caracterizada geralmente por espessos depósitos de taludes, a ação gravitacional atua sobre material alterado, caracterizado por escorregamentos da massa de regolito instável e heterogêneo.

Fiori e Carmignani (2009) destacam que maciços rochosos, por natureza, são tipicamente heterogêneos e anisotrópicos devido aos diferentes tipos litológicos, presença de descontinuidades e variados graus de alteração. Apontam a presença de descontinuidades nas rochas como fator principal de influência na estabilidade e deformação dos maciços rochosos, aliado à redução da resistência devido à alteração das rochas por processos metamórficos, magmáticos ou intempéricos. Estas descontinuidades são representadas por juntas, falhas, contatos litológicos e foliações metamórficas e, segundo muitos pesquisadores, a resistência da massa de rocha depende mais das

descontinuidades presentes do que propriamente da resistência da rocha intacta.

De modo simples, Fiori e Carmignani (2009) definem as descontinuidades como planos de fraqueza na rocha, por meio dos quais o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta menor resistência ao cisalhamento, dependendo dos tipos de descontinuidade como planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração, veios ou diques, de acordo com tipo de preenchimento. Ainda com relação à presença das descontinuidades, afirmam que o movimento da água através das mesmas diminui significativamente a resistência mecânica dos maciços devido à geração de pressões neutras e hidrostáticas. Esta influência da presença de água no planos de fraqueza constitui um capítulo à parte, face a sua importância no contexto da estabilidade dos maciços rochosos.

Segundo aqueles autores, os fatores geológicos que afetam a resistência das rochas nos processos de estabilidade são mineralogia, textura, granulometria e presença de material cimentante nas descontinuidades.

Em termos de estabilidade de maciços rochosos o estudo da geologia estrutural e geomecânica desempenham papel de relevância dentro deste contexto, uma vez que governam o comportamento mecânico resistente, deformacional e hidráulico dos maciços, no caso em estudo representado por taludes de rocha.

Fato é que a compartimentação do maciço de rocha causada pela evolução das descontinuidades favorece os movimentos de massa gravitacionais, o que explica a importância em se estudar estes planos de fraqueza, que nada mais são do que feições geológicas produzidas por origens térmicas, sedimentares e tectônicas, podendo ainda ser acentuadas por ações antrópicas.

Redução do volume dentro do maciço, baixa resistência ao atrito e elevada permeabilidade são apenas algumas características que justificam a importância do estudo das descontinuidades e o seu papel no comportamento geomecânico dos maciços rochosos.

Na literatura é vasta a quantidade de autores que atribuem como primordial a importância de se conhecer as propriedades das descontinuidades

na análise de um maciço rochoso. Silva (2015) cita alguns destes pesquisadores nos textos abaixo reproduzidos :

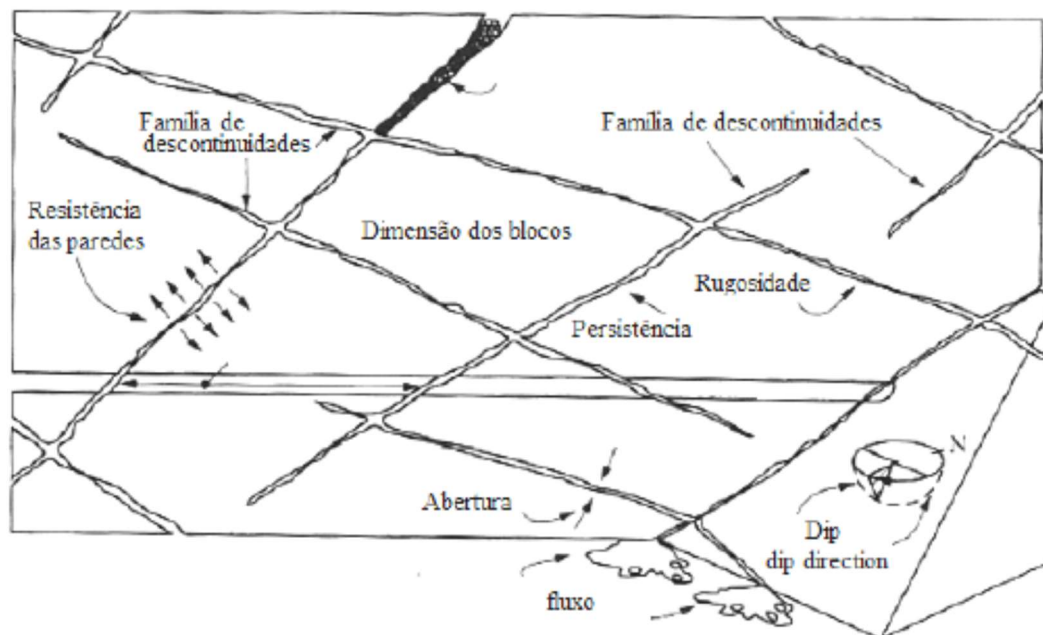
- Vallejo (2002): “Nos maciços rochosos quando se modificam as condições iniciais, devido à ação de forças externas ou internas, as deformações e rupturas dos mesmos dão-se segundo superfícies das descontinuidades;

- Bandis (1980) refere-se às descontinuidades como “..interrupções mecânicas pré-existentes, descontínuas de origem geológica, sendo que o arranjo de blocos de rocha intacta formados por estas interrupções conferem ao maciço um caráter heterogêneo, anisotrópico e descontínuo.”;

- Grasselli (2001) afirma que “as descontinuidades são uma característica ou entidade geológica dos maciços rochosos que condicionam o seu comportamento mecânico, isto é, afetam a sua resistência e deformabilidade. Estas conferem um caráter anisotrópico e descontínuo, tornando-o menos resistente e mais deformável, o que dificulta a avaliação do seu comportamento mecânico. As descontinuidades tornam o maciço rochoso menos competente, mais deformável e altamente anisotrópico por reduzirem a sua resistência tangencial segundo determinadas direções.”

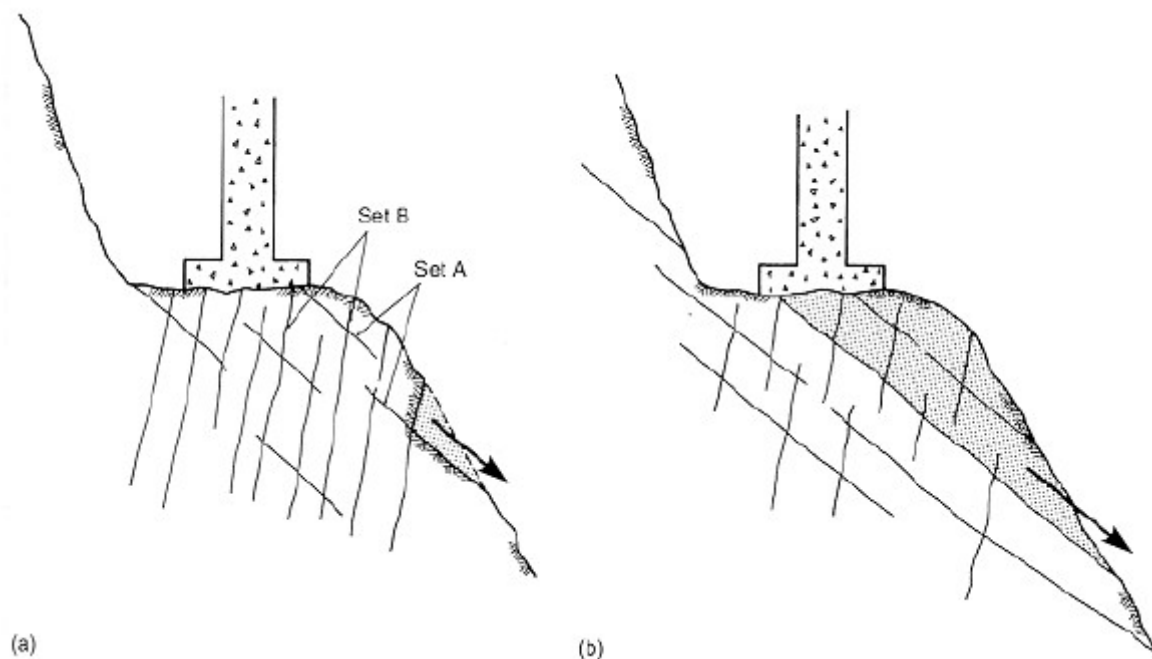
- ISRM (1977): “...a presença de planos de descontinuidade reduz a resistência tangencial paralela a estes planos e a resistência à tração perpendicular aos mesmos. Por esta razão, a caracterização das descontinuidades, seja ela baseada em métodos empíricos, analíticos ou numéricos, apresenta um papel fundamental no dimensionamento de estruturas de engenharia sobre ou no interior do maciço rochoso.”

De acordo com a ISRM (1977), as características mais importantes e mensuráveis das descontinuidades são: orientação espacial, persistência, espaçamento, rugosidade, abertura, preenchimento, resistência das paredes, percolação e número de famílias e dimensão dos blocos. As propriedades geotécnicas desses maciços afetadas por descontinuidades foram estudadas em detalhes por Bieniawski (1973) e Cording et al.(1975), depreendendo-se que a sua resistência depende intrinsecamente da combinação de todos estes fatores. A Figura 1 ilustra alguns destes parâmetros que caracterizam as descontinuidades e a sua influência na geometria do elemento rochoso.



**Figura 1 - Representação dos parâmetros que caracterizam as descontinuidades (Hudson e Harrison, 2007, apud Rocha, 2015)**

As figuras subsequentes ilustram apenas algumas dessas características, a título de exemplificação. No caso da Figura 2(a) podem-se identificar descontinuidades mergulhando para o interior do talude, reproduzindo uma situação de fundação estável, em contraposição à Figura 2(b), caso em que as descontinuidades mergulham para fora da face do talude, o que representa a instabilidade da fundação. (adaptado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_4\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf))



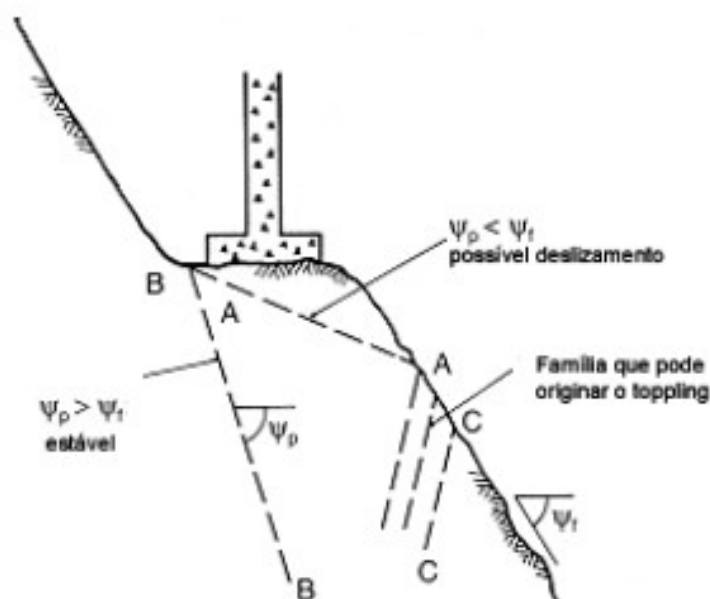
**Figura 2 - Influência do desenvolvimento e orientação das discontinuidades numa fundação em talude rochoso. (adaptado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_4\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf))**

Pode-se observar ainda que as discontinuidades responsáveis pelo deslizamento afluindo na face do talude da Figura 2(a) são pouco persistentes e mais espaçadas quando comparadas às discontinuidades da família representada pela Figura 2(b) que, por sua vez, sugere escorregamento da fundação sobre as discontinuidades. Diversos autores denominam tais discontinuidades como planos de fratura de tração (*tension cracks*)

Analisando ainda o caso apresentado na Figura 2, é interessante observar que, quanto à estabilidade global da fundação, segundo o autor da pesquisa (<http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apont>), embora as discontinuidades da Figura 2(a) não estejam projetadas desfavoravelmente para fora do talude, justamente por possuir maior densidade de fraturas, possui maior capacidade de individualização de blocos, cujo processo pode ainda ser acelerado com a ação erosiva da água (ou gelo), ocasionando movimentação parcial do maciço.

A Figura 3 ilustra agora duas situações de instabilidade de talude rochoso em função da orientação dos planos de fraqueza do maciço:

- i) Caso o ângulo  $\Psi_p$  que representa a inclinação com a horizontal do plano BB que contem uma descontinuidade seja menor que a inclinação da face do talude em relação ao mesmo plano horizontal ( $\Psi_f$ ), então a cunha de bloco formado por estes pode vir a deslizar. Portanto, quando  $\Psi_p > \Psi_f$ , pode-se assumir que a situação é estável quanto ao deslizamento (ruptura planar) do plano de fraqueza;
- ii) Pode-se identificar na família de 3 descontinuidades que interceptam a face do talude uma situação potencialmente instável, evidenciando possível ruptura por “*toppling*” com escorregamento entre as placas individualizadas, qual movimento de rotação, ou até mesmo subsidência dependendo da inclinação da fratura.



**Figura 3 - Representação de descontinuidades para análise de estabilidade de maciço de rocha (adaptado de**

[http://paginas.fe.up.pt/~qeng/ge/apontamentos/Cap\\_4\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~qeng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf))

Com relação ainda ao grau de orientação das juntas dentro de um maciço rochoso, Fiori e Carmignani (2009) comentam a respeito da influência da anisotropia mecânica na resistência das rochas, recorrendo à McMahon (1968):

“maciços rochosos, com juntas irregularmente orientadas, apresentam um grau maior de interligação entre os blocos e menor anisotropia mecânica do que maciços rochosos com juntas regularmente espaçadas.” Isto porque a anisotropia mecânica é diretamente proporcional à regularidade da orientação das juntas, o que facilita a geração de planos de fraqueza dentro do maciço rochoso.

Outra característica relevante das descontinuidades e que representa um dos parâmetros de maior influência no comportamento dos maciços rochosos refere-se a sua persistência, definida como uma expressão de sua continuidade ininterrupta ao longo de sua extensão em determinadas direções (adaptado de Fiori e Carmignani, 2009). Para quantificar a persistência mede-se o comprimento de todos os traços da superfície das descontinuidades em superfícies expostas do maciço em determinada área média das diversas famílias de descontinuidades. Em função do valor do comprimento do traço das descontinuidades pertencentes a uma mesma família, utilizam-se as definições reproduzidas na Tabela 4 para descrever a persistência das descontinuidades.

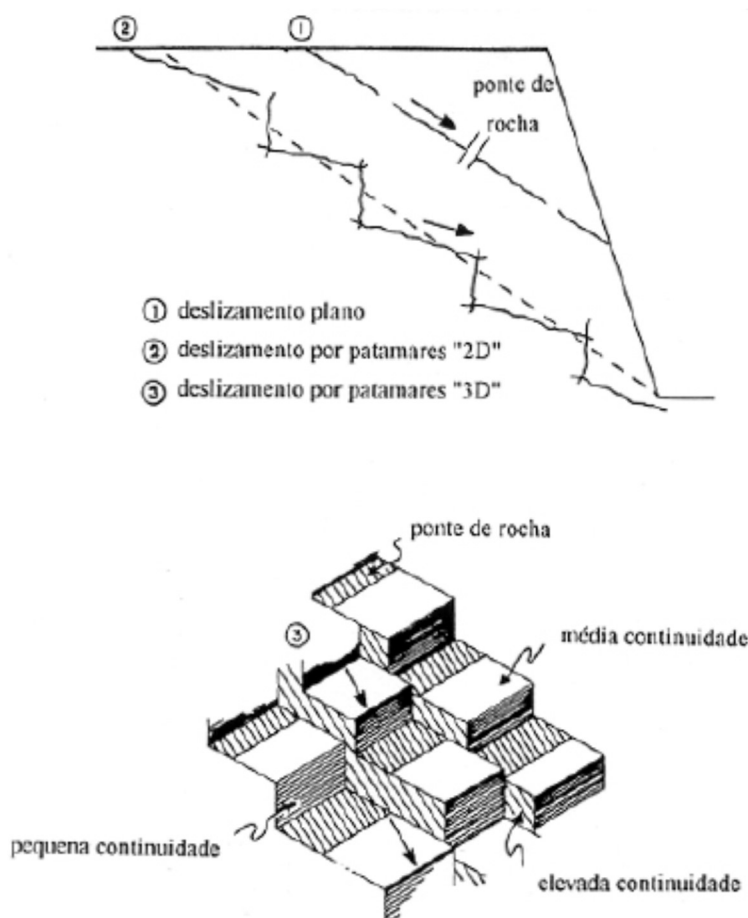
**Tabela 4 – Classificação das descontinuidades de um maciço rochoso quanto à persistência (ISRM,1983)**

PERSISTÊNCIA	COMPRIMENTO (m)
Muito pequena	<1
Pequena	1-3
Média	3-10
Elevada	10-20
Muito elevada	>20

Para facilitar a determinação numérica da persistência das descontinuidades, pode-se utilizar a Equação (1):

$$P = \left( 1 - \frac{C_{int}}{C_{id}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Sendo que  $C_{int}$  representa o somatório dos comprimentos dos segmentos intactos ao longo da descontinuidade e  $C_d$ , o comprimento total do segmento da descontinuidade no afloramento. Os segmentos intactos são ditos “pontes de rocha”, elementos portanto favoráveis à estabilidade de taludes, e estão ilustrados na Figura 4. Em última análise, pode-se afirmar que a persistência das descontinuidades indica as possibilidades de ruptura de um talude. Um dos indícios mais comuns dessas descontinuidades é o aparecimento de juntas de tração no topo dos taludes.



**Figura 4 - Representação de pontes de rocha , (adaptado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_4\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf))**

No estudo do comportamento da resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos deve-se obrigatoriamente estudar a contribuição da rugosidade das paredes de uma descontinuidade, no caso de não existir material de preenchimento na junta. De acordo com o critério de Mohr-Coulomb, a



resistência ao cisalhamento apresenta comportamento linear em relação à tensão normal agindo no plano das descontinuidades, de acordo com a equação (2):

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \phi + c \quad (2)$$

onde  $\phi$  representa o ângulo de atrito das descontinuidades,  $c$  a coesão das descontinuidades,  $\tau_p$  a resistência última ao cisalhamento e  $\sigma_n$  a tensão normal ao plano das descontinuidades. Este critério representa totalmente a realidade por considerar a existência de coesão (caso de material de preenchimento) porém não considera a geometria da superfície da junta. As asperezas devido às irregularidades geométricas da junta aumentam consideravelmente a resistência ao cisalhamento melhorando o comportamento quanto à estabilidade do maciço. (adaptado de Aguilera, 2009)

Estas considerações foram levantadas por Patton (1996), que considerou a dilatação volumétrica provocada pelas asperezas como incremento na resistência ao cisalhamento nos contatos da junta formada por dentes com inclinação constante, cuja formulação está representada pela equação (3).

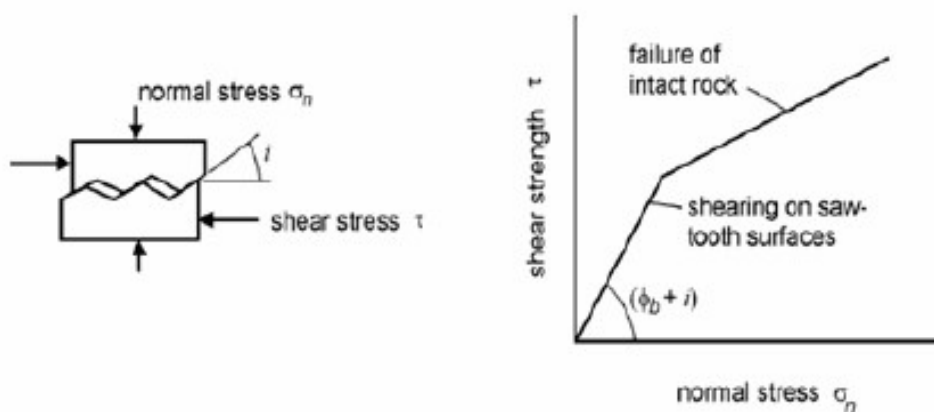
$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \quad (3)$$

sendo  $\phi_b$  o ângulo de atrito básico da superfície e  $i$  a inclinação da aspereza da superfície. A equação 3 é válida somente para casos em que as tensões normais são baixas e incapazes de despertar tensões cisalhantes significativas nas asperezas.

Para valores de tensão ou cargas normais elevadas, capazes de cisalhar facilmente as pontas das rugosidades (asperezas), Patton (1966) propôs, através de resultados experimentais de resistência ao cisalhamento em rochas, a aplicação de critério de ruptura onde denominou de  $c_j$  a coesão aparente da junta e  $\phi_r$  o ângulo de atrito residual. A equação (4) reproduz esta consideração.

$$\tau = c_j + \sigma_n \tan(\phi_r) \quad (4)$$

Cabe salientar que a resistência ao cisalhamento descrita por Patton (1966) considera um número de asperezas espaçadas regularmente e com igual dimensões, o que não é razoável considerar para efeitos práticos quanto ao comportamento dos maciços rochosos. A Figura 5 ilustra envoltória bilinear produzida pelo critério de ruptura de Patton (1966), que nada mais é do que uma simples extensão do critério de Mohr-Coulomb (adaptado de Aguilera, 2009).

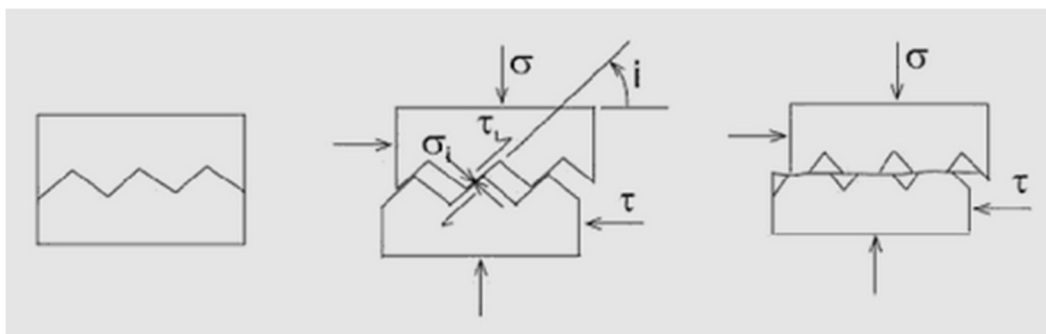


**Figura 5 - Critério de ruptura de Patton (1966). Trajetória bilinear de ruptura (Aguilera, 2009)**

Ainda no contexto de se considerar o acréscimo de resistência com a inclinação de superfícies na configuração de dentes, Hoek e Bray (1974) esquematizam proposta similar à de Patton (1966), sugerindo que o plano de ruptura pode ocorrer tanto no contato da superfície de inclinação “i” dos dentes, como também na própria interface de contato da junta e paralela ao plano de falha.

No primeiro caso as tensões normais e cisalhantes podem ser expressas decompondo-se os esforços em componentes normais e tangenciais ao plano dos dentes com inclinação “i”. Estas questões podem ser visualizadas na Figura

6, que reproduz ensaio de cisalhamento de corpo de prova de rocha com junta dentada.

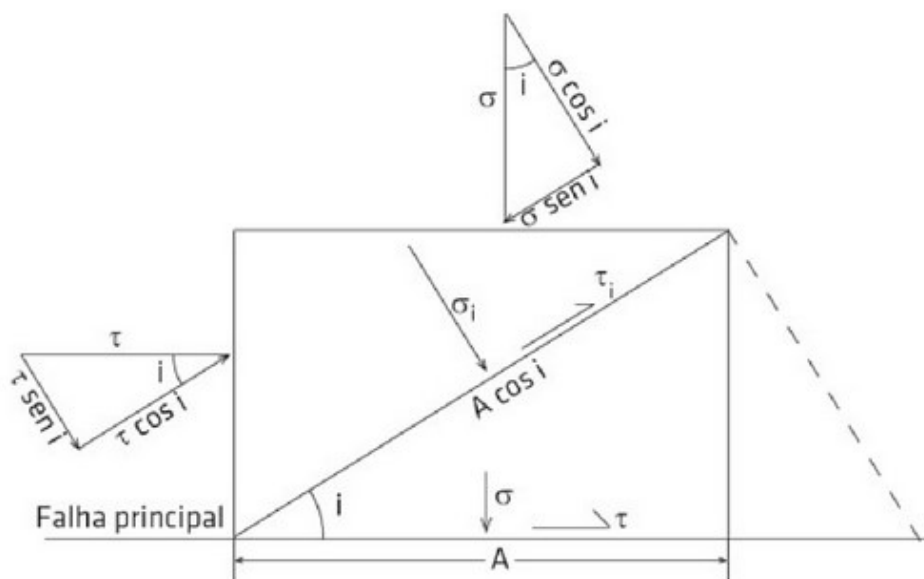


**Figura 6 - Influência das irregularidades ao longo de superfícies de cisalhamento (Hoek e Bray, 1974, apud Fiori e Carmigiani, 2009)**

Conseqüentemente, as tensões normais e cisalhantes podem ser expressas, por decomposição, conforme relatado de acordo com as equações (5) e (6) e com a Figura 7 :

$$\tau_i \cdot A = \tau \cdot \cos i \cdot A \cdot \cos i - \sigma \cdot \operatorname{sen} i \cdot A \cdot \cos i \quad (5)$$

$$\sigma_i \cdot A = \sigma \cdot \cos i \cdot A \cdot \cos i + \tau \cdot \operatorname{sen} i \cdot A \cdot \cos i \quad (6)$$



**Figura 7 - Decomposição dos esforços atuantes em um plano inclinado em relação à falha principal (Fiori e Carmigiani, 2009)**

Substituindo as equações (5) e (6) na equação de resistência ao cisalhamento proposta por Coulomb, no caso de se desprezar a coesão – eq. (7)– temos o desenvolvimento que se apresenta na sequência:

$$\tau_i = \sigma_i \cdot \text{tg} \phi \quad (7)$$

$$\tau \cdot \cos^2 i - \sigma \text{sen} i \cdot \cos i = (\sigma \cdot \cos^2 i + \tau \cdot \text{sen} i \cdot \cos i) \text{tg} \phi$$

Dividindo-se a expressão acima por  $\cos^2 i$ , temos:

$$\tau - \sigma \frac{\text{sen} i}{\cos i} = (\sigma + \tau \cdot \frac{\text{sen} i}{\cos i}) \text{tg} \phi \rightarrow \tau = \sigma \cdot \text{tgi} + \sigma \cdot \text{tg} \phi + \tau \cdot \text{tgi} \cdot \text{tg} \phi$$

$$\tau = \sigma \cdot (\text{tgi} + \text{tg} \phi) + \tau \cdot \text{tgi} \cdot \text{tg} \phi \rightarrow \tau \cdot (1 - \text{tgi} \cdot \text{tg} \phi) = \sigma \cdot (\text{tgi} + \text{tg} \phi)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{(\text{tgi} + \text{tg} \phi)}{(1 - \text{tgi} \cdot \text{tg} \phi)}$$

Da função de adição de tangentes, dos fundamentos de trigonometria temos que:

$$\text{tg}(x + y) = \frac{(\text{tg}x + \text{tg}y)}{(1 - \text{tg}x \cdot \text{tg}y)}$$

o que nos permite concluir, por simples analogia matemática que:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \text{tg}(i + \phi) \rightarrow \tau = \sigma \cdot \text{tg}(i + \phi) \quad (8)$$

Pode-se observar que a equação (8) já foi utilizada por Patton (1966) e apresentada com mesmo formato na equação (3) desta revisão de literatura.

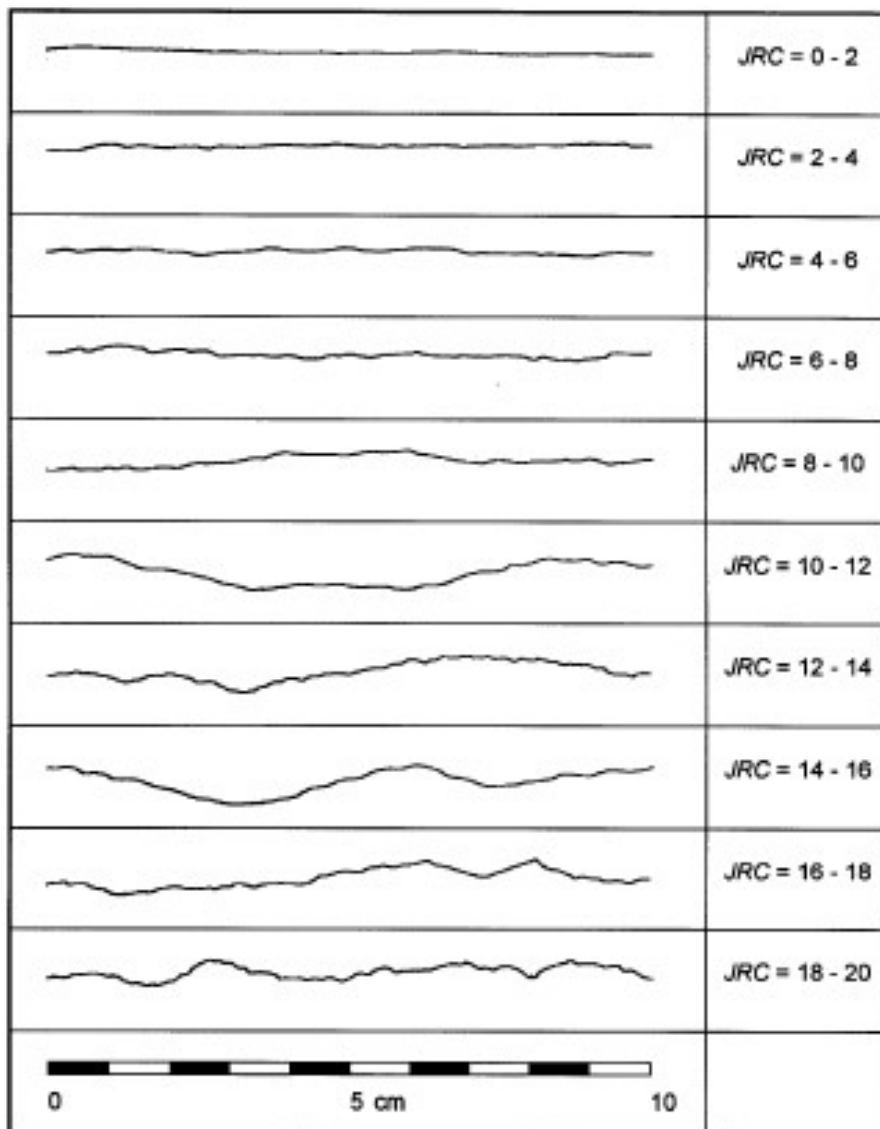
O ângulo da equação (8) é composto por uma parcela de inclinação da junta ( $i$ ) somada ângulo de atrito ( $\phi$ ), que pode ser máximo, ou seja, ângulo de pico, mínimo ou residual, ou ate mesmo intermediário, dependendo do grau de deslocamento cisalhante já ocorrido. (adaptado de Fiori e Carmignani, 2009).

Os valores do ângulo de atrito dependerá do tipo de rocha e do grau de alteração das paredes das descontinuidades não preenchidas por solo ou outra rocha incrustada.

Barton e Choubey (1977) propuseram método visual para mensurar o coeficiente de rugosidade da junta, denominado JRC, com utilização dos perfis de rugosidade apresentados na Figura 8, cujo valor de JRC a ser utilizado é o mais representativo. Já para estimar a resistência à compressão das paredes da junta, denominada de JCS, e o ângulo  $\phi$ , é necessário testar as paredes das descontinuidades com aparelho de esclerometria.

A expressão que relaciona todos estes parâmetros, incluindo ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) e de pico ( $\phi_p$ ) é apresentada na equação (9):

$$\phi_p = JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \quad (9)$$



**Figura 8 - Perfis de rugosidade para a determinação de coeficientes de rugosidade (Barton e Choubey, 1977, apud Aguilera, 2009).**

A abertura e o preenchimento das juntas são características importantes na determinação da resistência do maciço porque nestas aberturas desenvolvem-se pressões perpendiculares às paredes das juntas, além de movimentos tangenciais de cisalhamento podendo gerar material fragmentado ao longo dessas superfícies.

Os espaços entre as juntas, ora denominado aberturas, podem estar total ou parcialmente preenchidos por solo ou outra rocha, ou até mesmo sem nenhum preenchimento rígido. Independentemente do tipo de material de

preenchimento, de um modo geral, apresentam baixa resistência ao cisalhamento, com valores de ângulo de atrito variando de 8 a 15 graus, a exemplo de material argiloso (Cording et al., 1975, adaptado de Fiori e Carmignani, 2009).

A resistência ao cisalhamento da descontinuidade poderá ser governada tanto pela rocha como pelo material de preenchimento, dependendo do espaçamento entre as juntas: caso a abertura seja estreita o bastante para que as rugosidades das juntas desenvolva contato rocha-rocha a resistência de pico da descontinuidade será ditada pela própria resistência da rocha (adaptado de Fiori e Carmignani, 2009).

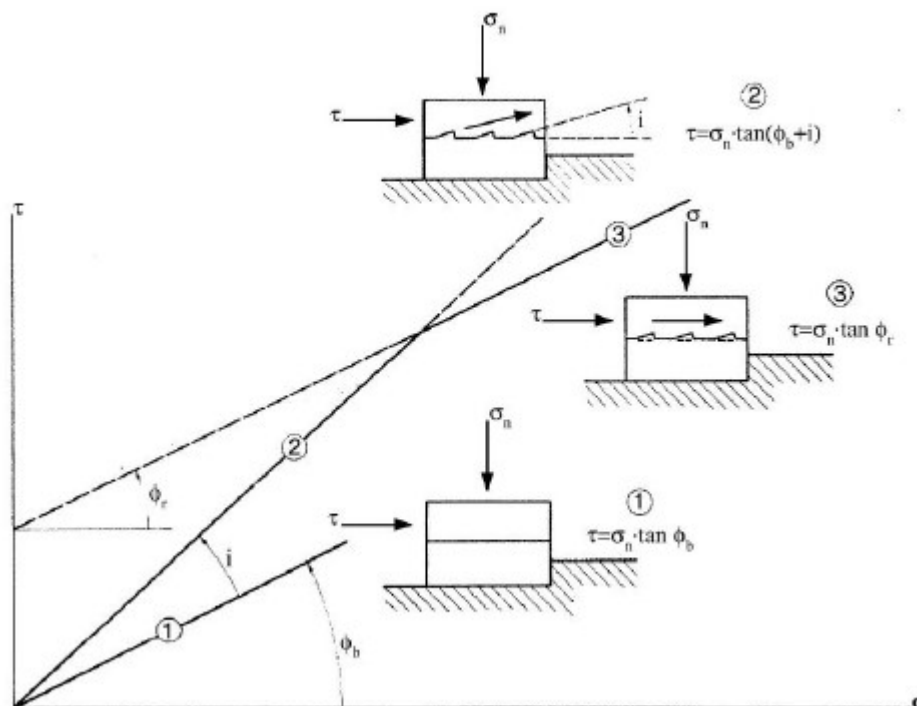
Fiori e Carmignani (2009) acrescentam ainda que, por outro lado, se a separação das juntas é ampla o bastante para que a espessura do material de preenchimento seja maior que a altura dos dentes do maciço, não haverá contato rocha-rocha, e a resistência ao cisalhamento da descontinuidade será controlada pelas propriedades do material de preenchimento, seja em termos de atrito, seja em termos de coesão.

A Figura 9 resume com clareza todo o exposto sobre a influência das aberturas e do preenchimento entre juntas na resistência ao cisalhamento do maciço:

- No caso I, as juntas lisas se tocam ao longo de toda a superfície da descontinuidade de modo que não existe elemento de preenchimento. Não havendo rugosidade na ligação entre as faces não existirá também resistência adicional de pico com prejuízo da resistência ao cisalhamento do maciço, que apresenta valor reduzido, associado a uma condição de resistência residual ;

- No caso II, as rugosidades na interface de contato existem, porém não há ligação rocha x rocha na sua totalidade devido à existência de preenchimento de solo, seja parcial ou total. Aqui a resistência ao cisalhamento do maciço é governada pela resistência do material de preenchimento dos vazios entre juntas, o que representa uma situação intermediária de resistência, dependendo das características do preenchimento com presença de intercepto coesivo.

- No caso III a superfície de toda a descontinuidade é áspera com a presença de dentes que induzem total contato rocha x rocha conduzindo a resistência de pico. A resistência da descontinuidade é controlada pela resistência do maciço.



**Figura 9 - Envoltória de ruptura para superfícies múltiplas**

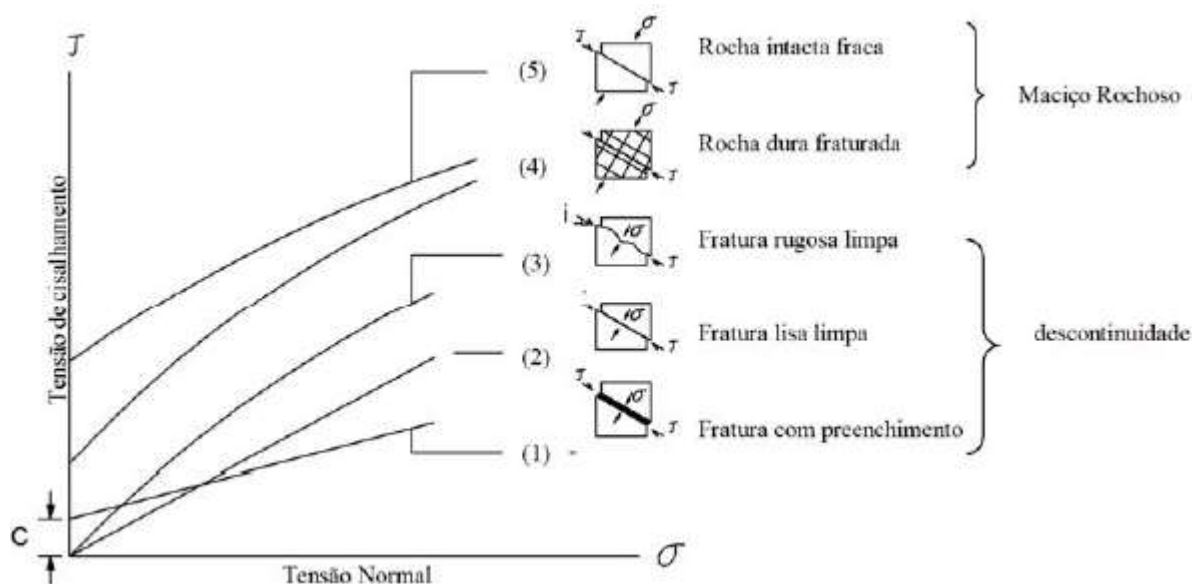
**(Patton, 1966, apud Ramirez, 2006).**

Board *et al* (1995) reproduz na Figura 10 diagrama análogo ao proposto por Patton (1996), porém apresenta três tipos de descontinuidades e dois tipos de maciços rochosos, totalizando 5 tipos de envoltórias.

Ramirez (2006) denomina as juntas de fraturas e apresenta os seguintes comentários: no caso da envoltória 1 as fraturas são preenchidas por argilas com elevada plasticidade e ângulo de atrito baixo, mas que podem oferecer alguma coesão. Na envoltória 2 as fraturas são lisas, a coesão é nula e, devido à ausência de material de preenchimento, o ângulo de atrito ( $\phi_b$ ) depende das características da rocha intacta. Na envoltória 3 a coesão é nula porque, assim como no caso 2, não existe material (argiloso) de preenchimento nas fraturas,



porém, devido à presença de irregularidades ou asperezas da superfície, passa a existir incremento de resistência nas descontinuidades. Com o aumento da tensão normal as asperezas são cisalhadas e o ângulo de atrito total progressivamente diminui. No caso da envoltória 4, a ruptura do maciço rochoso ocorre em parte através de rocha intacta e parcialmente ao longo de superfícies de descontinuidades, podendo ser expressa por uma envoltória não linear, dando valores de resistência dependentes da tensão normal atuante, do confinamento e da densidade de fraturas no maciço rochoso. A envoltória 5 pode representar maciços rochosos compostos por material de solo fino, o que confere ângulo de atrito baixo mas elevados valores de coesão em ausência de fraturas. (adaptado de Ramirez, 2006)

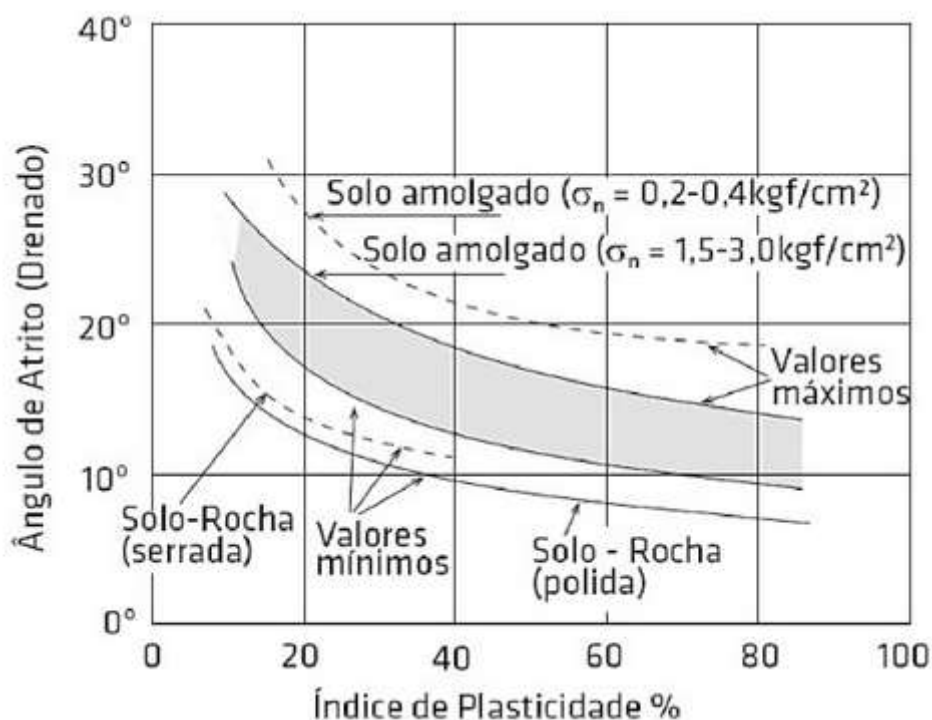


**Figura 10 - Envoltória de ruptura para superfícies múltiplas**

**(Patton, 1966, apud Ramirez, 2006).**

Kanji (1969) concluiu, após ensaios de laboratório realizados com amostras amolgadas de diversos tipos que, na ocasião da ruptura, ocorrem reduções do ângulo de atrito de 1 a 14,5° para tensões baixas e de 2,4 a 6,5° para tensões maiores. Pode-se observar pela Figura 11 que quanto mais regular e lisa for a superfície rochosa de contato menor será a resistência ao

cisalhamento no contato solo-rocha. Nas situações geológicas em que o solo estiver em contato com superfícies polidas, com estrias de fricção ou acamamento regular, as resistências ao cisalhamento apresentam valores mínimos. O tipo litológico tem aparentemente pouca importância no fator de redução da resistência, prevalecendo os critérios geométricos da superfície de contato (adaptado de Guidicini e Nieble, 1976, apud Fiori e Carmignani, 2009).



**Figura 11 - Correlação entre ângulo de atrito e índice de plasticidade em ensaios de cisalhamento de interfaces solo-rocha. (Fiori e Carmignani, 2009)**

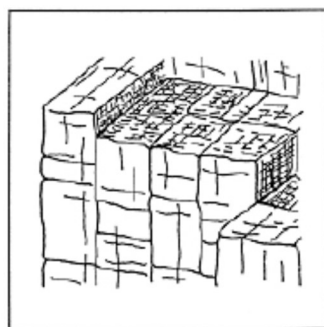
Com objetivo de descrever os maciços rochosos de acordo com características relativas à forma e às dimensões dos blocos de rocha, a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) propôs adoção de designações indicadas na tabela 5.

A ISRM estabelece também índices quantitativos para caracterização dos maciços rochosos que determinam não apenas as dimensões médias dos blocos de rocha mais frequentes, como também espaçamentos das famílias de descontinuidades e ângulos dos diedros definidos entre as superfícies das juntas, entre outros fatores, porém não será objeto de estudo desta pesquisa.

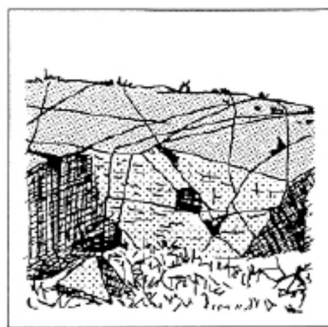
**Tabela 5 – Classificação das descontinuidades de um maciço rochoso quanto à persistência (ISRM,1983)**

TIPO DE MACIÇO	CARACTERÍSTICAS
Maciço compacto	Poucas descontinuidades ou muito espaçadas
Maciço de blocos paralelepípedicos	Dimensões da mesma ordem de grandeza
Maciço tabular	Uma dimensão consideravelmente menor que as duas restantes
Maciço colunar	Uma dimensão consideravelmente maior que as duas restantes
Maciço irregular	Grandes variações do tamanho e forma dos blocos
Maciço esmagado	Fracturação intensa

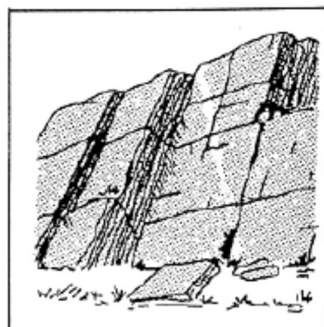
A Figura 12 ilustra representações esquemáticas referentes aos tipos de maciço apresentados na tabela 5.



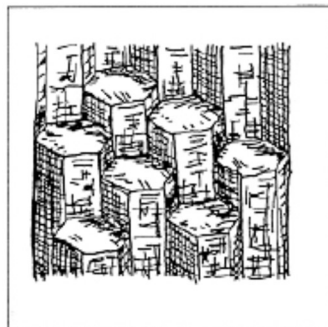
a



b



c



d

**Figura 12 - Representação esquemática de maciços rochosos; a- blocos paralelepípedos; b- blocos irregulares; c- blocos tabulares; d- blocos colunares. (adaptado de Vallejo et al, 2002)**

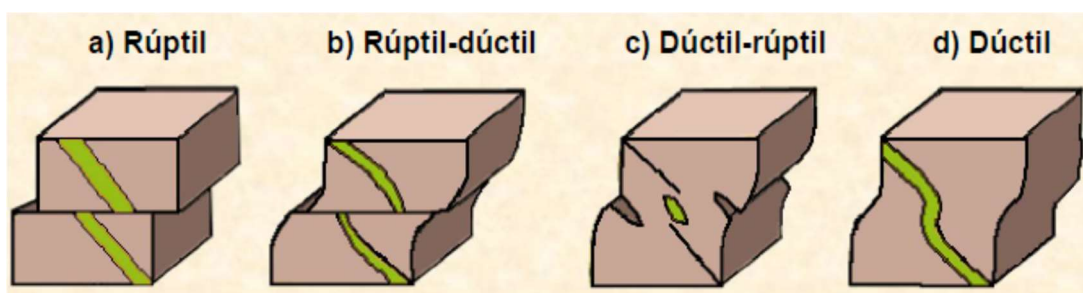
### 1.1.2.2 Condicionantes litológicos

Os intemperismos físico, químico e biológico provocam grandes alterações nas propriedades geotécnicas dos maciços rochosos conduzindo, no tempo geológico, a formação de solos em variados estados de agregação, denominados pelos estudiosos de material não consolidado.

As propriedades de resistência, deformação e permeabilidade dependerão, fundamentalmente, do seu processo de formação, dos condicionantes de caráter litológico e portanto das características da rocha de origem.

Wolle (1988), apud Silva (2015), divide a atuação do condicionante litológico em dois níveis, um referente a uma escala regional, associado ao esculpimento do relevo (condicionante geomorfológico) e outro referente a uma escala local, na qual a presença de contatos entre litologias pode funcionar como uma descontinuidade capaz de provocar escorregamentos. Pode-se acrescentar ainda a possível presença de minerais expansivos na constituição da rocha, que pode levar à instabilização quando submetida a processo de intemperismo. Associado ao intemperismo, pode-se ressaltar a importância da litologia como condicionante a escorregamentos. O intemperismo e a erosão diferencial podem criar inúmeras situações de ocorrência de movimentos de massa.

Durante processo de gênese e até mesmo de metamorfismo das rochas, as movimentações no maciço, devido à influência de gradientes de pressão e temperatura, originam-se planos de fraqueza e zonas de cisalhamento de origem dúctil, rúptil, rúptil-dúctil ou dúctil-rúptil, conforme ilustrado na Figura 13.



**Figura 13 - Representação esquemática das zonas de cisalhamento.**

(Ramsay & Huber, 1976, apud Salamuni, 2006).

Figura 14 à Figura 18 apresentam-se exemplos de discontinuidades no maciço representadas por diversos tipos de fraturas, como diáclases (juntas), falhas, estrias associadas à ruptura parcial ou total, superficial ou volumétrica, assim como alguns tipos de deformações da rocha como dobramentos, por exemplo, ilustrando as diferentes zonas de cisalhamento esquematizadas na Figura 13.



Figura 14 - Cisalhamento Dúctil (Salamuni, 2006)



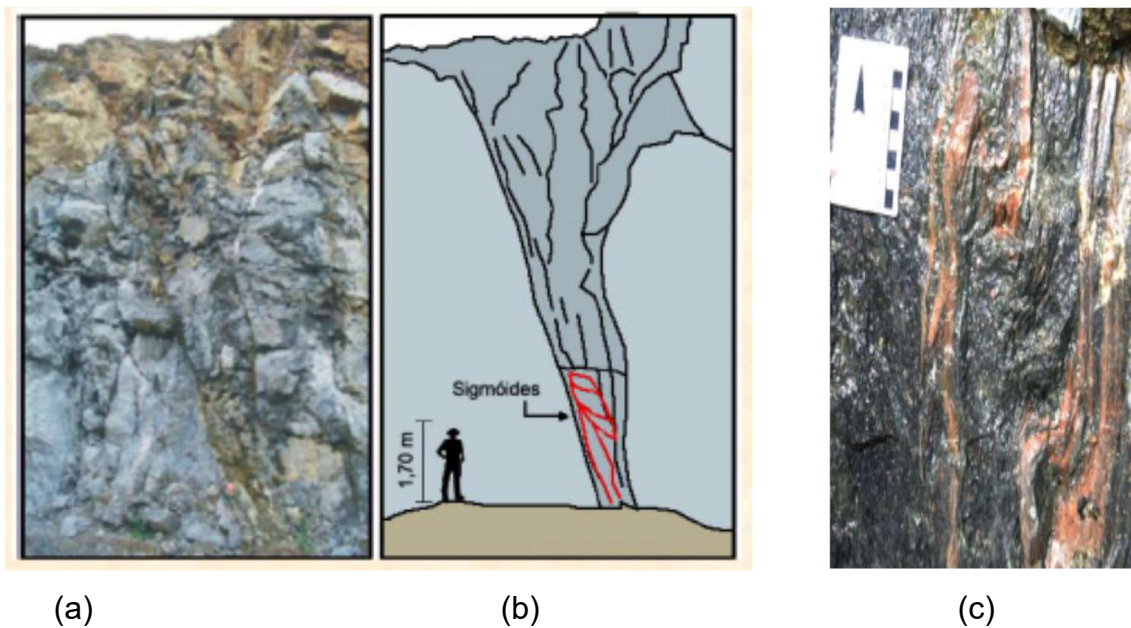
(a)



(b)

Figura 15 - Cisalhamento dúctil-ruptil (foto a) e rúptil (foto b), Salamuni (2006)





(a) (b) (c)  
 Figura 16 - Zonas de cisalhamento na pedreira Maringá (fotos a e b), e bandas de cisalhamento de gnaiss (foto c), (Salamuni, 2006)

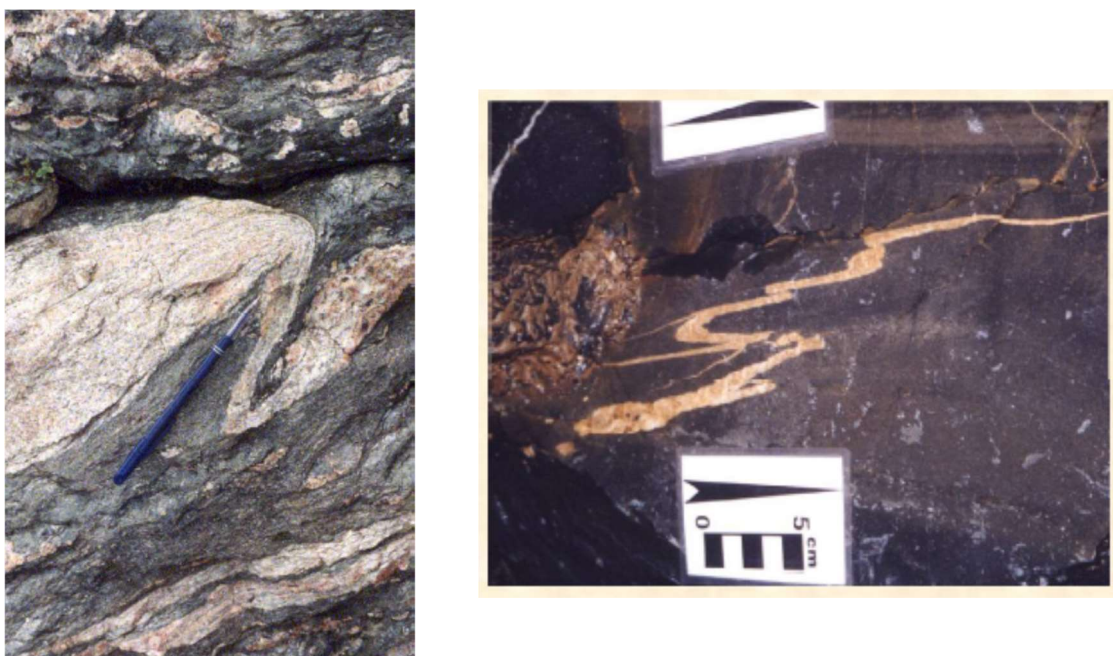


Figura 17 - Dobras geradas em cinturões de cisalhamento rúptil-dúctil (Salamuni, 2006)



Figura 18 - Comportamento rúptil de quartzito (Salamuni, 2006)

Cabe lembrar que as juntas desempenham papel fundamental no processo de fragmentação dos maciços rochosos porque permitem a infiltração e fluxo de água facilitando ação da erosão e denudação do terreno, além de condicionar o relevo e a própria drenagem.

Os condicionantes de caráter litológico são fundamentais nos processos de formação dos solos residuais e, portanto, nos fenômenos de instabilidade dos taludes. Além disso, a partir da litologia da rocha, com avaliação de sua composição mineralógica é possível também associar ao tipo de rocha formada. Esta designação litológica está descrita na

Tabela 6.

Tabela 6 – Designação da litologia (adaptado de ISRM, 1981; FRASCA & SARTORI, 1998, apud Rodriguez, 2005)

	<b>rocha</b>	<b>possíveis minerais primários</b>
Ígnea	Granito	quartzo, plagioclásio, feldspato potássico (biotita/hornblenda)
	Diorito	plagioclásio, biotita, hornblenda (quartzo/feldspato potássico)
	Sienito	feldspato potássico (biotita/hornblenda)
	Gabro/Diabásio	Plagioclásio cálcico, augita, opacos
	Riolito	quartzo, plagioclásio, feldspato potássico (biotita/hornblenda)
	Basalto	Plagioclásio cálcico, augita, opacos
Metamórfica	Filito	sericita, quartzo
	Xisto	micas, quartzo
	Gnaisse	feldspato, quartzo, biotita e/ou hornblenda
	Migmatito	feldspato, quartzo, biotita e/ou hornblenda
	Milonito	sericita, feldspato e quartzo
	Quartzito	quartzo, sericita
Sedimentar	Arenito Lítico	grãos compostos por fragmentos de rocha (argilominerais)
	Arenito Arcosiano	quartzo e feldspato (argilominerais)
	Arenito	quartzo (argilominerais)
	Folhelho	argilominerais (quartzo, feldspato e mica)
	Siltito	argilominerais (quartzo, feldspato e mica)
	Argilito	argilominerais (quartzo, feldspato e mica)

O tipo de rocha define a sua permeabilidade e, portanto, o tipo de drenagem e textura, além da resistência ao intemperismo. A presença de fraturas (tectônicas ou resultantes de alívio de pressão) denota importantes pontos de descontinuidade e menor resistência, constituindo-se em caminhos preferenciais à erosão e movimentos de massa. Muitas destas descontinuidades são formadas pelo alívio de pressão, encontrando-se intemperizadas, o que causa deslizamento (Wolle, 1988, apud Silva, 2016).



O granito, por exemplo, apresenta forte resistência ao intemperismo e baixas porosidade e permeabilidade, mas em regiões tropicais úmidas, devido às características climáticas, este tipo de rocha é fortemente intemperizado, afetando preferencialmente as zonas de fragilidade, como juntas e cisalhamentos (Twidale, 1971; Twidale, 1982; Chorley et al., 1984).

No que se refere ao processo de alteração de maciços rochosos, cabe ressaltar a importância no conhecimento do fenômeno de intemperismo físico que dá origem ao químico que, por sua vez, é potencializado pela infiltração e fluxo de água no subsolo, através das redes de descontinuidades presentes na rocha.

### 1.1.2.3 Condicionantes pedológicos

A definição de solo é ampla e a literatura oferece diferentes abordagens.

De acordo com o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007), parte integrante dos Manuais Técnicos em Geociências, produzido pelo IBGE, os conceitos de solo mais adequados ao levantamento pedológico são a do *U.S. Department of Agriculture* (1975) e do *U.S. Department of Agriculture* (1984):

“Solo é a coletividade de indivíduos naturais, na superfície da terra, eventualmente modificado ou mesmo construído pelo homem, contendo matéria orgânica viva e servindo ou sendo capaz de servir à sustentação de plantas ao ar livre. Em sua parte superior, limita-se com o ar atmosférico ou águas rasas.

Lateralmente, limita-se gradualmente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. O limite inferior é talvez o mais difícil de definir. Mas, o que é reconhecido como solo deve excluir o material que mostre pouco efeito das interações de clima, organismos, material originário e relevo, através do tempo”.

De acordo com Jenny (1941), o solo não é uma entidade discreta na natureza, mas uma massa contínua na paisagem, com progressiva gradação resultante da combinação dos processos e fatores pedogenéticos.

Pedron *et al* (2004) conceituam os solos como corpos naturais que se desenvolvem em escalas de tempo da ordem de centenas a milhares de anos, e compõem a cobertura pedológica que reveste as áreas emersas da Terra. Esta cobertura é constituída por uma camada de material alterado que se localiza

entre a atmosfera e a litosfera, fortemente influenciada pela biosfera e pela hidrosfera. Esta camada é o resultado das inúmeras combinações de fatores (clima, organismos, tempo e relevo) e de processos (remoção, deposição, transporte e transformação) que atuam sobre os materiais de origem (rocha, sedimentos, depósitos orgânicos) e condicionam a variedade de solos encontrados.

Kertzman & Diniz (1995, apud Rodriguez 2005) consideram que o estudo pedológico parece ter maior aplicação no caso de erosão do que de escorregamentos que ocorrem em profundidade na maioria das vezes. Os principais grupos presentes na região tropical são os latossolos, os podzólicos e os cambissolos.

A descrição morfológica de perfis de solos compreende o registro das suas características, através do estudo e do exame do seu perfil em seu meio natural. Estas descrições incluem a delimitação dos horizontes e camadas com identificação e registro das características morfológicas de cada um(a) individualmente, caracterizando a transição entre horizontes ou camadas, profundidade e espessura, cor, textura, estrutura, consistência e demais características.

O *U.S. Department of Agriculture* (1962) define algumas dessas nomenclaturas de horizontes e camadas de solo que complementam ou até mesmo foram adotadas pelas estabelecidas pelo SiBCS (2006), quais sejam:

- Horizonte de solo: “deve-se entender uma seção de constituição mineral ou orgânica, à superfície do terreno ou aproximadamente paralela a esta, parcialmente exposta no perfil e dotada de propriedades geradas por processos formadores do solo, que lhe confere características de interrelacionamento com outros horizontes componentes do perfil, dos quais se diferencia em virtude de diversidade de propriedades, resultantes da ação da pedogênese”.

- Camada de solo: “deve-se entender uma seção de constituição mineral ou orgânica, à superfície do terreno ou aproximadamente paralela a esta, parcialmente exposta no perfil do solo e possuindo conjunto de propriedades não resultantes ou pouco influenciadas pela atuação dos processos pedogenéticos.”

Para a designação dos horizontes e camadas de solo, usam-se letras maiúsculas, minúsculas e números arábicos, sendo que as letras maiúsculas são usadas para designar horizontes ou camadas principais e a minúsculas como sufixos para qualificar distinções específicas. Prefixos numéricos são usados para denotar descontinuidade litológica. Por convenção o 1 não é mostrado, ex: A, E, B<sub>t</sub>, 2BC (adaptado de U.S.Department of Agriculture, 1981, apud IBGE, 2007).

Somente para exemplificação, alguns dos símbolos de horizontes e camadas:

- H = Horizonte ou camada de constituição orgânica, superficial ou não, composto de resíduos orgânicos acumulados ou em acumulação sob condições de prolongada estagnação de água, salvo se artificialmente drenado;
- A = Horizonte mineral, superficial ou em sequência a horizonte ou camada O ou H, de concentração de matéria orgânica decomposta e perda ou decomposição principalmente de componentes minerais (Fe, Al e argila);
- E = Horizonte mineral .....resultante da concentração residual de areia e silte constituídos de quartzo ou outros minerais resistentes.....;
- E/A = Horizonte mesclado com partes de horizonte E e A, porém com predomínio de material E
- E/B<sub>t</sub>= Presença de lamelas espessas (B<sub>t</sub>) dentro de horizonte E.
- B = Horizonte subsuperficial de acumulação de argila, Fe, Al, Si, húmus, CaCO<sub>3</sub>, .....com bom desenvolvimento estrutural;
- R = Camada mineral de material consolidado, que constitui substrato rochoso contínuo ou praticamente contínuo, a não ser pelas poucas e estreitas fendas que pode apresentar.

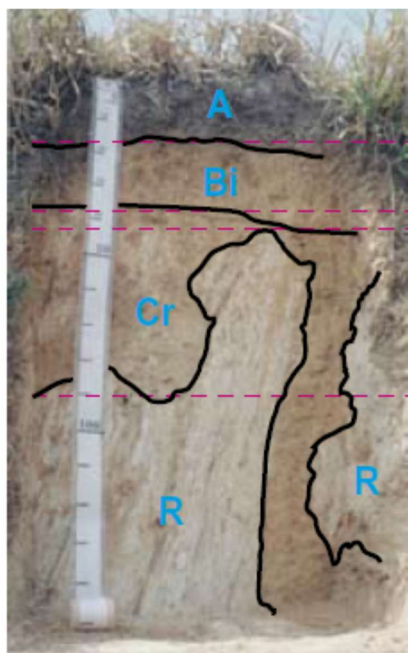
Alguns sufixos de Horizontes e Camadas:

- a = Propriedades ândicas. Usado com A, B e C para designar constituição dominada por material amorfo, de natureza mineral de transformação de materiais vulcanoclásticos;
- c = Concreções ou nódulos endurecidos, cimentados por outro material que não seja sílica;
- r = Rocha branda ou saprolito, usado com C;

- t = Acumulação de argila.

Após a separação dos horizontes ou camadas, efetua-se a medida de suas profundidades e espessuras de acordo com os seguintes critérios:

- A profundidade é obtida colocando-se trena na posição vertical, fazendo-se coincidir o zero da mesma com a parte superior do horizonte ou camada do solo e fazendo-se a leitura de cima para baixo a partir da marca zero. Para cada um dos horizontes ou camada, anota-se então a medida observada nos seus limites superior e inferior. No caso de horizontes ou camadas com limites de transição ondulada ou irregular, anota-se o valor médio. A Figura 19 ilustra este procedimento e a Figura 20 exemplifica características morfológicas de solos com ocorrência de lamelas.



#### Profundidade dos Horizontes

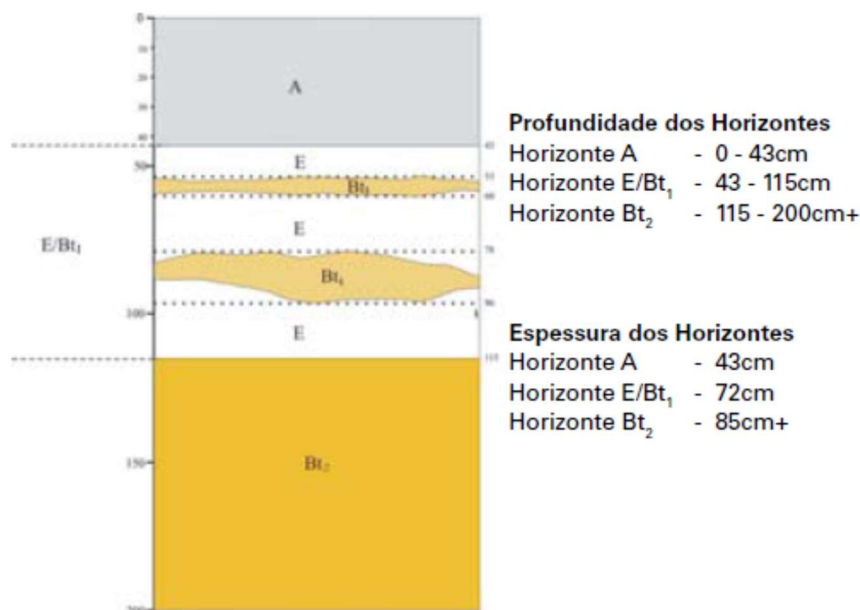
Horizonte A	- 0 - 18cm
Horizonte Bi	- 18 - 38m
Horizonte Cr	- 38 - 91cm
Camada R	- 91 - 150cm+

#### Espessura dos Horizontes

Horizonte A	- 18cm
Horizonte Bi	- 20cm
Horizonte Cr	- 6 - 112cm+
Camada R	- 59 - 106cm+

**Nota:** O limite inferior do horizonte Cr varia predominantemente entre as profundidades de 44 e 91cm, havendo porém, línguas que se estendem até o final da trincheira (150cm).

**Figura 19 - Exemplo de caracterização morfológica de solo com mais de um horizonte ou camada apresentando transição irregular (IBGE, 2007)**



**Figura 20 - Exemplo de caracterização morfológica de solo com ocorrência de lamelas (IBGE, 2007)**

Além da classificação morfológica propriamente dita, a pedologia também define outras características dos solos como a granulometria, textura, estrutura, consistência, entre outras de menor relevância para esta pesquisa.

Outros conceitos/classificações importantes relativos à pedologia e que constam no Manual Técnico de Pedologia (IBGE,2007) são:

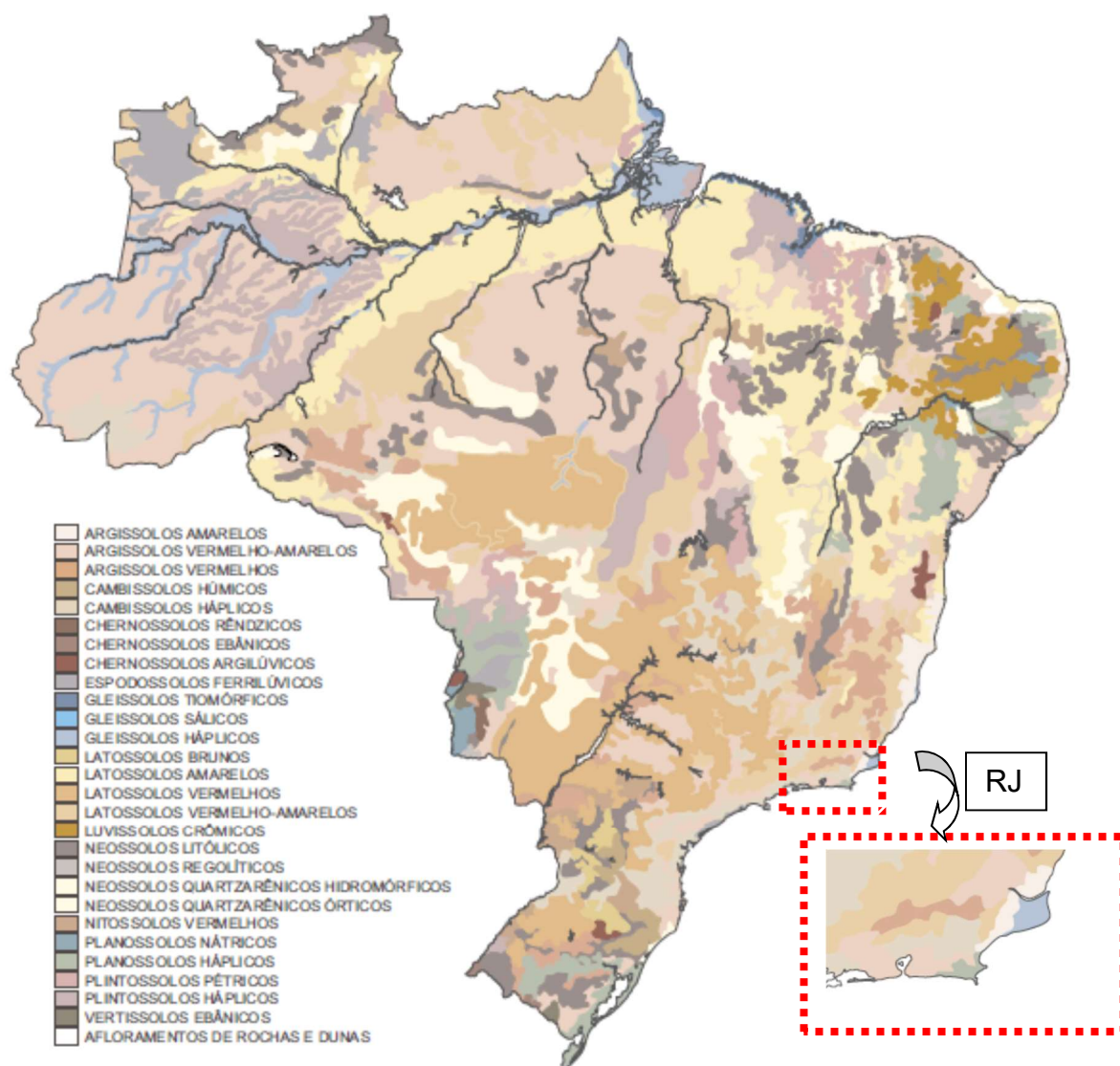
- Solum: parte superior e pressupostamente mais intemperizada do perfil do solo, compreendendo somente os horizontes A e B (excluído o BC)
- Solo autóctone: solos desenvolvidos a partir de material de origem proveniente das rochas imediatamente subjacentes;
- Solo alóctone: solos desenvolvidos de material de origem não proveniente das rochas subjacentes. Podem ter natureza distinta ou compatível com as rochas subjacentes.
- Paleossolo: solo formado em uma paisagem numa época passada e que foi posteriormente coberto por sedimentos. Podem estar à superfície caso tenham sido expostos pela erosão do manto de sedimentos subjacente.

Cabe salientar que a taxonomia dos solos, com a sua completa caracterização, está disponível no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2006), organizado com o propósito de atender às condições de clima tropical a que está submetida a maior parte do País e que se encontra estruturado até o seu quarto nível categórico.

Pela classificação genética dos solos, solo autóctone corresponde aos solos residuais e o alóctone aos solos transportados, que não se originaram no local onde se encontra a rocha que o originou. Portanto, os solos coluvionares, sendo transportados, pertencem à categoria de solos alóctones.

Na literatura geotécnica é vasta a pesquisa sobre o comportamento de solos residuais e coluvionares nas encostas brasileiras, notadamente em algumas metrópoles brasileiras onde a concentração de moradias precárias e sem infra-estrutura urbana acentua os riscos de acidentes geotécnicos. Neste contexto, citam-se alguns trabalhos acadêmicos relativamente recentes de relevância, como, por exemplo, Rodriguez (2005) e Perazzolo (2003) no caso de solos coluvionares, e Suzuki (2004) no estudo de solos residuais e coluvionares

. Os principais tipos de solo no Brasil, segundo classificação pedológica, são apresentados na Figura 21 e, no caso específico do Estado do Rio de Janeiro, a tipologia está destacada no detalhe.



Adaptado de Atlas nacional do Brasil (2000).

**Figura 21 - Delimitação Esquemática dos principais solos brasileiros e do RJ (Adaptado de Atlas Nacional do Brasil, 2000, apud IBGE, 2007).**

#### 1.1.2.4 Condicionantes geomorfológicos

Podem-se citar, de modo resumido, como condicionantes geomorfológicos, a amplitude e a forma do perfil das encostas (retilíneo, convexo e côncavo), a dissecação e a declividade do relevo. O conceito de geomorfologia é extremamente amplo no contexto da geografia, constituindo uma disciplina à

parte. Entretanto, para fins tão somente geotécnicos e relacionados a esta pesquisa, a geomorfologia será abordada de modo mais restrito, envolvendo apenas a sua relação com os movimentos de massa gravitacionais.

De acordo com Casseti (2005), o objeto de estudo da geomorfologia é a superfície da crosta terrestre, apresentando uma forma específica de análise que se refere ao relevo. A análise incorpora o necessário conhecimento do jogo de forças antagônicas, sistematizadas pelas atividades tectogenéticas (endógenas) e mecanismos morfoclimáticos (exógenos), responsáveis pelas formas resultantes.

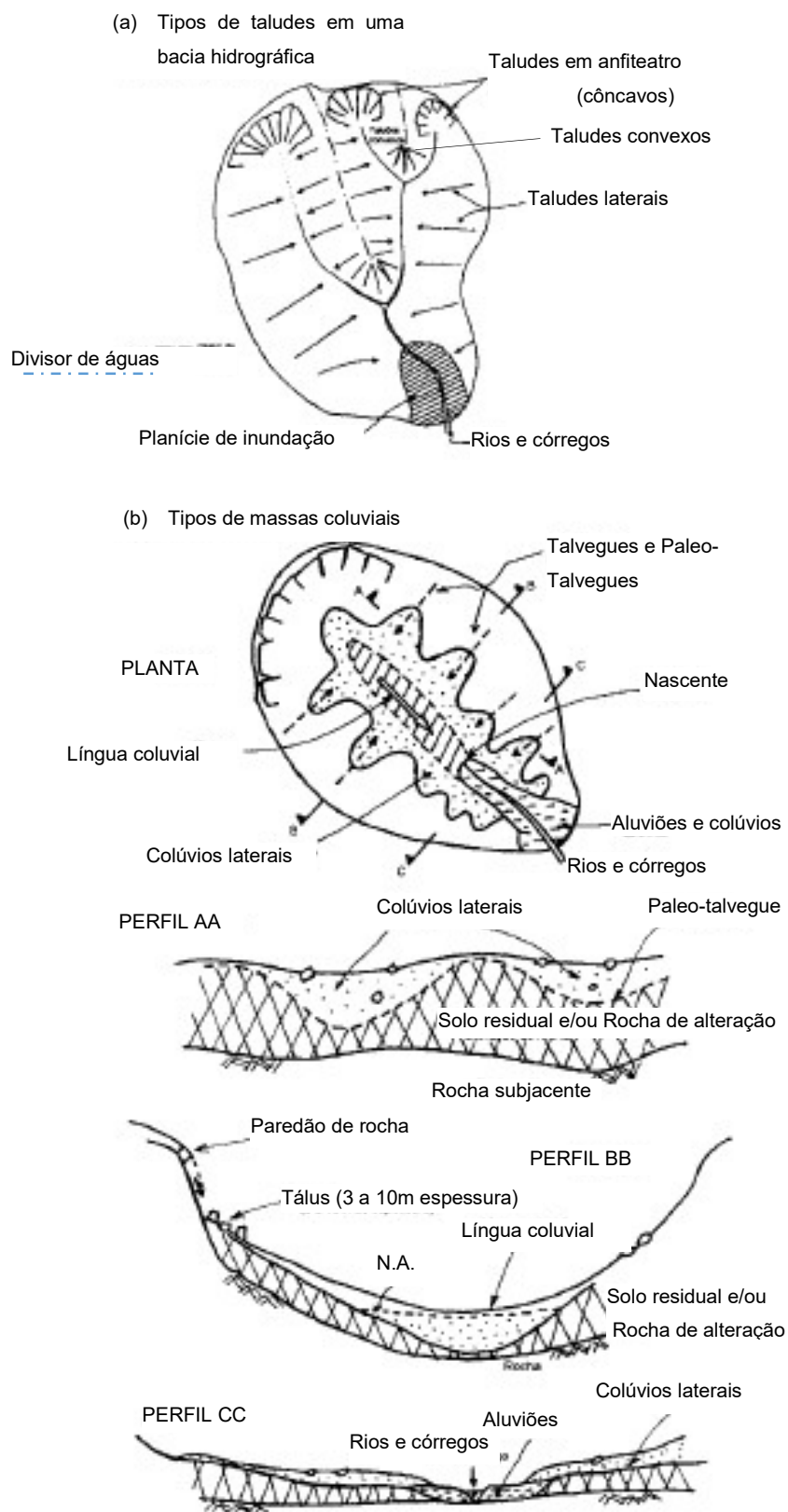
A declividade é uma variável de grande importância nos processos geomorfológicos, pois condiciona cursos d'água e deslocamento de colúvios. Além disso, fornece a medida da inclinação do relevo e governa parâmetros importantes como, por exemplo, a velocidade de deslocamento de solo/rocha e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas (adaptado de Christofolletti, 1974; Clark e Small, 1982; Tarboton et al., 1991; Crepani et al., 1999; Nogami, 1998; apud Sestini, 1999).

A declividade tem ainda relação com a probabilidade de riscos de escorregamentos e com erosividade de canais em regiões de encostas mais dissecadas, ou seja, com alta densidade de drenagem. Isto ocorre geralmente próximo às cabeceiras onde o gradiente de energia é alto justamente pelas altas declividades destes locais (adaptado de Thomas, 1979; Christofolletti, 1981; IPT, 1989; Tuttle, 1970; e Tricart, 1972; apud Sestini, 1999).

Lacerda e Sandroni (1985) estudou a geologia de massas coluvionais e observou que colúvios se depositam nos talvegues através, principalmente, de escorregamentos de capas superficiais alteradas. Tais deslizamentos são observados nas regiões Sul e Sudeste, formados por rochas granito-gnáissicas.

Figura 22 ilustra um trecho de bacia hidrográfica e seções transversais ilustrando a variação da espessura do colúvio sobre solo residual segundo diferentes conformações do relevo. Em resumo, o perfil AA apresenta colúvio preenchendo antigas depressões de solo residual. O perfil BB ilustra o aumento da espessura de solo coluvionar até atingir a depressão que forma o vale, e o perfil CC representa regiões costeiras ou rios onde os colúvios se depositam sobre solo rígido (residual ou rocha alterada). (adaptado de Lacerda, 2001, apud Suzuki, 2004).





**Figura 22 - Geomorfologia dos colúvios**  
(adaptado de Lacerda, 2001; apud Suzuki, 2004)

Após estudo estatístico levando-se em conta também a influência de vários fatores que afetam a estabilidade de taludes, Sayão (2001) concluiu que a solução mais apropriada para estabilizar taludes de inclinação inferiores a 20°, com nível do lençol freático elevado, é o rebaixamento do lençol d'água (adaptado de Suzuki, 2004). As declividades correspondentes a valores acima de 30° de inclinação apresentam risco de deslizamentos mais frequentes. Acima de 60° o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos, principalmente em épocas de pluviosidade elevadas e ao redor de cabeceiras de drenagem, tornando exposta a superfície da rocha de base (Tricart, 1972; Thomas, 1979; IPT, 1989; Fernandes e Amaral, 1996; Sayão, 2001, apud Sestini, 1999).

A amplitude de relevo significa a diferença entre as cotas máximas e mínimas e, assim como as declividades e a dissecação, está diretamente relacionada ao potencial destrutivo do movimento de massa devido aos valores de energia cinética associados à massa de colúvio ou bloco de rocha deslocado em relação à vertente (adaptado de Tuttle, 1970; Tricart, 1972; Christofolletti, 1974; Thomas, 1979; Crepani et al., 1999). Com relação ainda à questão da altitude, que representa a amplitude quando a cota inferior representa a cota de base, é importante salientar que, embora condicionante, não existem limites precisos para classificar o nível de susceptibilidade do terreno em relação a hipsometria (técnica de representação da elevação) (adaptado de Pinto *et al*, 2013).

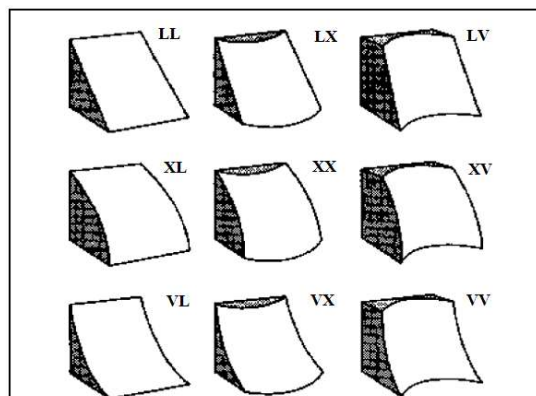
Com relação à forma das vertentes, podem-se distinguir três tipos distintos: convexo, côncavo e retilíneo, que influenciam diretamente na estabilidade das encostas, tendo sido abordados por diferentes autores, conforme reproduzido:

“O relevo apresenta tipos de vertentes diversificados, desde superfícies planas suavemente inclinadas, próximas à horizontal, até superfícies retilíneas, escarpadas e quase verticais. A maior parte das encostas é composta de vários segmentos, geralmente seu perfil é formado por um segmento superior convexo, no qual a declividade aumenta para a jusante, seguido por um seguimento inferior côncavo com redução de declive encosta abaixo.” (Bigarella e Passos, 2003; apud Pinto et al, 2013).

Diversos autores divergem com relação à influência da forma do perfil das encostas na estabilidade dos taludes. De acordo com IPT (1991), as encostas retilíneas tendem a apresentar maiores declividades em geral do que as convexas sendo, assim, mais susceptíveis aos escorregamentos. Encostas convexas apresentam, em média, maiores espessuras de solos, favorecendo a instabilidade e potencializando ruptura mais profunda. Entretanto, para Guerra (1998) e Fernandes e Amaral (2000), os perfis côncavos, por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxo d'água, são mais favoráveis aos movimentos de massa. Neste mesmo sentido, Lacerda (2002) afirma que os colúvios com espessura superior a 5 metros que ocupam depressões de vales e encontram-se permanentemente saturados são os mais preocupantes em termos de escorregamento. Selby (1993) considera que, nas encostas retilíneas, predominam processos erosivos de grande velocidade.

O tipo de material depositado sobre as vertentes também é importante. A presença tanto de mantos espessos de solo residual quanto de tálus contribuem para a ocorrência de escorregamentos (Fernandes e Amaral, 1996). Os depósitos de tálus são resultantes de movimentos de massa pretéritos e servem de fonte para novos movimentos de massa, principalmente em períodos de elevada pluviosidade (Guidicini e Nieble, 1993).

A Figura 23 ilustra os diferentes tipos de forma das vertentes, que são caracterizadas da seguinte forma: LL (retilínea), LX (convexo-retilínea), LV (côncavo-retilíneo), XL (retilíneo-convexo), XX (convexo), XV (côncavo-convexo), VL (retilíneo-côncavo), VX (convexo-côncavo), VV (côncavo).

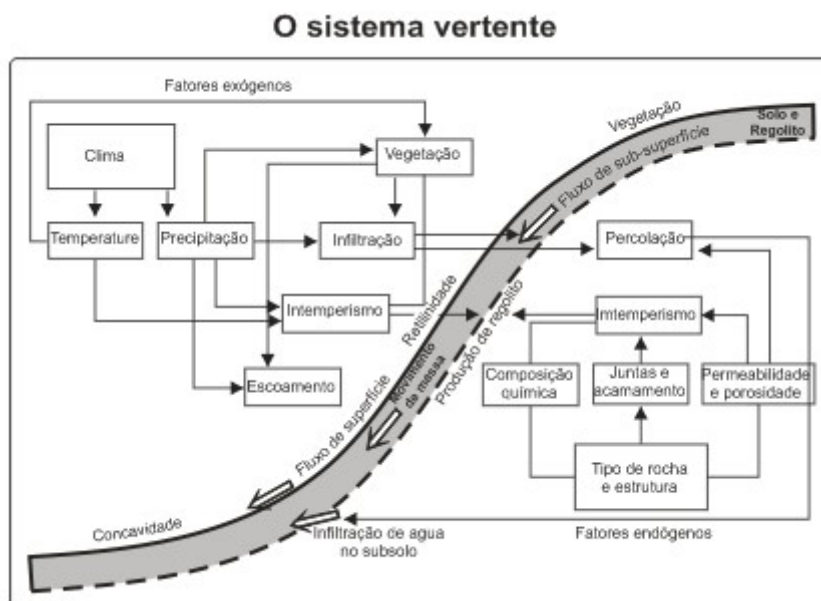


**Figura 23 - Diferentes formas das vertentes**

(Adaptada de Chorley et al. 1984)

Dai e Lee (2002, apud Pinto *et al*, 2013) destacam que a orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar intimamente relacionada à presença de umidade e de cobertura vegetal. Outro aspecto considerável é que as precipitações estão relacionadas à direção predominante dos ventos, ou seja, a quantidade de chuva é maior nas encostas expostas a estes eventos. Com relação à orientação, entende-se que, de acordo com este aspecto, a encosta tem maior ou menor exposição aos elementos climáticos como ventos, chuvas e insolação, que interferem na estabilidade das encostas. (Pinto *et al*, 2013).

Clark e Small (1982) mostram as relações processuais em uma vertente, considerando a sua forma, como ilustrado na figura 24.

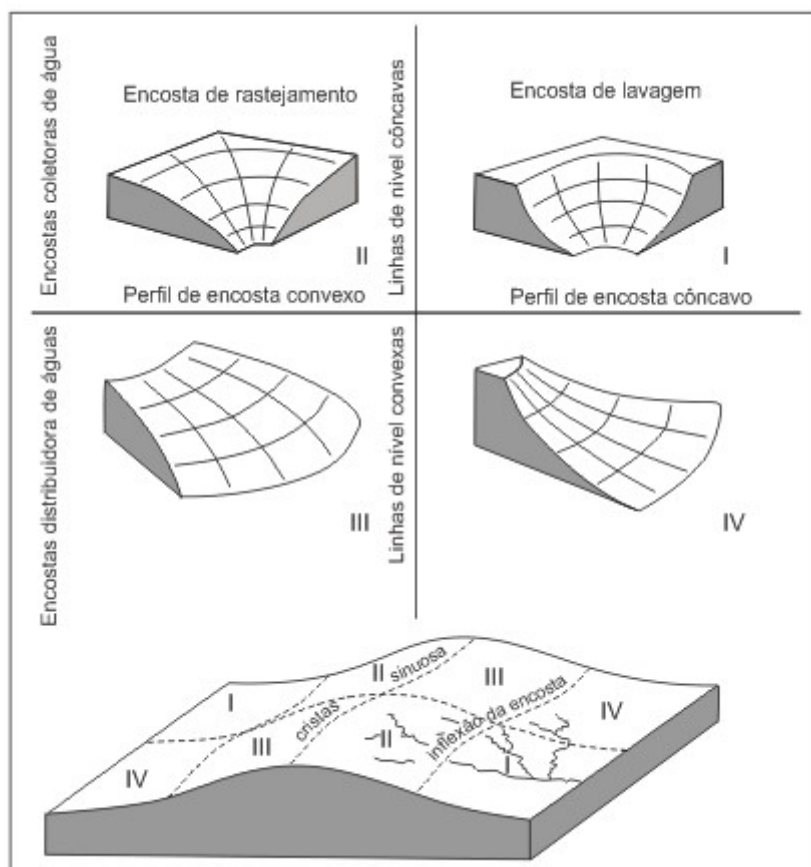


**Figura 24 - Diferentes formas das vertentes convexo-retilínea-concava  
(Clark & Smal, 1982, apud Chorley et al. 1984)**

O comprimento e a forma geométrica da vertente também devem ser estudados como elementos de indução morfogenética nos movimentos de massa gravitacionais. De acordo com Bertoni et al (1972, apud Casetti, 2005), pesquisas realizadas no Instituto Agrônomo de Campinas mostram que, quadruplicando-se o comprimento da vertente, quase são triplicadas as perdas

de terra por erosão, diminuindo em mais da metade as perdas de água (redução do escoamento por aumento da superfície de infiltração).

A figura 25 divide os quatro tipos principais de encostas em dois grupos: encostas coletoras e divisoras de água, cada qual apresentando contornos côncavos e convexos. Estes facilitam o desenvolvimento do rastejamento e aqueles favorecem a lavagem pelas águas de chuva. De acordo com Chorley et al (1984), este modelo foi proposto por Bloom (1970), que utilizou-se dos modelos geométricos de vertente de Troeh (1965).



**Figura 25 - Diferentes formas das vertentes de uma encosta  
(Troeh, 1965; apud Chorley et al. 1984)**

#### 1.1.2.5 Condicionantes climáticos-ambientais e hidrológicos

Corominas (2001, apud Soares, 2006) afirma que a incidência de deslizamentos vem aumentando em muitos países do Hemisfério Norte devido às mudanças no modelo de precipitação: “ a relação entre o clima e

*deslizamentos tem atraído o interesse de inúmeras pesquisas, devido a precipitação ser o fator que mais contribui para o desencadeamento de deslizamentos de terra em muitas regiões do mundo.”*

A influência da precipitação pluviométrica na ocorrência de deslizamentos também é ressaltada por Silva (1991, Soares, 2006) quando associa a predominância de taludes de corte em diversos trechos da rodovia BR 101. Nesse local específico, Silva (1991) pode observar que os escorregamentos planares estavam relacionados às fraturas de alívio de tensões em contraposição aos escorregamentos circulares, predominantes em outro quadrante geográfico, onde, possivelmente, a predominância de espessas camadas de solo homogêneo cobriam os taludes.

Soares (2006) afirma que, para o desenvolvimento de estudo de correlação de deslizamentos com precipitação em uma determinada região, se faz necessário ter conhecimento do modelo fenomenológico, ou seja, identificar os condicionantes naturais e antrópicos da região, através do mecanismo de movimentações, sua velocidade, geometria e raio de alcance, os materiais envolvidos, os condicionantes naturais, as modificações sofridas devido à ocupação antrópica e os agentes deflagradores dos eventos de deslizamento.

Com objetivo de se obter uma melhor definição de análise do risco, Cerri (1992, apud Soares, 2006), propõe que a ficha de levantamento de campo, para ser completa englobe informações sobre: o perfil geológico e suas características; antigas feições erosivas, cicatrizes de deslizamento; existência de matacões, blocos de rocha, e ou paredões rochosos; seus condicionantes estruturais; ocorrência de talude natural, talude de corte, aterro compactado; relação da declividade – estabilidade da encosta; existência de trincas no solo e ou construções; existência de degraus de abatimento; inclinação de árvores, muros, postes e ou qualquer outro elemento que possa sugerir uma movimentação no terreno; ocorrência de aterros, tipo de material usado e aspecto da compactação (aparência visual); acúmulo de lixo; águas servidas lançadas na superfície; presença de fossas e sumidouros; sistemas de abastecimento de águas e esgoto; sistemas de drenagens; vegetação local; tipos de cultivo que favorecem a instabilidade e construções próximas à base e ao topo dos taludes.

Existe uma relação intrínseca entre o clima, a precipitação e suas consequências sobre os processos morfogenéticos. Nos domínios morfoclimáticos tropicais, a elevada umidade provoca o encharcamento do solo que, por sua vez, favorece os movimentos de massa. A intensidade da chuva (em mm/hora) relaciona-se à energia cinética desta que, por sua vez, está relacionada à erosividade (potencial que um processo tem para causar desagregação de material, como solo ou rocha, conforme Selby, 1993 e IPT, 1989) e, conseqüente, transporte de material. As medidas de pluviosidade (totais diários, médias mensais, etc.) fornecem uma aproximação de intensidade de chuva (Guerra, 1994 apud Silva, 2015).

Augusto Filho e Virgili (1998, apud Silva, 2016) comentam que as chuvas atuam como o principal agente não antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Os grandes acidentes relacionados aos processos de escorregamentos sempre ocorrem durante o período chuvoso.

A água é, portanto, o mais importante agente natural na predisposição à ocorrência de escorregamentos, podendo atuar das seguintes formas:

(a) Elevação do nível piezométrico no maciço, aumentando a poropressão e reduzindo a resistência;

(b) Aumento da pressão hidrostática em descontinuidades. A ocorrência e o comportamento da água subterrânea são condicionados pelas rochas e estruturas geológicas presentes no local em questão. No caso de maciços de rochas fraturadas com baixa porosidade, a subida do N.A. acontece de forma rápida.

(c) Erosão subterrânea retrogressiva (“*piping*”). Este processo, resultante da força de percolação, inicia-se a partir de uma surgência de água e forma, através da erosão e do carreamento das partículas, cavidades que podem apresentar muitos metros de comprimento.

(d) Diminuição do efeito da coesão aparente;

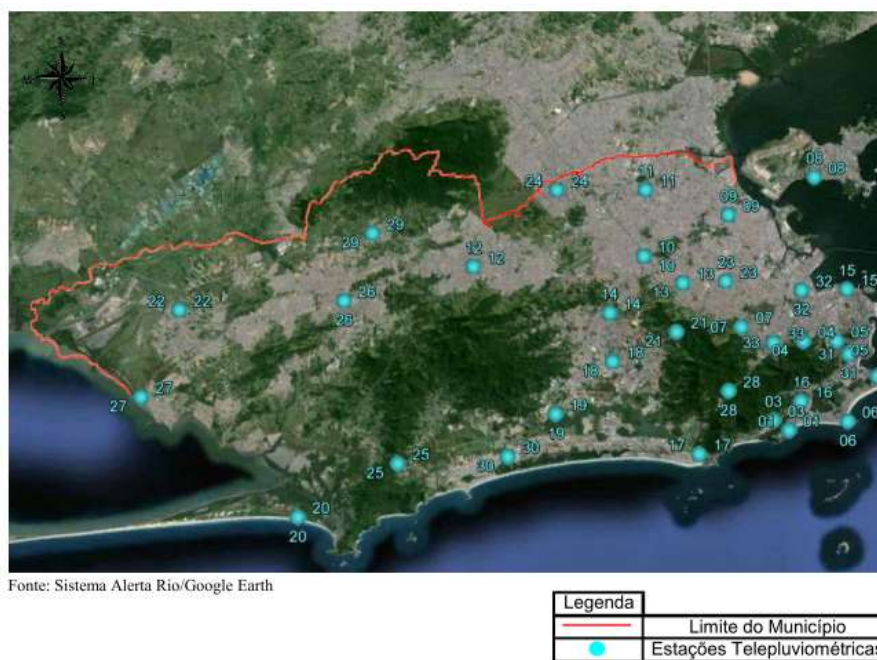
(e) Enfraquecimento dos materiais, pela ação do intemperismo químico;

(f) Erosão superficial, agindo diretamente sobre o talude. A água superficial contribui para a erosão laminar, que será tanto maior quanto menos protegido estiver o solo, podendo inclusive criar cicatrizes erosivas (ravinas ou voçorocas) que mais tarde resultarão, eventualmente, em escorregamentos.

A detecção, instrumentação e controle da água subterrânea é, portanto, de grande valia nos estudos e nas aplicações práticas relativas à ocorrência de movimentos de massa. Carregã e Balzan (1997, apud Silva, 2016) ressaltam que as rupturas de taludes são acidentes comumente ocasionados por condições excepcionais de água subterrânea.

Tendo em vista a influência direta dos eventos chuvosos nas ocorrências de escorregamentos, a GEORIO implementou em setembro de 1996 o Sistema Alerta Rio na cidade do Rio de Janeiro com objetivo de monitorar os índices pluviométricos (através de 33 estações distribuídas pela cidade) e, através do estabelecimento de protocolos pré-definidos por estudos de correlação chuva x escorregamento, acionar alerta sonoro em casos de chuva intensa e/ou prolongada. A figura 26 e 27 apresentam, respectivamente, estações telepluviométricas e pluviômetros distribuídos pela cidade do Rio.

As estações pluviométricas enviam dados em tempo real, a cada 15 minutos, para a central do Alerta Rio. Deste total de 33, duas estações (São Cristóvão e Guaratiba) são estações meteorológicas completas e enviam, além dos dados de chuvas, informações de vento, temperatura do ar, umidade e pressão atmosférica. A estação Alto da Boa Vista também envia dados de temperatura e umidade, além dos dados pluviométricos (<http://alertario.rio.rj.br>).



**Figura 26 - Localização das Estações Telepluviométricas Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro (relatório GEORIO/DEP/GPE-Nº 002/2016)**





**Figura 27 - Localização dos Pluviômetros na Cidade do Rio de Janeiro:  
Alerta Rio (relatório GEORIO/DEP/GPE-Nº 002/2016)**

O protocolo que norteia a decisão de acionamento ou não do alerta sonoro (sirenes) em diversas comunidades foi elaborado com base no estudo de correlações chuva x escorregamento progressas na cidade do Rio, em função dos índices pluviométricos horários (mm/h) como também com relação aos índices acumulados em 12hs, 24hs ou 96hs,

Diante do exposto, fica clara a importância do acompanhamento das precipitações na identificação de áreas de risco. Gusmão Filho (1997) ressalta que a ocorrência de escorregamentos nas mais variadas cidades brasileiras está sempre associada a episódios de chuva. O autor destaca o conhecimento de diversas correlações entre os episódios de precipitação e os escorregamentos em diferentes regiões do Brasil. Cada local apresenta características próprias de chuva, relevo, materiais naturais, vegetação e uso do solo, impondo um modelo regional de interação distinto. Segundo Gusmão Filho (1997), uma vez conhecida a correlação local, é possível estabelecer níveis de alerta e emergência para a mobilização da Defesa Civil, tal como o Sistema Alerta Rio, recém-citado.

No que se refere à vegetação, pode-se afirmar que a cobertura vegetal que reveste os taludes contribui para a sua estabilização. Isto porque o potencial erosivo gerado pelo escoamento superficial é minimizado pela redução da energia cinética promovida pelo atrito da vegetação, aumentando, inclusive a parcela de infiltração das águas de chuva no solo.

Apesar da dificuldade em se avaliar quantitativamente a influência da vegetação nos processos de estabilidade de taludes, existem alguns trabalhos acadêmicos que utilizaram métodos analíticos empregando a teoria do equilíbrio limite para a sua determinação. Esses métodos utilizam parâmetros de vegetação cuja influência é incontestável como, por exemplo, o peso da cobertura de vegetação, a força de arrasto do vento que age sobre as copas das árvores e o próprio sistema radicular que contribui na resistência ao cisalhamento dos solos.

Em um sistema solo-raiz, as raízes podem ser tratadas como se fossem elementos flexíveis e elásticos, de resistência relativamente elevada, embebidos no solo e que levam a um aumento da resistência contra eventuais escorregamentos nas encostas. (Waldron, 1977; Dakessian, 1981, apud Fiori e Carmignani, 2009).

Atenção especial deve ser atribuída ao efeito de cunha das raízes por tratar-se de processo potencialmente desestabilizador, especialmente onde rupturas e outras descontinuidades das rochas estão presentes, permitindo a entrada, avanço e crescimento das raízes. Nos locais onde a vegetação ganha um ancoradouro em vertentes inclinadas com planos de descontinuidades subverticais, o efeito de cunha de raízes pode deslocar e causar o fenômeno do tombamento de blocos (*toppling*). Nas vertentes onde a espessura de solo é maior este fenômeno não costuma ocorrer. Cabe salientar que o efeito de cunha das raízes pode não causar instabilidades nas vertentes durante o tempo de vida de uma árvore ou vegetação, uma vez que os blocos de rocha podem ser envolvidos pelas raízes, porém, após a morte das árvores, este efeito cessa e os blocos perdem a sustentação ficando suscetíveis à movimentações (adaptado de Fiori e Carmignani, 2009).

É comum associar o aumento da coesão do solo como uma função da densidade das raízes, relacionando inclusive a influência da tensão suportada pelas raízes na resistência ao cisalhamento do solo à ruptura, ocasião em que a

resistência das raízes é totalmente mobilizada. Assim como em qualquer outro material, o nível de deformação das raízes dependerá do seu módulo de elasticidade, o qual governará as relações dessas deformações com o nível de tensão solicitado. Uma vez excedida a resistência das raízes a ruptura do sistema solo – raiz ocorrerá, podendo deflagrar algum movimento de massa. (adaptado de Fiori e Carmignani, 2009).

Além do aumento da coesão promovido pela ação de ligamento nas fibras que compõem o solo, a adesão das partículas de solo nas raízes também favorece os processos de estabilização dos taludes. Outros fatores que podem influenciar estes processos são o aspecto morfológico das raízes, a densidade e a profundidade das raízes. (adaptado de O’Loughlin, 1984).

Raízes pouco profundas podem sofrer arrancamento antes mesmo que o pico de resistência à tensão seja atingido pelas simples perda de ligação entre a raiz e o solo (adaptado de Waldron; Dakessian, 1981). Por outro lado, raízes que penetram longos metros no solo são bem ancoradas não apenas pelo aumento de superfície de contato (atrito), como também pelo favorável entrosamento com blocos e outras raízes

De acordo com Suarez (1997, apud Silva, 2016), a avaliação da importância da cobertura vegetal na estabilidade de encostas é bastante difícil. No entanto, fica clara a ação da vegetação nos seguintes aspectos:

1. Aumento da resistência pela trama de raízes;
2. Prevenção de erosão superficial. Tal efeito ocorre pela diminuição da velocidade de escoamento superficial da água das chuvas e pela redução da desagregação devida ao impacto de gotas de chuva no solo;
3. Diminuição do nível d’água pelo efeito da transpiração e interceptação. O rebaixamento do lençol freático diminui as poropressões no interior do maciço, fato benéfico à estabilidade;

#### 1.1.2.6. Condicionantes antrópicos

A ação antrópica como condicionante dos movimentos de massa corresponde à atuação do homem na remodelação dos taludes de modo a torná-los instáveis, seja por modificação de seu ângulo de equilíbrio natural, com ações de corte ou aterro, seja pela ocupação indevida associada ao acréscimo de sobrecargas excessivas, lançamentos de efluentes e detritos, retirada de cobertura vegetal, entre outros fatores.

De acordo com Wolle (1988, apud Sestini, 1999), a ação antrópica destrutiva sobre a vegetação tem gerado e/ou acelerado processos geomorfológicos de degradação, tornando estes mais intensos que os de deposição ou se sobrepondo aos processos pedogenéticos. Isso tem ocorrido de forma intensa no sudeste brasileiro, devido tanto às atividades agrícolas quanto à urbanização, sendo que a instabilização de encostas tem sido agravada pela remoção das matas.

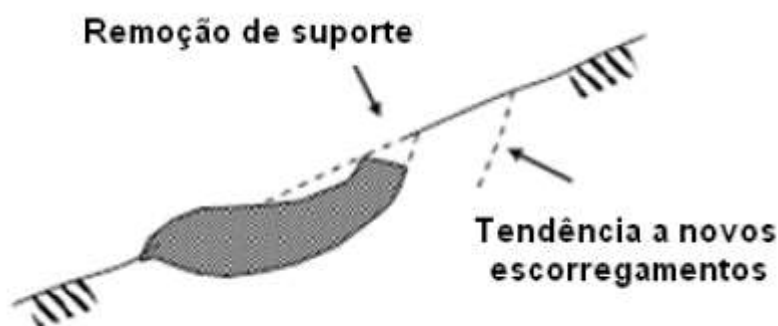
Sem esta interferência os processos de decomposição seriam mais rápidos que os de transporte, devido a fatores como a alta taxa de infiltração induzida pela umidade, temperatura do solo, ação bioquímica e intenso intemperismo químico (Sternberg, 1949; Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al, 1984; apud Sestini, 1999).

Segundo Augusto Filho e Virgili (1998), as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são:

- Remoção indiscriminada da cobertura vegetal;
- Lançamento e concentração de águas servidas;
- Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas sanitárias;
- Execução inadequada de cortes nas encostas;
- Execução deficiente de aterros;
- Lançamento de entulho e deposição de lixo nas encostas;
- Vibrações produzidas por tráfego pesado;
- Atividades de pedreiras, dentre outras

Silva (2016) apresenta de modo mais resumido as principais ações antrópicas que podem induzir escorregamentos:

- 1 Modificação da geometria do talude, através de cortes ou aterros (Figura 28);
- 2 Alteração do regime hidrológico do talude;
- 3 Eliminação ou modificação da cobertura vegetal da encosta;
- 4 Ocupação do solo propriamente dita.



**Figura 28 – Mudança na geometria do talude (Silva, 2016)**

Ainda de acordo com Silva (2016), na região litorânea sul do Rio de Janeiro, existem desmatamentos antigos, para a constituição de pastos ou culturas. Outras áreas foram desmatadas para permitir a passagem da rodovia BR-101 e, a partir do início da operação da via, ocorreram desmatamentos subsequentes, com o aumento da população da área. Nesta região, foram observados diversos casos de instabilidade de encostas. A maioria dos casos ocorreu em faces de taludes de corte, onde estão expostos horizontes diversos dos perfis de intemperismo.

A ação antrópica destrutiva sobre a vegetação tem gerado e/ou acelerado processos geomorfológicos de degradação. Estes processos têm ocorrido de forma intensa no sudeste brasileiro, devido tanto às atividades agrícolas quanto à urbanização, sendo que a instabilização de encostas tem sido agravada pela remoção das matas (Wolle, 1988). Sem esta interferência, os processos de decomposição seriam mais rápidos que os de transporte, devido a fatores como

a alta taxa de infiltração induzida pela umidade, a temperatura do solo, a ação bioquímica, e o intenso intemperismo químico (Chorley et al,1984).

Os cortes de estradas e outras obras em áreas de declividade desfavorável e/ou que possuam características geológicas e geomorfológicas sujeitas a deslizamentos aceleram estes processos (Guerra, 1994; Fernandes e Amaral, 1996). Além disso, o tráfego de veículos pesados provoca vibrações que detonam processos de instabilização de encostas (Guidicini e Nieble, 1993). O papel das atividades antrópicas como indutoras de deslizamentos é muito significativo, sendo muito frequentes os deslizamentos em encostas ocupadas durante períodos de chuvas intensas. O volume de material removido e transportado por água pluvial está relacionado à densidade de cobertura vegetal e à declividade, de forma que com o desmatamento, esses processos se tornam mais intensos, principalmente em pontos de alta declividade.

### 1.1.3 Tipologia dos Movimentos de Massa

Existem inúmeras classificações dos movimentos de massa na literatura. Para efeito de exemplificação reproduzem-se algumas delas, a começar pela proposta de Varnes (1978), que se tornou referência internacional não apenas pela sua simplicidade, mas também porque é considerada oficial pela *International Association of Engineering Geology and the Environment* – IAEG.

Como característica marcante, a proposta de classificação dos movimentos de massa por Varnes (1978) relaciona cada tipo de movimento ao tipo de material envolvido no processo, sendo que no caso de solos o aspecto granulométrico é considerado, como pode ser observado na

#### **Tabela 7.**

Na literatura brasileira, a classificação proposta por Augusto Filho (1992) é provavelmente a mais utilizada e está reproduzida na Tabela 8, principalmente dentro do contexto da elaboração de Mapas de Risco geotécnico.

A Tabela 9 apresenta a classificação de Hutchinson (1988) para movimentos de massa gravitacionais, baseando-se na classificação de Varnes (1958 e 1978).

Como pode-se observar, esta proposta é fundamentada na morfologia dos movimentos das encostas e materiais movimentados, sendo excluídos quaisquer movimentos em grande escala, bem como aqueles associados a subsidência e tectônica (adaptado de Ahrendt,2005).

**Tabela 7 - Proposta de Varnes (1978) para classificação dos movimentos de massa gravitacionais (Brabb,1991, apud Conti,2012)**

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solos (engenharia)	
				Predominante-mente Grosso	Predominante-mente Fino
Quedas ( <i>fall</i> )			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de solo
Tombamento ( <i>topple</i> )			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de solo
Escorregamento ( <i>slide</i> )	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento em rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento em solo
	Translacional	Muitas Unidades			
Espalhamentos ( <i>lateral spread</i> )			Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Corridas ( <i>flow</i> )			Corrida de rocha	Corrida de detritos	Corrida de lama
Complexo ( <i>complex</i> )			Combinação de dois ou mais tipos principais de movimento		

**Tabela 8 - Proposta de Augusto Filho (1992) para classificação dos movimentos de massa em encostas (Augusto Filho, apud Tominaga, 2009)**

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vários planos de deslocamento (internos)</li> <li>• velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>• movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</li> <li>• solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</li> <li>• geometria indefinida</li> </ul>
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>• velocidades médias (m/h) a altas (m/s)</li> <li>• pequenos a grandes volumes de material</li> <li>• geometria e materiais variáveis: Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza</li> </ul>
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sem planos de deslocamento</li> <li>• movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</li> <li>• velocidades muito altas (vários m/s)</li> <li>• material rochoso</li> <li>• pequenos a médios volumes</li> <li>• geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.</li> <li>Rolamento de matacão</li> <li>Tombamento</li> </ul>
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• muitas superfícies de deslocamento</li> <li>• movimento semelhante ao de um líquido viscoso</li> <li>• desenvolvimento ao longo das drenagens</li> <li>• velocidades médias a altas</li> <li>• mobilização de solo, rocha, detritos e água</li> <li>• grandes volumes de material</li> <li>• extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>

Pela proposta de classificação de Hutchinson (1988), os movimentos de massa gravitacionais são influenciados pela:

- litologia e geologia estrutural;
- hidrogeologia;
- topografia;
- clima,
- vegetação
- sismicidade e
- erosão.



**Tabela 9 - Proposta de classificação de Hutchinson (1988) para classificação dos movimentos de massa em encostas gravitacionais (apud Ahrendt, 2005).**

<i>Tipos</i>	<i>Subtipos</i>	
<i>Rebound</i>	Artificiais Naturais	
<i>Rastejo</i>	Superficial A grandes profundidades (deep-seated) Anterior a ruptura (pre failure) Posterior a ruptura (post failure)	-Rastejo de solo ou talus -Rastejo de gelo, gelifluxão
<i>Sagging of mountain slopes</i>	Um lado da encosta Dois lados da encosta Combinado com tombamento	-Rotacional -Combinado -Rotacional -Combinado
<i>Escorregamentos</i>	Ruptura confinada Rotacionais Compostos Translacionais	-Taludes naturais -Taludes artificiais -Simples -Sucessivos -Múltiplos -Liberados por cisalhamento interno -Progressivos -em placas (sheet) -em lascas (slab/flake) -em turfas (peat/bog) -em rochas ( planar, escalonado, cunha) -detritos ( não periglacial e periglacial) -espalhamento lateral repentino
<i>Escoamento ou fluxo (Flow-like form)</i>	mudslides flow slides debris flows sturzstroms	-Placas -Alongados -Sem coesão -Materiais ligeiramente cimentados -Rochas brandas muito porosas -Detritos de rochas intemperizadas -Materiais orgânicos -Materiais provenientes de vulcões
<i>Tombamentos</i>	Descontinuidades pré-existentes Fissuras de tração em material intacto	- simples - múltiplos
<i>Quedas</i>	Primárias Secundárias	
<i>Complexos</i>		

#### 1.1.4 Metodologias para caracterização dos movimentos de massa

Partindo-se da definição ampla de que os movimentos de massa são fenômenos naturais de dinâmica externa com capacidade de mudar e modelar as formas de relevo (Guimarães et al, 2003), faz-se necessário definir critérios para classificar as diferentes topologias de tais movimentos.

Podem-se citar algumas das características que diferenciam os variados tipos de movimentos de massa:

- i) Volume mobilizado de material deslocado;
- ii) Alcance de solo/rocha transportado;
- iii) Potencial destrutivo do acidente geotécnico;
- iv) Tipo de material deslocado;
- v) Velocidade e direção de transporte da massa movimentada;
- vi) Natureza e características de material instabilizado;
- vii) Características do movimento de solo/rocha;
- viii) Geometria das massas movimentadas.
- ix) Natureza do movimento gravitacional.

Guidicini e Niebli (1984), com base na sistemática de Penta (1963), apresentam uma série de características de interesse na descrição de um movimento de massa, que estão reproduzidas na

Tabela 10. (adaptado de GEORIO, 2014).

As tabelas subsequentes (Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13) apresentam propostas de acordo com WLI (1993, apud GEORIO,2014), baseadas, respectivamente, pelo tipo do escorregamento, velocidades do movimento de massa e estado de atividade dos escorregamentos.

**Tabela 10 - Elementos significativos na descrição dos movimentos de massa**

<b>Descrição das partes típicas</b>	<b>Raiz ou região de destaque, extensão de movimentação, base ou zona de deposição.</b>
Natureza e estado do material envolvido	Material rochoso (maciço, estratificado, xistoso, gnaissificado, compacto, fraturado, desagregado), material incoerente (areias, siltes, lama, detritos, materiais aluviais em geral), material coerente (argilas não-saturadas, argilas endurecidas, argilas tixotrópicas, turfa), estado do material da massa movimentada (sólido, líquido, plástico, fragmentário).
Características estruturais	Homogeneidade ou heterogeneidade estrutural, presença de atitude de falhas, intercalações de baixa resistência mecânica, sistema de compartimentação (direção, mergulho, frequência, espaçamento, abertura e preenchimento de descontinuidades, rugosidade, encurvamento e ondulações).
Características mecânicas	Propriedades da rocha intacta entre descontinuidades, previsão de comportamento diferenciado diante das solicitações.
Mecanismo de movimentação	Início, desenvolvimento, evolução, duração, velocidade, discriminação de causa e agente, forma de atuação.
Superfície de movimentação	Presença ou ausência, natureza, continuidade, superfícies múltiplas, descontinuidades, vazios, inclinação, irregularidades, abaulamentos.
Comportamento no tempo	Periodicidade, frequência no mesmo local, sucessivos estágios de desenvolvimento.
Relação com outros movimentos	Coexistência, contemporaneidade, sucessão, distribuição, termos de passagem, densidade regional.
Conseqüências na área	Influência na morfologia local ou regional, implicações econômicas, mudanças no regime de escoamento superficial ou subterrâneo.

**Tabela 11 – Estilo do escorregamento**

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Complexo	Exibe pelo menos dois tipos de movimentos (queda, escorregamento fluxo) em seqüência.
Composto	Exibe pelo menos dois tipos de movimentos simultâneos em diferentes partes da massa deslocada.
Sucessivo	É do mesmo tipo de um escorregamento anterior vizinho, mas não compartilha com ele o material deslocado ou a superfície de ruptura.
Simple	É um simples movimento de material deslocado.
Múltiplo	Apresenta repetidos desenvolvimentos no mesmo tipo de movimento.

**Tabela 12 – Classificação da velocidade de deslocamento**

Classificação	Velocidade
Muito lento	de 0,3 m/5 anos a 1,5 m/ano
Lento	de 1,5 m/ano a 1,5 m/mês
Moderado	de 1,5 m/mês a 1,5 m/dia
Rápido	de 1,5 m/dia a 0,3 m/min
Muito rápido	de 0,3 m/min a 3 m/s

**Tabela 13 – Estado de atividade do escorregamento**

Estado de atividade	Descrição
Ativo	Está atualmente em movimento.
Paralisado	Moveu-se nos últimos 12 meses, mas não está ativo no presente.
Reativado	É um ativo que estava inativo.
Inativo	Não se moveu nos últimos 12 meses.
Adormecido	Inativo que pode ser reativado por suas causas originais, ou por outras causas.
Abandonado	Inativo que não está mais afetado pelas causas originais.
Estabilizado	Inativo que está protegido de suas causas originais por medidas corretivas artificiais.
Reliquiar	Um escorregamento inativo, que se desenvolveu sob condições climáticas e geomorfológicas consideravelmente diferentes das do presente. São também denominados movimentos de massas fósseis.

## 1.2 Mapas de Risco e Mapas de Susceptibilidade

### 1.2.1 Introdução

Pode-se conceituar Mapas de Susceptibilidade a Escorregamentos como sendo a representação gráfica que apresenta e classifica áreas onde existe a possibilidade de movimentos de massa encosta abaixo, com energia que dependerá, entre outros fatores, da inclinação do talude sobre o qual o deslocamento de solo e/ou rocha irá se desenvolver.

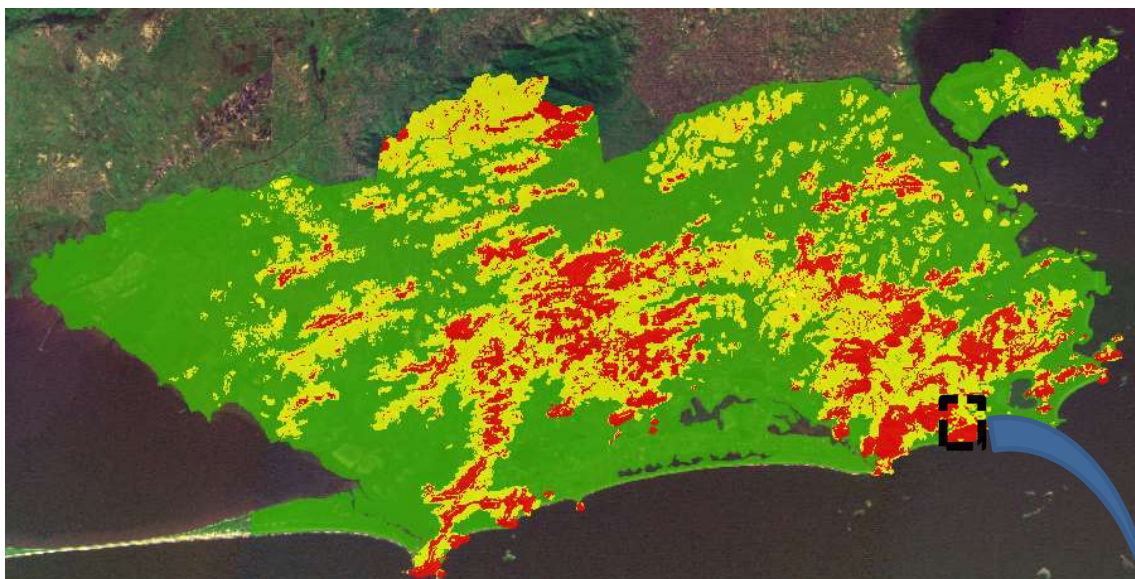
De um modo prático, associa-se diretamente a susceptibilidade ao escorregamento às diversas faixas de variação de inclinação dos taludes de um maciço. Portanto, pela simples análise das declividades classifica-se o quanto susceptível ao movimento gravitacional de massa estão sujeitas as diferentes regiões que constituem o maciço.

Já os Mapas de Risco representam conceito mais amplo: apresentam e classificam também de forma ilustrativa através de manchas, ora denominadas de “*shapes*”, áreas consideradas, segundo avaliação de geólogos e engenheiros geotécnicos, de risco geralmente classificados como alto, médio e baixo. Estes riscos consideram principalmente a possibilidade de perdas humanas, e devem ser mitigados seja através da execução de intervenções de engenharia construindo obras de estabilização, seja através da remoção total ou parcial de moradias na área de alcance do movimento de massa.

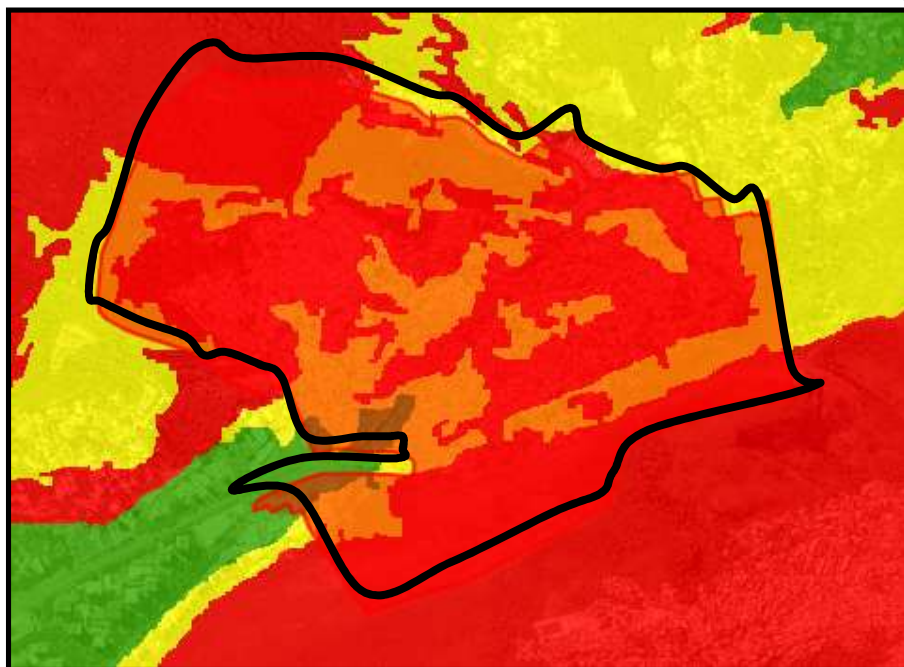
Os propósitos do Mapa de Risco estão relacionados aos aspectos técnicos, sociais, econômicos e políticos, podendo ser resumidos da seguinte maneira (adaptado de Gusmão Filho, 1997) :

- Instrumento de planejamento e desenvolvimento de estratégias de redução de desastres;
- Possibilitar avaliação espacial do risco à partir da análise do perigo de cada região em conjunto com a vulnerabilidade e o dano potencial do processo potencialmente perigoso
- Definição de áreas prioritárias para intervenções em base técnica, e não política;
- Definição do sistema de controle nos pontos críticos;
- Definição do tipo de tratamento na área em função do seu maior fator de risco (topográfico, geológico ou ambiental);
- Instrumento de negociação com as comunidades e órgãos de financiamento;
- Orçamento de obras de infraestrutura

Os Mapas de Suscetibilidade ao Risco desenvolvidos pela GeoRio para o Maciço da Tijuca estão ilustrados respectivamente nas Figura 29 à 31. Os mesmos mapas em escalas mais adequadas se encontram no Anexo desta tese.



**Figura 29 - Mapa de susceptibilidade ao escorregamento da cidade do Rio de Janeiro (IPP e GeoRio, 2013)**



**Figura 30 Mapa de susceptibilidade ao escorregamento na área de abrangência da Comunidade da Rocinha, ampliado da Figura 29**



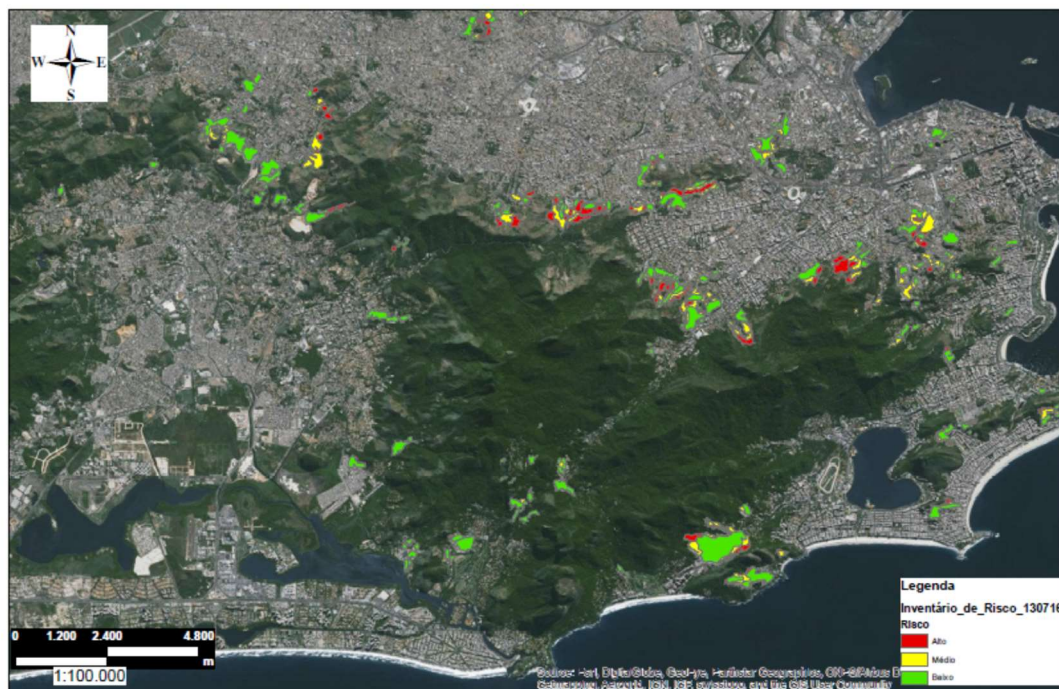


Figura 31 - Mapa de susceptibilidade ao risco no Maciço da Tijuca

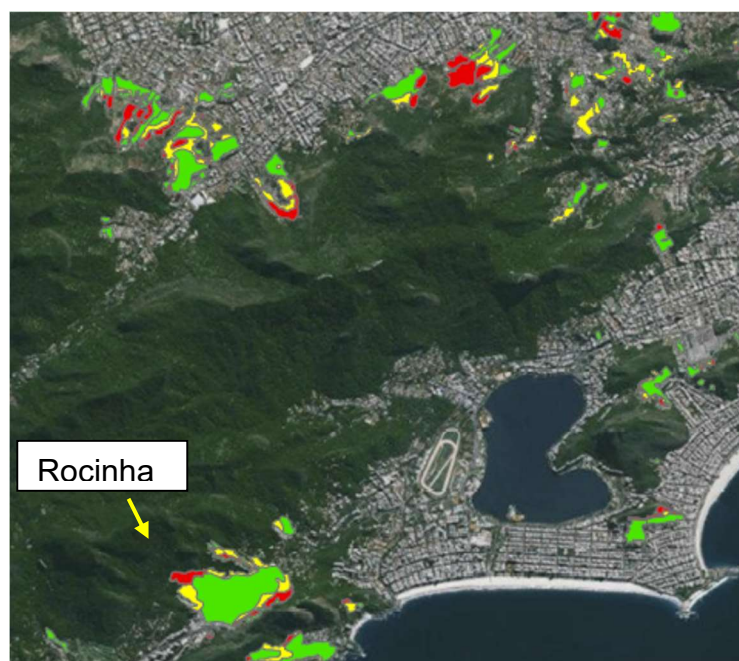


Figura 32- Mapa Susceptibilidade ao risco ampliado nas vertentes Norte e Sul do Maciço da Tijuca

De uma maneira geral, os mapas de risco tendem a ser mais objetivos que os de susceptibilidade ao risco, por indicarem de forma mais clara as regiões onde se espera maior perda de vidas em um eventual movimento de massa. Entretanto, pela maior dificuldade em estabelecer os elementos em risco e as vulnerabilidades adota-se na literatura geotécnica, geralmente, os mapas de susceptibilidades ao risco, que indicam indiretamente as regiões com maior probabilidade de deslizamento, que não são necessariamente as mesmas onde se esperam maiores perdas de vidas.

Por essas razões, os mapas produzidos na presente tese são mapas de susceptibilidade ao risco.

### 1.2.2 Propostas para elaboração de mapas de risco e terminologias

Estudos mais apurado sobre critérios de elaboração dos Mapas de Risco passam a ser importantes na medida em que eles são utilizados para avaliação nos processos que decidem sobre execução de obras de contenção onerosas, objetivando tornar a ocupação segura de uma encosta natural, ou ainda, em processos que decidem pela total desocupação de uma área, fato que pode ser ainda mais oneroso, tendo em vista os custos elevados que envolvem a relocação de dezenas e as vezes centenas de famílias para locais seguros.

Avaliações de risco equivocadas podem conduzir ao desperdício de recursos públicos ou, o que é ainda mais grave, podem implicar em perdas humanas irreparáveis, no caso de subdimensionamento da gravidade das possibilidades do risco de determinada região.

Na literatura é possível encontrar diversas abordagens sobre classificação e definição não apenas sobre risco geotécnico, como também no que se refere a outros termos, conceitos e terminologias envolvendo o assunto, conforme apresentado a seguir.

De acordo com Augusto Filho et al (1990), “Risco” representa a probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população, sendo considerado como a condição potencial de ocorrência de um determinado acidente. Por outro lado, “Acidente” refere-se a um fato já ocorrido, onde foram registradas consequências danosas sociais e/ou econômicas.



A publicação organizada pela Organização das Nações Unidas, o *International Strategy for Disasters Redution* (UN-ISDR, 2004), que tem por objetivo principal a redução das vulnerabilidades das comunidades como forma de reduzir o risco de desastres propõe a seguinte definição:

- “Risco esta associado à probabilidade de consequências prejudiciais, ou danos esperados (morte, ferimentos a pessoas, prejuízos econômicos, etc) resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pela ação humana e as condições de vulnerabilidade.”

Em sua versão atualizada a UN-ISDR em 2009 define como Risco “A combinação da probabilidade de um evento e suas consequências negativas”.

Outro conceito importante é o de “perigo” e, pelo entendimento da própria ISDR os perigos ambientais envolvem a consideração de quase todos os fenômenos físicos da Terra, incluindo entre eles os perigos metereológicos, hidro-geológicos, biológicos, geofísicos, etc, podendo ser estudados individualmente ou em conjunto, caso em que a interação deve receber tratamento especial devido a sua complexidade.

Logicamente, a classificação de perigo que interessa ao escopo deste trabalho é aquela relacionada aos perigos naturais geológicos, que por sua vez, de acordo com a proposta do UM-ISDR (2004), pode ser dividida em três categorias a saber: Hidrometeorológicos, Geológicos e Biológicos. A classificação completa está apresentada na Tabela 14 :

Tabela 14 - Classificação de Perigo proposta pela UM-ISDR (2004)

<b>PERIGO (HAZARD)</b>	
Um evento, fenômeno ou atividade humana potencialmente danoso, o qual pode causar perda de vidas ou ferimentos a pessoa, danos à propriedades, rupturas sócio econômicos ou degradação ambiental.	
<b>PERIGOS NATURAIS (NATURAL HAZARDS)</b>	
Processos ou fenômenos naturais que ocorrem na biosfera e que podem constituir-se em um evento danoso. Os perigos naturais podem ser classificados quanto à origem em: geológico, hidrometeorológico e biológico.	
ORIGEM	EXEMPLOS DE FENÔMENOS
<b>Perigos geológicos</b> Processos ou fenômenos naturais que podem ser de origem endógena ou exógena	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terremotos, tsunamis;</li> <li>• Atividade e emissões vulcânicas;</li> <li>• Movimentos de massa, escorregamentos, queda de blocos rochosos, liquefação;</li> <li>• Colapso superficial, atividade de falha geológica.</li> </ul>
<b>Perigos hidrometeorológicos</b> Processos ou fenômenos naturais de natureza atmosférica, hidrológica ou oceanográfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundações/enchentes, corridas de lama/detritos;</li> <li>• Ciclones tropicais, tempestades marinhas, ventanias, chuvas de tempestades, nevasca, relâmpagos;</li> <li>• Secas, desertificação, fogo, temperaturas extremas, tempestade de areias;</li> <li>• <i>Permafrost</i>, avalanches de neve.</li> </ul>
<b>Perigo biológico</b> Processos de origem biológica ou aqueles transmitidos por vetores biológicos, incluindo exposição aos micro-organismos patogênicos, tóxicos e substâncias bioativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eclosão de doenças epidêmicas, contágios de plantas ou de animais e de infestações extensivas.</li> </ul>
<b>PERIGO TECNOLÓGICO (TECHNOLOGICAL HAZARDS)</b>	
Perigo associado com acidentes tecnológicos ou industriais, rompimento de infraestrutura ou atividades humanas que podem causar perda de vidas ou ferimentos a pessoa, danos à propriedades, rupturas sócio econômicos ou degradação ambiental. Exemplos: poluição industrial, radioatividade, resíduo tóxico, queda de barragens, acidentes industriais, etc.	

De acordo com Tominaga et al (2009), existem dois elementos essenciais na formulação do risco: a ocorrência do perigo à partir de se ter um evento, fenômeno ou atividade humana potencialmente danosa, e a vulnerabilidade, ou seja, o grau de suscetibilidade do elemento exposto ao perigo.

Para Veyret (2007), o risco é um perigo calculável, pois a sua ocorrência pode ser previsível desde que se conheça os mecanismos causadores e os diversos condicionantes envolvidos no problema. Ainda segundo Veyret (2007), a estatística pode contribuir em muito para a previsibilidade dos desastres naturais, uma vez estimada frequência de ocorrência de eventos através do histórico de acidentes. E justamente dentro deste conceito que esta tese se desenvolve.

Ainda segundo Tominaga et al (2009), “o risco existe quando há um perigo com potencial de causar dano”, de modo que, uma vez dimensionado ou estimado o perigo, o risco poderá ser eliminado ou pelo menos minimizado. Neste sentido, o trabalho da engenharia geotécnica em conjunto com a geologia pode receber destaque e importância em vários aspectos, humano, social e até mesmo econômico. De acordo com Varnes (1984), a avaliação do risco geológico pode ser determinada analiticamente pela equação:

$$R_t = E \times R_s, \text{ sendo } R_s = H \times V, \text{ logo, } R_t = E \times H \times V$$

$R_t$  = Risco total

$E$  = Elementos em Risco

$R_s$  = Risco específico

$H$  = Perigo Natural (*Natural Hazard*)

$V$  = Vulnerabilidade

Ressalta-se que o Risco total ( $R_t$ ) corresponde ao nº esperado de perdas humanas ou materiais, ou até mesmo interrupção de atividades econômicas.

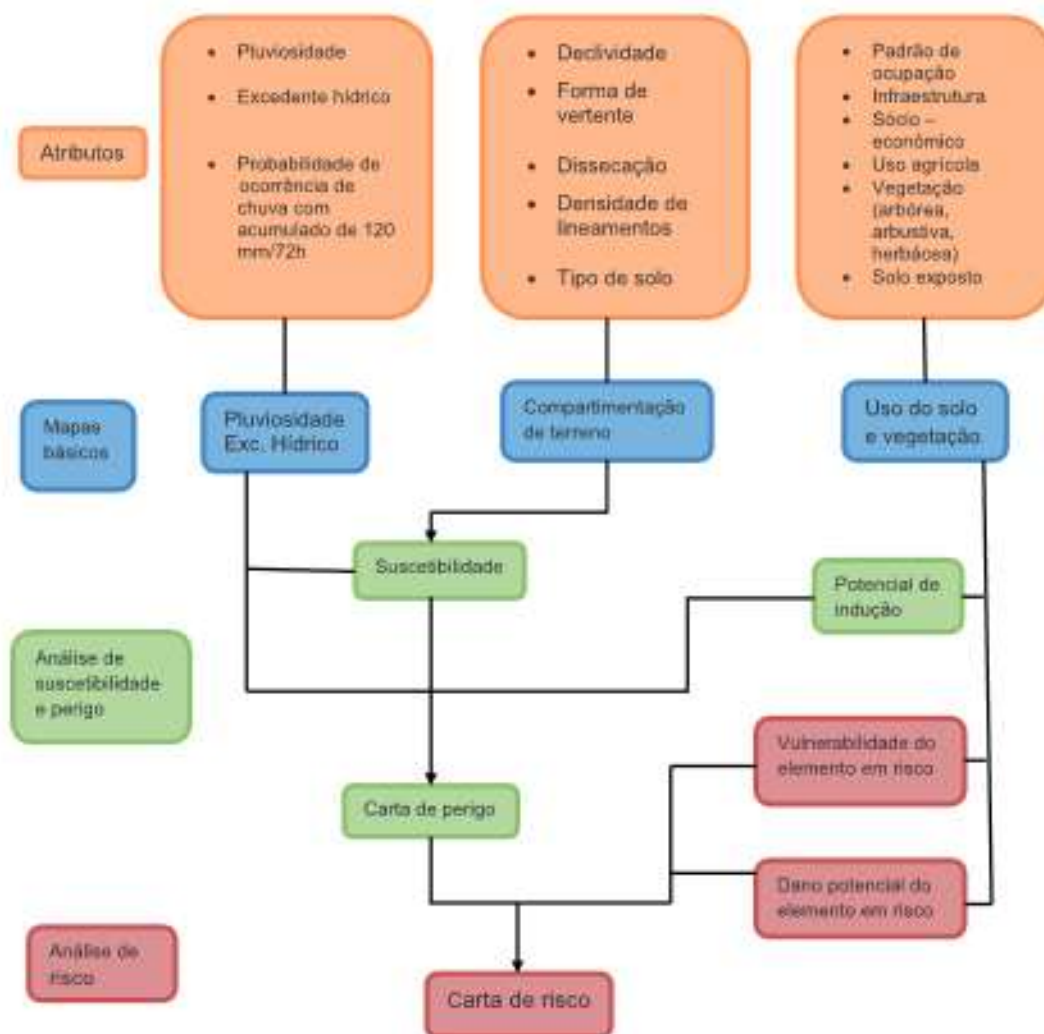
Cabe salientar da importância em se procurar quantificar analiticamente o Risco ( $R$ ) em função do Perigo ( $P$ ), da Vulnerabilidade ( $V$ ) e do Dano Potencial ( $DP$ ), de acordo com proposta de Tominaga et al (2004) e Tominaga (2007), com base em Varnes (1984), Einstein (1988) e UM-ISDR (2004):  $R = P \times V \times DP$ , considerando as definições abaixo:

Perigo – refere-se à possibilidade de um processo ou fenômeno natural potencialmente danoso ocorrer num determinado local e num período de tempo especificado;

Vulnerabilidade – conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, o qual aumenta a suscetibilidade de uma comunidade (elemento em risco) ao impacto dos perigos. A vulnerabilidade compreende tanto aspectos físicos (resistência de construções e proteções da infraestrutura) como fatores humanos, tais como, econômicos, sociais, políticos, técnicos, culturais, educacionais e institucionais.

Risco – é a possibilidade de se ter consequências prejudiciais ou danosas em função de perigos naturais ou induzidos pelo homem. Assim, considera-se o Risco ( $R$ ) como uma função do Perigo ( $P$ ), da Vulnerabilidade ( $V$ ) e do Dano Potencial ( $DP$ ), o qual pode ser expresso como  $R = P \times V \times DP$ .

Nesta linha de raciocínio, Tominaga et al (2004) propôs fluxograma para nortear análise de perigo e risco, onde podemos identificar de modo organizado a dependência entre os diversos condicionantes envolvidos na elaboração das “cartas” de risco. A Figura 33 reproduz o referido fluxograma:



**Figura 33 - Classificação de Perigo proposta pela UM-ISDR (2004)**

O risco específico ( $R_s$ ) (Varnes, 1984; Smith, 1996, apud Pamplona e Valente, 2014) define-se como a probabilidade de ocorrência de um acidente natural e de que este cause perdas ou danos. Por conseguinte, a avaliação do risco é realizada através da susceptibilidade (no caso de não ser possível obter dados sobre a intensidade, magnitude e frequência dos fenômenos perigosos – perigosidade) correspondente a um determinado processo e dos efeitos do

mesmo sobre elementos expostos ao perigo. Este risco pode ser reduzido, quer diminuindo a susceptibilidade, quer diminuindo a vulnerabilidade (Vallejo et al, 2005).

Assim, uma carta de risco específico (ou mapa de risco) resulta da combinação, numa proporção adequada, da susceptibilidade com a vulnerabilidade dos elementos expostos à ação de determinado processo natural (Pamplona e Valente, 2014).

No artigo intitulado “Avaliação do risco à ocorrência de movimentos de massa: proposta de uma metodologia”, Pamplona e Valente (2014) apresentam uma abordagem simples também para a definição de zonas de susceptibilidades objetivando gerar instrumentos para minimizar ou até mesmo reduzir ocorrência de acidentes geotécnicos com danos materiais e humanos, de acordo com a proposta desta tese. O modelo por eles apresentados desenvolve-se à partir do modelo proposto por Hearn (1987) e TRL (1997), referido em Hearn & Griffiths (2001), que apresentam fatores como o tipo de rocha, declive da vertente, a forma e orientação dos taludes, o uso do solo e a proximidade dos talvegues. No modelo atualizado são ainda levados em conta espessura e grau de alteração da rocha, ocorrência de falhas, precipitação e escoamento superficial.

Os fatores que norteiam o modelo são organizados em quatro grupos (adaptado de Pamplona e Valente, 2014):

- a) Geomorfologia – declive, forma, extensão e orientação da vertente;
- b) Geologia – grau de alteração e espessura de alteração da rocha, contato entre litogias, ocorrência de falhas, ocorrência de pequenos movimentos, erosão ou risco de erosão;
- c) Hidrologia – precipitação, escoamento superficial (*run off*), e proximidade de linhas de talvegue;
- d) Geografia – proximidade de habitações e/ou vias de acesso, taxa de ocupação do solo e áreas devastadas.

Para melhor definição das áreas de susceptibilidade e vulnerabilidade, Pamplona e Valente (2014) propõem, respectivamente, a Tabela 15 e Tabela 16,

que foram construídas com base na atribuição de pesos ou graus de importância, cujo valor depende da relevância relativa no conjunto dos fatores avaliados.

O somatório dos pesos atribuídos às várias classes permite gerar as cartas (mapas) de susceptibilidade. Analogamente, cada um dos fatores da tabela geradora de vulnerabilidade é dividido em classes e a cada classe é atribuída um peso, cujo valor está de acordo com o grau de fragilidade associada aos elementos expostos (Tabela 17) (Pamplona e Valente, 2014).

À partir do intervalo de pesos para cada classe da Tabela 15 e, de acordo com critérios adotados pelo autor no artigo em referência, obtém-se determinada categorização, que se resume em diferentes graus de susceptibilidade aos movimentos de massa, quais sejam:

**Tabela 15 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014)**

Grau de susceptibilidade	Intervalo de valores
Elevado	$\geq 20$
Médio	12 -19
Baixo	$\leq 11$

De modo análogo, a definição dos graus e intervalos de vulnerabilidade que inclui a análise do impacto que a quantificação dos diferentes fatores teria em termos de danos e perdas, resulta da soma dos diferentes pesos das classes da Tabela 18

**Tabela 16 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014)**

Grau de vulnerabilidade	Intervalo de valores
Elevado	$\geq 14$
Médio	7 -13
Baixo	$\leq 6$

Tabela 17 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014)

GRUPO	FACTORES	CLASSES (PESOS)
Geomorfologia	Declive*	0°-10° (0); 10°-25° (1); > 25° (3)
	Forma da vertente	Plana (0); Convexa (1); Côncava (2)
	Comprimento da vertente	≤ 50 m (1); > 50 m (2)
	Orientação da vertente	Exposição solar elevada (0); exposição solar fraca (2)
	Presença de blocos	Não (0); Sim (2)
Geologia	Grau de alteração**	W1-W2 (0); W3-W4 (1); W5-W6 (2)
	Espessura de alteração	≤ 1 m (0); > 1 m (2)
	Litologias e contactos	Não (0); Sim (1)
	Ocorrência de falhas	Não (0); Sim (3)
	Ocorrência de pequenos movimentos/movimentos anteriores	Não (0); Sim (3)
	Erosão diferencial e/ou risco de erosão	Não (0); Médio (1); Elevado (2)
Hidrologia	Precipitação anual	≤ 2000 mm (1) 2000-2400 mm (2); 2400-2800 mm (3); > 2800 mm (4)
	Escoamento superficial	≤ 1000 mm (1); 1000-1400 mm (2); 1400-1800 mm (3); > 1800 mm (4)
	Proximidade de talvegues (raio)	> 20 m (1); ≤ 20 m (2)
Geografia	Proximidade de agregados populacionais e/ou vias de comunicação	Não (0); Sim (2)
	Uso do solo	Florestal / Terraços agrícolas (0); Agrícola (1); Desflorestado (2)
	Área ardida	Não (0); Sim (2)

\*baseado em Hearn & Griffiths (2001); \*\* ISRM (1981)

Tabela 18 - Adaptado de Pamplona e Valente (2014)

FACTORES	CLASSES (PESOS)	NOTAS
Agregados populacionais	Não (0) < dimensão (3) > dimensão (5)	Os agregados populacionais de menor dimensão incluem as pessoas que vivem na proximidade (200m) de áreas susceptíveis ou em aldeias. Os agregados populacionais de maior dimensão correspondem a vilas e cidades.
Construções s.l.	Não (0) Industrial (3) Residências e serviços (4)	O valor máximo foi atribuído à classe que integra as residências familiares e, ainda, inclui elementos estratégicos e vitais, nomeadamente, aquando da existência de situações de crise (e.g., hospitais, quartéis de bombeiros e postos da polícia).
Património construído	Não (0) Sim (3)	Edifícios públicos e privados de importância nacional e local com relevância cultural e histórica.
Vias de comunicação	Não (0) Estradas secundárias (2) Estradas principais, caminho de ferro, portos e aeroportos (4)	O valor máximo foi atribuído em função da importância estratégica destas vias no transporte de bens e serviços.
Rede de distribuição de água e de saneamento básico	Não (0) Sim (4)	Infra-estruturas de suporte às actividades humanas.
Rede eléctrica e de telecomunicações	Não (0) Sim (4)	Infra-estruturas de suporte às actividades humanas.
Uso do solo (Florestal/Agrícola)	Não (0) Sim (2)	Estas áreas são economicamente vitais para as comunidades rurais.

Finalmente, a avaliação do risco específico (Re), como resultado dos valores combinados de susceptibilidade (S) e vulnerabilidade (V), pode ser expressa numericamente, ponderando-se a importância de cada um deles, levando-se em conta fator de correção (cf) justamente para se calibrar as diferenças entre valores de S e V :

$$Re = 0,65.S + 0,35.V.cf \quad (10)$$

Os autores atribuem essas diferenças na ponderação entre S e V devido ao fato de a susceptibilidade considerar os fatores desencadeadores dos movimentos de massa, ou seja, levar em conta a probabilidade de ocorrência de tais movimentos, ao passo que a vulnerabilidade se refere a elementos que se manifestam a jusante, estando associada à sensibilidade e à fragilidade dos elementos expostos a um possível desastre natural, justificando assumir menor peso no cálculo do risco.



O parâmetro “cf” pode se tornar muito importante na medida em que, conhecendo-se os resultados de um evento catastrófico bem como todas os elementos condicionantes associados às causas, através de retro-análise, pode-se calibrar “cf” de modo a validar a equação que determina o risco específico para o caso estudado.

Com relação às metodologias para elaboração dos Mapas de Risco podemos citar algumas propostas, destacadas pela literatura, conforme descrição a seguir.

Segundo Bolt et al (1975) dois tipos de análises podem ser utilizadas para classificar o risco geológico-geotécnico de uma encosta:

- Análise quantitativa de risco: a probabilidade das ocorrências e de suas consequências é considerada nos diversos pontos onde são registrados acidentes geotécnicos. Os diversos níveis de gravidade podem ser levados em conta, de modo que existe atribuição de diferentes pesos a serem distribuídos espacialmente pela superfície considerada.

- Análise qualitativa do risco: o grau de risco é avaliado à partir de comparação com algum critério estabelecido pelo profissional como por exemplo a geomorfologia do local e/ou o mapa de declividades da região. Segundo Cerri e Carvalho (1990) este tipo de análise tem caráter preliminar na elaboração dos mapas de risco. Com relação aos níveis de gravidade do risco, pode-se dizer que são definidos literalmente e não quantitativamente, ou seja, risco baixo, médio ou alto.

De acordo com Fernandes et al (2001) e Savage et al (2004), os métodos adotados para elaboração de Mapas de Risco podem ser divididos em 3 grupos:

- Métodos empíricos:

Ocorrem quando os mapas são elaborados a partir da observação de inventário de ocorrências, podendo-se utilizar também dados pluviométricos regionais, mapeamentos geológicos e geomorfológicos, além de dados digitais do terreno em SIG (Sistema de Informações Geográficas) para estimar a distribuição espacial e temporal do potencial de instabilidade das vertentes. Segundo Fernandes et al (2001) pode-se considerar ainda como método empírico o estudo de mapas geomorfológicos combinados com a experiência do

profissional na ocasião da análise do risco. Existe neste caso a desvantagem do elevado grau de subjetividade na avaliação do risco

- Métodos probabilísticos:

Estes procedimentos baseiam-se no princípio de que os fatores que causaram a instabilidade em um determinado local no passado poderão gerar novas instabilizações no futuro (Van Westen, 1993; Guzzetti et al, 1999). Fernandes et al (2001) porém ressalta que, para eficiência deste método probabilístico, é necessária existência de banco de dados extenso, fato considerado raro na realidade brasileira. No caso específico da Fundação GeoRio este método pode ser perfeitamente aplicado uma vez que o banco de dados é vasto, o que permite tratamento probabilístico das informações.

- Métodos determinísticos:

A partir do estudo de grande quantidade de informações detalhadas e obtidas em ensaios de campo e laboratório, são elaborados modelos matemáticos em bases físicas envolvendo cálculo de estabilidade de diversas vertentes do maciço, através da determinação dos seus fatores de segurança correspondentes. Esta exigência do conhecimento dos parâmetros geológico-geotécnicos, assim como dos aspectos geomorfológicos, este método pode se tornar viável somente para áreas reduzidas e pontos localizados.

Prever, e se possível evitar a ocorrência de desastres naturais é o grande objetivo deste trabalho e, para tanto, se faz necessário conhecer, investigar, e entender a variabilidade espacial dos eventos no maciço estudado.

Neste sentido, a elaboração de um Mapa de Susceptibilidade ao Risco confiável, dinâmico e com fácil atualização é imprescindível ao planejamento de estratégias de redução de desastres naturais, como se propõe nesta tese.

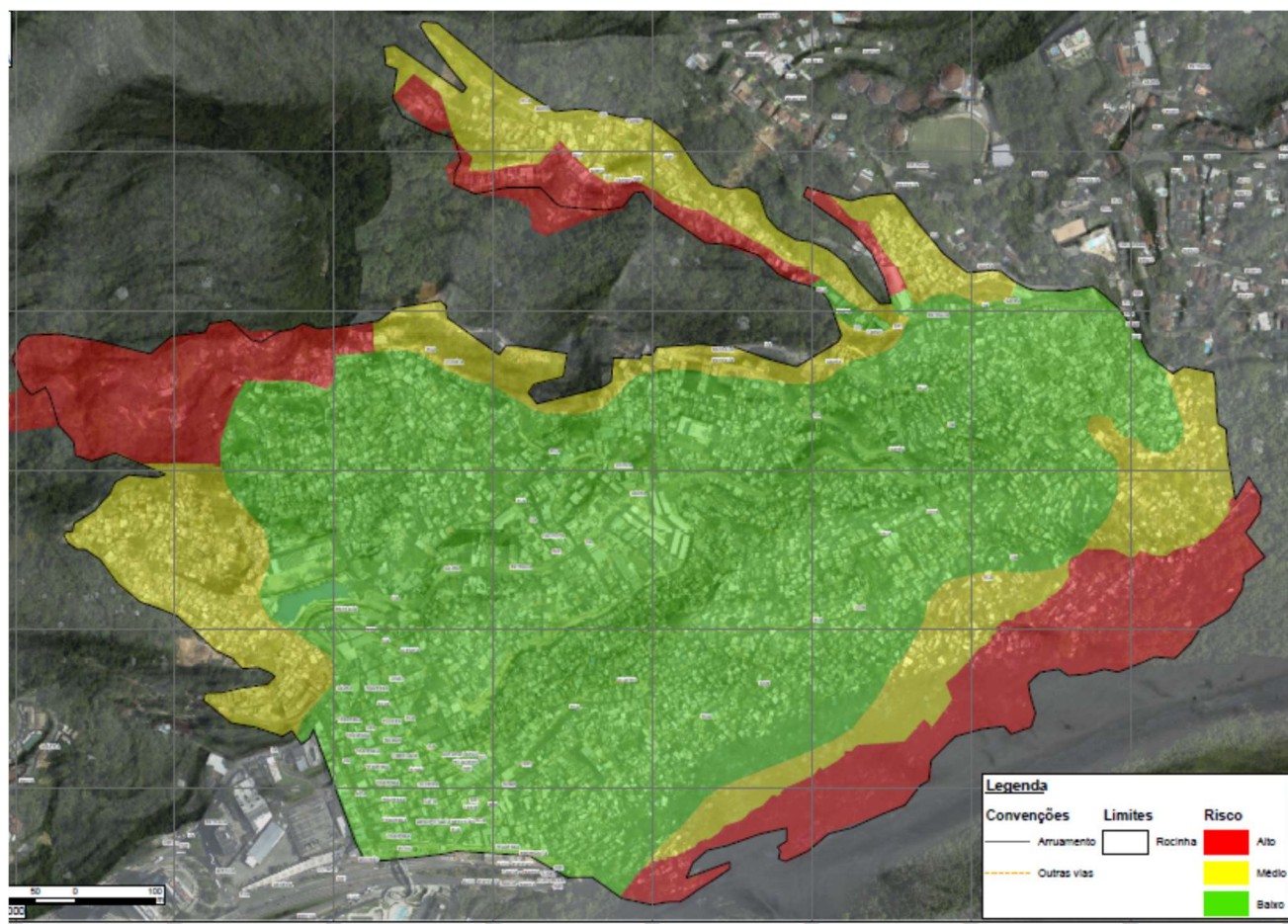
### 1.2.3 Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Rocinha

O Mapa de susceptibilidade ao risco da Rocinha, reproduzido na Figura 34 foi elaborado por geólogos e engenheiros da fundação GEORIO utilizando o método empírico, de base qualitativa, a partir da vasta experiência de profissionais geotécnicos, após diversas vistorias técnicas na comunidade.

Para avaliação do risco também levou-se em conta a vulnerabilidade de cada vertente aos movimentos de massa nos locais onde a densidade de moradias é significativa.

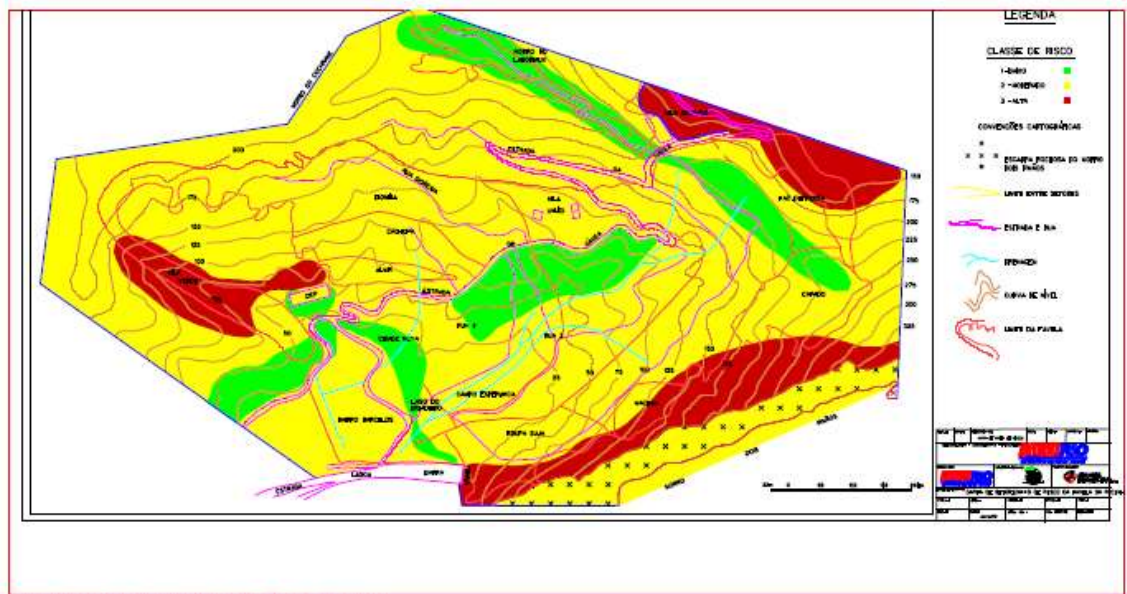
À medida que obras de contenção ou demais intervenções responsáveis pela redução ou eliminação do risco vão se desenvolvendo em locais avaliados inicialmente como de alto risco, o tipo de classificação também vai sofrendo atualização, o que torna o mapeamento da comunidade um processo dinâmico ao longo do tempo.

Nota-se uma certa uniformidade na hierarquização da susceptibilidade ao risco, o que é facilmente explicado pelos critérios adotados na construção do mapa. Pareceu evidente a priorização das regiões situadas nas cotas mais elevadas, associadas, em sua maioria, aos locais de alta declividade. Historicamente, representam também locais mais desprotegidos e com maior incidência de escorregamentos, desprendimento de lascas, queda e rolamento de blocos e demais movimentos de massa.



**Figura 34 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Rocinha elaborado pela Gerência de Geologia da Fundação GEORIO (2014)**

A título de registro histórico, são apresentadas as figuras 35 e 36 que ilustram, respectivamente, cartas de setorização de risco da Rocinha em 1992 e da cidade do Rio de Janeiro em 1991. Estes mapas foram elaborados pela Fundação GEORIO através de avaliação geológico-geotécnica de engenheiros geotécnicos e geólogos e após análise de todos os condicionantes envolvidos no processo. Esta avaliação empírica é norteadada pela experiência dos profissionais e se inicia em diversas vistorias de campo com anotações de feições e características geológicas associadas ao risco de movimentos de massa a serem estudados. Os mapas das figuras 35 e 36 distinguem 3 classes de risco : baixo (verde), moderado (amarelo) e alto (vermelho).



...MAPAS 1-2.000 DGM/EROCINHA.DGN 02/04/08 16:16:35

Figura 35 – Carta de setorização de risco da Rocinha (1992)

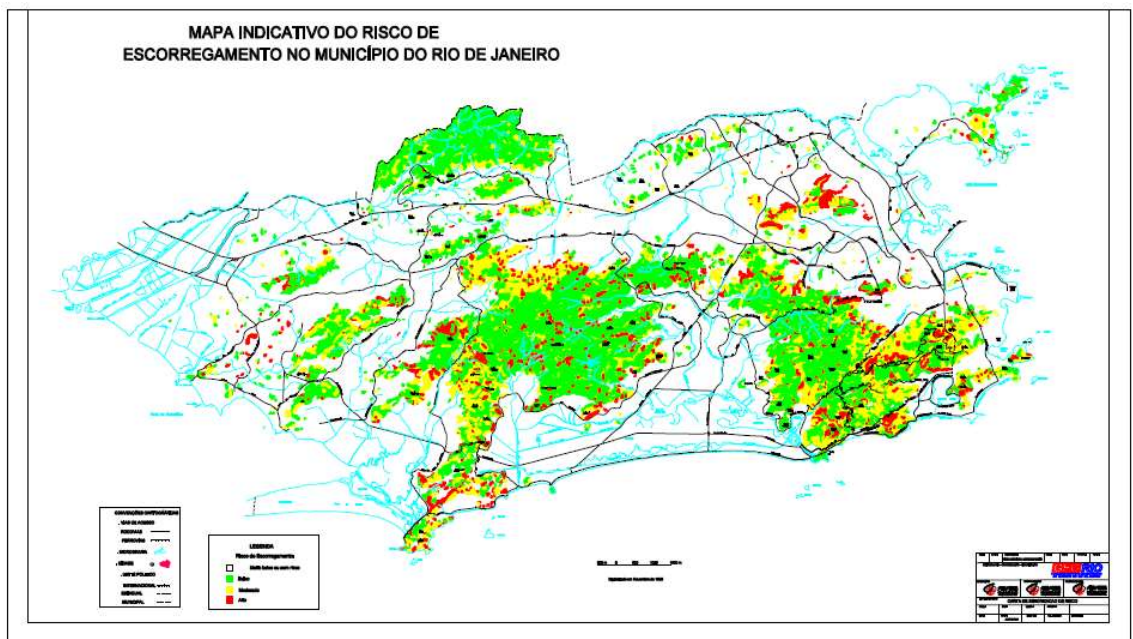


Figura 36 – Carta de setorização de risco do Rio de Janeiro (1991)

### 1.3 Caracterização Geológico-Geotécnica da Comunidade da Rocinha

A Comunidade Rocinha está localizada no extremo sul do Maciço da Tijuca, tendo como vizinho, a sudoeste, a comunidade Matinha (R.A Rocinha), situada na mesma vertente da comunidade, a sudeste, o Morro do Vidigal e a Chácara do Céu, situados do outro lado da vertente do Morro Dois Irmãos e como vizinho a nordeste, a Vila Parque da Cidade, situada nos arredores do bairro da Gávea.

Geomorfologicamente, a região ocupa, em sua parte central, vertentes côncavas delineando linhas de talvegue, sendo bordejada a sudeste pelas encostas escarpadas do Morro Dois Irmãos e, a noroeste, por vertentes convexas – côncavas, tendo em seu extremo norte – nordeste, o setor conhecido como Laboriaux, distribuído ao longo da cumeeira divisora que separa a Gávea da Rocinha.

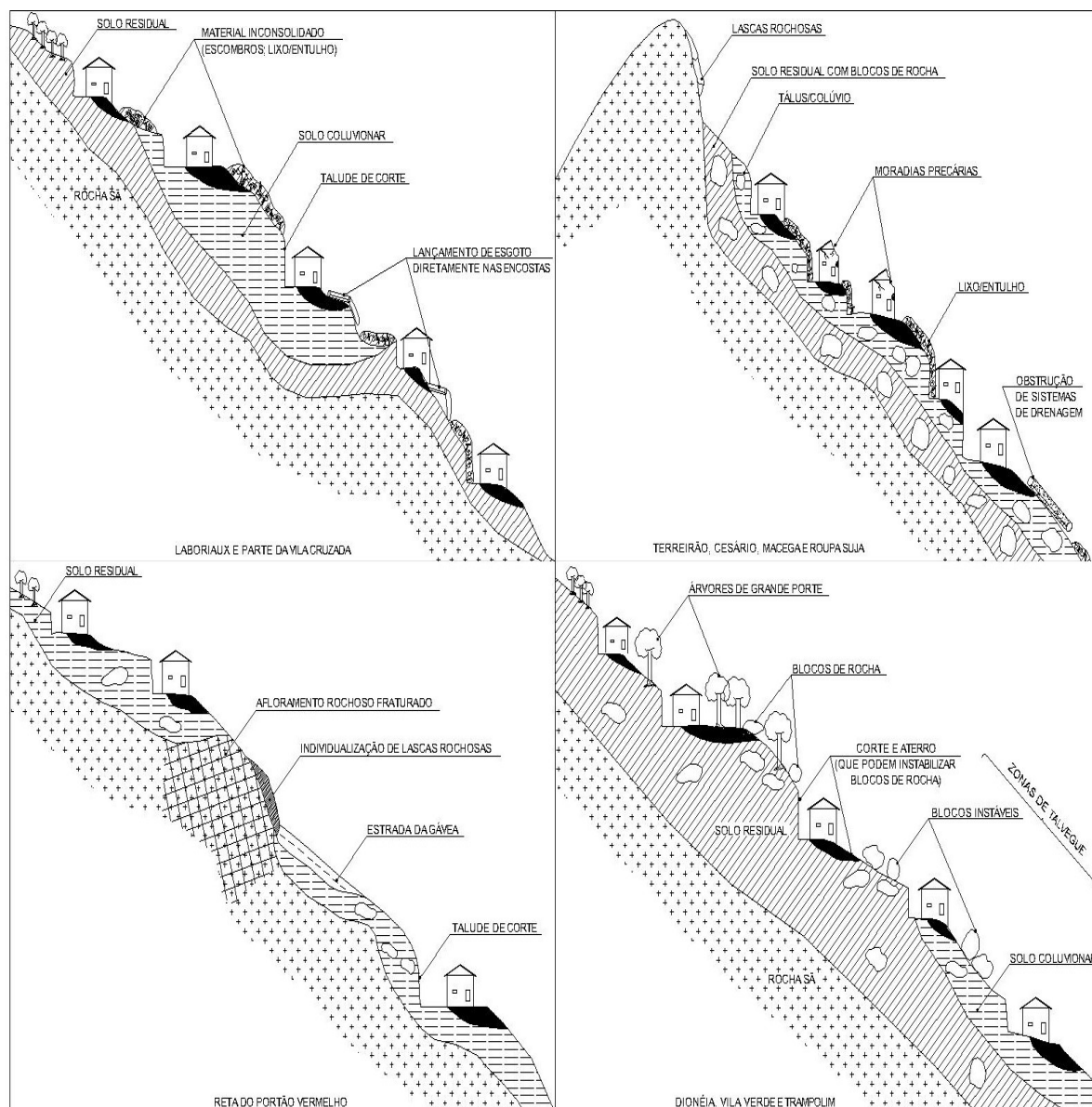
O desnível topográfico da Rocinha é de 260m e sua declividade média varia entre 45 – 55%, podendo chegar a alguns locais com mais de 70%, na medida em que vai se atingindo cotas mais altas, ocupando uma área total com cerca de 865.032 m<sup>2</sup>. O setor Laboriaux ocupa uma área de aproximadamente 5.000 m<sup>2</sup>, com elevação atingindo 300m de cota e encostas norte e sul atingindo até 80% de declividade em suas bordas, sendo constituídas por rochas quartzíticas sobrepostas a um perfil de alteração, onde afloram solos residuais e depósitos coluvionares localizados.

A litologia predominante na comunidade é o Gnaisse Facoidal, encontrado em sua porção central, oeste, extremo noroeste e extremo sul. O Biotita Gnaisse também é encontrado em parte da porção central, extremo norte e nordeste da comunidade, originando essas rochas, solos residuais e coluvionares de espessuras variáveis. Na Figura 37, abaixo, é apresentado um perfil geológico-geotécnico esquemático representativo da área.

O Setor de alto risco, assim considerado pelo levantamento da Fundação GeoRio, possui 293.558 m<sup>2</sup> e a estimativa de moradias nestas áreas é de 1814 unidades. O Mapa Geológico da Rocinha está ilustrado no Anexo 1, e os Mapas



2 e 3 do mesmo Anexo 1 correspondem, respectivamente, ao Mapa Geomorfológico e ao Mapa de Declividade da área da Rocinha.



**Figura 37 - Perfil geológico-geotécnico esquemático da Rocinha**

(GEORIO, 2010)

## 1.4 Elaboração de laudos de vistoria de acidentes geotécnicos

### 1.4.1 Introdução

Todos os acidentes geotécnicos que se tem notícia, envolvendo danos materiais ou humanos, são registrados pela Defesa Civil e/ou pela Fundação GEORIO, órgão da prefeitura da cidade do Rio de Janeiro responsável institucionalmente por todas as obras de estabilidade nas encostas, no âmbito municipal. Esses registros são materializados formalmente, através de laudos, após vistoria técnica no local da ocorrência.

A elaboração dos laudos de vistoria técnica, a partir de “fichas de campo”, possui importância singular no escopo de qualquer trabalho envolvendo tratamento estatístico baseado em histórico de ocorrências.

Pode-se inclusive ressaltar que todo o escopo desta tese, no que tange aos aspectos numéricos de probabilidade, e até mesmo, de certa forma, em sua análise qualitativa quando da ocasião da classificação do risco, depende do banco de dados fornecido pelo inventário de ocorrências geotécnicas à partir dos laudos de vistoria.

Deve-se ressaltar que é muito difícil em regiões de comunidades como a da Rocinha programar e executar ensaios geotécnicos e levantamentos de campo mais elaborados, daí a importância do banco de dados da GEORIO, que serve de base a esta tese.

As vistorias técnicas de natureza geotécnica se iniciam, em geral, a partir de demandas originadas na Defesa Civil, através da emissão de boletins de ocorrência (B.O.), que podem ser emergenciais ou não. Nos períodos de elevada precipitação pluviométrica que caracterizam eventos chuvosos de grande intensidade, as demandas são numerosas com produção de diversos laudos em pontos distribuídos em várias localidades, em função do grau de risco, vulnerabilidade e suscetibilidade específicos de cada região.

Ao longo dos anos os procedimentos e critérios para elaboração dos laudos foram se aperfeiçoando, aumentando significativamente a qualidade e a quantidade das informações, em termos das características das vertentes e do próprio solo superficial, da taxa de ocupação do solo, do tipo e gravidade do movimento de massa, etc. Além disso, para facilitar a avaliação da ocorrência,



buscou-se acrescentar relatórios fotográficos e desenhos esquemáticos para representar não somente os mecanismos do acidente geotécnico, como também possíveis soluções técnicas em caráter preliminar e, às vezes, emergencial.

Com objetivo de melhor situar geograficamente a ocorrência vistoriada no contexto do maciço, procurou-se adotar como prática a utilização de equipamento GPS (*global positioning system*). Uma vez georeferenciado o local em estudo, pode-se situá-lo em termos plani-altimétricos, inclusive identificando-o também em mapa cartográfico já conhecido, além de facilitar posteriormente trabalhos que dependam de distribuição espacial de eventos, como por exemplo a presente tese.

#### 1.4.2 Apresentação de laudos de vistoria

A título de exemplificação, as Figura 38 a Figura 44 ilustram, respectivamente, laudos utilizados pela Defesa Civil Municipal do Rio de Janeiro e pela Fundação GeoRio em suas vistorias de campo.





	<b>PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO</b> Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos Subsecretaria de Defesa Civil		
<b>BOLETIM OCORRÊNCIA Nº</b>		<b>/16</b>	
Solicitante: <u>Leonardo (GEO-RIO)</u>		Telefone: <u>989093728</u>	
Tipo de Ocorrência: <u>Ameaça desabamento de imóvel</u>			
Endereço: <u>Rua Conselheiro Jobim nº 422 / Casa 01</u>			
Bairro: <u>Engenho Novo</u>		Sub-bairro/Comunidade: <u>São João</u>	
Ponto de Referência: <u>Endereço da Associação de Moradores</u>			
<b>Vistoria Restrita à Análise Visual</b>			
<p>Trata-se de imóvel residencial, multifamiliar e com 03 pavimentos.</p> <p>No momento da vistoria verifiquei que o imóvel localiza-se no pé de encosta vertical, composta por maciço rochoso, matacões e blocos de rocha instáveis, onde foi realizada obra de contenção pela GEO-RIO, instalando barreiras fixas e tela de aço, estando o imóvel supracitado no interior da área de risco.</p> <p>Segundo informações de representante da Associação de Moradores, o proprietário não reside mais no imóvel, estando com processo em andamento no programa "Minha Casa Minha Vida", entretanto o local foi objeto de invasão, estando ocupado.</p> <p>É necessária a relocação destes ocupantes e demolição integral do imóvel, em função do risco potencial de rolamento de blocos de rocha e matacões, podendo atingir a edificação.</p> <p>Para acesso ao local é necessário o acompanhamento por parte de representante da Associação de Moradores (Rua Conselheiro Jobim nº 422).</p>			
<b>Providências</b>			
<p>À Secretaria Municipal de Habitação - SMH para análise e providências com urgência.</p> <p>À Secretaria Municipal de Desenvolvimento Social - SMDS para ciência e providências com urgência.</p> <p>À Coordenação de Operações Especiais da Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos - SC/COE para demolição integral do imóvel, após a relocação dos ocupantes.</p> <p>À Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro – GEO-RIO para conhecer.</p>			
Vistoriante: <u>Engº Daniel Guerra Crivano</u>		Data: <u>15/01/16</u>	
Matrícula: <u>10/209085-0</u>		Assinatura _____	
	Subsecretaria de Defesa Civil Rua Visconde de Santa Isabel, nº 32 – Vila Isabel – CEP: 20.560-120 199 / 2258-8868		

Figura 38 - Laudo de vistoria adotado pela Defesa Civil Municipal

**LAUDO DE VISTORIA GEORIO No.: 41/73****1 -LOCALIZAÇÃO**

Logradouro: Dois

Categoria: Rua

Complemento: Barraco

Bairro: Rocinha

Favela: Rocinha

Estado: Rio de Janeiro

Número: 18

R.A.: XXVII AP: 2

País: Brasil

Cidade: Rio de Janeiro

**2 -DATA DO PEDIDO** 25/03/73**3 -DATA DA VISTORIA** 25/03/73**4 -ORIGEM DO PEDIDO****5 -SOLICITANTE**

Nome:

Telefone:

**6 -ASPECTOS REGIONAIS****6.1 - Tipo de Ocupação**

Favela

Densidade: Alta

**6.2 - Tipo de Vegetação**

Densidade: Alta

**6.3 - Tipo de Relevo:** Escarpado**7 -CARACTERÍSTICAS LOCAIS****7.1 - Tipo de Talude**

Natureza do Material

Figura 39- Folha 1 do Laudo de vistoria adotado pela GEORIO, até 2009

7.2 - Espessura média aproximada do perfil do solo (m):

7.3 - Tipo de Drenagem: Natural

7.3.1 - Condição do Sistema de Drenagem: Satisfatória

7.4 - Condições de Água Subterrânea

Null

7.5 - Risco

Tipo: Inexistente

Grau: Baixo

## 8 - CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA

8.1 - Situação: Com Possibilidade de Ocorrência

8.2 - Data: / /

Hora Aproximada: :

8.3 - Volume aproximado do material mobilizado (m3):

8.4 - Tipo(s) de Movimento(s)

8.4.1 - Superfície de Deslizamento

8.4.2 - Classificação

8.5 - Conseqüências

Número de Vítimas Fatais: Null

Figura 40 - Folha 2 do Laudo de vistoria adotado pela GEORIO, até 2009



## LAUDO DE VISTORIA

Folha: 01/02

1. LOCAÇÃO: ROCINHA		Date: 14/02/2011
1.1. Ponto de Referência: Ponto 01	3 Responsável: ..... André Pereira Lima	
4. Tipo de Situação:		
<input type="checkbox"/> Movimento ocorrido <input type="checkbox"/> Possibilidade de movimento <input type="checkbox"/> Estudo/Projeto <input type="checkbox"/> Não se trata de problema geotécnico		
2. Coordenadas UTM: N = 7457348	E = 879338	
2.1. Datum: Sigsis 2000		

5. ASPECTOS LOCAIS		
5.1. Tipo da Ocupação / Densidade	5.2. Tipo de Vegetação / Condições	5.3. Drenagem / Condições
<input type="checkbox"/> Área não ocupada <input type="checkbox"/> Área urbana estruturada <input type="checkbox"/> Estrada <input checked="" type="checkbox"/> Favela <input type="checkbox"/> Outra: _____	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Baixa  <input checked="" type="checkbox"/> Arbórea <input checked="" type="checkbox"/> Arbustiva <input checked="" type="checkbox"/> Rasteira <input type="checkbox"/> Nenhuma	<input checked="" type="checkbox"/> Natural <input type="checkbox"/> Construída <input type="checkbox"/> Inexistente  <input checked="" type="checkbox"/> Satisfatória <input type="checkbox"/> Insuficiente <input type="checkbox"/> Obstruída <input type="checkbox"/> Deteriorada
5.4. Relevo / Perfil de Encosta		
<input type="checkbox"/> Escarpado <input checked="" type="checkbox"/> Montanhoso <input type="checkbox"/> Ondulado <input type="checkbox"/> Suave  <input type="checkbox"/> Côncavo <input checked="" type="checkbox"/> Convexo <input type="checkbox"/> Retilíneo		

6. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS	
6.1. Local Vistoriado	6.2. Geometria ( <input type="checkbox"/> Ver Croqui )
<input type="checkbox"/> Encosta natural <input type="checkbox"/> Talude de corte <input type="checkbox"/> Talude de aterro <input type="checkbox"/> Talvegue <input type="checkbox"/> Extração mineral <input type="checkbox"/> Outros: _____	Altura (m): _____ Largura (m): _____ Inclinação (°): _____
6.3. Obras de Contenção Existentes	6.4. Natureza do Material
<input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	<input checked="" type="checkbox"/> Solo <input type="checkbox"/> Rocha
<input type="checkbox"/> Pública Tipo: _____ <input type="checkbox"/> Privada Dimensões h x l (m): _____ x _____ Condições: _____	<input checked="" type="checkbox"/> Argiloso <input type="checkbox"/> Arenoso <input type="checkbox"/> Com blocos <input type="checkbox"/> S&L <input type="checkbox"/> Alterada <input type="checkbox"/> Fraturada <input type="checkbox"/> Com blocos
6.5. Condições de Saturação	6.6. Evidências de Movimentos
<input type="checkbox"/> Seco <input checked="" type="checkbox"/> Úmido <input type="checkbox"/> Encharcado <input type="checkbox"/> Ver Croqui anexo	<input type="checkbox"/> Tensões no solo <input type="checkbox"/> Tensões em acessos <input type="checkbox"/> Tensões em edificações <input type="checkbox"/> Lascas/blocos instáveis <input checked="" type="checkbox"/> Árvores em desequilíbrio <input type="checkbox"/> Surgências d'água <input type="checkbox"/> Deslocamentos <input checked="" type="checkbox"/> Processos erosivos/assoreamento
<input type="checkbox"/> Com surgência <input type="checkbox"/> Tubulação rompida <input type="checkbox"/> Afundamento <input type="checkbox"/> Esgoto in natura	<input type="checkbox"/> Topo <input type="checkbox"/> Meio encosta <input type="checkbox"/> Sapé <input type="checkbox"/> Plata <input type="checkbox"/> Aceleração <input type="checkbox"/> Outros: _____

7. CARACTERÍSTICAS DA SITUAÇÃO	
7.1. Movimento Ocorrido <input type="checkbox"/>	7.2. Possibilidade de Movimento <input checked="" type="checkbox"/>
Date: ____/____/____ Hora: _____	7.2.1. Grau de Risco
Volume estimado (m³): _____	<input checked="" type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Baixo
Pluviometria (Últimas 48h) (mm): _____	7.2.2. Número de Elementos em Risco
7.1.1. Consequências	<input checked="" type="checkbox"/> Vidas { <input type="checkbox"/> < 10 <input type="checkbox"/> entre 10 e 50 <input checked="" type="checkbox"/> > 50 <input type="checkbox"/> Moradas <input type="checkbox"/> Hospitais/Escolas <input type="checkbox"/> Edificações/Estruturas <input type="checkbox"/> Estradas <input type="checkbox"/> Outros: _____
<input type="checkbox"/> Vítimas fatais (nº _____) <input type="checkbox"/> Vítimas não fatais (nº _____) <input type="checkbox"/> Obstrução de vias <input type="checkbox"/> Danos a bens particulares <input type="checkbox"/> Danos a bens públicos <input type="checkbox"/> Riscos a terceiros <input type="checkbox"/> Sem consequências	7.3. Tipologia do Movimento / Características
7.3. Tipologia do Movimento / Características	7.4. Superfície de Deslizamento
<input type="checkbox"/> Queda/rolamento de blocos <input checked="" type="checkbox"/> Escorregamento <input type="checkbox"/> Rastejo <input type="checkbox"/> Subsidência <input type="checkbox"/> Complexo	<input checked="" type="checkbox"/> Solo-Solo <input type="checkbox"/> Solo-Rocha <input type="checkbox"/> Rocha-Rocha <input type="checkbox"/> Não identificada (Descrever): _____
<input type="checkbox"/> Rotacional <input type="checkbox"/> Plana <input type="checkbox"/> Complexo <input type="checkbox"/> Lento <input checked="" type="checkbox"/> Rápido	

Figura 41 - Folha 1 de Fichas de Campo adotadas pela GEORIO







PREFEITURA  
DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO  
Secretaria Municipal de Obras  
Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro  
Campo de São Cristóvão, 265 – 1ª e 3ª andares – São Cristóvão.  
Telefone: 3878-7878 Fax: 3878-6397 E-mail: georio@rio.rj.gov.br



**LAUDO DE VISTORIA GEO RIO N.º: 0572/2012**

- 1 – **LOCAL:** Rua Armando de Albuquerque - Rua São Luiz nº 47, casa 10 – Vila Isabel  
RA: IX AP: 2.2 Favela: Parque Vila Isabel Setor:
- 1.1 – **PONTO DE REFERÊNCIA:** 1.2 UTM (23K; SAD 69): 678.410 / 7.465.016
- 2 – **DATA DO PEDIDO:** 04/07/2012 **DATA DA VISTORIA:** 30/10/2012 (2ª vistoria)
- 3 – **ORIGEM/MOTIVO DO PEDIDO:** S/SUBDEC - BO 11.598/2012
- 4 – **SOLICITANTE:** Maria Sorala Tel.: 3522-3492
- 5 – **TIPO DE OCORRENCIA:**  Ocorrência Geotécnica  Possibilidade de Ocorrência



6 – ASPECTOS REGIONAIS		7 – CARACTERÍSTICAS LOCAIS	
<b>6.1 – Tipo de ocupação:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Favela <input type="checkbox"/> Área urbana estruturada <input type="checkbox"/> Área de preservação ambiental <input type="checkbox"/> Área não ocupada <input type="checkbox"/> Loteamento irregular <input type="checkbox"/> Interface de favela <input type="checkbox"/> Outras:		<b>6.1.2 – Densidade Ocupacional:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Baixa	
<b>6.2 – Tipo de Vegetação:</b> <input type="checkbox"/> Arbórea <input type="checkbox"/> Arbustiva <input type="checkbox"/> Rasteira <input checked="" type="checkbox"/> Nenhuma		<b>6.2.1 – Densidade:</b> <input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Esparsa	
<b>6.3 – Drenagem:</b> <input type="checkbox"/> Natural <input type="checkbox"/> Construída <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente		<b>6.3.1 – Condições:</b> <input type="checkbox"/> Satisfatória <input type="checkbox"/> Insuficiente <input type="checkbox"/> Obstruída <input type="checkbox"/> Danificada	
<b>6.4 – Relevo</b> <input type="checkbox"/> Escarpado <input type="checkbox"/> Montanhoso <input type="checkbox"/> Ondulado <input checked="" type="checkbox"/> Suave		<b>6.4.1 – Perfil da encosta</b> <input type="checkbox"/> Côncavo <input type="checkbox"/> Convexo <input type="checkbox"/> Retilíneo	
		<b>7.1 – Sítio vistoriado:</b> <input type="checkbox"/> Encosta natural <input checked="" type="checkbox"/> Talude de corte <input type="checkbox"/> Talude de aterro <input type="checkbox"/> Talvegue <input type="checkbox"/> Escavação <input type="checkbox"/> Extração mineral <input type="checkbox"/> Outros:	
		<b>7.2 – Geometria:</b> Altura (m): 2,0   Largura (m): 8,0 Inclinação (°): 90	
		<b>7.3 – Obras de contenção:</b> <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Pública <input type="checkbox"/> Privada <input checked="" type="checkbox"/> Não	
		<b>7.4 – Condições de umidade:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Seco <input type="checkbox"/> Úmido <input type="checkbox"/> Saturado <input type="checkbox"/> Com urgência <input type="checkbox"/> Tubulação rompida	
		<b>7.5 – Natureza do Material</b>	
		<input type="checkbox"/> Rocha <input type="checkbox"/> Sa <input type="checkbox"/> Alterada <input type="checkbox"/> Fraturada	
		<input checked="" type="checkbox"/> Solo <input type="checkbox"/> Com trincas <input type="checkbox"/> Sem trincas	
		Espessura estimada (m): <input type="checkbox"/> Bloco Tipo de apoio: Forma: Volume	
		<input type="checkbox"/> Talus <input type="checkbox"/> Entulho <input type="checkbox"/> Lascas <input type="checkbox"/> Lixo <input type="checkbox"/> Aterro	

Figura 43 - Folha 1 de Laudos de Vistoria adotadas pela GEORIO



PREFEITURA  
DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO  
Secretaria Municipal de Obras  
Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro  
Campo de São Cristóvão, 268 – 1ª e 3ª andares – São Cristóvão.  
Telefone: 3878-7878 Fax: 3878-6397 E-mail: georio@rio.rj.gov.br



8 – CARACTERÍSTICAS DA OCORRÊNCIA OU SITUAÇÃO																				
<b>8.1 – Situação</b> <input checked="" type="checkbox"/> Possibilidade de ocorrência <b>com</b> atingimento de moradias, prédios ou bens públicos. <input type="checkbox"/> Possibilidade de ocorrência <b>sem</b> atingimento de moradias prédios ou bens públicos <input type="checkbox"/> Ocorrência	<b>8.1.1 – Grau de Risco</b> <input checked="" type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Baixo <input type="checkbox"/> Inexistente Volume (m³):	<b>8.1.2 – Número de pessoas beneficiadas:</b> 02 <b>8.1.3 – Número de Interdições:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Unidade habitacional: 1 <input type="checkbox"/> Acessos: <input type="checkbox"/> Outros: <b>8.1.4 – Nº de solicitações para Demolição:</b> 01																		
<b>8.2 – Tipologia da ocorrência</b> <input type="checkbox"/> Escorregamento de solo <input type="checkbox"/> Escorregamento de lixo/entulho <input type="checkbox"/> Escorregamento de rocha <input checked="" type="checkbox"/> <b>Escorreg. de talus/cortivo</b> <input type="checkbox"/> Ruptura de talude corte <input type="checkbox"/> Ruptura de talude aterro <input type="checkbox"/> Ruptura de obras de contenção <input type="checkbox"/> <b>Desloc. de blocos</b> ou lascas <input type="checkbox"/> Corridas de massa <input type="checkbox"/> Processo erosivo <input type="checkbox"/> Outros:	<b>8.3 – Possível ocorrência</b> <input type="checkbox"/> Escorregamento de solo <input type="checkbox"/> Escorregamento de lixo/entulho <input type="checkbox"/> Escorregamento de rocha <input checked="" type="checkbox"/> <b>Escorreg. de talus/cortivo</b> <input checked="" type="checkbox"/> Ruptura de talude corte <input type="checkbox"/> Ruptura de talude aterro <input type="checkbox"/> Ruptura de obras de contenção <input type="checkbox"/> <b>Desloc. de blocos</b> ou lascas <input type="checkbox"/> Corridas de massa <input type="checkbox"/> Processo erosivo <input type="checkbox"/> Outros:	<b>8.4 – Superfície de deslizamento</b> <input checked="" type="checkbox"/> Sobre solo <input type="checkbox"/> Sobre rocha <input type="checkbox"/> Sem superfície definida <b>8.5 – Consequências</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ocorr.</th> <th>Possib.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Obstrução de vias</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Danos a bens partic.</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Danos a bens publ.</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Riscos para terceiros</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Sem danos</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		Ocorr.	Possib.	Obstrução de vias	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Danos a bens partic.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Danos a bens publ.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Riscos para terceiros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sem danos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ocorr.	Possib.																		
Obstrução de vias	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Danos a bens partic.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																		
Danos a bens publ.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Riscos para terceiros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Sem danos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
		<b>8.6 – Vítimas</b> <input type="checkbox"/> Vítimas Fatais <input type="checkbox"/> Vítimas não fatais																		

#### 8.7 – Descrição da Ocorrência ou Situação

Casa térrea em alienaria de tijolo de meia vez localizada no topo da escadaria (Travessa São Luiz nº 47) que se encontra em péssimo estado de conservação. Paredes fora do prumo, piso rachado e afundado e telhado deformado. Encontra-se afastada 1,0m da crista de um pequeno corte com altura de 2,0m que já sofreu fuga de material. O risco de queda da moradia é iminente.

#### 9 – PROVIDÊNCIAS:

9.1 – À S/SUBDEC para:

- interditar a moradia da Rua São Luiz, nº 47, casa 10;
- encaminhar à SMH para relocação dos moradores da casa interditada;

9.2 – À GEO-RIO/GAB para oficial à SECONSERVA para, após a relocação, promover a demolição da moradia.

#### 10 – OBSERVAÇÕES GERAIS:

11 – **RESPONSÁVEL PELA VISTORIA:** Eng.º José Guilherme Montfort de Mello

12 – **ANEXOS:**  Fotos  Croqui  Outros

Rio de Janeiro, 26 de dezembro de 2012.

Visto em 30/12/2012

Lauda 0572/2012

2/2

Figura 44 - Folha 2 de Laudos de Vistoria adotadas pela GEORIO



## 2 FUNDAMENTOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA

### 2.1 Introdução

A relevância do estudo da probabilidade reside na necessidade de se modelar fenômenos considerados como aleatórios, onde estão embutidas incertezas que comprometem a confiabilidade dos dados utilizados para uma tomada de decisão do ponto de vista de engenharia.

O estudo de probabilidade e estatística é amplo e muito diversificado porém, nesta pesquisa, procurou-se pontuar tão somente os assuntos relacionados diretamente ou, no máximo, periféricamente, àqueles abordados na presente tese.

Neste capítulo é traçado breve histórico a respeito da probabilidade clássica, incluindo os principais conceitos adotados, revisão de literatura sobre definições e conceitos já consagrados, como axiomas, propriedades das probabilidades, probabilidade condicional, teorema da probabilidade total.

De modo particular, este capítulo enfatiza o Teorema de Bayes e a Atualização Bayesiana, não apenas quanto às questões teóricas, como também com relação aos aspectos práticos voltados para engenharia geotécnica.

Para estudar a frequência de ocorrência dos eventos faz-se conhecer conceitos sobre variáveis aleatórias discretas e contínuas, funções de probabilidade das variáveis, conceitos básicos sobre parâmetros de centralidade e dispersão, quais sejam a média ou esperança, variância, desvio padrão e, ainda, alguns modelos de distribuição teórica de probabilidades (Harr, 1987; Pinheiro et al, 2012; Bonfarine, 2013).

Para finalizar o capítulo, é apresentado o conceito sobre atualização de confiabilidade por Bayes e, para subsidiá-lo, torna-se necessário introduzir breve revisão de literatura a respeito da distribuição Beta, apresentada por Karl Pearson em 1895, tomando-se por base a distribuição binomial.

## 2.2 Breve histórico sobre Probabilidades

Probabilidade é conhecida como sendo a Matemática do acaso ou, ainda, da incerteza, justamente porque se preocupa em modelar matematicamente a ocorrência ou não ocorrência de fenômenos aleatórios, através de estudos teóricos e abstratos. De modo muito simples, Levine (2008) define probabilidade como sendo um valor numérico que representa uma chance, uma eventualidade ou uma possibilidade que um determinado evento venha a acontecer.

Segundo Fiolhais (2010), o matemático, médico e filósofo italiano Girolamo Cardano (1501-1576), um jogador compulsivo, foi o primeiro a abordar o assunto com algum rigor. O seu livro *Liber de Ludo Alea* (O Livro dos Jogos de Azar), só publicado postumamente em 1663, Cardano apresenta a primeira análise matemática dos jogos. O autor reparou que, para resolver uma questão de probabilidades, tinha de reconhecer quais eram os acontecimentos igualmente prováveis.

Por outro lado, fontes da literatura atribuem aos matemáticos Pascal e Fermat a origem da probabilidade, em meados do século XVII, mais precisamente em 1654. Os conceitos foram formulados após a troca de correspondências, com objetivo de atender uma consulta de um jogador francês, aristocrata, conhecido como Chevalier de Méré, cujo objetivo era de aumentar as chances de acerto nos jogos de azar. Entretanto, somente com Gauss (1777-1855) que as aplicações do cálculo de probabilidade contribuíram de fato para a ciência. A partir da publicação *A Teoria dos Erros de Observação (Theoria Combinationis Observatorium Erroriluns Minimis Obnoxia)*, em 1809, estabeleceu-se o Método dos Mínimos Quadrados, justificando o emprego, na teoria dos erros, da lei que designou por “normal”, hoje conhecida também por Lei de Gauss ou Lei de Laplace-Gauss. Somente no século XX, Komogorov desenvolveu uma teoria matemática rigorosa, baseada em axiomas, definições e teoremas (Pedro et al, 1999).

### 2.3 Conceituação Clássica, de Frequência e Subjetiva

À rigor existem duas conceituações a respeito das probabilidades:

- Conceito clássico: os espaços amostrais são finitos e uniformes; os eventos, cujas probabilidades de ocorrência que deseja-se conhecer, são práticos e têm a mesma probabilidade de acontecer (equiprováveis) e todo o processo envolvido no cálculo da probabilidade é bem conhecido. Pode-se citar como exemplos os seguintes processos: lançamentos de moedas e dados, retirada de cartas de baralhos, giro de roletas e etc.

Nesse contexto, seja  $\Omega$  um espaço amostral finito uniforme e seja  $A$  um evento qualquer desse espaço. A probabilidade de que  $A$  ocorra, denotada por  $P(A)$ , é dada pela equação (11) :

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(\Omega)} \quad (11)$$

Sendo  $n(\Omega)$  o nº de resultados possíveis do experimento,  $n(A)$  o nº de resultados favoráveis à ocorrência do evento  $A$ , considerando que  $0 \leq P(A) \leq 1$

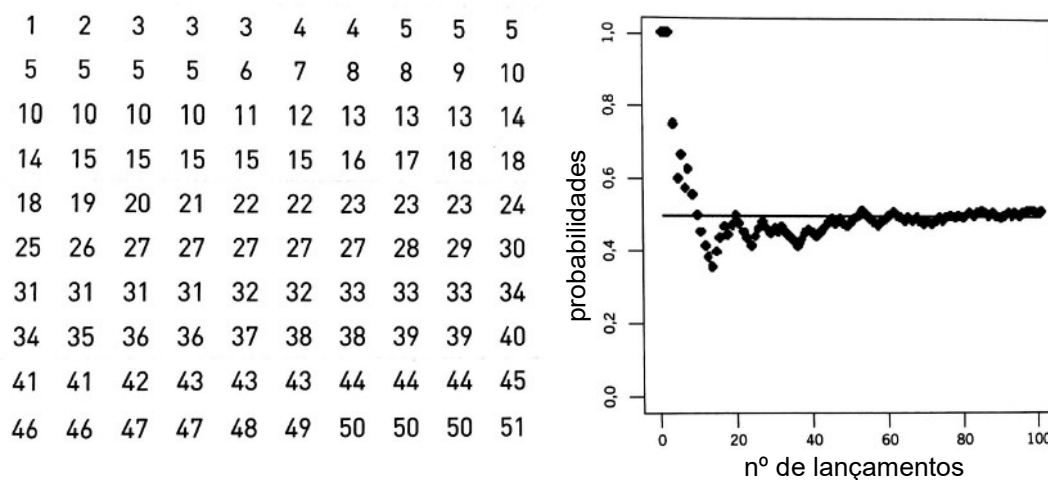
- Conceito com base na frequência: a estimativa da probabilidade tende a se aproximar do valor verdadeiro, à medida que o tamanho da amostra cresce. Em outras palavras, de acordo com a Lei dos grandes números, à medida que um experimento é repetido mais e mais vezes, a probabilidade empírica (frequência relativa) de um evento tende à sua probabilidade real. (Oliveira, 2012).

Com isso, a probabilidade de um evento  $A$  é definida como o limite da frequência relativa, quando o número “ $n$ ” de observações tende para infinito, tal que:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{f_i}{n} \right)^n, \text{ sendo:} \quad (12)$$

Onde  $\frac{f_i}{n} = \text{frequencia relativa}$  e  $f_i = \text{frequencia absoluta simples}$

A abordagem com base na frequência pode ser ilustrada com um exemplo prático apresentado por Pinheiro et al (2012), a partir da simulação de cem lançamentos de uma moeda equilibrada. A cada lançamento, o número acumulado de caras era anotado e, em seguida, calculada a proporção de correspondente ao número de ocorrências de caras. A Figura 45 mostra o resultado do exemplo. À esquerda apresentam-se os valores acumulados de ocorrências de caras, sendo a 1ª linha os resultados do 1º ao 10º lançamento, na 2ª linha da tabela os resultados do 11º ao 20º lançamento e assim por diante. À direita tem-se o gráfico ao lado ilustra a proporção de ocorrência de caras ao longo dos lançamentos.



**Figura 45 – Valores acumulados de ocorrência de cara e gráfico ilustrando visão frequentista em 100 lançamentos de dados (adaptado de Pinheiro et al, 2012)**

Com o experimento (Figura 45) fica evidente a estabilidade estatística em torno de um valor constante, ao longo de um processo de tentativas (lançamento do dado). Com isso, comprova-se que a probabilidade de um evento A tende a

convergir para  $P(A)$ , caso o experimento seja repetido  $n$  vezes, sob as mesmas condições, e que o evento ocorra  $m$  vezes entre essas  $n$  realizações. Assim,

$$P(A) \cong \frac{m}{n} \quad (13)$$

Logicamente, a variabilidade do valor da probabilidade  $P(A)$  tende a reduzir com aumento do nº repetições.

- Conceito subjetivo: o valor da probabilidade é meramente intuitivo, de acordo com a experiência de eventos anteriores ou, até mesmo, de acordo com o grau de confiança de quem estima a probabilidade, quanto à ocorrência ou não do evento. Toda e qualquer quantificação da incerteza é apenas subjetiva.

Como exemplo pode-se citar a previsão de quedas na bolsa de valores, a mudança de um cenário político, as chances de um time vencer uma partida de futebol, etc.

## 2.4 Axiomas de Komogorov, consequências e propriedades da probabilidade

As definições axiomáticas de probabilidade assumem como  $\Omega$  o espaço amostral associado a um experimento aleatório e  $P(A)$  a probabilidade do evento  $A$  qualquer desse espaço amostral:

- 1º axioma : (14)  
 $P(A) \in \mathbb{R}, P(A) \geq 0, \quad \forall A \in \Omega$

- 2º axioma: (15)  
 $P(\Omega) = 1$

- 3º axioma (caso os eventos  $A_i$  sejam mutuamente exclusivos):

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad (16)$$

Como consequências e propriedades das definições axiomáticas tem-se:

- Probabilidade do conjunto vazio :

$$P(\emptyset) = 0 \quad (17)$$

- Propriedade de monotonicidade :

$$\text{se } A \subseteq B \text{ então } P(A) \leq P(B) \quad (18)$$

- Propriedade do limite numérico :

$$0 \leq P(A) \leq 1, \quad \forall A \in \Omega \quad (19)$$

## 2.5 Probabilidade condicional

Se A e B são eventos que podem ocorrer em um dado experimento, a probabilidade de que um evento B ocorra, quando se sabe que o evento A já ocorreu, é denominada de probabilidade condicional de B dado A, representada por  $P(B/A)$  e calculada por:

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}, \text{ se } P(A) > 0 \quad (20)$$

Nestes casos de probabilidade condicional é evidente que o espaço amostral do problema é reduzido porque procede-se como se A fosse o próprio espaço amostral.

Entende-se por  $P(A \cap B)$  o nº de elementos de B que estão em A, e por  $P(A)$  o espaço amostral reduzido. Interessante notar também que, para se calcular a probabilidade condicional, basta conhecer a probabilidade dos eventos e não necessariamente o espaço amostral.

## 2.6 Teorema da Probabilidade Total

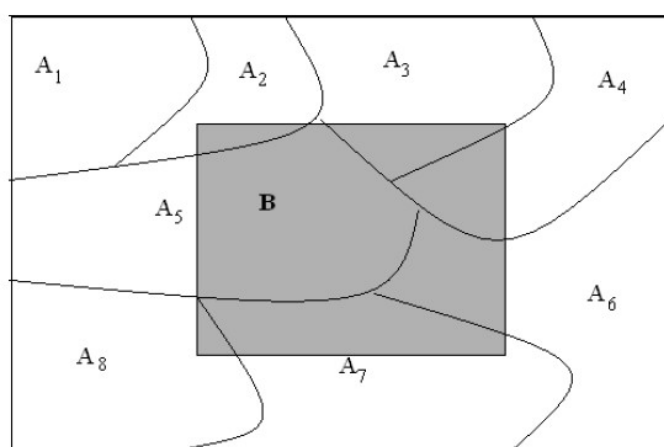
O Teorema da probabilidade total ou absoluta permite calcular a probabilidade de um dado evento, a partir de um conjunto de probabilidades condicionais envolvendo o referido evento.

O conceito pode ser melhor entendido a partir da Figura 46. É apresentada a partição de um espaço amostral  $\Omega$ , que contem B como um evento qualquer contido neste espaço e originado pela união de eventos  $A_i$ , os quais também

estão contidos em  $\Omega$ . Portanto, os eventos  $A_1 \cap B, A_2 \cap B, \dots, A_m \cap B$  são todos mutuamente exclusivos e  $B = \cup_{i=1}^m (A_i \cap B)$ ,

Pode-se inferir, portanto, que a probabilidade de B ocorrer é igual ao somatório das probabilidades parciais da interseção de cada evento  $A_i$  com o evento B, o que resulta no próprio conceito de probabilidade total ou absoluta:

$$\begin{aligned} P(B) &= P(A_1 \cap B) + P(A_2 \cap B) + \dots + P(A_m \cap B) \\ &= \sum_{i=1}^m P(B/A_i) \cdot P(A_i) \end{aligned} \quad (21)$$



**Figura 46 - Partição do espaço amostral para  $m=7$  (Farias et al, 2006)**

## 2.7 Teorema da Bayes: fundamentação teórica e aplicação prática

Tomando-se por base ainda o conceito de partição do espaço amostral  $\Omega$  e o Teorema de Probabilidade total, Bayes estendeu o conceito formulando um teorema que define a probabilidade de ocorrência de um evento  $A_i$ , considerando já conhecer a probabilidade do evento B, ou seja:

$$P(A_i/B) = \frac{P(B/A_i) \cdot P(A_i)}{P(B)}, \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

Ao analisar o enunciado do Teorema de Bayes, Pinheiro et al (2012) observaram os seguintes pontos:

- i) A possibilidade de ocorrência de  $A_i$ , é afetada diretamente ao se conhecer que o evento B ocorreu;

- ii) Quando se trata de probabilidades condicionais, este nos permite inverter a ordem dos condicionamentos;
- iii) Pelo fato de  $A_1, A_2, \dots, A_m$  formarem uma partição do espaço amostral, tem-se

$$\sum_{i=1}^m P(A_i/B) = \sum_{i=1}^m P(A_i) = 1 \quad (23)$$

Com objetivo de melhor ilustrar o problema de probabilidades utilizando o Teorema de Bayes, adaptando-se exercício proposto por Pinheiro et al (2012) para o caso de duração de componentes eletrônicos, apresenta-se, a seguir, um exemplo prático inserido no contexto da engenharia civil geotécnica, no que se refere ao gerenciamento de risco de áreas de encostas ocupadas por moradias precárias:

- Considere uma encosta formada, por 3 vertentes, em que se conhece a distribuição de locais críticos distribuídos da seguinte forma:
  - 50% pertencem à vertente  $A_1$ ;
  - 20% pertencem à vertente  $A_2$ ;
  - 30% pertencem à vertente  $A_3$
- Suponha que se deseje calcular a probabilidade de determinado local, escolhido ao acaso, sofrer escorregamento num momento em que o índice pluviométrico registra valor menor que 100mm/h de chuva.
- Sabe-se, previamente, de acordo com estudos de correlações chuvas x escorregamentos naquela região do maciço, que a probabilidade de determinado ponto escorregar antes de um pluviômetro registrar 100mm/h de chuva é expressa pelos valores da Tabela 19, em função da localização nas vertentes
- Importante salientar que cada vertente do maciço possui características peculiares quanto aos aspectos geomorfológicos, geológico-geotécnicos, entre outros, que influenciam o seu comportamento quanto aos processos de instabilidade, o que explica respostas diferentes para as mesmas condições hidrológicas.



Tabela 19 – Probabilidades de escorregamento em cada vertente em condições de chuva com índices menor que 100mm/h

Vertente	Probabilidade escorregamento
A <sub>1</sub>	5%
A <sub>2</sub>	10%
A <sub>3</sub>	15%

- De acordo com o Teorema de Bayes Eq. (22) temos que:
  - $B$  representa o evento “ escorregamento de um local com índice pluviométrico menor a 100mm/h” ;
  - $A_i$  representa os espaços amostrais “parciais” que são as vertentes;
  - $P(A_i)$  corresponde às probabilidades à priori já fornecidas pelo problema;
  - $P(A_i/B)$  corresponde às probabilidades à posteriori que devem ser calculadas pelo Teorema de Bayes;
  - $P(B/A_i)$  representa a probabilidade condicional fornecida, em função do histórico de ocorrência de escorregamentos.
  
- Pelo que já foi apresentado com relação ao conceito de espaço amostral reduzido por particionamentos, o evento  $B$  é resultado da união da interseção das ocorrências de  $A_i$  com ele mesmo, ou seja:
 
$$P(B) = P(A_1 \cap B) + P(A_2 \cap B) + P(A_3 \cap B) \quad (24)$$
- As probabilidades do local situar-se em cada vertente corresponde ao número de pontos; isto é:
 
$$\begin{aligned} P(A_1) &= 0,5 \\ P(A_2) &= 0,2 \\ P(A_3) &= 0,3 \end{aligned} \quad (25)$$
- Para o cálculo da probabilidade do local escolhido aleatoriamente sofrer escorregamento com chuva inferior a 100mm/h, utiliza-se o Teorema da Probabilidade Total (Eq (21)) qual seja:

$$\begin{aligned} \text{➤ } P(B) &= P(B/A_1).P(A_1) + P(B/A_2).P(A_2) + P(B/A_3).P(A_3) \\ &= 0,05.0,5 + 0,10.0,2 + 0,15.0,3 = 0,09 \end{aligned} \quad (26)$$

- A probabilidade que o local escolhido aleatoriamente esteja localizado na vertente  $A_1$ , dado que o índice pluviométrico é menor que 100mm/h (probabilidade à posteriori), é:

$$P(A_1/B) = \frac{P(B/A_1) \times P(A_1)}{P(B)} = \frac{0,05 \times 0,5}{0,09} \cong 0,28 \quad (27)$$

Analogamente para as vertentes  $A_2$  e  $A_3$ , tem-se:

$$P(A_2/B) = \frac{P(B/A_2) \times P(A_2)}{P(B)} = \frac{0,10 \times 0,2}{0,09} \cong 0,22 \quad (28)$$

$$P(A_3/B) = \frac{P(B/A_3) \times P(A_3)}{P(B)} = \frac{0,15 \times 0,3}{0,09} \cong 0,50 \quad (29)$$

Pode-se observar que a qualidade das informações, em termos de probabilidade, melhoram quando se conhecem com antecedência parâmetros relevantes. Na vertente  $A_1$ , por exemplo, a probabilidade  $P(A_1)$  reduz de 0,5 para 0,28 com a combinação das informações. Ao se medir os índices de chuva horária em diversos locais correlacionando-os com o fenômeno de interesse, no caso movimento de massa, pode-se estimar com maior confiabilidade as probabilidades de ruptura em diversos locais.

Interessante notar que, ao se atualizar o histórico de escorregamentos por localidade em função de cada faixa de valores de pluviometria, atualiza-se também as probabilidades à posteriori de ocorrência de escorregamentos. Assim sendo, o teorema de Bayes é valioso para avaliação de questões práticas da engenharia, porque aumenta a confiabilidade das previsões estatísticas.

## 2.8 Fundamentos de Estatística

Este item apresenta uma breve revisão sobre alguns conceitos estatísticos necessários ao entendimento do estudo da atualização bayesiana com utilização da distribuição beta, no final do capítulo.

### 2.8.1 Parâmetro de centralidade: Média, valor esperado ou esperança

Para caracterizar a distribuição de uma variável aleatória discreta faz-se necessário a determinação da média da distribuição das variáveis. Seja  $X$  a variável aleatória discreta que assume os valores  $x_1, x_2, x_3, \dots$  respectivamente, com probabilidades  $P(x_1), P(x_2), P(x_3), \dots$ .

A média, também denominada valor esperado ou esperança de  $X$ ,  $E(X)$  será representada por:

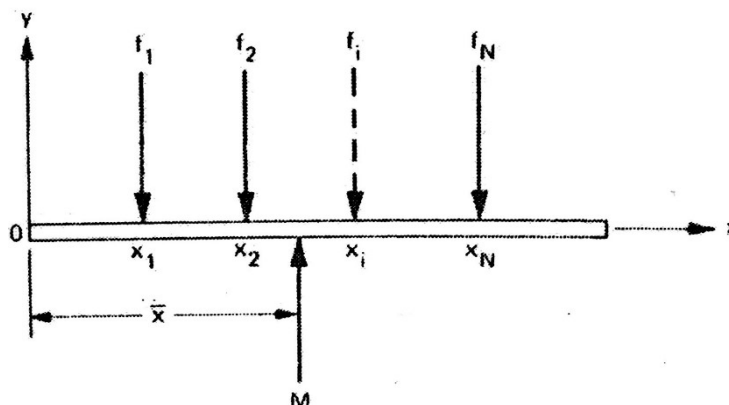
$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \cdot P(x_i) = x_1 \cdot P(x_1) + x_2 \cdot P(x_2) + \dots \quad (30)$$

No caso de variáveis contínuas, a esperança matemática  $E(x)$  representa fisicamente a abscissa  $x_i$  do centro de gravidade da função de distribuição  $P(x)$ . No caso de variáveis discretas, a esperança pode ser entendida como uma média ponderada, onde os pesos são as probabilidades de cada ponto. (adaptado de Erbano, 2015 e Pinheiro, 2012).

A esperança matemática também é conhecida como primeiro momento de distribuição de probabilidade, definida como:

$$E(X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot f(x_i)}{M} \quad (31)$$

A Figura 47 ilustra o conceito de esperança matemática. Através do equilíbrio de momentos do sistema de forças verticais  $\sum f_i x_i$ , em torno de um centro de rotação (ponto 0), define-se  $E(x) = \bar{x}$ , admitindo  $M=1$



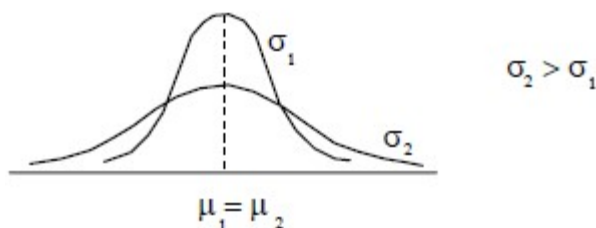
**Figura 47 - Sistema de forças verticais discretas numa viga rígida (Harr, 1987)**

### 2.8.2 Parâmetros de dispersão: a variância, o desvio padrão, e coeficientes de variação, assimetria e curtose.

Para se caracterizar de modo mais completo a distribuição de ocorrências de um evento, o conhecimento da média, por si só, não é capaz de mensurar o distanciamento de cada variável  $x_i$  proporcionalmente à distribuição de todo o conjunto de pontos.

A variância, o desvio padrão e os coeficientes de variação, assimetria e curtose são medidas de variabilidade em torno da média, empregadas com objetivo de se quantificar o grau de dispersão da distribuição de frequências de determinada variável aleatória  $X$ .

A Figura 48 ilustra graficamente o papel da variância na função de distribuição



**Figura 48 - Apresentação de duas distribuições de frequência com mesmo valor de média e diferentes graus de dispersão.**

#### 2.8.2.1 Variância

Pode-se associar fisicamente a variância como sendo o momento de inércia da distribuição discreta de massa, representada pela função de probabilidade  $P(x)$ , em relação a um eixo vertical que passa pelo centro de abscissa  $E(x)$  (Pinheiro et al, 2012), motivo pelo qual a variância é também denominada de 2º momento central:

$$I_y = Var(x_i) = \sum_{i=1}^N (x_i - x)^2 \cdot P(x_i) \quad (32)$$

A variância de uma variável aleatória discreta  $X$ , caso ela apresente número infinito de valores possíveis, será:

$$\sigma^2 = Var(X) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i^2 \cdot P(x_i) - [E(x)]^2 \quad (33)$$

Para um número finito de valores possíveis, a equação torna-se :

$$\sigma^2 = \bar{x} = \sum_{i=1}^N (x_i - [E(x)])^2 \cdot P(x) \quad (34)$$

Pode-se também desenvolver a expressão que trata da variância em termos de esperança matemática:

$$Var(x_i) = E[(x_i - \bar{x})^2] \quad (35)$$

onde  $\bar{x} = E[x_i]$ .

Desenvolvendo a Eq (53) tem-se que (Harr, 1987)

$$\begin{aligned} Var(x_i) &= E[(x_i - \bar{x})^2] = E[x_i^2 - 2 \cdot x_i \cdot \bar{x} + \bar{x}^2] = \\ Var(x_i) &= E[x_i^2] - 2 \cdot \bar{x} \cdot E[x_i] + E[\bar{x}^2] = E[x_i^2] - 2 \cdot \bar{x}^2 + \\ \bar{x}^2 &= E[x_i^2] - E[x_i]^2 \end{aligned} \quad (36)$$

Que é equivalente ao teorema dos eixos paralelos para momento de inércia:

$$\bar{I}_y = I_y - \bar{x}^2 \quad (37)$$

Em resumo, matematicamente a variância representa a média dos desvios que a variável aleatória  $X$  apresenta em relação à sua média  $\mu = E(x)$ , elevados ao quadrado. Sendo assim, a variância será sempre positiva e quanto maior a variabilidade da variável aleatória, maior será a sua variância.

#### 2.8.2.2 Desvio Padrão $\sigma$

O desvio padrão  $\sigma$  corresponde à raiz quadrada da variância e possui mesma unidade de medida da variável aleatória, sendo, portanto, uma possibilidade para se quantificar a dispersão dos dados:

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (38)$$

Dividindo-se o desvio padrão pela média obtém-se o coeficiente de variação (CV), que é uma maneira conveniente de se descrever a dispersão de uma distribuição de frequências. Pelo simples fato de ser adimensional, permite a comparação entre distribuições de frequências de valores completamente diferentes. (adaptado de Yamamoto, 2012):

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (39)$$

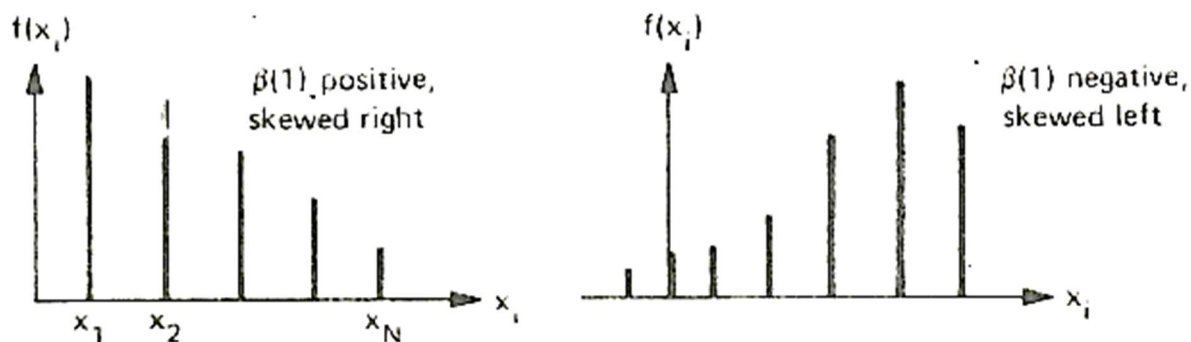
O coeficiente de variação diz respeito também a representatividade da média, a qual será tanto maior quanto mais CV se aproxima de zero.

### 2.8.2.3 Coeficiente de Assimetria $\beta(1)$

O coeficiente de assimetria, representado  $\beta(1)$  mede a dispersão para distribuições assimétricas e é baseado no 3º momento em torno da média. Pearson (1984,1985; apud Harr, 1987) propôs sua obtenção a partir da divisão do 3º momento central pelo cubo do desvio padrão; isto é :

$$\beta(1) = \frac{E[(x_i - \bar{x})^3]}{(\sigma[x_i])^3} \quad (40)$$

Como esta medida é resultado de uma potência ímpar, o coeficiente de assimetria pode ser negativo, caso em que a cauda de distribuição à esquerda é mais longa, e positivo, quando a cauda à direita que apresenta maior comprimento, conforme mostra a Figura 49.



**Figura 49 - Orientações positiva e negativa do coeficiente de assimetria  $\beta(1)$  (Harr, 1987).**

A intensidade da assimetria pode ser classificada de acordo com a faixa de variação de  $\beta(1)$ , conforme proposta apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Classificação da intensidade da assimetria (adaptado de Lopes, 2003)

Valor de $ \beta(1) $	intensidade da assimetria
$ \beta(1)  < 0,2$	simetria
$0,2 <  \beta(1)  < 1,0$	assimetria fraca
$ \beta(1)  > 1,0$	assimetria forte

#### 2.8.2.4 Coeficiente de Curtose $\beta(2)$

Pearson (1984,1985; apud Harr, 1987) propôs outro parâmetro de dispersão, denominado o coeficiente de curtose, representado por  $\beta(2)$ . A curtose representa o grau de achatamento da distribuição e está baseado no 4º momento em torno da média. Sua determinação é dada por :

$$\beta(2) = \frac{E[(x_i - \bar{x})^4]}{(\sigma[x_i])^4} \quad (41)$$

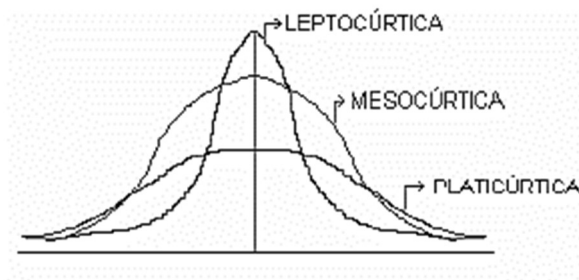
A medida de curtose mostra até que ponto a curva representativa de uma distribuição é mais aguda ou achatada do que uma curva normal, de altura média (Lopes, 2003) .

Análogo à classificação da intensidade da assimetria, Lopes (2003) apresentou classificação do achatamento das curvas de distribuição de frequências em função do seu coeficiente, no caso, de curtose, de acordo com a Figura 50.

Platicúrtica  $\rightarrow \beta(2) < 3$

Mesocúrtica  $\rightarrow \beta(2) = 3$

Leptocúrtica  $\rightarrow \beta(2) > 3$

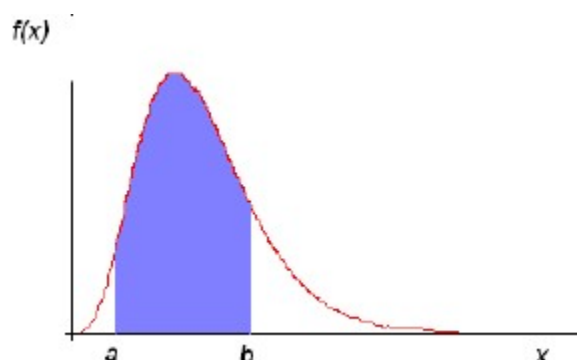


**Figura 50 - Tipos de achatamento de curvas de frequência definidas por  $\beta(2)$  (adaptado de Lopes, 2003)**

## 2.9 Principais distribuições teóricas de probabilidade

Para caracterizar a distribuição de uma variável aleatória  $X$ , define-se uma função de distribuição  $f(x)$ . Seu significado físico está mostrado na Figura 51, onde a probabilidade  $P(a < X < b)$  corresponde à área sombreada sendo delimitada pela curva normal  $N(\mu; \sigma^2)$ . Em notação matemática, significa que, para qualquer faixa de valores  $a$  e  $b$ , a probabilidade é dada por

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) \cdot dx \quad (42)$$



**Figura 51 - Gráficos sobre o comportamento da função de densidade  $f(x)$**

De um modo mais geral, considerando todos os valores pertencentes a um intervalo de números reais, a função de densidade  $f(x) \geq 0$  corresponde à área total abaixo da curva, ou seja, a probabilidade de que todas as variáveis ocorram, corresponde à 100%:



$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x). dx = 1 \quad (43)$$

Para se calcular as estatísticas que descrevem de modo quantitativo as distribuições de frequências (simples ou acumuladas), é necessário verificar o modelo de distribuição teórica que melhor se ajusta à frequência do problema.

Segundo Landim (2003, apud Yamamoto et al, 2013), no caso de amostras constituídas por variáveis discretas a distribuição Binomial e de Poisson são mais apropriadas e, no caso de amostras constituídas por variáveis contínuas, a distribuição Lognormal e Normal são mais comuns em problemas voltados para a Geologia.

### 2.9.1 Distribuição Binomial

A distribuição binomial é um modelo probabilístico discreto, usualmente adotado na prática da estatística, em que se deseja, na maioria das vezes, conhecer a probabilidade de ocorrência de um resultado em particular. O modelo reposta aos experimentos de Bernoulli, onde os únicos resultados possíveis são chamados de sucesso ou fracasso e as probabilidades de ocorrência são representadas respectivamente por  $p$  e  $(1 - p)$ , de tal sorte que  $P(X=1) = p$  e  $P(X=0) = 1 - p$ , na qual  $0 < p < 1$ , sendo  $X$  uma variável aleatória qualquer (adaptado de Pinheiro et al, 2012).

Por meio da distribuição binomial é possível calcular a probabilidade  $P(x)$  de  $X$  eventos em uma amostra de tamanho  $n$ , sabendo-se que a probabilidade de ocorrência do evento é  $p$  e a de não ocorrência,  $q$ , conforme segue (Landim, 2003, apud Yamamoto et al, 2013). Assim:

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot p^{n-x} \cdot q^x, \quad \text{em que } 0 < x < \infty \quad (44)$$

Pode-se observar que  $[\frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot p^{n-x} \cdot q^x]$  corresponde ao termo geral do desenvolvimento do binômio de Newton, sendo  $\frac{n!}{x!(n-x)!} = \binom{n}{x}$  o número de maneiras ou combinações de se obter  $x$  sucessos e  $(n-x)$  fracassos. Assim sendo, pode-se concluir que

$$\sum_{x=0}^n P(X = x) = \sum_{x=0}^n \binom{n}{x} \cdot p^{n-x} \cdot q^x = 1 \quad (45)$$

Harr (1987) apresenta a distribuição binomial como ferramenta para fornecer a probabilidade de sucesso ou falha de um número de experimentos  $N$  repetido  $x$  vezes. Caso o interesse seja calcular a probabilidade de ocorrência de  $x$  falhas em  $N$  tentativas, pode-se escrever:

$$b(x; N, p(f)) = \frac{N!}{x!(N-x)!} \cdot p(f)^x \cdot R^{N-x} \quad (46)$$

Onde  $p(f)$  representa a probabilidade de ruína ou falha e  $R$  a probabilidade da falha não ocorrer, ou seja, a probabilidade de ocorrer sucesso. Ambos termos são assumidos como constantes para as  $N$  tentativas.

Levando-se em conta que, em geral, as probabilidades de ruína expressam valores pequenos nos problemas de engenharia civil é necessário dispor de um número muito grande de tentativas (experimentos) para que o evento raro da falha possa ocorrer. Neste sentido, faz necessário aproximar o número  $N$  ao infinito, o que conduz a uma distribuição de Poisson, a qual será comentada posteriormente.

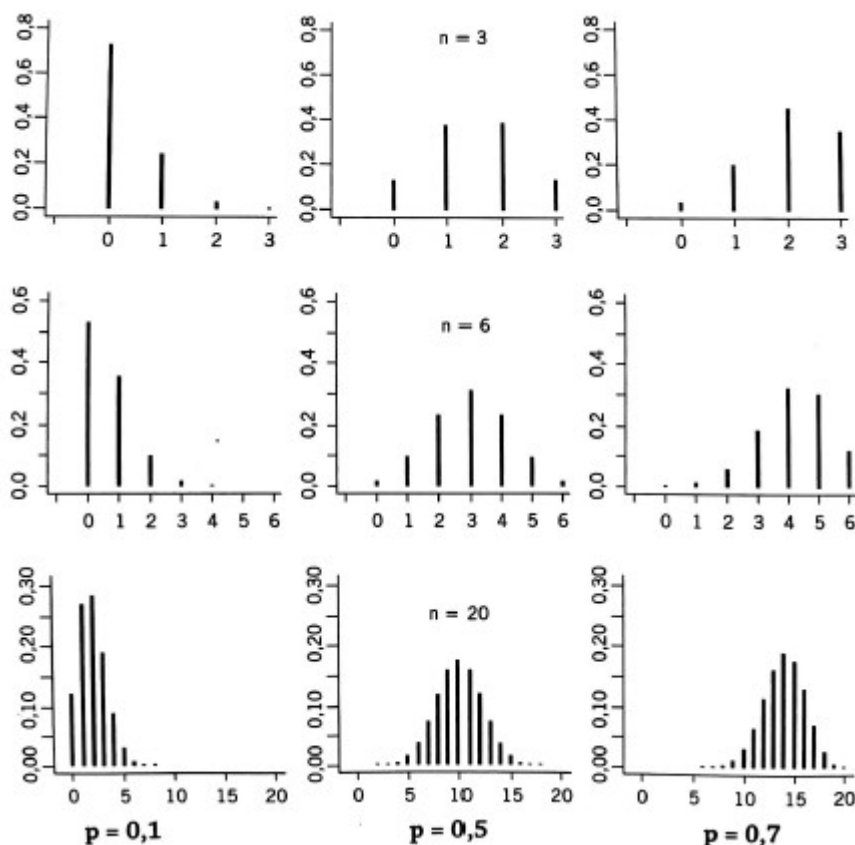
Sendo  $\mu$  o valor da esperança matemática ou média da distribuição em questão, os valores dos demais momentos são:

$$E(x_i) = Var(x_i) = \mu \quad (47)$$

$$\beta(1) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad (48)$$

$$\beta(2) = \frac{1 + 3 \cdot \mu}{\mu} \quad (49)$$

A lei de probabilidade Binomial com variação dos parâmetros  $n$  e  $p$  pode ser ilustrada pelo gráfico das funções de probabilidade apresentado na figura 49.



**Figura 52 - Função de probabilidade da Binomial (n,p) (Pinheiro et al, 2012)**

Com objetivo de melhor ilustrar a utilização do modelo binomial, Pinheiro et al (2012) apresentaram exemplo prático que é adaptado a seguir no contexto do gerenciamento de risco de áreas de encostas ocupadas por moradias precárias:

- Considere que se deseje calcular a probabilidade de que pelo menos 4 entre 6 solicitações de vistorias da Defesa Civil, estejam associadas à ruptura de talude de corte ou aterro
- Considere-se que este tipo de acidente geotécnico representa 80% das ocorrências registradas pela Defesa Civil em dias de eventos chuvosos significativos; isto é  $p = 0.8$  e  $q = 0.2$ .
- Aplicando-se as definições do modelo distribuição binomial (equação (45)) para determinação da probabilidade de sucesso, tem-se

$$\begin{aligned}
 P(X \geq 4) &= \binom{6}{4} \cdot 0,8^4 \cdot 0,2^2 + \binom{6}{5} \cdot 0,8^5 \cdot 0,2 + \binom{6}{6} \cdot 0,8^6 = \\
 &= 0,901 = 90,1\%
 \end{aligned}
 \tag{50}$$

- No caso de se desejar conhecer a probabilidade de todas as 6 ocorrências apresentarem acidentes geotécnicos relativos a ruptura de talude de corte ou aterro, tem-se:

$$P(X = 6) = 0,8^6 = 0,262 = 26,2\% \quad (51)$$

### 2.9.2 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é um modelo probabilístico discreto, que apresenta bons resultados quando a probabilidade de acontecimentos é pequena e o tamanho da amostra é grande (adaptado de Landim, 2003).

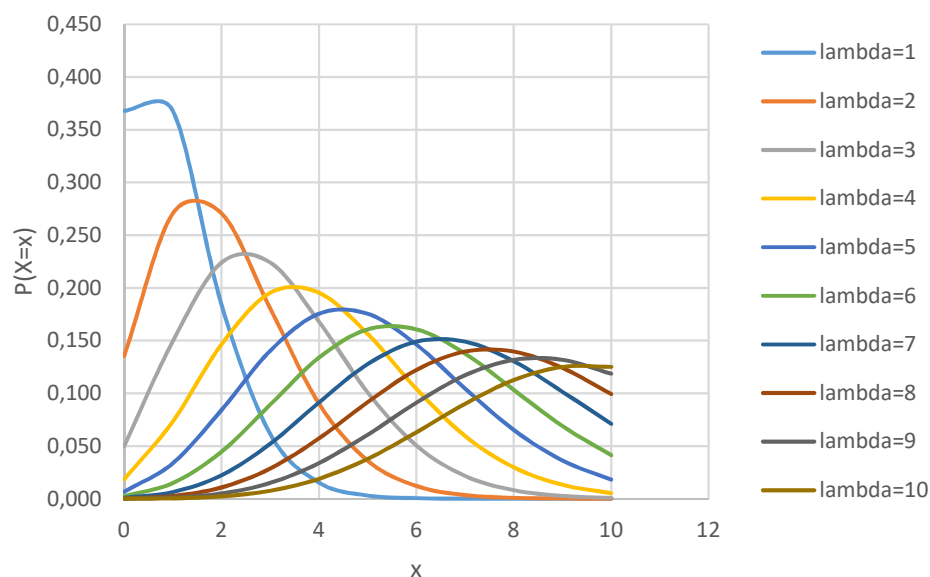
Fazendo, na equação (46), o número N tender ao infinito, chega-se à distribuição de Poisson para que a probabilidade desejada  $p(f)$  seja determinada; isto é (adaptado de Harr, 1977):

$$b(x; N, p(f)) = f(x_i) = \frac{\mu^{x_i} \cdot e^{-\mu}}{x_i!}, x_i = 0, 1, 2 \dots \quad (52)$$

Em outras palavras, supondo que um evento, aleatoriamente distribuído por uma superfície, apresente uma taxa de ocorrência média  $\lambda$ , e se X é a variável aleatória que representa a referida ocorrência em uma unidade de superfície escolhida ao acaso, então diz-se que X segue um modelo de Poisson com parâmetro  $\lambda$  se a sua função de probabilidade for (adaptado de Pinheiro et al, 2012):

$$p(x_i) = P(X = x_i) = \frac{\lambda^{x_i} \cdot e^{-\lambda}}{x_i!}, x_i = 0, 1, 2 \dots \quad (53)$$

Observa-se que a similaridade entre as equações (52) e (53), fazendo-se distinção tão somente na simbologia do parâmetro  $\lambda$  referente à taxa de ocorrência média. A Figura 53 ilustra a influência significativa de  $\lambda$  no modelo de distribuição.

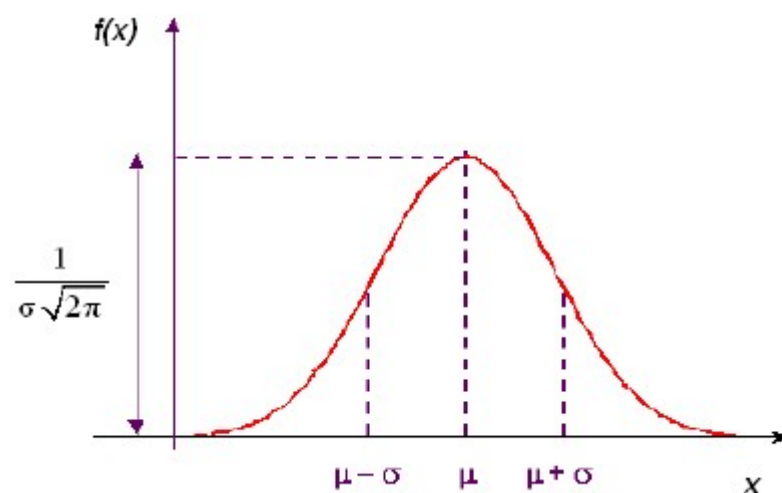


**Figura 53 - Curvas da distribuição de Poisson, para valores de  $\lambda$  variando de 1 à 10.**

### 2.9.3 Distribuição Normal

O modelo de distribuição de Gauss ou de distribuição normal é o mais empregado, pois traduz a forma de frequência de ocorrência de diversas variáveis encontradas na natureza.

A Figura 54 mostra a forma da curva normal ou gaussiana, cuja distribuição é simétrica em relação a um valor central. Para melhor definir o valor central da curva e a sua variabilidade em relação a este ponto central, a distribuição é caracterizada, respectivamente, por  $\mu$  (média) e  $\sigma^2$  (variância):



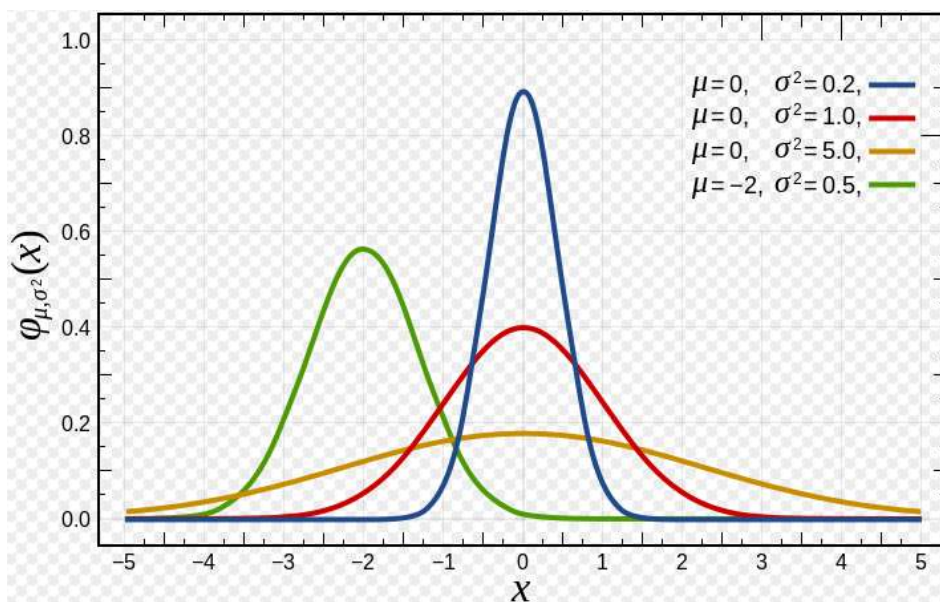
**Figura 54 - Curva típica de densidade da distribuição Normal (Chiann, 2009)**

Na verdade, a distribuição normal é a distribuição teórica de probabilidades mais importante em Estatística e sua função densidade de probabilidade é descrita como (Dixon, 1957; apud Yamamoto et al, 2013):

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2} \quad (54)$$

Sendo que  $\mu$  e  $\sigma$  representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da distribuição normal.

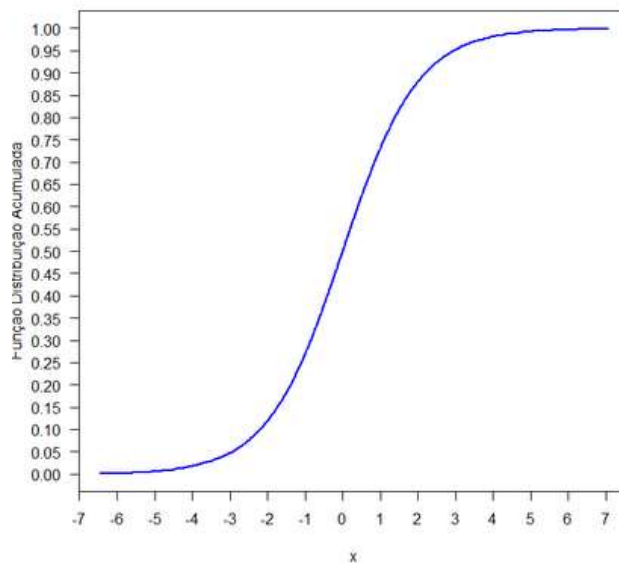
Se a distribuição Normal possui valores de média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$  respectivamente iguais a 0 e 1, a distribuição é denominada de Normal Padrão ou Normal Reduzida. Neste caso, como mostra a Figura 55 (linha vermelha), a curva da densidade  $\varphi(z)$  é simétrica (eixo vertical) e tem seu valor máximo em  $x=0$ , com pontos de inflexão em  $x=-1$  e  $x=1$ . Para as demais combinações de média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ , a curva muda de posição e forma.



**Figura 55 - Curvas de função de densidade de probabilidade  $\varphi(x)=f(x)$  por variável  $X$  (Brenner, 2015).**

As propriedades da distribuição Normal estão elencadas a seguir, sendo que algumas delas podem ser verificadas a partir da simples observação das curvas da Figura 55

- A curva de densidade da distribuição Normal é simétrica em relação ao eixo vertical que passa por  $x = \mu$ ;
- A curva se aproxima assintoticamente do eixo horizontal quando  $x$  tende a  $+\infty$  ou a  $-\infty$ ;
- A função de densidade tem seu ponto de máximo em  $x = \mu$  e tem pontos de inflexão em  $x = \mu - \sigma$  e  $x = \mu + \sigma$ ;
- Na faixa da variável  $x$  entre  $\mu \pm 2\sigma$ , a probabilidade  $P[\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + \sigma] \cong 0,95$ . Em outras palavras somente 5% dos casos o valor de  $X$  estará distante da média de mais de dois desvios padrão.
- Independente da média e desvio padrão, a função acumulada de uma distribuição Normal varia de 0 a 1, como mostra a Figura 56



**Figura 56 - Gráfico da função de distribuição Normal ( $\mu; \sigma^2$ ) acumulada**

Como a integral indefinida da função de densidade  $N(\mu; \sigma^2)$  não possui uma expressão analítica conhecida, sua resolução pode ser obtida por método de integração numérica ou, ainda, através de tabela de probabilidade (Tabela 21) correspondente à função de distribuição acumulada  $\Phi(z)$  da distribuição Normal Padrão.

Como a função de distribuição acumulada independente da média e desvio padrão, a Tabela 21 é válida para qualquer caso estudado. Nesta tabela, a parte inteira e a primeira casa decimal encontram-se na coluna esquerda da tabela e, a segunda casa decimal, encontra-se na 1ª linha da tabela. Para determinado valor de  $z$  (Figura 57), com a dupla entrada de valores obtém-se o valor correspondente à probabilidade  $\Phi(z)$ .

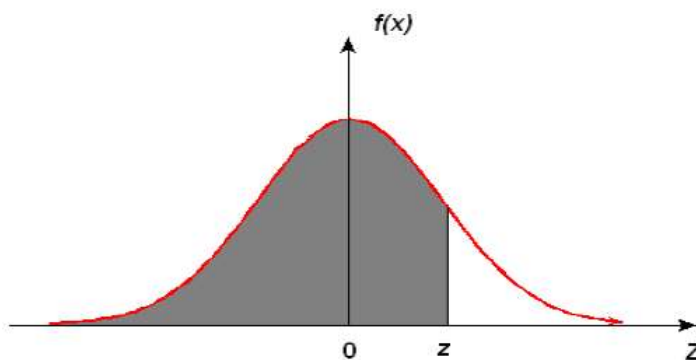




Figura 57 - Função densidade  $f(x) = \Phi(z)$  para distribuição Normal Padrão  
(Chiann, 2009)

Tabela 21 – Tabela de distribuição Normal acumulada (adaptado de Chiann, 2009)

Distribuição Normal : Valores de $P(Z \leq z) = A(z)$										
Segunda decimal de z										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.7	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.8	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

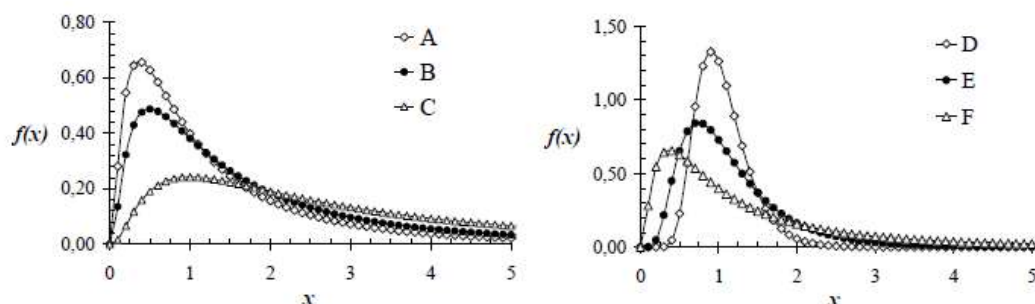
## 2.9.4 Distribuição Lognormal

Diz-se que uma variável aleatória  $X$  tem a distribuição lognormal quando o seu logaritmo  $f(x) = \log(x)$  tem a distribuição normal. Este modelo de distribuição é geralmente utilizado quando a distribuição de frequências evidencia a ocorrência de grande quantidade de variáveis com valores baixos e pouca quantidade de variáveis com valores mais altos ((Koch; Link, 1971; apud Landim, 2013): Sua função é descrita como:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \beta \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2}\right) \cdot [\log x - \alpha / \beta]^2} \quad (55)$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta^2$ , respectivamente, a média e a variância dos logaritmos de  $x$ . (Landim, 2013).

A distribuição lognormal sempre apresenta assimetria positiva, como mostra a Figura 58, e a quantidade de assimetria depende da variância  $\beta^2$ . (Koch; Link, 1971; apud Landim, 2013). Maia (2003) observa ainda que o papel de  $\mu$  e  $\sigma^2$ , diferentemente da distribuição normal, interferem na escala e forma. Na distribuição normal  $\mu$  e  $\sigma^2$  são determinantes na posição e escala da curva.



**Figura 58 – Funções de densidade da lognormal em função da variação de  $\sigma$  e  $\mu$ . A ( $\mu = 0$  ;  $\sigma^2=1$ ), B( $\mu = 0,3$  ;  $\sigma^2=1$ ) , C( $\mu = 1$  ;  $\sigma^2=1$ ) , D ( $\mu = 0$  ;  $\sigma^2=0,1$ ), E( $\mu = 0$  ;  $\sigma^2=0,3$ ) e F( $\mu = 0$  ;  $\sigma^2=1$ ) Maia (2003)**

### 2.9.5 Distribuição Beta

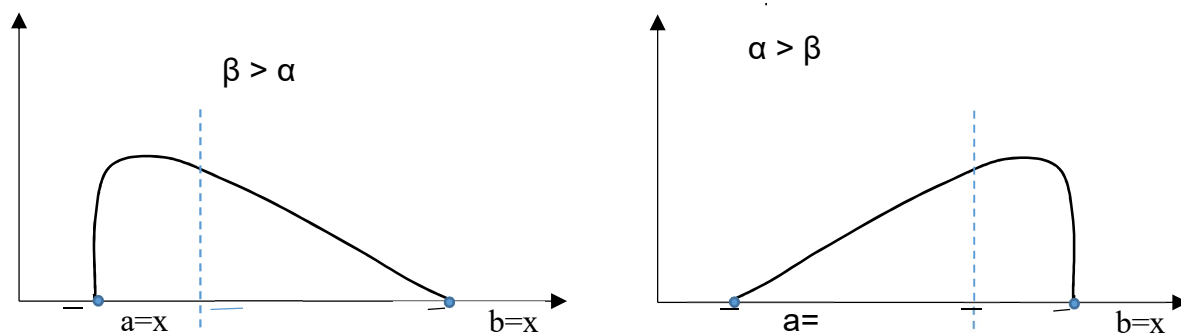
A distribuição beta é definida sobre os limites  $[a,b]$  através da função  $f(x)$  calculada pela equação (56) :

$$f(x) = C \cdot (x - a)^\alpha \cdot (b - x)^\beta \quad (56)$$

sendo  $C$  uma constante de normalização definida como:

$$C = \frac{(\alpha + \beta + 1)!}{\alpha! \cdot \beta! \cdot (b - a)^{(\alpha + \beta + 1)}} \quad (57)$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta$  inteiros e maiores que  $-1$ . A distribuição beta produz curvas com assimetria positiva e negativa, como mostra a Figura 59.



**Figura 59 - Funções de densidade da distribuição Beta.**

A esperança matemática e a variância são calculadas aplicando-se os conceitos apresentados anteriormente (item 3.8.1) resultando, respectivamente, em :

$$E[x] = a + \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta + 2} (b - a) \quad (58)$$

$$Var[x] = \frac{(b - a)^2 \cdot (\alpha + 1) \cdot (\beta + 1)}{(\alpha + \beta + 2)^2 \cdot (\alpha + \beta + 3)} \quad (59)$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados em função dos limites inferior e superior da distribuição Beta e das distancias entre abscissa, que define a média da distribuição e os referidos limites, respectivamente  $a$ ,  $b$  e  $L_0(x)$ ,  $U_0(x)$ . Tais valores de  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser determinados analiticamente pelas equações (60) e (61) ou, ainda, por gráficos (Harr, 1987):

$$\alpha = \frac{X^2}{Y^2} \cdot (1 - X) - (1 - X) \quad (60)$$

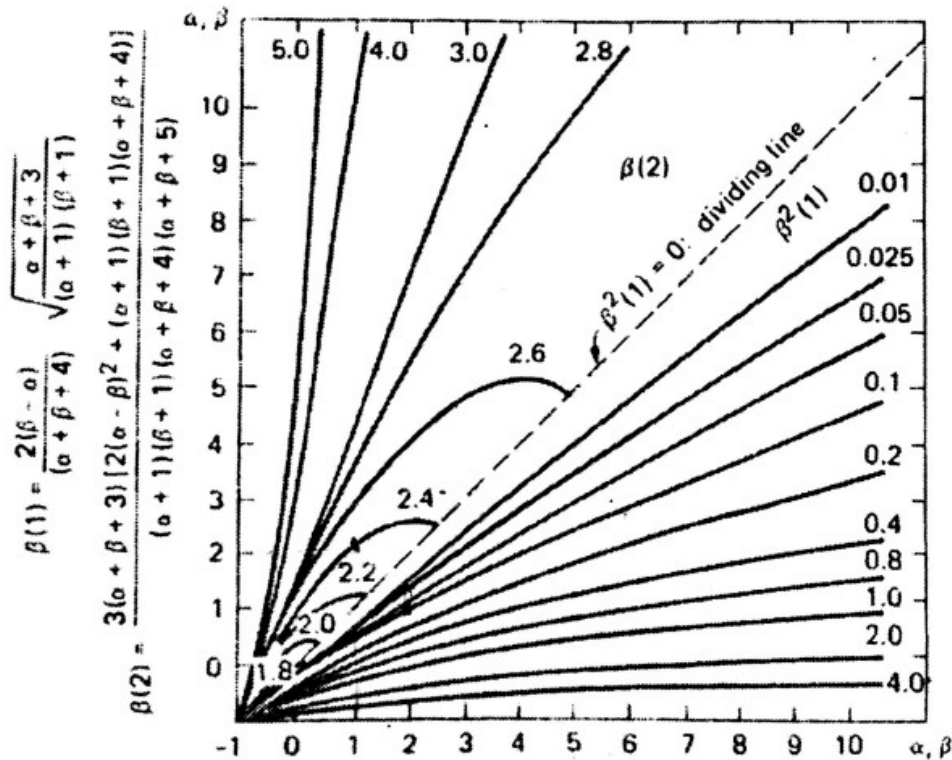
$$\beta = \frac{\alpha + 1}{X} - (\alpha + 2) \quad (61)$$

Sendo que:

$$X = \frac{\bar{x} - a}{(b - a)} \quad (62)$$

$$Y = \frac{\sigma}{(b-a)} \quad (63)$$

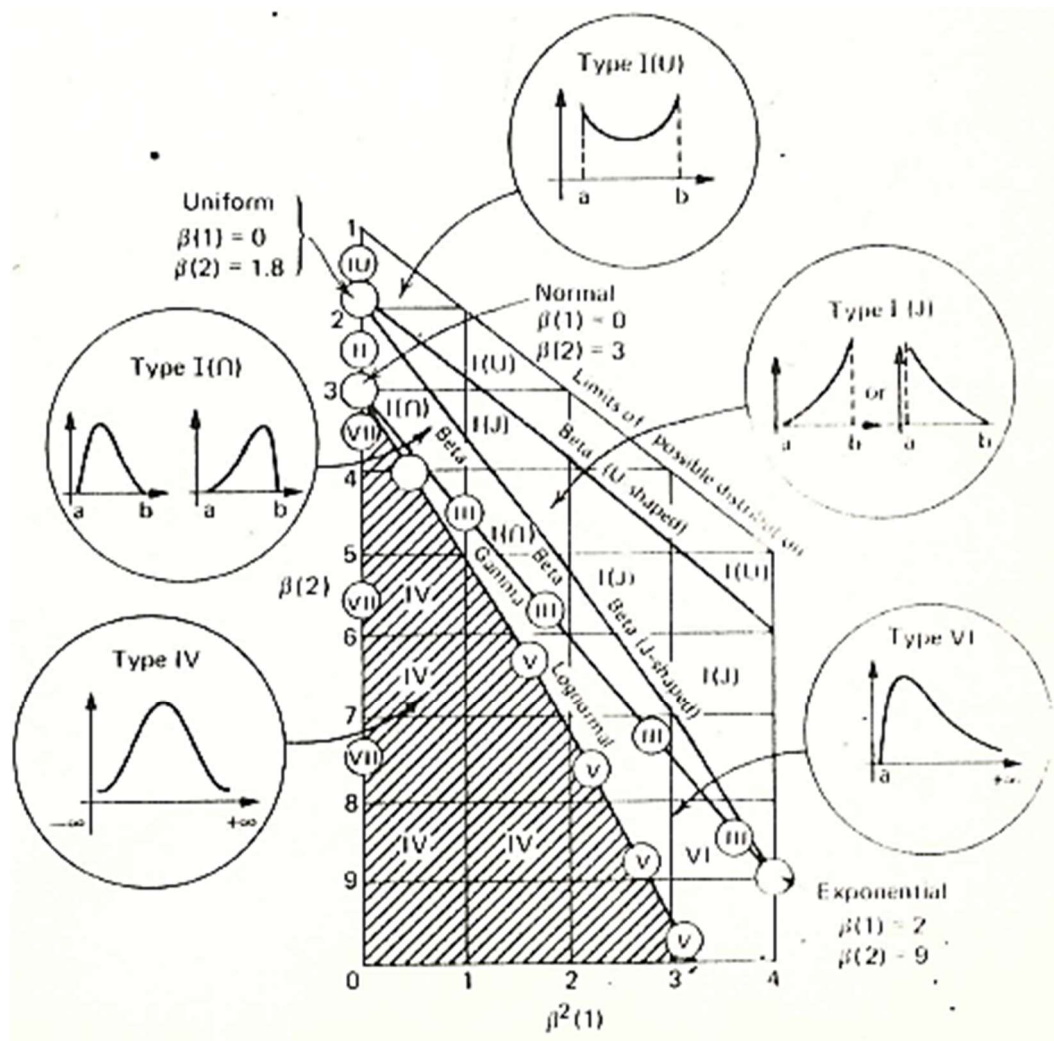
Para se obter os coeficientes de assimetria  $\beta(1)$  e curtose  $\beta(2)$  deve-se consultar o ábaco ilustrado na Figura 60, determinado por Harr (1987)



**Figura 60 - Ábaco para determinação dos coeficientes  $\beta^2(1)$  e  $\beta(2)$  em função dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  (Harr, 1987).**

Com relação à forma da curva da função de distribuição das variáveis, esta pode ser definida conhecendo-se os valores dos parâmetros  $\beta^2(1)$  e  $\beta(2)$ , segundo proposta de Karl Pearson (1985), apresentada na Figura 61.





**Figura 61 - Família de curvas de distribuição de probabilidades de Pearson em função de parâmetros de curtose e assimetria (Pearson & Hartley, 1972 apud Harr, 1987).**

Para obtenção da probabilidade acumulada da distribuição Beta, Harr (1987) desenvolveu a integração da função, apresentada na equação (64), em função da variável aleatória  $x(k)$ .

$$P[x \leq x(k)] = k = \frac{\int_0^F y^\alpha \cdot (1-y)^\beta \cdot dy}{\int_0^1 y^\alpha \cdot (1-y)^\beta \cdot dy} \quad (64)$$

A solução da probabilidade acumulada, denominada  $k$ , para todo intervalo de parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , foi apresentada na forma de famílias de curvas, apresentadas na Figura 62. Cada família de curvas corresponde a um valor de  $k$ , que representa a área no intervalo considerado (probabilidade acumulada), e

cada curva representa um valor de  $F$ , necessário para determinação da variável aleatória  $x(k)$ , dado que:

$$x(k) = a + F(b-a). \quad (65)$$

para qualquer intervalo  $[a,b]$ , respeitando valores limites mínimo e máximo, respectivamente de 0 à 1.

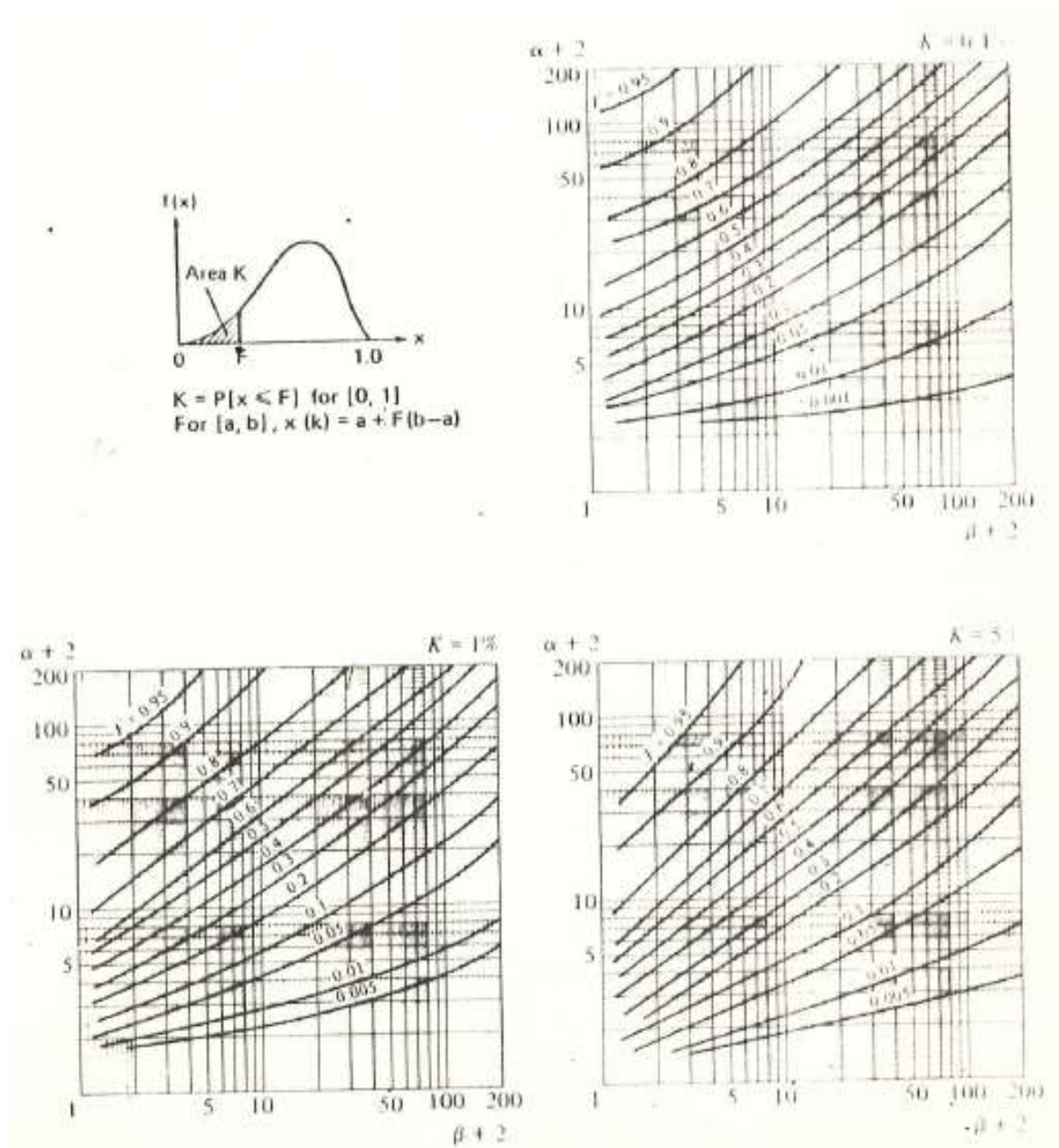


Figura 62 - valores de pontos da distribuição Beta ( $F$ ), para  $K=P[x \leq F]$  no intervalo  $[0,1]$  necessários ao cálculo de  $x(k)=a+F.(b-a)$  de  $[0,1]$  (Harr, 1987)

Como exemplificação do modelo proposto, Harr (1987) sugere a determinação do valor de uma variável  $x(k)$  tal que  $P[x < x(k)] = 0,04$ , a partir do conhecimento dos valores  $a=4$  e  $b=6,5$  (como limites mínimo e máximo) das abscissas da distribuição Beta, e dos valores já conhecidos de  $E[x]=5$  e  $\sigma[x]=0,5$ .

O primeiro passo para resolução do problema é a determinação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , que dependem, fundamentalmente, dos parâmetros de centralidade e dispersão fornecidos  $E[x]$  e  $\sigma[x]$ , além, logicamente, dos limites  $a$  e  $b$ .

$$X = \frac{\bar{x}-a}{(b-a)} = \frac{5-4}{6,5-4} = 0,4 \quad \text{e} \quad Y = \frac{\sigma}{(b-a)} = \frac{0,5}{6,5-4} = 0,2 \quad , \text{consequentemente:}$$

$$\alpha = \frac{X^2}{Y^2} \cdot (1 - X) - (1 - X) = 1,00 \quad \text{e} \quad \beta = \frac{\alpha+1}{X} - (\alpha + 2) = 2,00$$

Com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  é possível a determinação dos parâmetros  $\beta^2(1) \cong 0,1$  e  $\beta(2) \cong 2,4$  pelo ábaco da Figura 60. Conhecendo-se  $\beta^2(1)$  e  $\beta(2)$  pode-se identificar a forma da curva da função de distribuição como sendo tipo I, de acordo com ilustração da Figura 61.

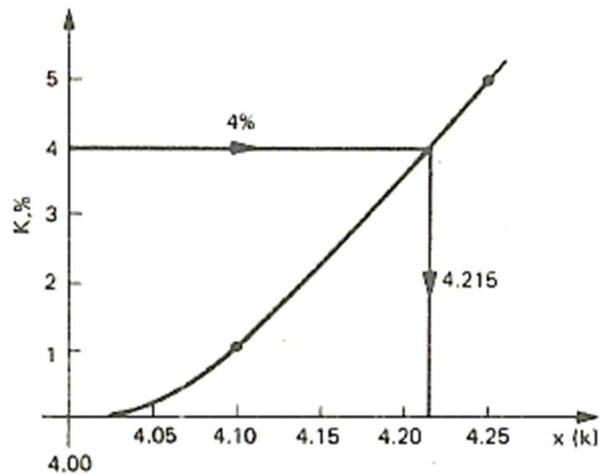
Utilizando-se a Figura 62 pode-se determinar, o limite F que delimita a área sob a referida curva capaz de fornecer a a probabilidade acumulada k cujo valor de  $x(k)$  desejamos conhecer. Cabe observar que, caso o ponto F objetiva situar a curva no plano considerando que a mesma encontra-se deslocada da origem do sistema de acordo com as distancias  $a$  e  $b$ .

Os valores de F e de  $x(k)$  para cada valor da área K (probabilidade, em percentagem) estão reproduzidos na Tabela 22 abaixo.

**Tabela 22– Principais grupos de fatores que influenciam nas ocorrências de movimentos de massa gravitacionais (adaptado de Cruden e Varnes, 1996, apud Harr, 1987).**

K (%)	F	$x(k)=4+2,5.F$
0,1	0,015	4,04
1	0,04	4,10
5	0,10	4,25

Como não foi desenvolvido ábaco para o valor de  $k=4\%$ , probabilidade dada pelo problema, é necessário interpolar o valor de  $x(k)$  correspondente ao mesmo, tomando por base os valores da Tabela 22, conforme ilustrado na Figura 63.



**Figura 63 - valores de pontos da distribuição Beta (F), para  $K=P[x \leq F]$  no intervalo  $[0,1]$  necessários ao cálculo de  $x(k)=a+F.(b-a)$  de  $[0,1]$  (Harr, 1987)**

Finalmente, pode-se concluir que  $P [x \leq 4,25] = 4\%$  , dado que  $E[x]=5$  e  $\sigma[x]=0,5$  numa distribuição Beta com  $a=4$  e  $b=6,5$ .



## 2.10 Modelo de Atualização Bayseana (Harr, 1987)

A formulação apresentada a seguir é aquela utilizada nesta tese para atualização de probabilidades (atualização Bayesiana), com vistas à elaboração de mapas de susceptibilidade ao risco na comunidade da Rocinha a partir de distribuições Beta e Binomial.

O Teorema de Bayes apresentado no item 3.7, em sequência ao teorema da probabilidade total e ao conceito de probabilidade condicional, se mostrou uma ferramenta adequada de se estimar novas probabilidades de ocorrência de determinado evento, uma vez conhecidas as novas distribuições de variáveis relevantes antes do sistema sofrer novas variações de frequências (novos eventos), que permitem a atualização continuada de probabilidades.

Essas alterações na frequência das variáveis aleatórias podem decorrer, por exemplo, tanto de uma falha no projeto de engenharia ou, simplesmente, devido a modificações no padrão de ocorrência dessas variáveis, por questões de natureza aleatória. De toda forma, novas informações (variáveis aleatórias) afetam a distribuição estatística, em termos de média  $E[x]$  e dispersão de dados  $Var[x]$ , alterando, portanto, o cálculo da probabilidade de ocorrência do evento que se deseja investigar, ensejando o cálculo da probabilidade à *posteriori*.

Portanto, o processo de atualização Bayesiana de probabilidades pode ser expresso conceitualmente como probabilidade “à *posteriori*” (revisada) = probabilidade “à *priori*” (conhecida) x nova informação. A nova informação é uma outra distribuição contendo novos eventos (novos deslizamentos, como no caso estudado nesta tese), conhecida como função de verossimilhança. A distribuição “à *priori*” é aquela conhecida previamente, com base em eventos pretéritos.

A atualização continuada de probabilidades tende à estabilização das probabilidades revisadas, à medida que o número de atualizações baseadas em dados reais tende a infinito. Portanto, no que concerne à presente tese, o mapa de susceptibilidade ao risco obtido da interpretação de muitos laudos de vistoria da Fundação GeoRio já se mostra com as probabilidades praticamente estabilizadas, como se verificará no capítulo 5.

Uma vez atualizadas as probabilidades, baseando-se no processo de aprendizado de Bayes, a confiabilidade do sistema que reúne o conjunto de informações tende a aumentar e, conseqüentemente, reduzem-se as incertezas.

Harr (1987) propôs um modelo de atualização baseado no conceito de confiabilidade (R), incorporando conceitos básicos das teorias de probabilidade.

De acordo com um dos axiomas de probabilidade, desde que dois resultados esperados, no caso sucesso (R) e falha (f), sejam mutuamente exclusivos, então  $P[\text{sucesso} + \text{falha}] = 1$ . Caso seja R a probabilidade de sucesso e p(f), a probabilidade de falha, conclui-se que  $R + p(f) = 1$ .

De acordo com Harr (1987), a confiabilidade R de um sistema é, em si, uma variável aleatória, cujas características são prescritas por alguma distribuição de probabilidade. Assim sendo, esta deve variar entre 0 e 1, incluindo os extremos. Com 4 parâmetros ( $R_{\min}=0$ ,  $R_{\max}=1$ ,  $E[R]$  e  $\text{Var}[R]$ ) o princípio de máxima entropia (incerteza) indica que a distribuição de confiabilidade leve em conta a variável beta:

$$beta(R_0 | \alpha, \beta) = \frac{(\alpha + \beta + 1)!}{\alpha! \beta!} \cdot R_0^\alpha (1 - R_0)^\beta \quad (66)$$

Portanto, se  $\alpha$  e  $\beta$  são inteiros, a distribuição de confiabilidade *à priori* é expressada pela equação (66) (adaptado de Harr, 1987).

Ajustando a distribuição Beta ao modelo de variação Binomial estudado no item 3.7, obtém-se:

$$b(x; N, R) = \frac{N!}{x! (N - x)!} \cdot R^x \cdot (1 - R)^{N-x} \quad (67)$$

Substituindo-se na equação (66):

- o número de sucessos x por  $\alpha$ ;
- o número de insucessos ( $N - x$ ) por  $\beta$ ;

obtém-se a equação (66) expressa em função de  $\alpha$  e  $\beta$

$$b(\alpha; \alpha + \beta, R) = \frac{(\alpha + \beta)!}{\alpha! \beta!} \cdot R^\alpha (1 - R)^\beta \quad (68)$$

Cabe observar que a distribuição *à posteriori* após atualização de dados (novas informações) será, num futuro, uma distribuição *à priori*.

De acordo com Harr (1987), ao serem satisfeitas as relações acima, as distribuições Beta e Binomial são referidas como distribuições conjugadas.

Para obtenção dos parâmetros de centralidade (média) e de dispersão (variância), aplicam-se as definições apresentadas no item 3.6, referentes aos fundamentos estatísticos, para obter as equações 69 e 70 com isso:

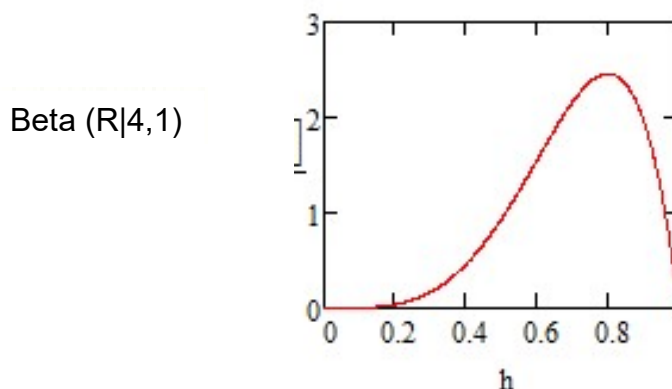
$$\bar{R} = E[\text{beta}(R_0 | \alpha, \beta)] = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta + 2} \quad (69)$$

$$\sigma^2[R] = \text{Var}[\text{beta}(R_0 | \alpha, \beta)] = \frac{(\alpha + 1) \cdot (\beta + 1)}{(\alpha + \beta + 2)^2 \cdot (\alpha + \beta + 3)} \quad (70)$$

Com o intuito de melhor ilustrar a utilização do conceito desenvolvido neste capítulo seja um determinado experimento onde o número de sucessos seja  $\alpha = 4$ , e, o número de insucessos seja  $\beta = 1$

- $R_{\min} = 0$ ;
- $R_{\max} = 1$ ;
- $E[\text{beta}(R / \alpha, \beta)] = \bar{R} = 0,71$ ;
- $\sigma(R) = 0,16$ ;
- $\text{beta}(R / \alpha, \beta) = 2,22$ .

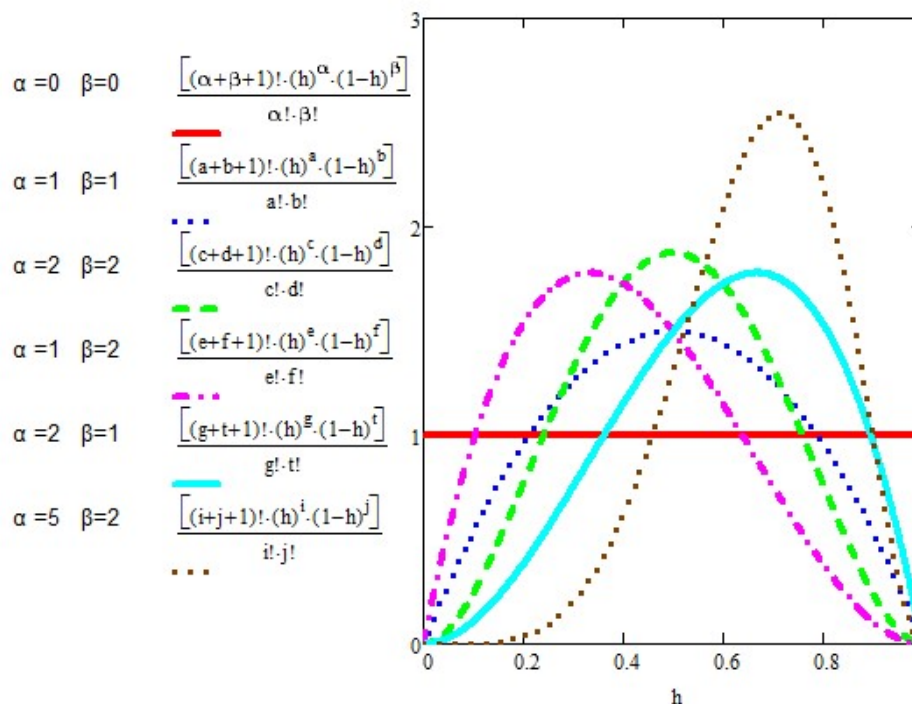
A Figura 64 apresenta a distribuição beta para o exemplo citado.



**Figura 64 - Distribuição beta para o exemplo**

Com objetivo de se avaliar graficamente a influência da variação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , ambos maiores que zero, foram plotadas várias curvas de distribuição Beta, como mostra a Figura 65. Observa-se relação de simetria em

relação ao eixo y quando  $\alpha = \beta$ , sendo que quanto maior for este valor, menor será o achatamento da curva (maior curtose). Por outro lado, quanto maior a diferença de valores entre  $\alpha$  e  $\beta$  maior será a assimetria da curva em relação à vertical.



**Figura 65 – Comportamento da distribuição Beta ao varia parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$**

Com vistas à aplicação da equação 70 à presente tese, apresenta-se um caso da comunidade da Rocinha no item 5.4 referente ao cálculo de probabilidades de danos associados aos escorregamentos.

### 3 FUNDAMENTOS DE GEOESTATISTICA

#### 3.1 Inferência espacial

As probabilidades calculadas (atualizadas) na área da Comunidade da Rocinha foram obtidas em pontos discretos (pontos amostrais), distribuídos na região estudada, em função dos locais onde se observam as maiores frequências de ocorrência de deslizamentos. Para que essas probabilidades sejam interpoladas por toda área estudada a partir de pontos amostrais utilizam-se conceitos de Geoestatística, a seguir descritos.

Geoestatística é um ramo da Estatística Espacial que utiliza o conceito de funções aleatórias para incorporar a dependência espacial aos modelos para variáveis georeferenciadas. Sob determinadas hipóteses, torna-se possível fazer inferências e previsões a partir de amostras.

De modo resumido, geoestatística pode ser definida como uma subárea da Estatística que estuda variáveis regionalizadas (Matheron, 1971). A Teoria das Variáveis Regionalizadas, por sua vez, estuda o problema de estimativa com base em dados experimentais medidos sobre suportes que não abrangem totalmente tais domínios. (Yamamoto e Landim, 2013)

Segundo Soares (2006), o conjunto de variáveis aleatórias  $Z(x_i)$ ,  $i=1, n$ , correlacionadas entre si, constitui uma função aleatória, cuja amostragem fornece uma realização  $z(x_i)$ . Por isso, com uma única realização torna-se impossível determinar as estatísticas no ponto  $x_i$  dessa função, tais como média e variância. A solução consiste em assumir diversos graus de estacionaridade da função aleatória, ou seja, admite-se que as variáveis aleatórias tenham a mesma média:

$$E[Z(x_1)] = E[Z(x_2)] = \dots = E[Z(x_n)] = E[Z(x)] = m \quad (71)$$

Desse modo, a média  $m$  passa a ser independente da localização e obtida como média aritmética das realizações das variáveis aleatórias (Soares, 2006):

$$m = E[Z(x)] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Z(x_i) \quad (72)$$

Esta hipótese é válida nos casos em que os valores são homogêneos, ou seja, a média das amostras seja representativa da área em estudo, porém, esta homogeneidade espacial raramente ocorre, sendo necessária a verificação da distribuição e da variabilidade espacial da função aleatória.

A variância associada à média é calculada como:

$$Var[Z(x)] = E\{[Z(x) - m]^2\} \quad (73)$$

Existem situações em que a capacidade de dispersão da variável regionalizada é muito elevada, de modo que pode-se considerar os momentos de segunda ordem (variância e covariância) como infinitos.

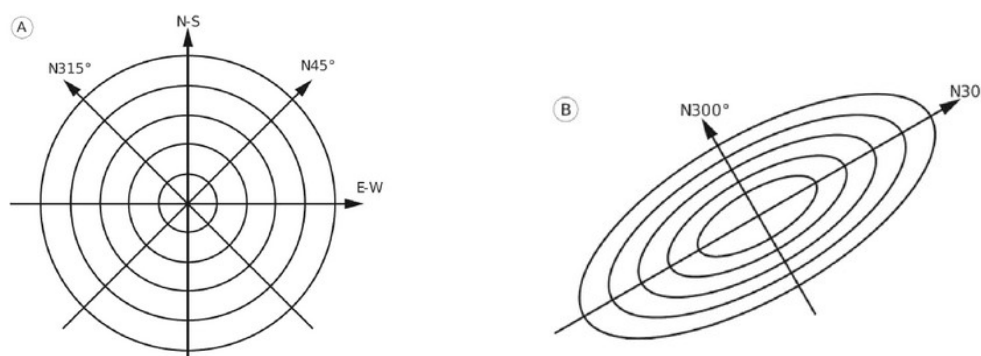
Nesta hipótese, os primeiros dois momentos das diferenças das variáveis  $z(x)$  e  $z(x+h)$  são independentes de suas localizações, sendo função somente do vetor  $h$  que as separam. (Olea, 1984). A esta hipótese denomina-se estacionaridade de 2ª ordem.

Em outras palavras, além de definir que a esperança matemática,  $E[Z(x)]$ , existe e não depende do suporte  $x$ , define-se também que a correlação entre duas variáveis aleatórias depende somente da distância espacial,  $h$ , que as separam, e é independente da sua localização (adaptado de Journel & Huijbregts, 1978).

Cabe destacar a distinção no conceito de covariância em Estatística e Geoestatística. Enquanto que na estatística a covariância é uma medida da relação mútua entre duas variáveis aleatórias distintas, por exemplo  $X$  e  $Y$ , em geoestatística a covariância mede a relação entre valores da mesma variável, obtidos em pontos separados por uma distância  $h$ , conforme uma determinada direção. Isso significa que, ao alterar a direção, a covariância também pode se alterar e, nesse caso, há indicação de presença de fenômeno espacial anisotrópico, conforme ilustrado na Figura 66b.

Nas situações em que a covariância é a mesma, independente da direção, o fenômeno espacial é considerado isotrópico (Figura 66a). Assim, calcula-se a covariância para várias direções com objetivo de se definir a isotropia (ou

anisotropia) do fenômeno espacial. Nos casos de estudos com distribuição em 2D, calculam-se as covariâncias apenas em quatro direções : 0°, 45°, 90° e 135°.



**Figura 66 - Fenômenos espaciais: A) isotrópico e B) anisotrópico (Yamamoto e Landim, 2013)**

A covariância de uma variável regionalizada para pontos separados por uma distância  $h$  pode ser calculada como:

$$C(h) = E\{[Z(x+h) - m] \cdot [Z(x) - m]\} \quad (74)$$

Se  $h$  representa um vetor entre dois pontos  $x_1$  e  $x_2$  no espaço tridimensional, a covariância para distância nula, onde  $h=0$ , é igual à variância da variável regionalizada  $Z(x)$ . A função variograma é definida como a variância do incremento  $[Z(x+h)-Z(x)]$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (75)$$

De acordo com Yamamoto e Landim (2013), a hipótese de estacionaridade de 2ª ordem assume a existência da variância e, portanto, de uma variância *a priori* finita (Journel & Huijbregts, 1978). Existem, porém, fenômenos físicos e, conseqüentemente, variáveis regionalizadas com uma capacidade infinita de dispersão, nos quais não se pode definir, *a priori*, nem a covariância nem a variância, mas se pode determinar um variograma (Journel & Huijbregts, 1978).

Não havendo a necessidade de se adotar uma média constante e variância finita para a função aleatória  $Z(x)$ , pode-se considerar a hipótese

intrínseca, em que apenas que os incrementos da função aleatória  $[Z(x+h) - Z(x)]$  sejam estacionários de 2ª ordem (Goovaerts, 1997 apud Yamamoto e Landim, 2013).

De acordo com Goovaerts (1997), a estacionaridade é uma propriedade do modelo de função aleatória necessária para a inferência estatística. Para todos os vetores  $h$ , o incremento  $[Z(x+h) - Z(x)]$  tem uma variância finita, a qual não depende do suporte  $x$  (Journel & Huijbregts, 1978):

$$\text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2 \cdot \gamma(h) \quad (76)$$

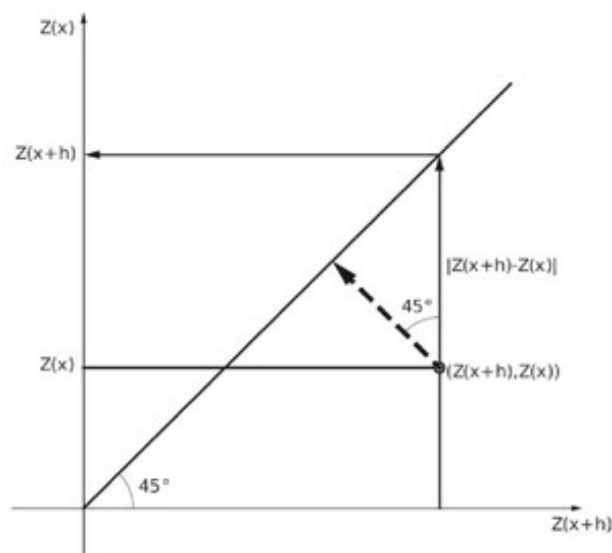
Yamamoto e Landim (2013) destacam ainda que, com relação ao termo variograma, há uma confusão terminológica na literatura geoestatística pois alguns autores como Journel e Huijbregts (1978) preferem a denominação semivariograma, em detrimento de variograma, utilizado por Wackernagel (2003). Segundo Bachmaier e Backes (2008), a confusão a respeito do prefixo *semi* surgiu porque Matheron (1965) tinha em mente a variância das diferenças  $[Z(x+h) - Z(x)]$ , mas o valor desejado, na prática, era a metade dessa diferença, que fornece a variância da diferença de pares de pontos separados por  $h$ . Na realidade, o prefixo *semi* se deve à divisão da média das diferenças ao quadrado por dois:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot E. [Z(x+h) - Z(x)]^2 = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (77)$$

Em resumo,  $2\gamma(h)$  é chamado de variograma e  $\frac{1}{2} \cdot \gamma(h)$  de semivariograma, apesar de se encontrar na literatura a consideração de  $\gamma(h)$  como sendo variograma, ainda que os valores estejam divididos por dois.

Journel (1989) demonstrou a origem da expressão do (semi) variograma a partir de interpretação geométrica, em contraposição a sua origem supostamente empírica, baseada em pares de pontos em um diagrama de dispersão, de acordo com Figura 67.





**Figura 67 - Interpretação geométrica da função semivariograma em um diagrama de dispersão (Journal, 1989, apud Yamamoto e Landim, 2013)**

Simplemente por geometria, da figura 64::

$$d_i = [Z(x+h) - Z(x)] \cdot \cos 45^\circ \quad (78)$$

Elevando-se a  $i$ -ésima distância ao quadrado, tem-se:

$$d_i^2 = \frac{1}{2} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (79)$$

Considerando  $n$  pares de pontos para uma determinada distância  $h$ , pode-se calcular a média das distâncias, a qual foi chamada por Journal (1989) de momento de inércia:

$$\gamma_{x+h,x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot [Z(x+h) - Z(x)]^2 = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (80)$$

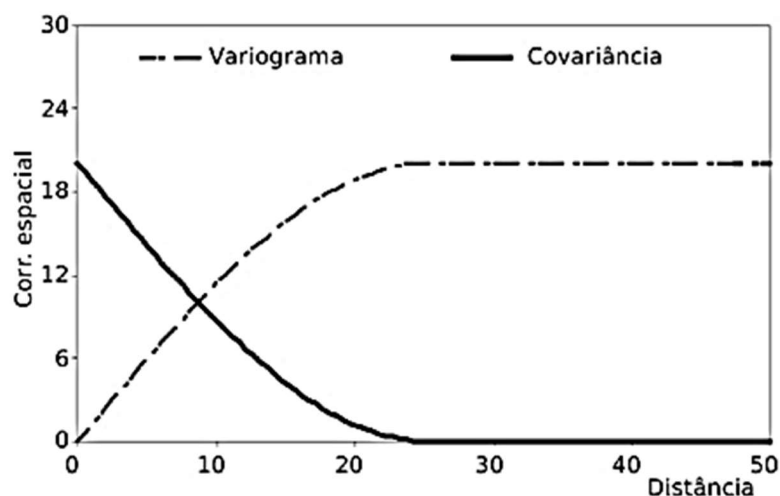
Yamamoto e Landim (2013) observam que quanto maior a dispersão, maior o momento de inércia e menor a correlação, de modo que, se não houver dispersão, ou seja, se todos os pares de pontos caem sobre a reta de  $45^\circ$ , o momento de inércia é zero e o coeficiente de correlação será máximo e igual a um.

Para os objetivos desta tese, é indiferente denominar-se variograma ou semivariograma e, por simplicidade, o termo variograma será aquele utilizado no presente trabalho.

Considerando-se que,

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (81)$$

e que o vetor  $h$  seja infinitamente pequeno, a variância será mínima e a covariância máxima, havendo um valor  $\Delta h$  para o qual as duas apresentam valores iguais. Entretanto, à medida em que  $\Delta h$  aumenta, a covariância diminui, enquanto a variância aumenta. Isto porque ocorre, progressivamente, maior independência entre os pontos a distâncias cada vez maiores, conforme apresentado na Figura 68.



**Figura 68 - Relação entre a função variograma e a função covariância (Yamamoto e Landim, 2013)**

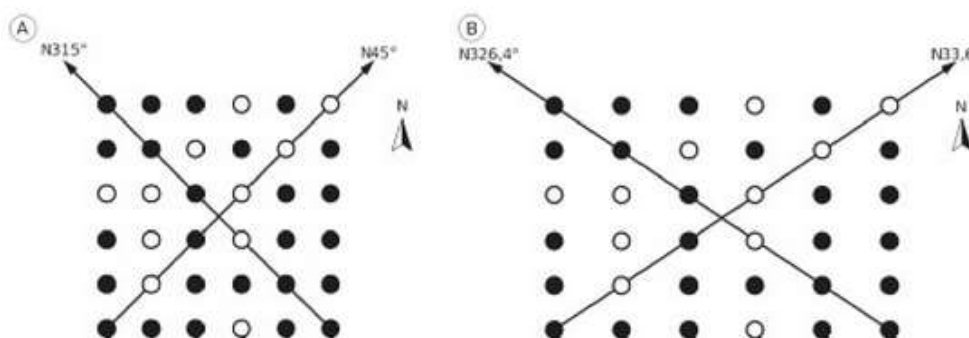
### 3.2 Modelagem variográfica

A determinação da função variograma experimental se dá em função da descrição matemática da relação entre a variância de pares de observação (que são pontos experimentais de amostragem), e a distância que separa tais pontos. O variograma é muito sensível à distribuição dos pontos amostrais, assim como ao tipo de distribuição estatística associada.

Existem duas classificações para a distribuição espacial dos pontos amostrais: regular ou irregular. O caso do presente estudo será abordado pela distribuição regular, em que o variograma pode ser calculado diretamente com base nos pontos amostrais.

Os pares de pontos encontrados para uma determinada distância  $h$ , ao longo de uma direção, são usados para calcular as diferenças ao quadrado, que são acumuladas para o cálculo da média, de acordo com equação (77).

Como a malha é regular, as duas direções ortogonais são EW e NS; se a malha for quadrada, então se têm mais duas direções ortogonais, N45° e N315°; se a malha for retangular, as direções ao longo das duas diagonais do retângulo precisam ser calculadas com base nos lados do retângulo. Os círculos vazios representam pontos não amostrados, enquanto que os preenchidos são pontos amostrados.



**Figura 69 - Malha quadrada (A) e retangular (B) e direções ortogonais para definição do variograma experimental (Yamamoto e Landim,2013)**

Com objetivo de ilustrar numericamente o procedimento de cálculo de variogramas experimentais para dados de uma distribuição regular, são apresentados por Yamamoto e Landim (2013) dados de um depósito da espessura de carvão numa localidade do Paraná.

A

Tabela 23 apresenta 57 pontos de observação, onde estão indicadas as coordenadas x e y, além da espessura de carvão (coordenada z).

**Tabela 23 - Tabela de pares ordenados da amostra experimental com as suas respectivas alturas (adaptado de Cava,1985 e Landim, Soares e Pumputis,1998, apud Yamamoto e Landim, 2013)**

Ponto	x	y	z	Ponto	x	y	z
1	2	2,5	1,3	26	5	4	1,32
2	1,5	2,5	1,4	34	6	3,5	1,3
3	2,5	2,5	1,5	37	1,5	1,5	2,09
4	2,5	2	1,2	38	3,5	1,5	1,38
5	1,5	2	1,85	39	4	2	1,3
6	2	1,5	1,6	40	2,5	4	0,96
7	2,5	1,5	1,4	41	3,5	4	1,05
8	3	2	1,23	42	4,5	4,5	0,73
10	2	5	0,72	43	1,5	4	0,94
11	4	3,5	1,18	44	3,5	3	1,3
12	4	2,5	1,4	45	2,5	3	1,57
13	1	5	0,8	46	0,5	1,5	1,62
14	4	5	0,69	47	1,5	3	1,55
15	5	3	1	48	2	1	1,31
16	1	3,5	1,02	49	0,5	2,5	1,18
20	2	3,5	1,2	50	3	1,5	1,41
21	3,5	1	1,28	54	3	4,5	0,8
24	2,5	0,5	0,55	55	0,5	4	1,19
25	3	3,5	1,1	57	4	1,5	1,04

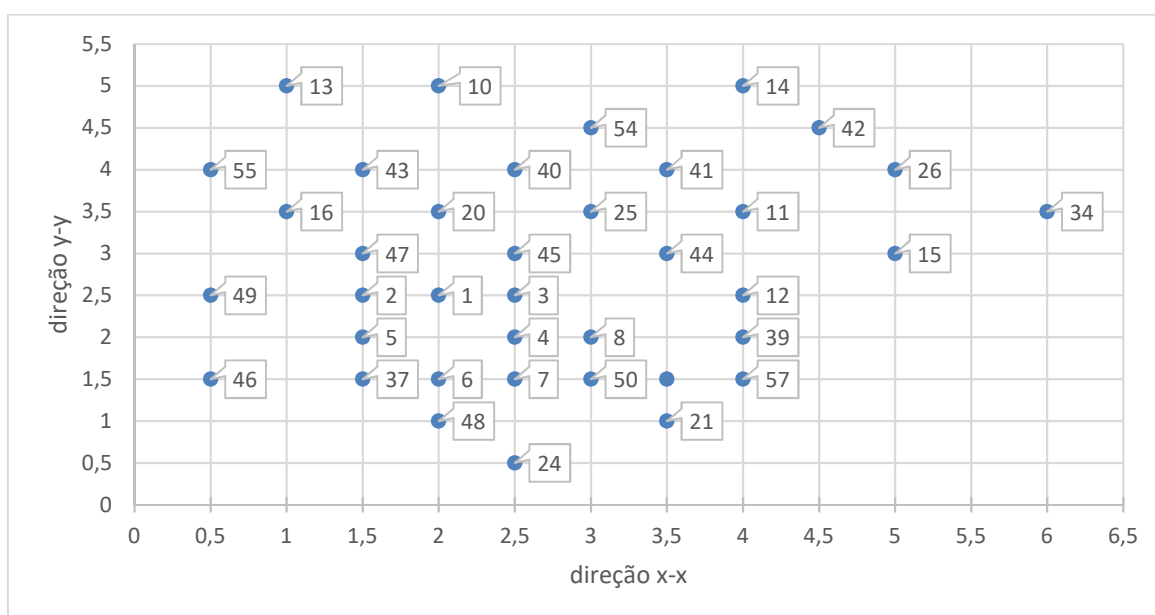
Para obter os variogramas nas direções x e y, faz-se necessário calcular o somatório dos quadrados das diferenças; isto é

$$\gamma(h) = \frac{\sum_0^n \{z(x+h) - z(x)\}^2}{2n} \quad (82)$$

Ou, na direção y:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_0^n \{z(y+h) - z(y)\}^2}{2n} \quad (83)$$

Onde  $n$  é o número de pontos,  $x$  e  $y$  as coordenadas  $h$  o intervalo entre pontos. A Figura 70 exemplifica a metodologia de cálculo, para o menor intervalo possível entre pontos, ou seja,  $h=0,5$  m. Nesta figura, apresenta-se a malha com divisões de  $0,5$ m, onde estão identificados o número do ponto e a sua posição nas direções  $x$  e  $y$ . Observa-se que nem todos os pontos distam entre si  $0,5$ m. Assim sendo, dado que  $h=0,5$ m, equações (82) e (83), para as direções  $x$  e  $y$ , somente considerarão os pontos que atendem a esta distância.

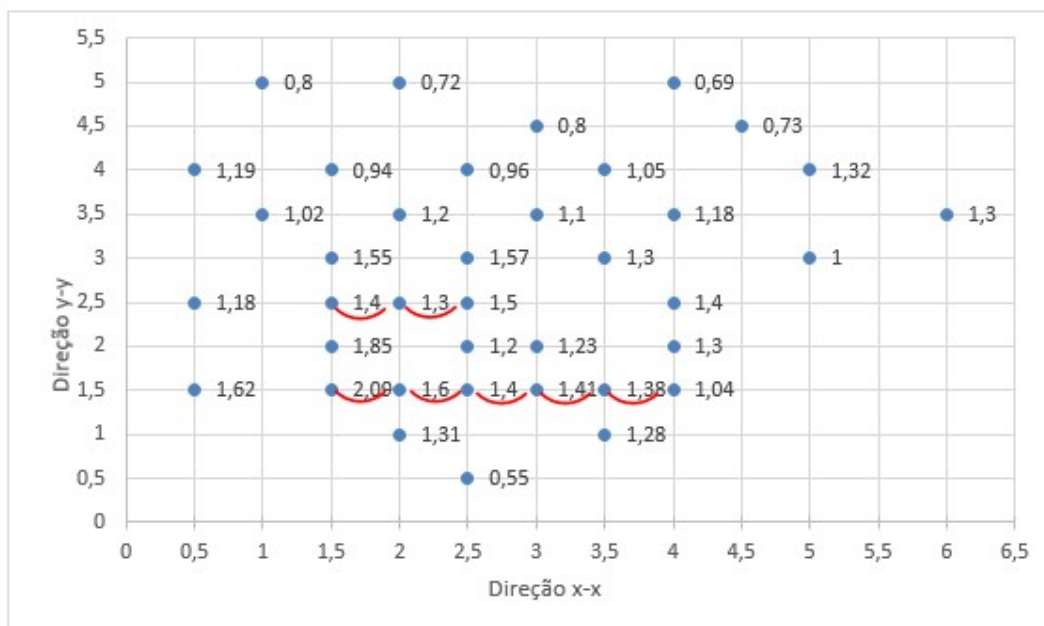


**Figura 70 - Reprodução dos pares ordenados de pontos para cálculo de variograma experimental – distancia 0,5.**

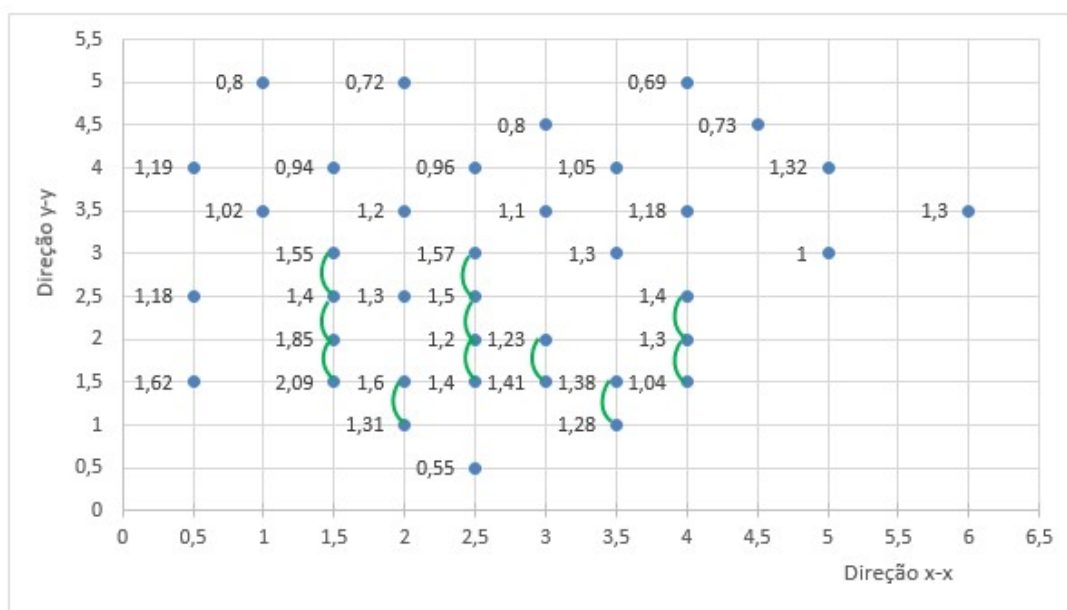
Os números da figura 70 correspondem aos pontos identificados na Tabela 23.

A Figura 71 mostra as ligações possíveis (conectores) entre pontos distanciados de  $0,5$  unidades, nas direções  $x-x$  e  $y-y$ . Os valores de  $z$ , correspondentes a cada ponto, acionados pelos conectores são utilizados para calcular as equações (82) e (83).

Tal procedimento é repetido para os demais espaçamentos entre pontos, até o valor máximo, no caso do exemplo, de  $h=3,5$ m



(a) Direção x-x



(b) Direção y-y

**Figura 71 - Reprodução dos pares ordenados com conectores a cada 0,5 unidades. Os números referem-se ao valor de z em cada ponto. (Adaptado de Yamamoto e Landim, 2013).**

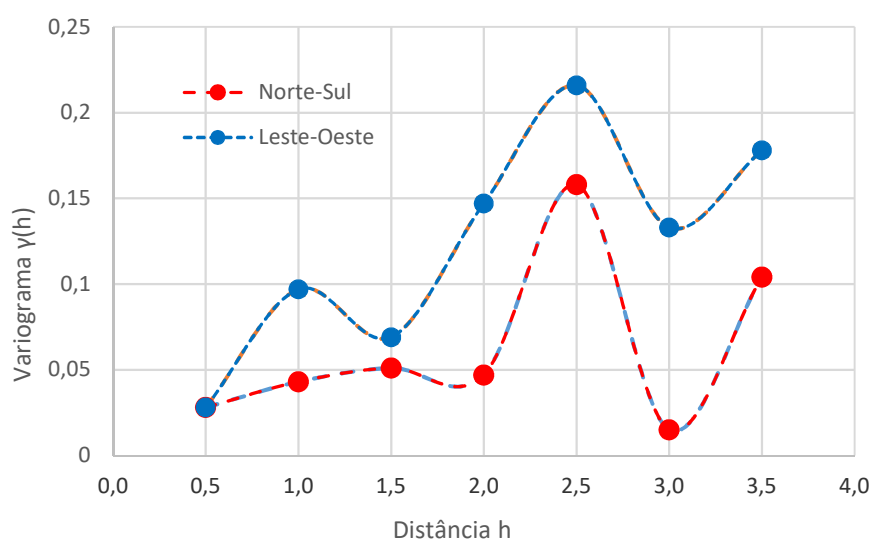
A Tabela 24 e Figura 72 mostram os resultados dos variogramas  $\gamma(h)$ , nas direções x-x- e y-y, para todos os espaçamentos possíveis. As diferenças

entre curvas denota um comportamento típico de fenômeno espacial anisotrópico.

**Tabela 24 - Valores de variogramas em função da distância  $h$  entre os pares ordenados com apresentação do nº de pontos dos vértices de cada malha quadrada. (Adaptado de Yamamoto e Landim, 2013)**

Distância	Leste-Oeste		Norte-Sul	
	$\gamma$ (h)	n	$\gamma$ (h)	n
0,5	0,028	8	0,028	11
1,0	0,043	18	0,097	15
1,5	0,051	12	0,069	13
2,0	0,047	12	0,147	7
2,5	0,158	6	0,216	9
3,0	0,015	5	0,133	3
3,5	0,104	4	0,178	3

De acordo com a literatura (Journel & Huijbregts, 1978), Yamamoto e Landim (2013) relatam que a distância máxima em que se pode calcular o variograma experimental é chamada de campo geométrico e é igual à metade o comprimento da linha na direção considerada.



**Figura 72 - Variogramas experimentais calculados para direções N-S (direção y-y) e L-O (direção x-x). (Adaptado de Yamamoto e Landim, 2013)**

### 3.3 Tipos de variogramas e suas propriedades típicas

O variograma é uma poderosa ferramenta na geoestatística porque tem como função dimensionar a continuidade espacial que abrange as variáveis. A partir do seu conhecimento e análise é que se obtém a ferramenta básica da estimativa por determinado método de interpolação, como por exemplo o método da krigagem (adaptado de Maranhão, 1983). Este método será apresentado no capítulo 4.4.

A função variograma mede a variância entre pontos separados por uma distância  $h$ , de modo que a variância será tanto menor quanto maior for a proximidade entre os pontos considerados. Ocorre que, em geral, a variância se estabiliza em torno de valores que expressam uma variância máxima, o que acontece à partir de uma certa distância. Denominando-se por patamar esta variância máxima, as distribuições que apresentam este comportamento são ditas como funções variogramas com patamar.

Denomina-se alcance ou amplitude (*range*) de um variograma a distância segundo a qual  $\gamma(h)$  atinge o nível do patamar (*sill*). A altura alcançada pelo patamar é denominada soleira que, por sua vez, é representada pela soma das parcelas  $C + C_0$ . O efeito pepita, representado por  $C_0$ , é causado pela variância aleatória enquanto que a altura  $C$  é denominada variância espacial e é produzida pela própria variabilidade experimental dos dados. Estas informações podem ser visualizadas graficamente na Figura 73.

De acordo com Correia (2010), o efeito pepita é por vezes inserido quando são usados modelos gaussianos, para evitar más estimações devido a descontinuidades nas zonas mais próximas da origem. Ainda segundo Correia (2010), na maioria dos casos, usando o modelo exponencial ou potencial este efeito é negligenciável.



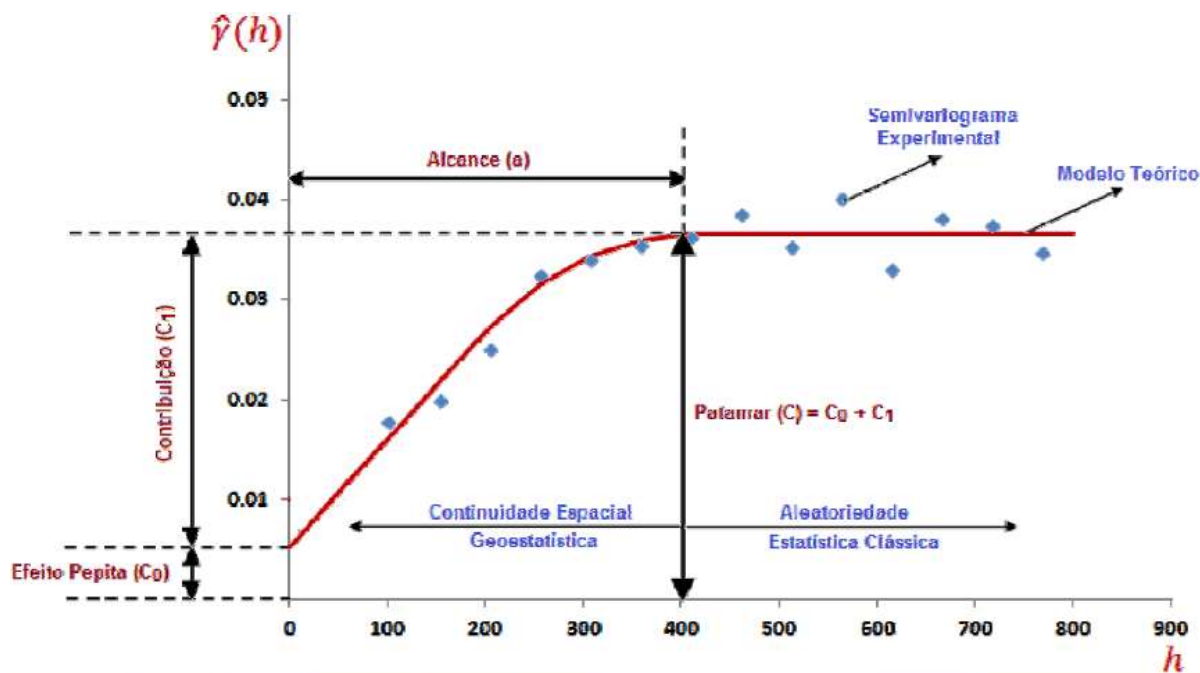


Figura 73 - Variogramas experimentais calculados para direções N-S e L-O (Correa, 2010)

Os modelos teóricos de variogramas com patamar mais utilizados e encontrados na literatura são apresentados na Tabela 25.

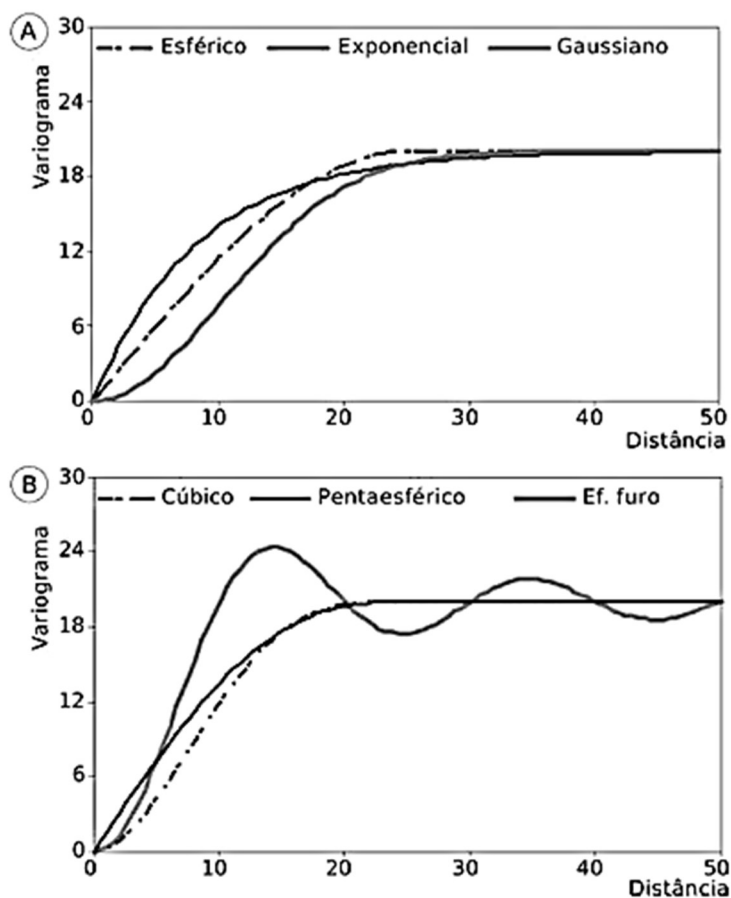
Tabela 25 - Modelos teóricos de variograma com patamar (Olea, 1999 apud Yamamoto)

Modelo	Equação
Esférico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp \left( -\frac{h}{a} \right) \right]$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp \left( -\left( \frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$
Cúbico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[ 7 \left( \frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^7 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Pentaesférico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{15}{8} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{5}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^3 + \frac{3}{8} \left( \frac{h}{a} \right)^5 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Efeito furo	$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \frac{\text{sen} \pi(h/a)}{\pi(h/a)} \right]$

O modelo de variograma do tipo esférico é provavelmente o mais utilizado devido ao seu comportamento linear a pequenas distâncias próximas à origem.

Assim como o modelo esférico, o modelo exponencial também é muito utilizado e caracteriza-se não somente pela sua linearidade próximo a origem, como também pelo seu crescimento mais rápido até o patamar, o qual é atingido assintoticamente.

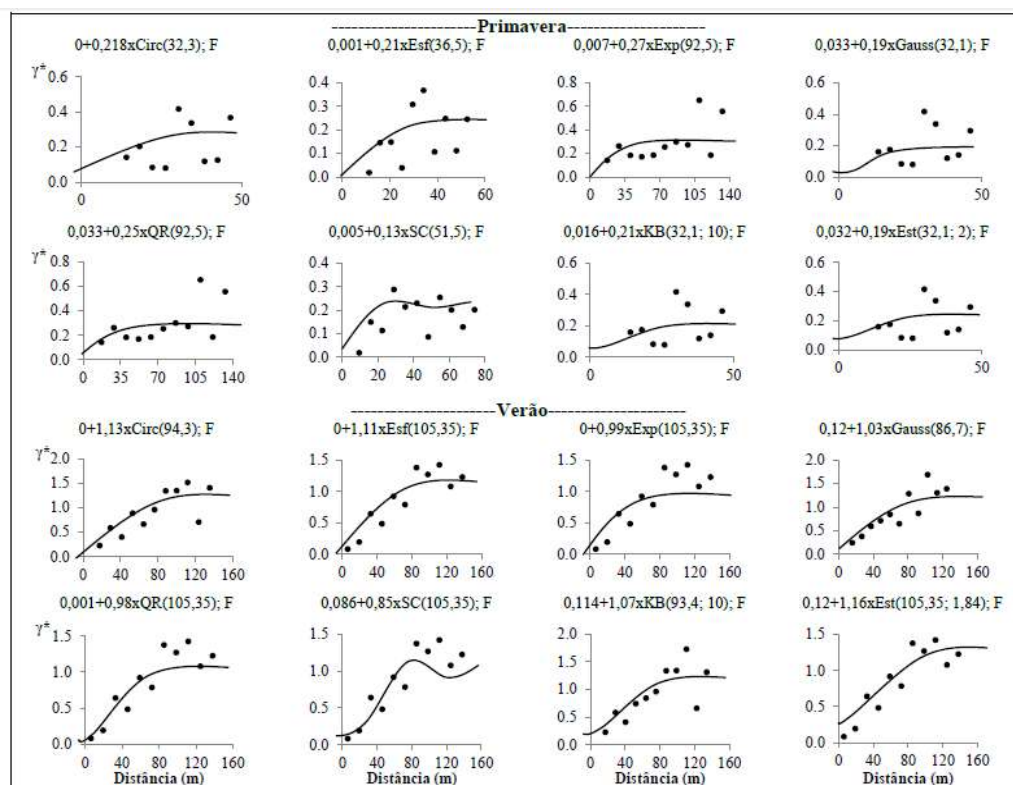
O modelo gaussiano tem como característica um comportamento parabólico junto à origem, sendo utilizado para fenômenos extremamente contínuos.



**Figura 74 - Modelos teóricos de variograma com patamar conforme equações disponíveis em Olea (1999), (Olea,1999 apud Yamamoto)**

Para efeito de exemplificação prática, Pasini *et al* (2011) desenvolveram publicação acadêmica como resultado de estudo sobre variabilidade espacial da incidência de população de insetos em diferentes períodos do ano, através de unidades amostrais. Para definição dos modelos teóricos de variogramas mais

adequados foram plotados diversos gráficos  $\gamma(h)$  x  $h$ , o que resultou em diferentes padrões para cada estudo, evidenciando a importância da escolha do modelo adequado em função do comportamento da dependência espacial. A Figura 75 ilustra claramente esta questão.



**Figura 75 - Modelos teóricos de variogramas de uma população de insetos em duas épocas do ano , para efeito de exemplificação (Pasini et al, 2011)**

### 3.4 Estimativas geoestatísticas

O objetivo principal deste capítulo é apresentar a formulação matemática das estimativas geoestatísticas. Um dos métodos de estimação ou aproximação de dados muito utilizado é o da Krigagem, que tem como característica particular o fato de permitir o cálculo do erro associado às estimativas, chamado de variância de estimação. A denominação Krigagem é uma homenagem ao idealizador do método, o pesquisador Daniel G. Krige, que produziu diversos trabalhos em minas na África do Sul nos anos 60, consagrando-se na resolução

de problemas envolvendo interpolação de variáveis regionalizadas que possuem dependência espacial. Para tanto, se faz necessário determinar os valores numéricos dos estimadores que serão abordados neste capítulo.

Através da análise variográfica, que leva em conta aspectos geométricos e o peso entre as amostras, calculam-se as distâncias entre pontos vizinhos e, a partir daí, determina-se o algoritmo estimador.

Dependendo do sistema de krigagem adotado para se determinar os ponderadores o método é classificado como simples, média ou ordinária. No caso da krigagem ordinária utiliza-se a krigagem simples com a média local calculada pela krigagem da média.

O estimador utilizado pelos métodos de interpolação de dados pode ser linear, quando as estimativas são realizadas através de uma combinação linear de dados sendo diretamente proporcionais à covariância de uma amostra e o local estimado. Caso contrário os estimadores serão considerados não lineares.

A krigagem não linear não será abordada nesta tese, caso em que seria necessário também apresentar outros tipos de krigagem como por exemplo a multigaussiana, lognormal e indicadora. Esta última (krigagem de variáveis indicadoras), só a título de conhecimento, seria adequada no caso da presença de poucos valores altos na interpolação de regiões com valores baixos e foi proposta por Journel (1983).

Segundo Sturaro (1994), a krigagem ordinária (resultado da combinação da krigagem simples e da média) é considerada o melhor estimador linear sem viés. A expressão “sem viés” significa que o erro residual da estimativa seja mínimo, com tendência à zero.

### 3.4.1 Krigagem simples ou estacionária

Journel (1989) propôs uma estimativa linear ponderada para um ponto não amostrado denominado  $x_0$ , sendo  $n$  o número de valores obtidos nos pontos adjacentes (adaptado de Yamamoto e Landim, 2013):

$$Z_{kS}(x_0) = m_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot [Z(x_i) - m_i] \quad (84)$$

em que  $m_i = E[Z(x_i)]$  são as médias, admitidas como conhecidas,  $m_0$  e  $\lambda_i$ , ( $i=1,n$ ) são os pesos associados aos  $n$  dados. No caso de variáveis regionalizadas, a localidade não amostrada, bem como os pontos amostrados, faz parte de uma função aleatória. Sob a condição de estacionaridade de 2ª ordem, a média e a variância de todos os locais são constantes, dependendo apenas das distâncias euclidianas que os separam:

$$E[Z(x)] = m \quad (85)$$

$$E[(Z(x) - m) \cdot (Z(x+h) - m)] = E[Z(x) \cdot Z(x+h) - m^2] = C(h) \quad (86)$$

Assim, o estimador da krigagem simples é calculado (Olea,1999, apud Yamamoto e Landim,2013) :

$$Z_{KS}^*(x_0) = m + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot [Z(x_i) - m] \quad (87)$$

O problema consiste em determinar os pesos ótimos da krigagem simples da equação (87). Para sua solução, segundo Olea (1999, apud Yamamoto e Landim,2013), define-se uma nova função aleatória, que é a diferença entre a função aleatória  $Z(x)$  e a sua média :

$$Y(x) = Z(x) - E[Z(x)] \quad (88)$$

em que  $E[Y(x)]=0$ . Assim, a equação (88) faz a estimativa dos resíduos.

De acordo com Olea,(1999 apud Yamamoto e Landim, 2013), a covariância de  $Z(x)$  é admitida igual à covariância de  $Y(x)$ :

$$\text{Cov}(x_i, x_j) = \text{Cov}_Y(x_i, x_j) = E[Y(x_i) \cdot Y(x_j)] \quad (89)$$

E a variância do erro é igual a:

$$\sigma^2(x_0) = \text{Var}[Z_{KS}^*(x_0) + Z(x_0)] \quad (90)$$

que pode ser reescrita em termos dos resíduos:

$$\sigma^2(x_0) = Var \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Y(x_i) - Y(x_0) \right] \quad (91)$$

Fazendo  $\lambda_0 = -1$ , essa expressão torna-se (Olea,1999, apud Yamamoto e Landim, 2013):

$$\sigma^2(x_0) = Var \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Y(x_i) \right] \quad (92)$$

A variância de uma combinação linear pode ser desenvolvida, segundo este autor, como:

$$\begin{aligned} Var \left[ \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot Y(x_i) \right] \\ = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot \{E[Y(x_i) \cdot Y(x_j)] - E[Y(x_i)] \cdot E[Y(x_j)]\} \end{aligned} \quad (93)$$

Como  $E[Y(x_i)] = E[Y(x_j)] = 0$ , então a variância do erro torna-se:

$$\sigma^2(x_0) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot Cov[Y(x_i), Y(x_j)] \quad (94)$$

Ainda de acordo com Olea (1999), separando-se os termos  $i=0$  e  $j=0$ , tem-se a variância do erro:

$$\begin{aligned} \sigma^2(x_0) = Cov(x_0, x_0) - 2 \cdot \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Cov(x_i, x_0) \right] \\ + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot Cov(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (95)$$

O conjunto de ponderadores ótimos da krigagem simples é obtido pela minimização da variância do erro e, para se determinar o ponto de mínimo da função variância do erro, calculam-se as derivadas parciais em relação aos pesos  $\lambda_i$  e igualam-se a zero (Olea,1999 apud Yamamoto e Landim, 2013):

$$\frac{d\sigma^2(x_0)}{d\lambda_i} = -2 \cdot Cov(x_i, x_0) + 2 \cdot \sum_{j=1, n}^n \lambda_j \cdot Cov(x_i, x_j) \quad \text{para} \quad (96)$$

que resulta no sistema de equações:

$$\sum_{j=1, n}^n \lambda_j \cdot Cov(x_i, x_j) = Cov(x_i, x_0) \quad \text{para } i=1, n \quad (97)$$

O sistema de equações pode ser escrito em termos matriciais, cuja resolução resulta nos ponderadores da krigagem simples (Yamamoto e Landim, 2013):

$$\begin{pmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \end{pmatrix} \quad (98)$$

### 3.4.2 Krigagem da média

Como nem sempre a média pode ser considerada constante por todo o espaço amostral, existe a necessidade em se estima-la em torno de uma região caracterizada por vizinhança com  $n$  pontos mais próximos, cujas alturas, (no caso, valores de probabilidade  $Z(x_i)$ ) são conhecidas, sendo  $i=1, n$ .

Segundo Wackernagel (1995, apud Yamamoto e Landim, 2013), o valor da média a ser estimada em torno dos pontos de vizinhança conhecidos, será:

$$m^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} Z(x_i) \quad (99)$$

Sendo  $E[Z(x)] = m$  a média em toda a região. O erro de estimativa ( $m^* - m$ ) deve ser considerado igual a zero:

$$E[m^* - m] = 0 \quad (100)$$

O que implica à seguinte condição de não viés:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} = 1 \quad (101)$$

A variância do erro de estimativa pode ser desenvolvida em termos da função covariância:

$$\text{Var} [m^* - m] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i^{KM} \cdot \lambda_j^{KM} \cdot C(x_i - x_j) \quad (102)$$

Ainda de acordo com Wackernagel (1995, apud Yamamoto e Landim, 2013) é necessário minimizar a variância do erro de estimativa sujeita à condição de não viés com objetivo de se encontrar ponderadores ótimos e, ao fazê-lo, encontra-se uma função contendo o multiplicador de Lagrange definido por  $\mu$ . Deve-se, portanto, igualar a zero as derivadas parciais da função, resultando num sistema de  $n+1$  equações, denominadas Krigagem da média:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^{KM} C(x_i - x_j) - \mu_{KM} \quad \text{para } i = 1, n \quad \text{e} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KM} = 1 \quad (103)$$

Considerando-se que a variância de estimativa da Krigagem da média é igual ao próprio multiplicador de Lagrange (Wackernagel, 1995, apud Yamamoto e Landim, 2013):

$$\sigma_{KM}^2 = \mu_{KM} \quad (104)$$

Substituindo agora a média estimada na equação (87), em substituição a média conhecida e constante:

$$Z_{KS}^*(x_0) = m_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot [Z(x_i) - m_i] = \quad (105)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} Z(x_i) + \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KS} \cdot [Z(x_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} Z(x_0)] \quad (106)$$

Ou ainda:

$$Z_{KS}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i^{KM} + (1 - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KS}) \cdot \lambda_i^{KM}] \cdot Z(x_i) \quad (107)$$

sendo:



$$(1 - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KS}) \quad (108)$$

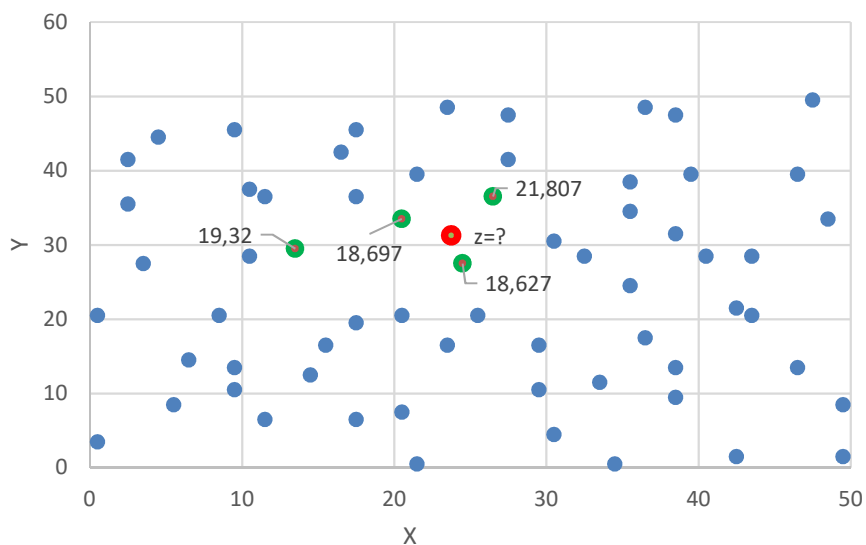
chamado de peso da média, e

$$[\lambda_i^{KM} + (1 - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KS}) \cdot \lambda_i^{KM}] \quad (109)$$

Denominado peso da krigagem ordinária. Verifica-se, então, que a krigagem ordinária nada mais é que a krigagem simples com a média calculada localmente, por meio da krigagem da média (Yamamoto et Landim, 2013).

Como exemplo prático de aplicação de krigagem da média, pode-se considerar uma situação proposta por Yamamoto e Landim (2013) em que se têm 4 pontos com valores conhecidos e, com eles, deseja-se determinar o valor em um ponto de coordenadas (23,75;31,25).

Os valores das coordenadas dos pontos conhecidos estão representados na Tabela 26 e os pontos estão plotados na Figura 76 com os valores respectivos (x,y,z).



**Figura 76 - Mapa de localização dos vizinhos próximos ao ponto de coordenadas (x=23,75; y=31,25)**

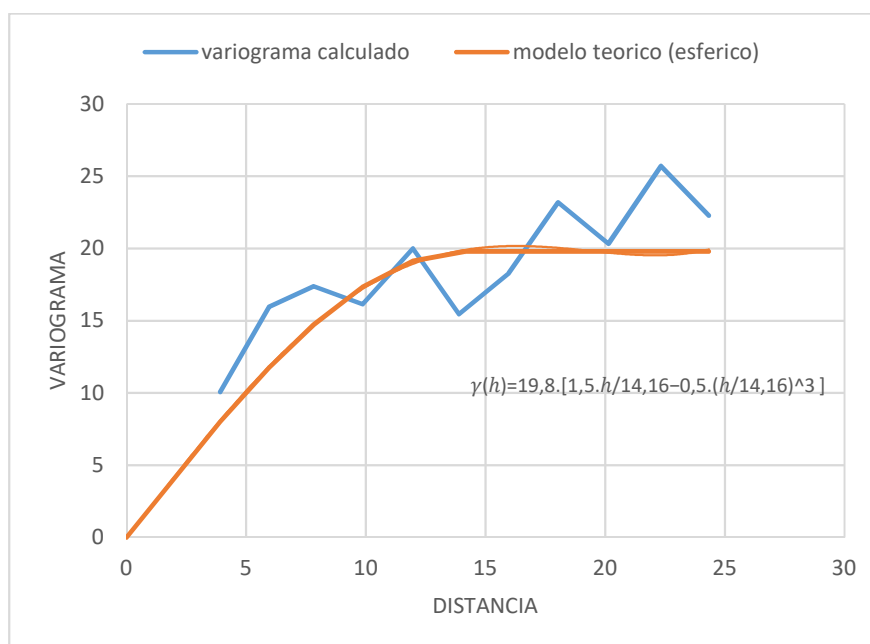
**Tabela 26 - Apresentação das coordenadas dos pontos vizinhos ao ponto que se deseja obter coordenada z por interpolação com utilização da krigagem da média (adaptado de Yamamoto e Landim, 2013)**

X	Y	Z
13,5	29,5	19,32
24,5	27,5	18,627
20,5	33,5	18,697
26,5	36,5	21,807
23,75	31,25	?

O modelo teórico de variograma encontrado após determinação e plotagem de diversos pontos  $\gamma(h)$  x  $h$  da matriz de pontos conhecidos é apresentado a seguir, e a figura 74, com base na equação abaixo:

$$\gamma(h) = 19,8 \cdot \left[ 1,5 \cdot \frac{h}{14,16} - 0,5 \cdot \left( \frac{h}{14,16} \right)^3 \right], \text{ para } h < 14,16, \text{ e}$$

$$\gamma(h) = 19,8 \text{ para } h \geq 14,16$$



**Figura 77 - Modelos de variograma teórico e experimental**

Desse modo, o modelo da função covariância torna-se

:

$$C(h) = 19,8 - 19,8 \cdot \left[ 1,5 \cdot \frac{h}{14,16} - 0,5 \cdot \left( \frac{h}{14,16} \right)^3 \right], \text{ para } h < 14,16, \text{ e}$$

$$C(h) = 0 \text{ para } h \geq 14,16$$

Com isso, utilizando-se recursos do programa MatCad 15.0 pode-se montar o sistema de equações de krigagem da média (equação (103)), com segue:

$$\begin{pmatrix} 19,8 & 6,782 & 0 & 3,195 & 1 \\ 6,782 & 19,8 & 4,717 & 5,983 & 1 \\ 0 & 4,717 & 19,8 & 1,223 & 1 \\ 3,195 & 5,983 & 1,223 & 19,8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \\ -\mu \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 3,195 \cdot W - \mu + 6,782 \cdot Y + 19,8 \cdot X \\ 5,983 \cdot W - \mu + 6,782 \cdot X + 4,717 \cdot Z + 19,8 \cdot Y \\ 4,717 \cdot Y - \mu + 1,223 \cdot W + 19,8 \cdot Z \\ 5,983 \cdot Y - \mu + 3,195 \cdot X + 19,8 \cdot W + 1,223 \cdot Z \\ W + X + Y + Z \end{pmatrix}$$

Given

$$\begin{aligned} 3,195 \cdot W - \mu + 6,782 \cdot Y + 19,8 \cdot X &= 0 \\ 5,983 \cdot W - \mu + 6,782 \cdot X + 4,717 \cdot Z + 19,8 \cdot Y &= 0 \\ 4,717 \cdot Y - \mu + 1,223 \cdot W + 19,8 \cdot Z &= 0 \\ 5,983 \cdot Y - \mu + 3,195 \cdot X + 19,8 \cdot W + 1,223 \cdot Z &= 0 \\ X + Y + Z + W &= 1 \end{aligned}$$

$$\text{Find}(X, Y, Z, W, \mu) \rightarrow \begin{pmatrix} 0,28919813542762234315 \\ 0,11247443414268850243 \\ 0,32786535370103440954 \\ 0,27046207672865474487 \\ 7,3530510289706877278 \end{pmatrix}$$

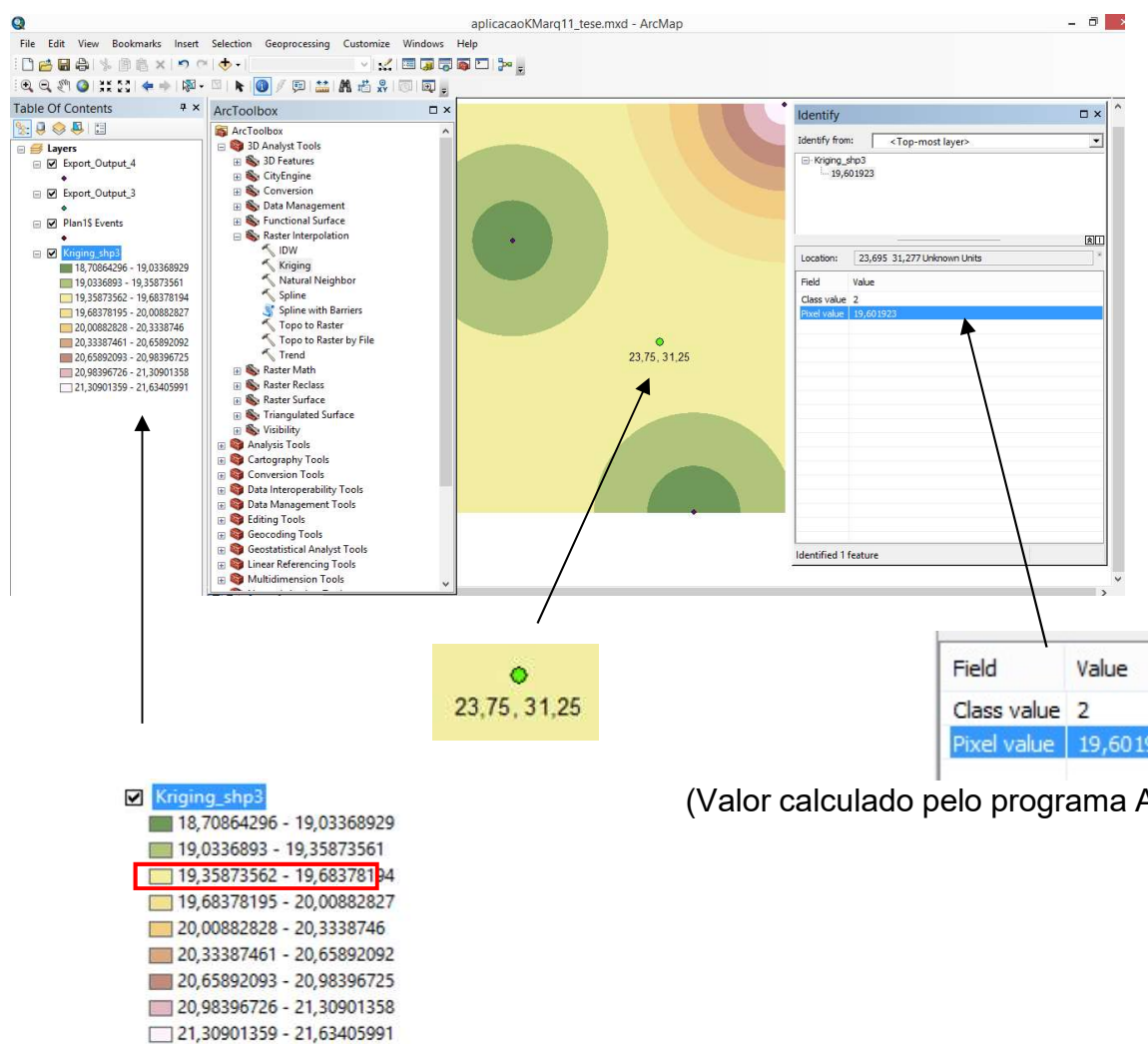
Desta forma, são obtidos os ponderadores da krigagem da média:

$$\begin{aligned} \lambda_1^{KM} = X &= 0,28920 & \lambda_3^{KM} = Z &= 0,32787 \\ \lambda_2^{KM} = Y &= 0,11247 & \lambda_4^{KM} = W &= 0,27047 \\ \mu = -\mu_{KM} &= 7,35305 \end{aligned}$$

Substituindo os ponderadores na equação (99), tem-se a média estimada em torno do ponto de coordenadas ( $x=23,75$ ;  $y=31,25$ ):

$$m^* = 0,28920 \cdot (21,807) + 0,11247 \cdot (18,697) + 0,32787 \cdot (19,320) + 0,27047 \cdot (18,627) = 19,682 \text{ (valor calculado analiticamente por Krigagem)}$$

Os cálculos acima de interpolação por krigagem da média (adaptados de Yamamoto e Landim, 2013) podem ser comprovados através de modelo numérico através de programa de computador com base em Sistema de Informações Geográficas (ArcGis), conforme ilustrado na Figura 78. A classe 2, a que se refere a saída de dados do programa, trata dos valores de probabilidades (z) situados entre 19,36 e 19,68, justamente onde está situado o ponto de coordenadas (23,75 ; 31,25). A modelagem foi ajustada para 9 classes, ou seja, nove intervalos de probabilidades.



**Figura 78 - Resultado da interpolação por krigagem ordinária e função variograma esférica**

## 4 MODELAGEM DO MAPA DE SUSCEPTILIDADE AO RISCO DA COMUNIDADE DA ROCINHA

### 4.1 Critério de seleção de laudos de ocorrência e eventos chuvosos

A primeira etapa dos estudos estatísticos foi analisar o extenso banco de dados, fornecidos gentilmente pela Diretoria de Fiscalização e Licenciamento (DFL) da Fundação GEORIO, referentes aos laudos de vistoria existentes na comunidade da Rocinha, desde os anos 60 até os dias atuais.

Esses laudos foram produzidos ao longo de diversos eventos chuvosos e a maior parte deles está associada aos grandes desastres naturais, devidos a chuvas intensas sobre os maciços, provocando expressivos movimentos de massa de elevado poder destrutivo.

Como resultado, observou-se que os eventos chuvosos mais recentes, associados a desastres naturais, relevantes, na cidade do Rio e, conseqüentemente na comunidade da Rocinha, ocorreram em 1966, 1988, 1996 e 2010 (até jan/2011).

Para atender aos estudos estatísticos, foram estabelecidas algumas premissas para seleção dos laudos de ocorrência; a saber:

- ✓ Priorizar grandes eventos chuvosos que atingiram a cidade do Rio de Janeiro mais especificamente o Maciço da Tijuca, incluindo as suas comunidades, inclusive a da Rocinha, objeto de estudo deste trabalho;
- ✓ Entre os eventos chuvosos significativos, desconsiderar as vistorias de períodos, em que o número de laudos era reduzido a ponto de inviabilizar o tratamento estatístico dos dados;
- ✓ Desconsiderar os laudos, cuja localização da ocorrência não estava bem documentada, seja pela ausência de geo-referenciamento (via GPS), seja pela descrição do endereço incompleto, com numeração duvidosa, ou sem referência conhecida. A seleção desses laudos diminuiria a

confiabilidade do cálculo de probabilidade, mascarando a eficiência do método;

Os eventos chuvosos associados ao ano de 1966, apesar de terem produzidos expressivos escorregamentos e demais movimentos de massa nas encostas da cidade e da própria rocinha, não foram considerados devido a quase total ausência de laudos de ocorrência, o que impedia estudo numérico e até mesmo qualitativo. Neste caso, o ano de 1966 foi eliminado do estudo devido a premissa 2).

As chuvas de 1996 atingiram elevados índices pluviométricos, comparáveis aos da região serrana (250mm/h), ocorridos em janeiro de 2011. Foram registrados vários escorregamentos causando mortes de centenas de pessoas, inclusive nas encostas ocupadas desordenadamente. Entretanto, a má qualidade das informações relativas a localização das ocorrências, não garantia confiabilidade no tratamento estatístico. Por outro lado, este período concentrou eventos pluviométricos significativos e, portanto, seus dados foram analisados estatisticamente e apresentados com as devidas ressalvas.

No ano de 2010 (incluindo janeiro de 2011) as chuvas causaram catástrofes relacionadas aos escorregamentos de terra, com elevado potencial destrutivo em todas as vertentes da Rocinha. Os índices pluviométricos alcançaram patamares da ordem de 288mm/h (em abril). Os laudos de ocorrência em 2010 constituíram uma importante base de dados desta pesquisa, não só pela quantidade de laudos, mas também pela qualidade das informações neles contidas. Neste período houve registros de acidente geotécnico distribuídos espacialmente por todas as vertentes da Rocinha.

Entre os anos de 2011 (desde fevereiro) e 2014 não foram registrados grandes eventos chuvosos, nem grandes ocorrências relacionadas aos movimentos de massa. Assim sendo, optou-se pelo agrupamento de todos os laudos do período 2011-2014. Pode-se dizer que, apesar da inexistência de catástrofes dignas de registros, o número de ocorrências contribuiu favoravelmente ao cálculo das probabilidades.

Embora as ocorrências do ano de 2015 e 2016 tenham sido disponibilizadas para elaboração desta tese, optou-se por não utilizá-las neste momento, devido à forte influência das obras de contenção realizadas na

encosta da Rocinha. O estudo do impacto das obras nos mapas de susceptibilidade ao risco é um assunto a ser tratado de modo particularizado num outro escopo de trabalho.

#### 4.2 Classificação do risco geotécnico

Após seleção criteriosa de laudos de ocorrência por período de estudo (1996, 2010 e 2011-2014), cada laudo selecionado recebeu uma classificação de risco, de acordo com a gravidade do movimento de massa associado àquela ocorrência.

Para tal, foi estabelecido um critério de classificação, que define a classe de gravidade do dano (alto, médio e baixo) associada à susceptibilidade ao risco (1, 2 ou 3), como mostra a Tabela 27.

**Tabela 27 - Critérios para estabelecimento da classe de susceptibilidade ao risco com base na avaliação dos laudos de ocorrências propostos nesta tese (Figura 39 a Figura 44)**

Classificação		Característica
Risco	Dano	
1	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No item 7.5 (laudo antigo) ou item 7.2.1 (laudo novo): risco alto preenchido pelo vistoriador;</li> <li>- Volume de solo mobilizado &gt; 100m<sup>3</sup>;</li> <li>- Possibilidade de ruptura global junto à área ocupada;</li> <li>- Local com histórico de escorregamentos ou desprendimento de blocos;</li> <li>- Ocorrência junto a talvegues;</li> <li>- Taludes que apresentam trincas de tração ou qualquer outra evidência de movimentação;</li> <li>- Áreas de taludes desprotegidos/desmatados com declividade acentuada, e capa de solo coluvionar/residual maduro sobre superfície rígida de solo residual jovem/rocha;</li> <li>- Taludes com concentração de blocos instáveis à montante de logradouros públicos ou moradias;</li> <li>- Demais situações que podem ser classificadas de modo qualitativo como de perigo humano ou dano material relevante, à critério do engenheiro ou geólogo responsável pela vistoria</li> </ul>
2	Médio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Item 7.5 (laudo antigo) ou item 7.2.1 (laudo novo): risco médio preenchido pelo vistoriador;</li> <li>- Qualquer ocorrência associada a danos humanos ou materiais, que não estejam enquadradas nas características da classe 1.</li> </ul>

(continuação da tabela 27)

3	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Item 7.5 (laudo antigo) ou item 7.2.1 (laudo novo): risco baixo preenchido pelo vistoriador;</li> <li>- Qualquer ocorrência não associada à danos humanos ou materiais e que não estejam enquadradas nas características da classe 1 e 2.</li> </ul>
---	-------	---

Cabe salientar que às ocorrências envolvendo mais de um local/residência foram atribuídos pesos proporcionais ao número de autuações, de modo a ponderar a gravidade de cada situação.

Deve-se também observar que, em todos os laudos onde foi possível avaliar, qualitativamente, as gravidades dos acidentes geotécnicos, esta análise prevaleceu, ainda que, no preenchimento da avaliação do risco pelo profissional responsável pela vistoria, houvesse alguma divergência de informação, atribuída à falha no preenchimento do laudo.

Para minimizar o caráter subjetivo na escolha da classificação, em situações com duplicidade de características, considerou-se simultaneamente duas classes para o mesmo evento. Estas situações diferem-se daquelas citadas anteriormente, onde o erro no preenchimento da classificação do risco era evidente.

De qualquer forma, importante registrar que o critério utilizado para classificação das ocorrências quanto aos danos causados foi sempre aquele estabelecido pela Tabela 27, proposta exclusivamente para fins desta pesquisa.

Embora, na presente pesquisa, o autor tenha procurado minimizar as atribuições de cunho subjetivo no cálculo das probabilidades, os critérios acima demonstram claramente a importância do julgamento pessoal do profissional especialista no cálculo dessas probabilidades. Portanto, a disponibilidade de laudos de vistoria confiáveis, elaborados por engenheiros geotécnicos ou geólogos de engenharia, especializados em estabilidade de encostas é imprescindível ao desenvolvimento dos estudos propostos.

#### 4.3 Distribuição espacial das ocorrências

Incontestavelmente, para a localização das ocorrências, a melhor ferramenta é a utilização de coordenadas georeferenciadas, fornecidas por equipamento GPS devidamente calibrado. Entretanto, na grande maioria das



vistorias este recurso não foi utilizado, o que diminui a precisão na locação de pontos. Entretanto, como todos os locais da comunidade são bem conhecidos, o erro associado à localização exata da ocorrência é considerado desprezível. De qualquer forma, casos de laudos de ocorrência cujo endereço foi considerado duvidoso ou de difícil localização foram expurgados do banco de dados utilizado neste trabalho.

De modo a simplificar o trabalho de localização de alguns pontos periféricos (travessas e becos) e até mesmo para viabilizar a utilização do maior número de ocorrências possível, dentro do que já foi discutido com relação à confiabilidade das informações, elegeu-se pontos centrais de ocorrência de acidentes geotécnicos denominados por  $L1$ ,  $L2$ , ... $L_n$ , em torno dos quais as ocorrências mais próximas podem se agrupar. A Figura 79 apresenta a locação dos pontos centrais de referência ( $L_n$ ) para cada ano/período proposto.

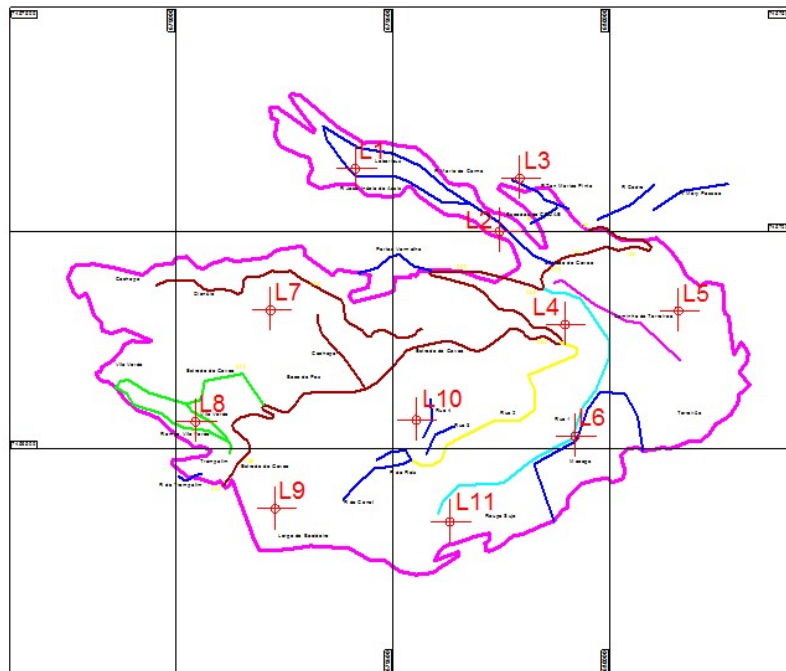
Pode-se observar que, no ano de 2010, alguns pontos (em vermelho) correspondentes às ocorrências de 1996 permanecem plotados. Isto porque, nos eventos chuvosos de 2010, alguns locais onde aconteceram acidentes coincidem com aqueles das chuvas de 1996.

Entretanto, alguns locais considerados no mapa de 1996 já não aparecem mais no de 2010, devido à ausência de ocorrências nestas localidades nos eventos de 1996.

A mesma consideração se aplica ao mapa de 2011-2014 com relação a alguns pontos do mapa de 1996 e 2010.

A localização de modo georeferenciado de todos os 27 pontos estudados está mostrada na figura 77 sobre ortofoto da comunidade da Rocinha. Esta figura reproduz a distribuição espacial dos pontos de referência  $L_n$  por todas as vertentes da região do maciço em estudo, em todos eventos chuvosos significativos que ocorreram entre de 1996 à 2014.

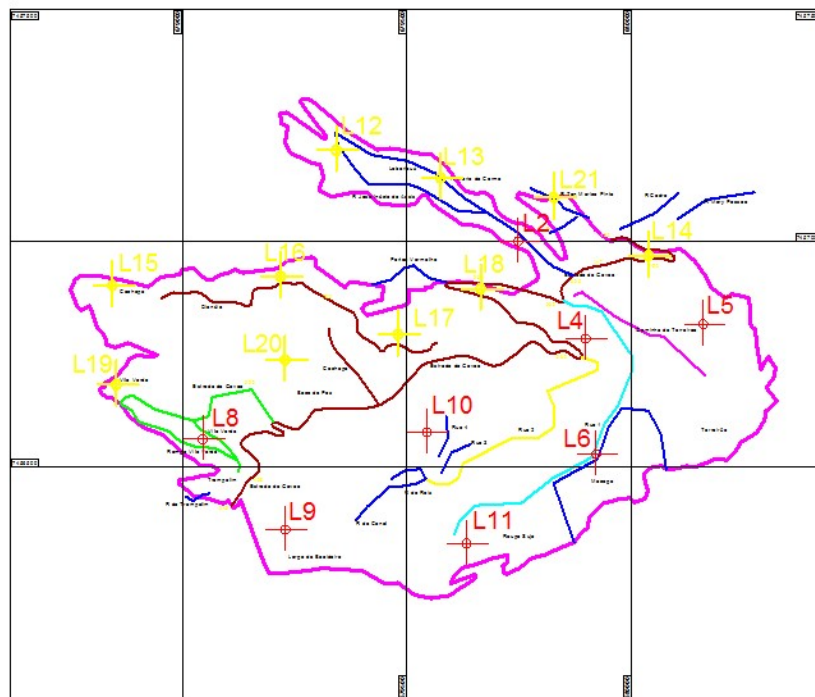
1996



(a) 1996

2010

1996 E 2010



(b) 2010

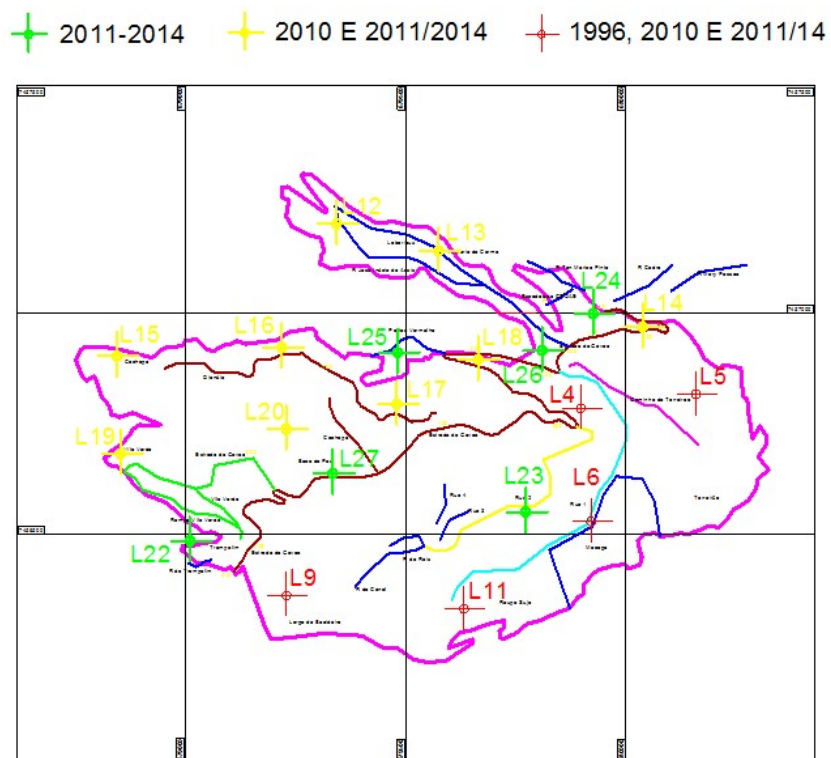
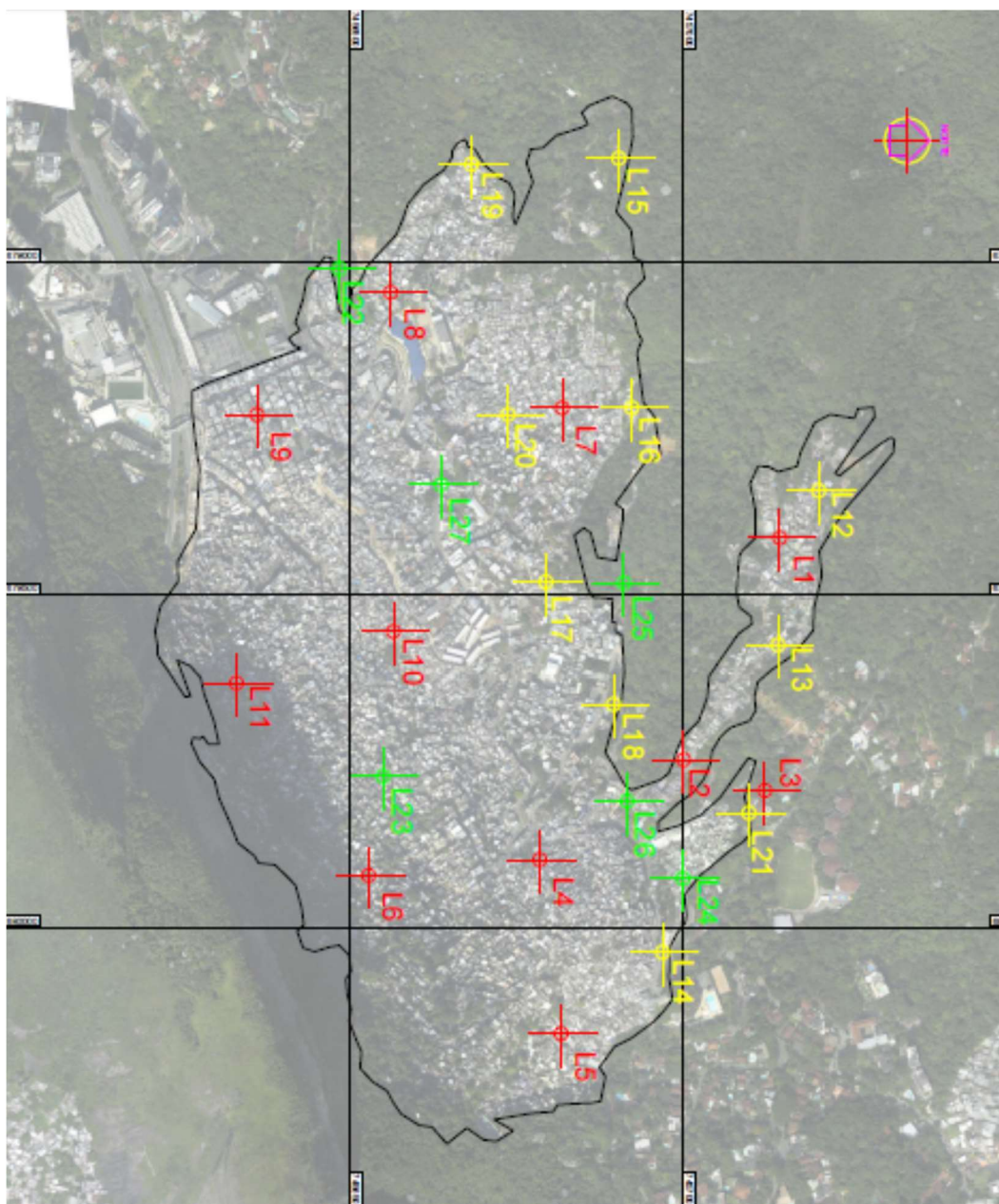


Figura 79 - Localização dos pontos de referência centrais (Ln) para ocorrências de



**Figura 80 - Distribuição espacial de pontos de referência centrais, em torno dos quais concentram-se todas as ocorrências geotécnicas da Rocinha entre 1996-2014**

Conforme já relatado, em alguns locais  $L_n$  existe registro de ocorrência recorrente em mais de um ano/período, o que explica a sua repetição no mapa de localização.

A relação detalhada dos laudos por período de estudo, com as respectivas informações referentes a data da ocorrência, nº do laudo/boletim de ocorrência,

endereço, localização ( $L_i$ ), e classificação do risco (1 à 3) está apresentada no Anexo 0.

#### 4.4 Cálculo das probabilidades de danos associados aos escorregamentos

A probabilidade de susceptibilidade ao risco associado aos movimentos de massa será calculada pontualmente, ou seja, para cada local  $L_n$  ( $L_1, L_2, L_3..$ ) em separado, distribuídos por toda a superfície do maciço, que compreende a comunidade da Rocinha, levando-se em conta o histórico de ocorrências de cada classe de agressividade.

Para o cálculo das probabilidades nos pontos centrais de ocorrência, utiliza-se a equação (70) desenvolvida no capítulo 3, de forma similar ao exemplo numérico apresentado ao final do item 3.10. Exemplificação prática será apresentada logo adiante após maiores esclarecimentos a respeito dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  necessários ao cálculo da probabilidade.

Em cada ano/período considerado (1996, 2010 ou 2010-2014) serão calculadas as probabilidades de ocorrência das classes 1, 2 e 3, respectivamente denominadas  $Pr_1, Pr_2$  e  $Pr_3$ , por ponto estudado ( $L_n$ ).

Dessa forma, para determinado período que compreende os eventos chuvosos, calculam-se os valores de probabilidade a partir da equação 70, que representa aplicação do Teorema de Bayes através da utilização conjunta das distribuições Binomial e Beta. A referida equação depende exclusivamente dos dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , estabelecidos como:

- ✓  $\alpha$  = eventos sem ocorrência ( $n^\circ$  de sucessos)
- ✓  $\beta$  = eventos com ocorrência ( $n^\circ$  de insucessos)

Conforme já exposto no Capítulo 2, a metodologia proposta para os cálculos de probabilidades tem a grande vantagem de fácil atualização dos dados em virtude das constantes alterações nas ocorrências em cada ponto do maciço. Esta mudança ocorre pela implementação de obras ou quaisquer outras medidas mitigadoras, ou mesmo por deteriorações dos padrões fisiográficos das diferentes vertentes do maciço ao longo do tempo

Os resultados detalhados do cálculo das probabilidades de cada ponto, por classe de agressividade, por período de estudo, estão reproduzidas em Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30.

Com vistas à aplicação da equação (70) à presente tese, apresenta-se um problema simples relacionado ao caso da comunidade da Rocinha.

Pode-se observar na 1ª linha da Tabela 28 que, de acordo com os critérios de seleção de laudos de vistoria, foram identificadas para o ponto central L<sub>2</sub> (incluindo agrupamento de locais vizinhos a ela):

- 6 ocorrências de classe 1 (riscos associados a danos altos);
- 2 ocorrências de classe 2 (riscos associados a danos médios)
- 2 ocorrências de classe 3 (riscos associados a danos baixos);

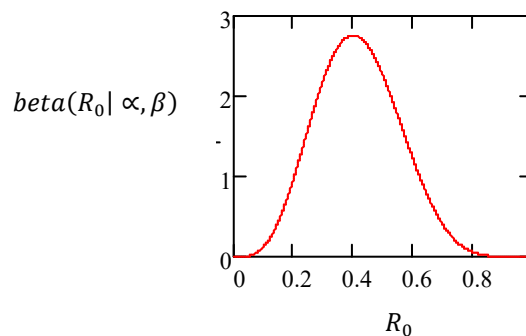
Com o objetivo de se calcular a probabilidade de ruína para danos considerados altos (Pr<sub>1</sub>) correspondente às ocorrências de 1996, para o ponto central L<sub>2</sub>, é necessário definir os valores dos parâmetros de  $\alpha$  e  $\beta$ , que representam, respectivamente, o número de sucessos e insucessos.

Entende-se por sucessos os eventos em que a classe 1 não se aplica (classe 2 e 3), ou seja, todas as ocorrências que geraram os laudos de vistoria no local L<sub>2</sub> e que não ensejaram ruptura e nenhuma outra característica (apresentada na Tabela 27) relativa à classe 1. Em contraposição, o número de insucessos representa eventos com pelo menos uma das características apresentadas na Tabela 27 como sendo classe 1, como, por exemplo, eventos com ruptura global, danos materiais e humanos relevantes (óbitos), etc.

Retornando para a 1ª linha da Tabela 28, de acordo com a formulação de Bayes, reproduzida na equação (70), para  $\alpha = 4$  e  $\beta = 6$  tem-se :

$$\begin{aligned} \text{beta}(R_0 | \alpha, \beta) &= \frac{(\alpha + \beta + 1)!}{\alpha! \beta!} \cdot R_0^\alpha (1 - R_0)^\beta \\ &= \frac{(4 + 6 + 1)!}{4! 6!} \cdot R_0^\alpha (1 - R_0)^\beta = 2310 \cdot R_0^4 (1 - R_0)^6 \end{aligned} \tag{110}$$

Variando a probabilidade de sucesso ( $R_0$ ) entre zero e 1, chega-se à função de distribuição mostrada na Figura 81.



**Figura 81 –Distribuição de confiabilidade de 4 sucessos e 6 insucessos ou falhas**

- A confiabilidade média (equação (69)) e variância (equação (70)) são determinadas respectivamente por:

$$\bar{R} = E[beta(R_0 | \alpha, \beta)] = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta + 2} = \frac{4 + 1}{4 + 6 + 2} = 0,417 \quad (111)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2[R] = Var[beta(R_0 | \alpha, \beta)] &= \frac{(\alpha + 1) \cdot (\beta + 1)}{(\alpha + \beta + 2)^2 \cdot (\alpha + \beta + 3)} \\ &= \frac{(4 + 1) \cdot (6 + 1)}{(4 + 6 + 2)^2 \cdot (4 + 6 + 3)} = 0,0064 \end{aligned} \quad (112)$$

- Finalmente, a probabilidade de ruína ( $P_{r1}$ ) é dada por

$$P_{r1} = P_{ruina} = 1 - \bar{R} = 0,583 \quad (113)$$

**Tabela 28 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos em  
1996**

	CLASSE			EVENTOS CHUVOSOS DE 1996								
	Nº OCORRÊNCIAS			$\alpha_1$	$\beta_1$	Pr <sub>1</sub>	$\alpha_2$	$\beta_2$	Pr <sub>2</sub>	$\alpha_3$	$\beta_3$	Pr <sub>3</sub>
	1	2	3									
L2	6	2	2	4	6	0,583	8	2	0,250	8	2	0,250
L4	0	2	1	3	0	0,200	1	2	0,600	2	1	0,400
L5	2	2	0	2	2	0,500	2	2	0,500	4	0	0,167
L6	1	4	2	6	1	0,222	3	4	0,556	5	2	0,333
L7	1	2	0	2	1	0,400	1	2	0,600	3	0	0,200
L8	2	2	1	3	2	0,429	3	2	0,429	4	1	0,286
L9	1	0	0	0	1	0,667	1	0	0,333	1	0	0,333
L10	0	1	0	1	0	0,333	0	1	0,667	1	0	0,333
L11	1	0	0	0	1	0,667	1	0	0,333	1	0	0,333



**Tabela 29 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos em  
2010**

	CLASSE			EVENTOS CHUVOSOS DE 2010								
	Nº OCORRENCIAS			$\alpha_1$	$\beta_1$	Pr <sub>1</sub>	$\alpha_2$	$\beta_2$	Pr <sub>2</sub>	$\alpha_3$	$\beta_3$	Pr <sub>3</sub>
	1	2	3									
L2	0	2	0	2	0	0,250	0	2	0,750	2	0	0,250
L4	0	6	0	6	0	0,125	0	6	0,875	6	0	0,125
L5	0	20	0	20	0	0,045	0	20	0,955	20	0	0,045
L6	1	2	0	2	1	0,400	1	2	0,600	3	0	0,200
L8	0	2	0	2	0	0,250	0	2	0,750	2	0	0,250
L9	0	6	0	6	0	0,125	0	6	0,875	6	0	0,125
L10	0	0	1	1	0	0,333	1	0	0,333	0	1	0,667
L12	0	17	0	17	0	0,053	0	17	0,947	17	0	0,053
L13	0	6	0	6	0	0,125	0	6	0,875	6	0	0,125
L14	2	13	0	13	2	0,176	2	13	0,824	15	0	0,059
L15	4	18	0	18	4	0,208	4	18	0,792	22	0	0,042
L16	8	21	1	22	8	0,281	9	21	0,688	29	1	0,063
L17	0	6	1	7	0	0,111	1	6	0,778	6	1	0,222
L18	1	11	0	11	1	0,143	1	11	0,857	12	0	0,071
L19	5	14	0	14	5	0,286	5	14	0,714	19	0	0,048
L20	0	1	0	1	0	0,333	0	1	0,667	1	0	0,333
L21	0	5	0	5	0	0,143	0	5	0,857	5	0	0,143

**Tabela 30 - Planilha de cálculo de probabilidades de risco eventos entre  
2011 e 2014**

	CLASSE			EVENTOS CHUVOSOS DE 2011-2014								
	Nº OCORRENCIAS			$\alpha_1$	$\beta_1$	Pr <sub>1</sub>	$\alpha_2$	$\beta_2$	Pr <sub>2</sub>	$\alpha_3$	$\beta_3$	Pr <sub>3</sub>
	1	2	3									
L4	0	2	1	3	0	0,200	1	2	0,600	2	1	0,400
L5	0	4	3	7	0	0,111	3	4	0,556	4	3	0,444
L6	0	2	1	3	0	0,200	1	2	0,600	2	1	0,400
L9	1	2	0	2	1	0,400	1	2	0,600	3	0	0,200
L11	1	0	1	1	1	0,500	2	0	0,250	1	1	0,500
L12	2	8	3	11	2	0,200	5	8	0,600	10	3	0,267
L13	0	3	3	6	0	0,125	3	3	0,500	3	3	0,500
L14	1	9	1	10	1	0,154	2	9	0,769	10	1	0,154
L15	0	5	1	6	0	0,125	1	5	0,750	5	1	0,250
L16	0	2	0	2	0	0,250	0	2	0,750	2	0	0,250
L17	0	6	1	7	0	0,111	1	6	0,778	6	1	0,222
L18	4	31	8	39	4	0,111	12	31	0,711	35	8	0,200
L19	0	0	1	1	0	0,333	1	0	0,333	0	1	0,667
L20	0	6	1	7	0	0,111	1	6	0,778	6	1	0,222
L21	0	0	0	0	0	0,500	0	0	0,500	0	0	0,500
L22	1	7	3	10	1	0,154	4	7	0,615	8	3	0,308
L23	0	2	1	3	0	0,200	1	2	0,600	2	1	0,400
L24	0	2	0	2	0	0,250	0	2	0,750	2	0	0,250
L25	0	1	0	1	0	0,333	0	1	0,667	1	0	0,333
L26	0	5	3	8	0	0,100	3	5	0,600	5	3	0,400
L27	0	2	2	4	0	0,167	2	2	0,500	2	2	0,500

#### 4.5 Mapas de Susceptibilidade ao Risco a partir das probabilidades calculadas

Os mapas de susceptibilidade ao risco são produzidos através de estimativa geoestatística dos valores de probabilidade distribuídos por toda a área de estudo que contempla, no presente trabalho, a comunidade da Rocinha.

Uma vez calculados os valores de probabilidades de ocorrência, separadas por classe de agressividade ( $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ ), em cada ponto de referência  $Ln$ , devidamente georeferenciados, por todas as vertentes da comunidade da Rocinha, em diferentes períodos de estudo, torna-se possível a elaboração dos mapas de susceptibilidade ao risco geotécnico.

Os valores de probabilidade calculados referem-se apenas a pontos (locais) discretos e, para efeito prático, é necessário estabelecer uma variação contínua por toda a superfície compreendida entre os pontos cujas probabilidades foram previamente calculadas de acordo com o modelo probabilístico proposto no capítulo 3.

A modelagem do fenômeno espacial de todos valores desconhecidos foi realizada utilizando-se programa ArcGis, que faz uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG ou GIS, em inglês), e possui diferentes ferramentas de interpolação. A ferramenta utilizada para interpolação é a geoestatística através do processo de Krigagem, por apresentar estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado, sendo que os mapas de susceptibilidade produzidos à partir de dados acumulados nos diferentes períodos chuvosos foi utilizado o recurso *Spline* para melhor ajuste das probabilidades de forma suavizada.

Como dados de entrada principais são necessários os valores das coordenadas georeferenciadas UTM (*Universal Transversa de Mercato*), vinculadas ao sistema geodésico brasileiro, no caso o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

Como as coordenadas UTM são planas, através das componentes norte (N) e leste (L) será adotado o sistema cartesiano convencional (x,y) acrescido da variável (z) referente ao valor de probabilidade já calculado dos pontos que agora alimentarão os dados de entrada do programa com base GIS.

Partindo desta premissa, para cada período de estudo, foram elaboradas as tabelas (Tabela 31, Tabela 32 e Tabela 33) com as informações relevantes para a elaboração dos mapas. Estão listados a localização dos pontos, em termos de denominação numérica ( $L_n$ ), o endereço, as coordenadas cartesianas ( $x,y$ ), além do valor das probabilidades para as diferentes classes correspondente ( $z$ ). Adicionalmente a planilha esta subdividida por bairros da comunidade, como: Laboriaux, Terreirão, Macega, Trampolim - Vila verde, Largo do Boiadeiro, Talvegue , Roupa suja, Portão vermelho e Cachoupa.

**Tabela 31 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de 1996**

Ln	Local	Coordenadas UTM		Probabilidade		
		X	Y	$Z_1=Pr_1$	$Z_2=Pr_2$	$Z_3=Pr_3$
LABORIAUX						
1	Pico	679432	7457140	-	-	-
2	Est Gavea 225	679768	7456996	0,583	0,250	0,250
3	Vertente Gavea/CEDAE	679810	7457118	-	-	-
TERREIRAO						
4	Est Gavea 369	679915	7456781	0,200	0,600	0,400
5	Caminho Terreirão - vert gavea	680176	7456813	0,500	0,500	0,167
MACEGA						
6	Rua 1 - Macega	679939	7456524	0,222	0,556	0,333
CACHOPA						
7	Rua Dionéia 732 -	679236	7456814	0,400	0,600	0,200
TRAMPOLIM - VILA VERDE						
8	Est Gavea 520 - rampa vila verde	679064	7456557	0,429	0,429	0,286
LARGO DO BOIADEIRO						
9	Est Gavea 550 - Largo do Boiadeiro	679247	7456357	0,667	0,333	0,333
TALVEGUE						
10	Rua 3, Rua 4, inicio Rua da Raiz	679572	7456562	0,333	0,667	0,333
H	ROUPA SUJA					
11	Inicio Rua 1	679650	7456326	0,667	0,333	0,333

**Tabela 32 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de 2010**

Local		Coordenadas UTM		Probabilidades		
Ln		X	Y	$Z_1=Pr_1$	$Z_2=Pr_2$	$Z_3=Pr_3$
LABORIAUX						
1	Pico	679432	7457140	-	-	-
2	Est Gavea 225	679768	7456996	0,250	0,750	0,250
3	Vertente Gavea/CEDAE	679810	7457118	-	-	-
12	Rua Jose Ignacio (inicio)	679361	7457198	0,053	0,947	0,053
13	Rua Maria do Carmo	679592	7457137	0,125	0,875	0,125
21	Rua Ten Marico Pinto	679845	7457094	0,143	0,857	0,143
TERREIRAO						
4	Est Gavea 369	679915	7456781	0,125	0,875	0,125
5	Caminho Terreirão - vert gavea	680176	7456813	0,045	0,955	0,045
14	Est Gavea 199	680054	7456965	0,176	0,824	0,059
MACEGA						
6	Rua 1 - Macega	679939	7456524	0,400	0,600	0,200
CACHOPA						
15	R Dioneia 812	678862	7456890	0,208	0,792	0,042
20	Beco da Paz - Vila Verde 2	679246	7456734	0,333	0,667	0,333
PORTAO VERMELHO						
16	R Dioneia 320	679237	7456919	0,281	0,688	0,063
17	Est Gavea 450 - R Dioneia 50	679498	7456790	0,111	0,778	0,222
18	Est Gavea 259	679682	7456891	0,143	0,857	0,071
E	TRAMPOLIM - VILA VERDE					
8	Est Gavea 520 - rampa vila verde	679064	7456557	0,250	0,750	0,250
19	R da Mata, Becos e Travessas	678871	7456678	0,286	0,714	0,048
LARGO DO BOIADEIRO						
9	Est Gavea 550 - Lgo Boiadeiro	679247	7456357	0,125	0,875	0,125
TALVEGUE						
10	Rua 3, Rua 4, inicio R. da Raiz	679572	7456562	0,333	0,333	0,667

**Tabela 33 - Planilha resumo em coordenadas georeferenciadas dos valores de probabilidade  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ , para cada ponto de referência central, associados às ocorrências geotécnicas no ano de entre 2011 e 2014**

Ln	Local	Coordenadas UTM		Probabilidade		
		X	Y	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>
LABORIAUX						
12	Rua Jose Ignacio (inicio)	679361	7457198	0,200	0,600	0,267
13	Rua Maria do Carmo	679592	7457137	0,125	0,500	0,500
24	Est Gavea 150	679943	7456994	0,250	0,750	0,250
26	Rua 1 - Travessa 47	679827	7456911	0,100	0,600	0,400
TERREIRAO						
4	Est Gavea 369	679915	7456781	0,200	0,600	0,400
5	Caminho Terreirão - vert gavea	680176	7456813	0,111	0,556	0,444
14	Est Gavea 199	680054	7456965	0,154	0,769	0,154
MACEGA						
6	Rua 1 - Macega	679939	7456524	0,200	0,600	0,400
23	Rua 2 - Macega	679790	7456545	0,200	0,600	0,400
CACHOPA						
15	R Dioneia 812	678862	7456890	0,125	0,750	0,250
20	Beco da Paz - Vila Verde 2	679246	7456734	0,111	0,778	0,222
27	Beco da Paz 33- Vila Verde/Cachopa	679352	7456634	0,167	0,500	0,500
PORTAO VERMELHO						
16	R Dioneia 320	679237	7456919	0,250	0,750	0,250
17	Est Gavea 450 - R Dioneia 50	679498	7456790	0,111	0,778	0,222
18	Est Gavea 259	679682	7456891	0,111	0,711	0,200
25	Est Gavea 259 (entrada) - Portão Vermelho	679499	7456907	0,333	0,667	0,333
TRAMPOLIM - VILA VERDE						
19	R da Mata, Becos e Travessas	678871	7456678	0,333	0,333	0,667
22	Est Gavea 545 - rampa vila verde	679028	7456480	0,154	0,615	0,308
LARGO DO BOIADEIRO						
9	Est Gavea 550 - Largo do Boiazeiro	679247	7456357	0,400	0,600	0,200
ROUPA SUJA						
11	Inicio Rua 1	679650	7456326	0,500	0,250	0,500

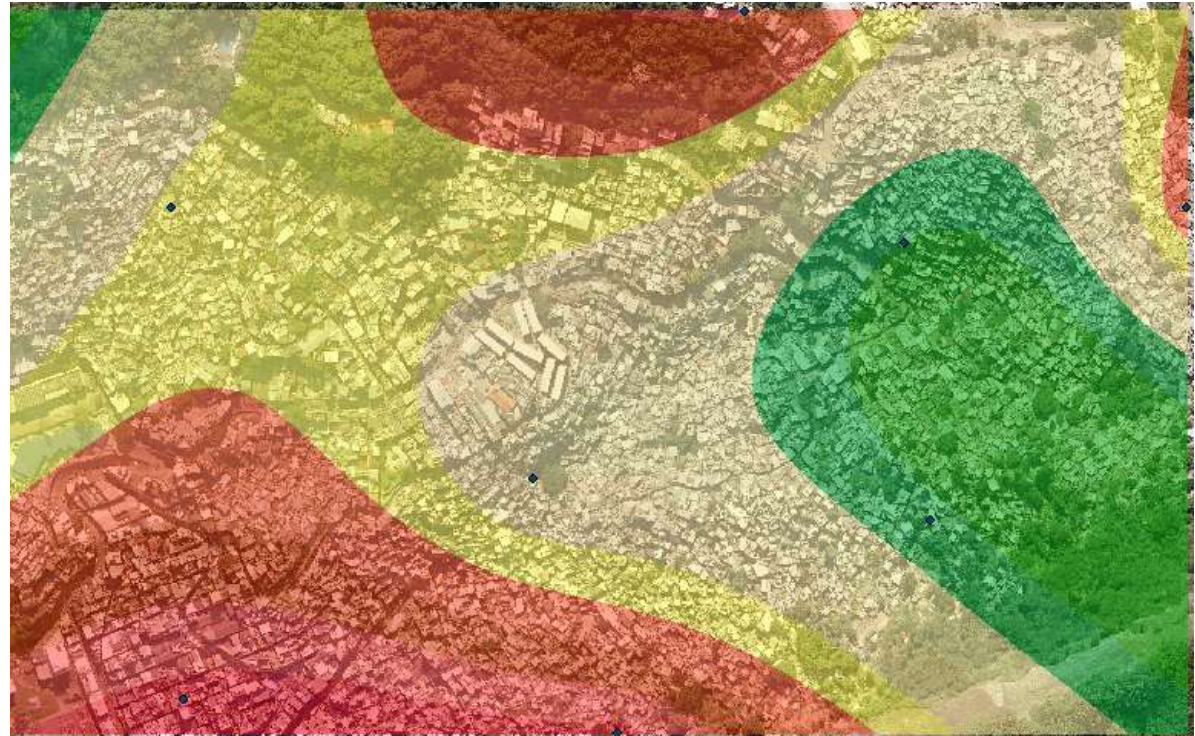
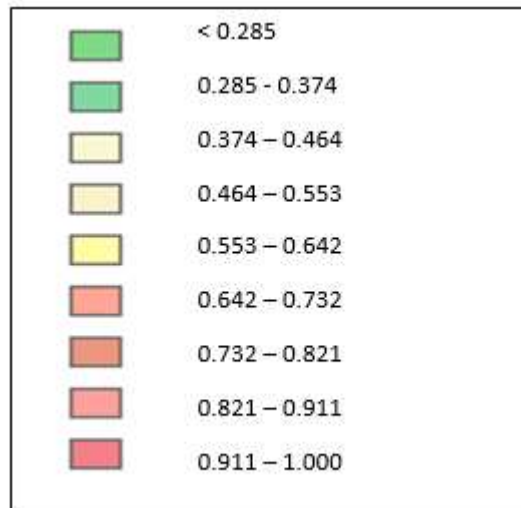
Pode-se observar que a probabilidade de risco associada aos danos de classe 2 representam mais de 80% do total de ocorrências registradas em todos

os eventos chuvosos dos anos de 2010 e 2011 à 2014. Em razão disto, optou-se pela modelagem dos mapas de risco a partir dos dados relacionados à  $Pr_2$  para aqueles períodos de ocorrência.

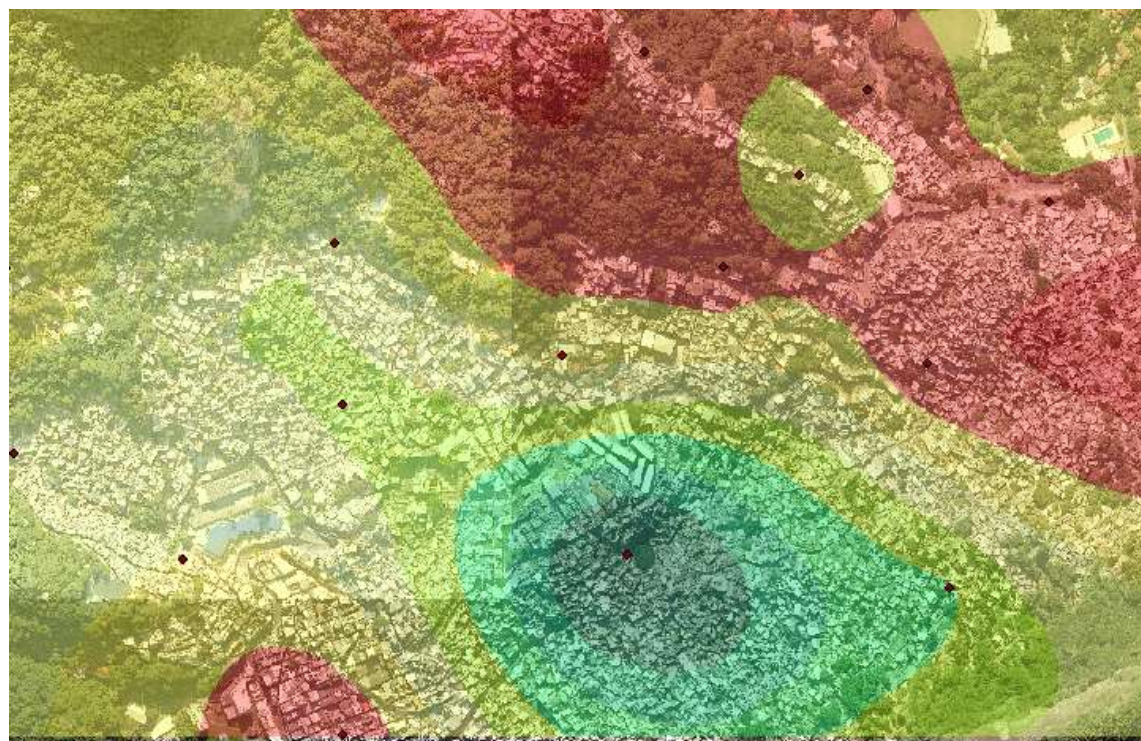
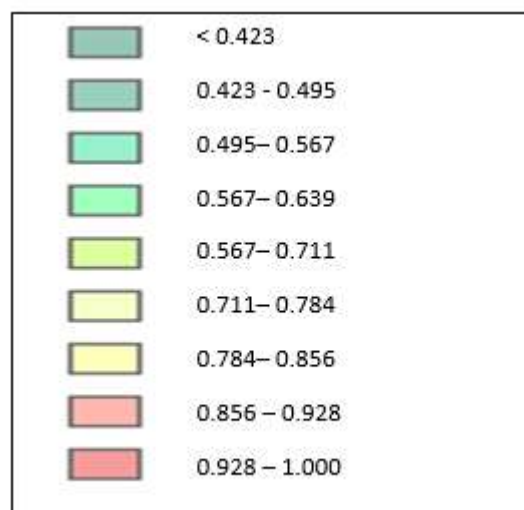
Por outro lado, observa-se que eventos considerados de risco associados a danos altos – classe 1 - possuem relevância (inclusive quantitativa) no ano de 1996 e, por este motivo, o mapa de susceptibilidade ao risco neste ano será elaborado tomando-se por base os valores de  $Pr_1$ .

Os resultados produzidos pelo programa ArcGis para os 3 diferentes períodos que englobam eventos chuvosos nos anos de 1996, 2010 e 2011-2014 estão ilustrados, respectivamente, nas Figura 82, Figura 81 e Figura 84. O quadro, em cada figura, representa, numa escala de 0 à 1000, as nove faixas de variação de probabilidade de ocorrência da classe considerada. De uma forma geral, as cores vermelha amarela e verde correspondem a probabilidades de ruína decrescentes.



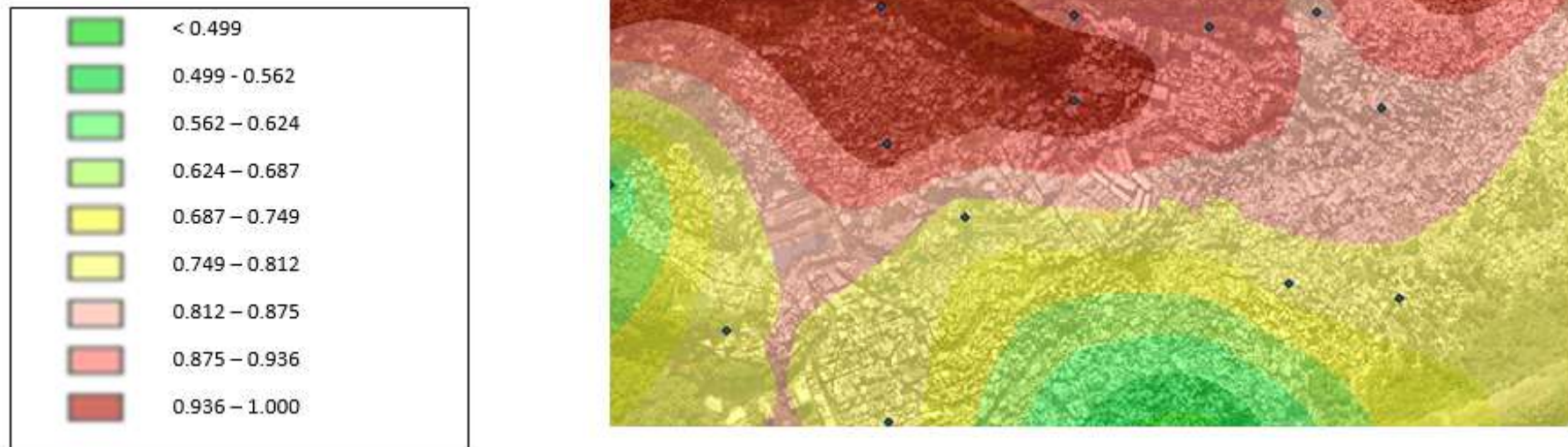


**Figura 82 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas no ano de 1996**



**Figura 83 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas no ano de 2010**





**Figura 84 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha à partir de dados de ocorrência geotécnica registradas entre 2011 e 2014**

Para fins de comparação, os mapas de susceptibilidade ao risco foram gerados inicialmente sem que se levasse em conta a atualização bayesiana. Portanto, nessas três figuras, apresentam-se probabilidades iniciais (*a priori*) relativas a cada um dos períodos estudados, considerados isoladamente. Constata-se então, que sem a atualização bayesiana, os contornos de probabilidades nas figuras 80 e 81 variam muito de mapa para mapa.

Por outro lado, os mapas apresentados nas figuras 82 e 83 foram gerados com base na atualização bayesiana, considerando valores de ocorrências acumulados desde o início do banco de dados utilizado nesta tese (a partir de 1996), de acordo com o item 3.10 do capítulo 3.

A tabela 34 mostra os valores acumulados do número de ocorrências de cada localidade  $L_n$ , para as três classes de danos diferentes nos eventos chuvosos considerados na pesquisa.

**Tabela 34 – Número de ocorrências acumuladas por periodo**

VALORES ACUMULADOS 1996+2010			VALORES ACUMULADOS 1996+2010+2011/2014		
Nº OCORRENCIAS POR CLASSE			Nº OCORRENCIAS POR CLASSE		
1	2	3	1	2	3
6	4	2	12	4	2
0	8	1	0	10	2
2	22	0	2	26	3
2	6	2	2	8	3
1	2	0	1	2	0
2	4	1	2	4	1
1	6	0	2	8	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	2	0	1
			2	8	3
			0	3	3
			1	9	1
			0	5	1
			0	2	0
			0	6	1
			4	31	8
			0	0	1
			0	6	1
			0	0	0
			1	7	3
			0	2	1
			0	2	0
			0	1	0
			0	5	3
			0	2	2

A Tabelas 35 relaciona para cada local (X,Y) os valores de probabilidade já apresentados anteriormente ( $Pr_1, Pr_2$  e  $Pr_3$ ) porém atualizados devido ao nº ocorrências acumuladas , aqui representados por  $Z_1, Z_2$  e  $Z_3$  atualizados.

**Tabelas 35a e 35b- Valores de Probabilidade para diferentes pontos de localização**

Z1	Z2	Z3	X	Y	
0,500	0,500	0,500	679432	7457140	1996-2010
0,500	0,357	0,214	679768	7456996	
0,500	0,500	0,500	679810	7457118	
0,091	0,818	0,182	679915	7456781	
0,115	0,885	0,038	680176	7456813	
0,250	0,583	0,250	679939	7456524	
0,400	0,600	0,200	679236	7456814	
0,333	0,556	0,222	679064	7456557	
0,222	0,778	0,111	679247	7456357	
0,250	0,500	0,500	679572	7456562	
0,667	0,333	0,333	679650	7456326	

Z1	Z2	Z3	X	Y	
0,500	0,500	0,500	679432	7457140	1996-2010-2011/14
0,650	0,250	0,150	679768	7456996	
0,500	0,500	0,500	679810	7457118	
0,071	0,786	0,214	679915	7456781	
0,091	0,818	0,121	680176	7456813	
0,200	0,600	0,267	679939	7456524	
0,400	0,600	0,200	679236	7456814	
0,333	0,556	0,222	679064	7456557	
0,250	0,750	0,083	679247	7456357	
0,250	0,500	0,500	679572	7456562	
0,600	0,200	0,400	679650	7456326	
0,200	0,600	0,267	679361	7457198	
0,125	0,500	0,500	679592	7457137	
0,154	0,769	0,154	680054	7456965	
0,125	0,750	0,250	678862	7456890	
0,250	0,750	0,250	679237	7456919	
0,111	0,778	0,222	679498	7456790	
0,111	0,711	0,200	679682	7456891	
0,333	0,333	0,667	678871	7456678	
0,111	0,778	0,222	679246	7456734	
0,500	0,500	0,500	679845	7457094	
0,154	0,615	0,308	679028	7456480	
0,200	0,600	0,400	679790	7456545	
0,250	0,750	0,250	679943	7456994	
0,333	0,667	0,333	679499	7456907	
0,100	0,600	0,400	679827	7456911	
0,167	0,500	0,500	679352	7456634	

Uma vez calculados os valores de probabilidade de ocorrência de classes 1, 2 e 3 utilizando-se os mesmos procedimentos já detalhados neste capítulo, plotou-se os novos Mapas de Susceptibilidade ao Risco para os períodos acumulados das chuvas de 1996 à 2010, e 1996 à 2014, reproduzidos, respectivamente, nas Figura 85 e Figura 86. Esses Mapas foram gerados à partir das probabilidades  $Z_1$  que representam a classe de danos altos, de acordo com a classificação proposta na Tabela 27, e inclui rupturas (ou possibilidades de rupturas) globais e ocorrências de maior relevância do ponto de vista humano ou material.

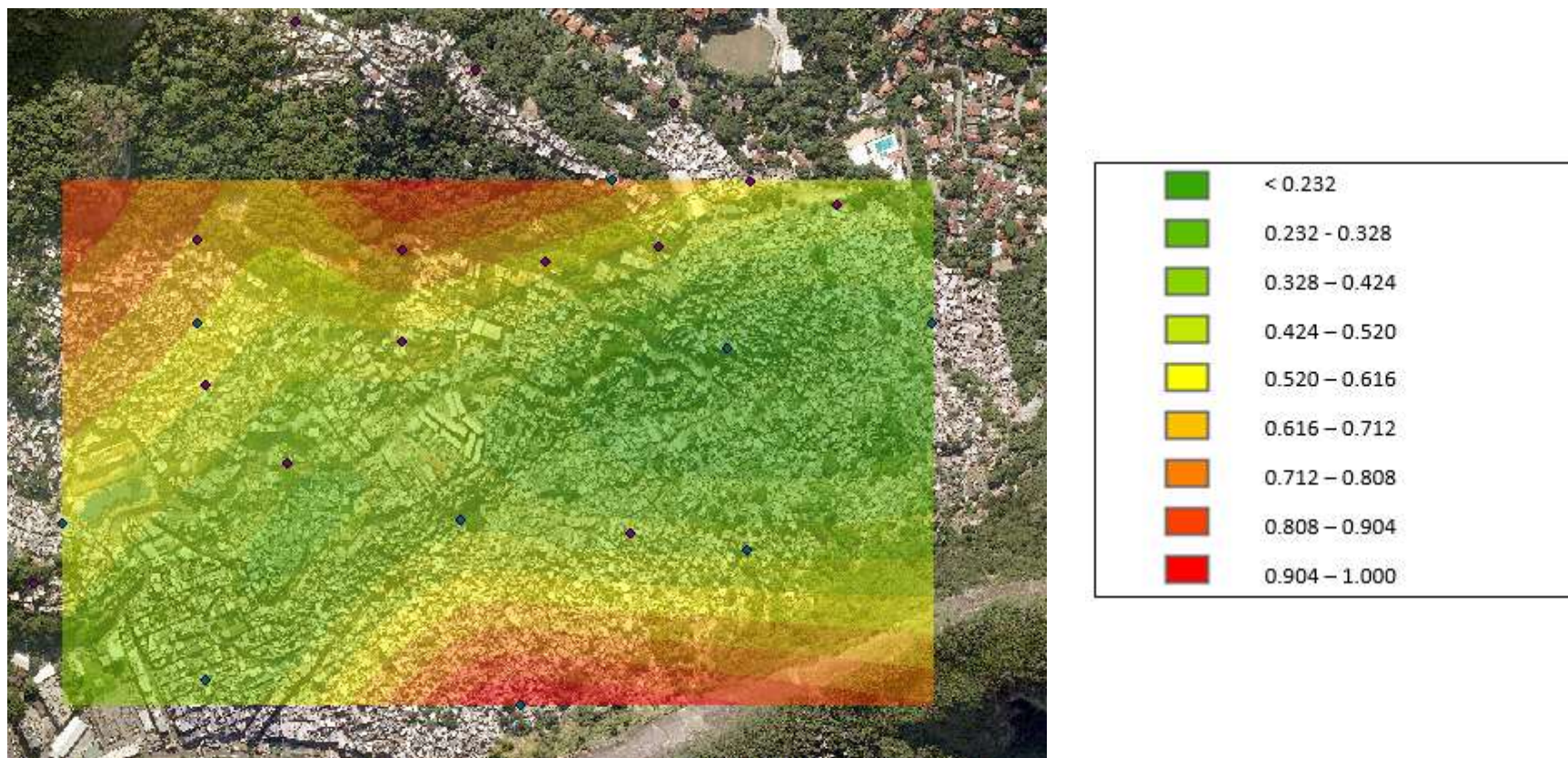
Poderia-se, analogamente, plotar outros mapas gerados a partir das probabilidades  $Z_2$  e  $Z_3$ , porém, o maior interesse prático está voltado para as probabilidades de susceptibilidade ao risco geotécnico associados aos danos mais relevantes.

Sob a ótica da atualização bayesiana, as probabilidades  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  na Tabela 35a (atualizadas a partir de  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ ) representam probabilidades *à posteriori*, levando-se em conta todos os eventos ocorridos entre 1996 e 2010.

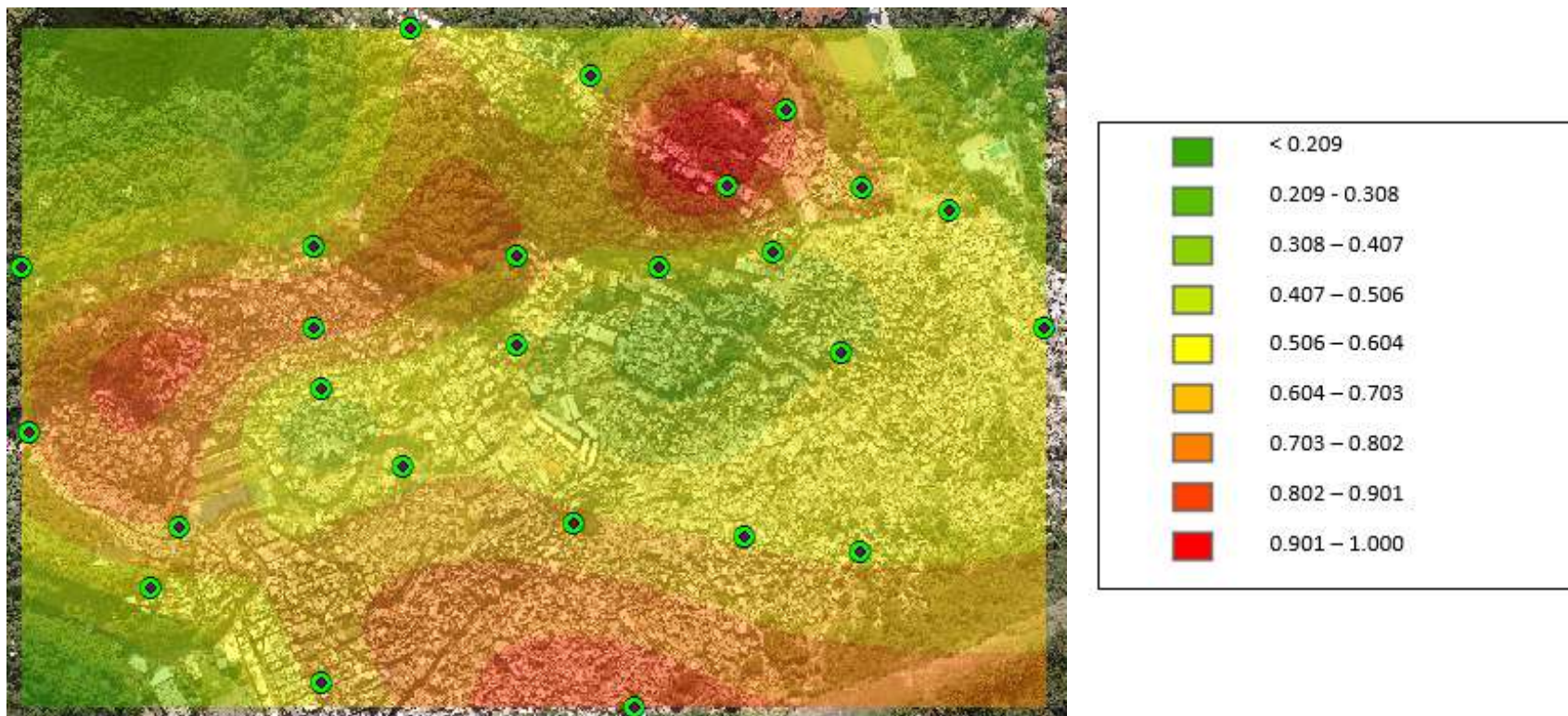
Pela mesma lógica, as probabilidades *à posteriori*  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  na Tabela 35b foram atualizadas levando-se em conta todos os eventos ocorridos entre 1996 e 2014. Esta nova atualização foi estabelecida tomando-se as probabilidades  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  da Tabela 35a (atualizadas a partir de  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ ) agora consideradas como estimativas *à priori*.

Comparando-se os mapas das figuras 82 e 83 verifica-se que são muito semelhantes entre si, indicando que as probabilidades tendem a convergir quando o número de eventos se torna suficientemente grande. Portanto, no que concerne aos objetivos desta tese, o mapa da figura 83 é uma representação atualizada do mapa de susceptibilidade ao risco da comunidade da Rocinha. Entretanto, novas atualizações serão devidas quando da ocorrência de novos eventos decorrentes de chuvas intensas





**Figura 85 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas e acumuladas nos períodos chuvosos de 1996 e 2010**



**Figura 86 - Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha a partir de dados de ocorrência geotécnica registradas e acumuladas nos períodos chuvosos de 1996, 2010 e 2011-14**



#### 4.5.1 Correções do mapa de susceptibilidade ao risco através de avaliação *in loco* em áreas específicas

No mês de setembro de 2016 foram realizadas pelo autor, na presença de geólogos da Fundação GEORIO, duas vistorias na comunidade da Rocinha: o primeiro trabalho de campo foi acompanhado pela geóloga Raquel Fonseca e teve a colaboração do estagiário de engenharia Matheus, além de funcionário da região administrativa e morador do local; a segunda vistoria foi realizada com a companhia do geólogo e gerente de geologia Luiz José Brandão.

O objetivo das vistorias foi melhor avaliar a susceptibilidade ao risco geotécnico a partir de observações de campo em locais específicos onde não existe histórico de registros de ocorrências, mas onde as vistorias indicaram elevada susceptibilidade ao risco (ainda que não tenham sido observadas ocorrências pregressas).

Pela experiência e pelo conhecimento técnico dos profissionais de engenharia e geologia mobilizados nas vistorias, percebeu-se que determinados locais apresentam riscos potenciais de acidentes geotécnicos, cujos motivos são abordados a seguir.

O primeiro local vistoriado foi a vertente junto à base da escarpa rochosa do Morro Dois Irmãos voltada para São Conrado, mais precisamente nas localidades conhecidas como Macega, Cesário e Roupa Suja. O caminho percorrido a partir da parte alta da Rua Um seguiu trajeto exatamente nesta sequência de “sub-bairros”.

A Figura 87, Figura 88 e Figura 89 apresentam trecho de talude rochoso do Morro Dois Irmãos evidenciando superfície com descontinuidades, juntas de alívio, e sistema de fraturas esparso, mas bem desenvolvido. Na base da escarpa rochosa situa-se depósito de colúvio e tálus, onde existe a presença de blocos e pequenos fragmentos de rocha por vezes instáveis que, embora não são visualizados na foto devido à cobertura vegetal, são verificados em grande quantidade.



**Figura 87 – Foto de escarpa rochosa da face esquerda do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega**



**Figura 88 - Foto de escarpa rochosa da face central do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega**



**Figura 89 - Foto de escarpa rochosa da face direita do Morro Dois Irmãos voltada para localidade Macega**

A foto da Figura 90 apresenta trecho de canaleta – chumbada na rocha - para coleta de águas pluviais que escoam pela escarpa bem verticalizada, o que contribui para mitigar o risco de movimentos de massa nos taludes de solo subjacentes decorrentes do fluxo superficial de água nos dias de chuva intensa.





**Figura 90 – Canaleta pluvial chumbada na rocha**

As Figuras 89a, 89b e 89c mostram ações antrópicas de moradores da comunidade, que cortam taludes a montante para construção de moradias resultando em perfil composto por diversos “platôs”, com clara evidencia de instabilidade geotécnica num próximo evento chuvoso relevante.



**(a)**



(b)



(c)

**Figura 91 – Ação antrópica contribuindo para instabilidade**

A Figura 90 ilustra, em pontos diferentes, a presença de blocos de variadas dimensões simplesmente apoiados no solo, constituindo o que, na prática, é denominado “ninhos de blocos”, resultantes possivelmente de desprendimentos do talude rochoso seguido por rolamentos no trecho de solo.





(a)



(b)

**Figura 92- Presença de blocos de rocha**

A Figura 93 apresenta fotos de sistema de drenagem precário e assoreado por lixo, detritos em geral e lançamento de efluentes *in natura*.



**Figura 93- Lixo e detritos em geral e lançamento de efluentes no solo *in natura***

A Figura 94 denota ausência de drenagem adequada em solo impermeabilizado, o que aumenta a velocidade de escoamento da água e, por consequência, o potencial erosivo a jusante.





**Figura 94- Impedimento à drenagem superficial**

É apresentado na Figura 95, na localidade conhecida como Roupa Suja, intenso adensamento de moradias construídas em local sem infraestrutura quanto a esgotamento sanitário lançado diretamente no solo; ausência de sistema de captação e condução de águas pluviais; ausência de coleta de lixo domiciliar que se acumula em talvegues naturais e servem de obstáculo ao fluxo de água.





**Figura 95- Ocupação intensa e desordenada**

A vista geral do maciço rochoso (Figura 96) mostra à esquerda a escarpa rochosa sob a qual se projetam as localidades visitadas. Mais ao centro observa-se que entre o talude de rocha e a massa de solo coluvionar com presença de tálus, situa-se drenagem chumbada .



**Figura 96- Vista geral da escarpa rochosa**

A Figura 97 mostra o detalhe da canaleta e início da região de talus.



**Figura 97. Detalhe da canaleta na base da escarpa**

Na Figura 98 observa-se a presença de blocos soltos de diversas dimensões, aparentemente protegidos pela cobertura vegetal na crista do talude rochoso, com presença de lascas e diversas discontinuidades na superfície das rochas escarpadas.





**Figura 98- Cobertura vegetal na crista do talude rochoso**

A Figura 99 mostra em detalhe a massa de solo coluvionar instável no sopé do talude rochoso, junto a moradias precárias. Evidente o risco de movimentação de solo a montante de casas que podem ser atingidas também por fragmentos de rocha que podem se desprender do talude de rocha fraturada. A Figura 100 mostra em detalhes juntas de alívio, descontinuidades diversas, e fraturas do talude intemperizado de rocha.



**Figura 99- Massa de solo coluvionar instável**



(a)



(b)

**Figura 100 – Fraturas no macico rochoso**

A segunda vistoria à comunidade da Rocinha foi realizada no dia 21/09/2016, em companhia do geólogo Luiz José Brandão, na vertente oposta àquela da primeira visita, e as localidades vistoriadas foram, nesta ordem: Laboriaux, Dionéia, Cachopa e Vila Verde. Nesta ocasião, com a ajuda de GPS foi possível traçar todo o percurso realizado, bem como identificar geograficamente, com mais precisão, os pontos mais significativos quanto ao aspecto geológico-geotécnico, que são a seguir relatados com comentários e fotografias.

A Rua Maria do Carmo é uma via principal do Laboriaux, que se inicia na estrada da Gávea até a parte mais alta junto aos depósitos de tálus no sopé de um dos muitos taludes de rocha que compõem a vertente sul do Maciço da Tijuca



voltada para o mar de São Conrado. Esta rua situa-se numa linha de cumeada, separando a vertente em direção à Gavea com a vertente que se volta para São Conrado.

As fotos da Figura 101 e da Figura 102 foram tiradas do início da Rua Maria do Carmo, localidade Laboriaux, de onde se observam: na Figura 101 a vertente do Morro Dois Irmãos voltada para a Rocinha, a vista do mar e trecho de São Conrado; na foto Figura 102, tirada da mesma posição mas em outro ângulo, visualiza-se a porção superior da mesma vertente do Morro, podendo-se observar os locais vistoriados na primeira visita a campo: Macega e Roupa Suja, no sopé da encosta.



**Figura 101- Vertente do Morro Dois Irmãos voltada para a Rocinha**



**Figura 102- Porção superior da Vertente do Morro Dois Irmãos voltada para a Rocinha**

A figura 100 foi tirada do final de via acessada pela Rua Maria do Carmo na vertente do maciço voltada São Conrado e denota lançamento de aterro indevido para construções irregulares e rede instalações sanitárias com esgotamento no solo *in natura*.



**Figura 103- Lançamento de aterro *in natura***



As fotos da Figura 104 foram tiradas do início da Rua Maria do Carmo, na vertente do maciço localizado no Laboriaux voltada para a Gávea, onde se observa obra de contenção em cortina ancorada ao longo de grande extensão. Neste local se iniciaram duas grandes corridas de detritos em paralelo, o que motivou a execução dessas intervenções pela GEORIO. Esse talude é caracterizado por forte inclinação e capa de solo coluvionar de espessura reduzida sobre superfície de rocha.



**Figura 104- obra de contenção em cortina ancorada**

A Figura 105 mostra espessa capa de solo coluvionar contida indevidamente por alvenaria em muro de blocos de concreto no final da Rua Dionéia, na localidade que recebe o mesmo nome.



**Figura 105- Capa de solo coluvionar contida indevidamente por alvenaria**



**Figura 106- Vista de talude de corte em condições instáveis**

Na figura 103 observa-se, ainda, na Rua Dionéia, o mesmo muro em blocos de concreto à direita da foto, sendo que, à esquerda, visualiza-se talude



a jusante com possibilidade de ruptura devido ao corte do terreno para implantação de moradia, colocando em risco a estabilidade do aterro que constitui a via.

Na foto seguinte ilustrada pela Figura 107, observa-se na crista do referido talude de corte a presença de pequeno bloco fruto de rolamento pelo talude a montante, e presença de bananeiras indicando concentração e acúmulo de água em diversos pontos da vertente, o que favorece os movimentos de massa.



**Figura 107- Pequeno bloco fruto de rolamento do talude à montante**

Ainda na Rua Dionéia, observa-se na Figura 108 o talude a montante da rua, em cuja superfície, praticamente desprovida de cobertura vegetal, é frequente o lançamento de lixo e entulho pelos moradores, o que aumenta o risco de deslizamento de detritos. Como agravante, nota-se a construção de edificações no pé do talude, inclusive na faixa de suposto talvegue por onde escoam as águas de chuva.

Problemas recorrentes são notados ainda pelas fotos da Figura 105 como, por exemplo: lançamento de lixo, cortes indevidos no terreno para construção de

moradias e ausência de sistema de drenagem pluvial para disciplinar condução de águas pluviais.



**Figura 108. Lançamento de lixo e entulho**

Nas fotos da Figura 109 observam-se algumas obras de mitigação de risco existentes, como por exemplo: construção de contrafortes atirantados, concreto projetado e calha pluvial de concreto armado. Nota-se que as



caçambas para disposição de lixo são insuficientes gerando acúmulo de material no solo que, em dias de chuva torrencial, podem ser transportados encosta abaixo.



(a) impermeabilização superficial



(b) contrafortes atirantados



(c) muro

**Figura 109- Obras de mitigação de risco**

Neste ítem do capítulo 5 ficou bem evidenciada a necessidade de se corrigir o modelo probabilístico de mapas de risco em alguns locais onde o

histórico de acidentes geotécnicos registrados na GEORIO não é suficiente para calcular as probabilidades, de acordo com o modelo proposto nesta tese.

Por esta razão, com objetivo de se levar em conta o risco potencial naqueles locais, foram estabelecidos pontos virtuais de ocorrência a serem inseridos no modelo de geração de mapas.

A base preponderante para geração dos pontos originados pelos laudos de ocorrência continua sendo através do modelo probabilístico proposto, mas a avaliação de probabilidade de ruína nos pontos virtuais é feita de forma subjetiva, com base em vistorias por profissionais qualificados e experientes.

Foram adicionados aos mapas de probabilidades dois pontos virtuais com valores de probabilidade que denotem alta susceptibilidade ao risco, sendo um para cada vertente da Rocinha: um ponto relativo ao risco oferecido pelo talude rochoso do Morro Dois Irmãos, voltado para as localidades Macega e Roupa Suja, e outro ponto relativo ao risco oferecido pelos taludes entre o Laboriaux e Dionéia. Pela escala de gravidade adotada para os mapas, foram atribuídos valores considerados como de alta susceptibilidade ao risco, entre 400 e 600, tendo sido adotada a coordenada  $z=500$  nestes pontos virtuais.

As coordenadas dos pontos adicionais (virtuais) decorrentes da vistoria técnica foram, respectivamente, para a primeira e segunda vistoria: (679878E; 7456440S) e (679452E;7457020S). Estes pontos estão indicados no mapa atualizado da Figura 110, que já retrata as probabilidades correspondentes aos pontos virtuais.

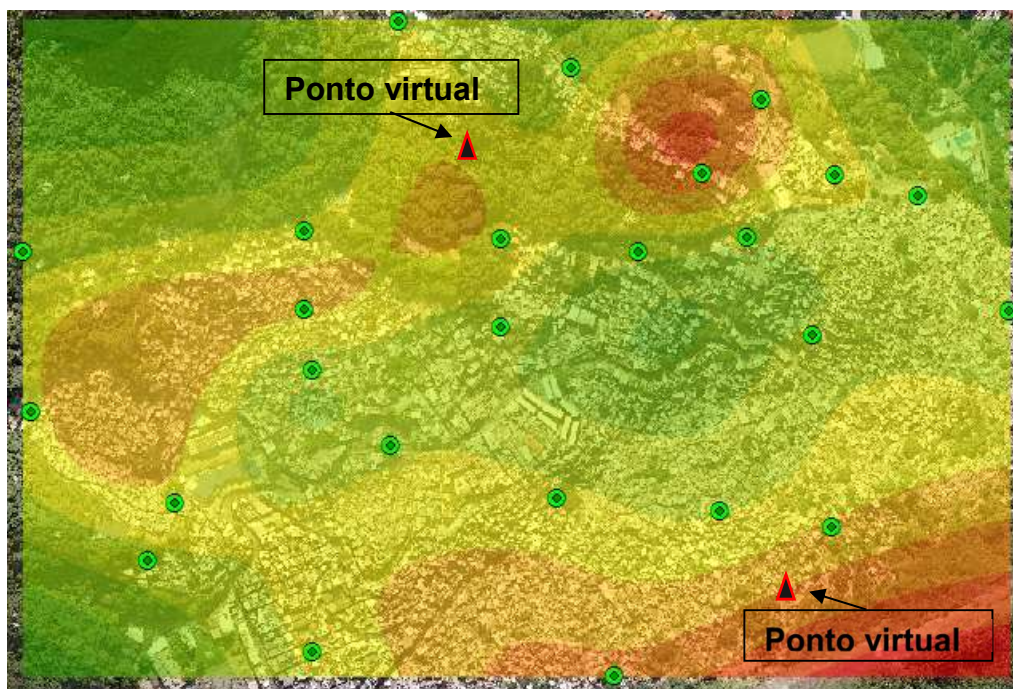


Figura 110- Modelo probabilístico com inclusão de pontos virtuais

## 5 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MAPAS DE RISCO

A comparação entre os Mapas de Risco produzidos pelo método empírico tradicional e aquele produzido pelo modelo probabilístico proposto nesta tese mostra-se satisfatória, com a vantagem do modelo probabilístico em minimizar as avaliações subjetivas.

No caso da comparação entre os Mapas de Risco da Rocinha pelo método observacional (empírico), adotado pela Geo-Rio, apresentado na Figura 111 e o Mapa de Susceptibilidade ao Risco da Figura 112, elaborado pelo modelo probabilístico, os dois mapas mostram, direta ou indiretamente, as informações acumuladas nos eventos chuvosos mais nos anos 1996, 2010 e no período de 2011 à 2014. Não foram produzidos mapas para eventos chuvosos a partir de 2015 porque, na ocasião de fechamento desta pesquisa, o Mapa de Susceptibilidade ao Risco geotécnico empírico ainda não tinha sido concluído por completo pela GEORIO, para que fosse utilizado na comparação.

Pode-se afirmar ainda que, no caso do modelo probabilístico, a sensibilidade na mudança do nível de probabilidades nos mapas em função da atualização, é significativa, seja devido à alteração na localização dos acidentes, seja devido à modificação da severidade do movimento de massa.

Em contraposição, no método tradicional ilustrado na figura 108, a definição do grau de susceptibilidade ao risco geotécnico é norteadada fundamentalmente pela expectativa subjetividade de escorregamento, em função da declividade das vertentes, combinada com a experiência dos profissionais responsáveis pelas vistorias. Entretanto, as avaliações subjetivas são possíveis apenas em alguns poucos pontos isolados, que não podem ser considerados representativos de toda uma região sujeita a ação de diversos condicionantes, não apenas geológico-geotécnicos, como também demais fatores fisiográficos, sociais, ambientais, entre outros.

Para elaboração do Mapa de Susceptibilidade ao Risco da figura 109, as curvas definidas por estimativa geoestatística foram estabelecidas a partir de pontos cujas probabilidades foram calculadas tomando-se, como referência, um banco de dados confiável. Isto porque, para o cálculo de probabilidades nos diversos locais de vistoria,

foram indiretamente levados em conta todos os fatores condicionantes relevantes para cada ponto estudado.

Haja vista a diferença entre os dois métodos, desde a concepção até a elaboração final dos mapas, é aceitável e até mesmo necessário que alguns resultados sejam divergentes, principalmente nos locais onde a avaliação de campo é dificultada por questões de acesso ou mesmo por dificuldades de avaliação subjetiva.

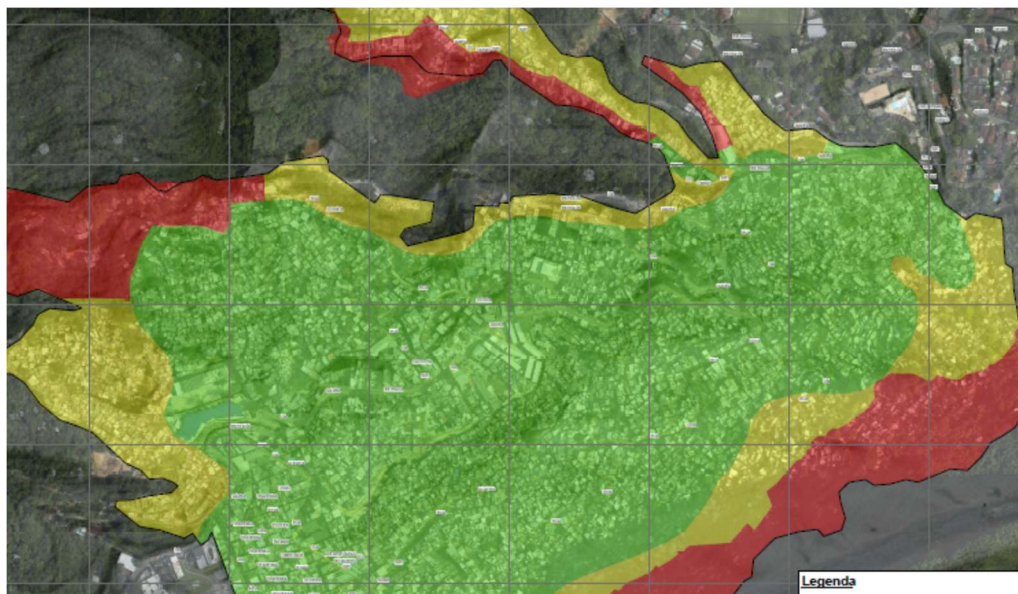
Nas regiões compreendidas pela Dionéia, Cachopa, Cachopinha e Vila Verde (porção oeste da comunidade), em praticamente toda a porção central (talvegue da bacia hidrográfica), e em toda a faixa que se estende paralelamente ao longo da escarpa rochosa do Morro Dois Irmãos (iniciada na parte alta: Capado/Terreirão) até a Roupa Suja, passando pela Macega, pode-se afirmar que o Mapa de Susceptibilidade ao Risco gerado pelo método probabilístico se aproxima satisfatoriamente do Mapa de Risco tradicional.

Cabe salientar que a boa convergência dos dois tipos de mapas ao longo do talude rochoso do Morro Dois Irmãos deve-se, logicamente, à avaliação qualitativa decorrente de vistoria de campo. Entretanto, esta avaliação resumiu-se a atribuição de um valor numérico de apenas um ponto, que serviu de base para a distribuição das superfícies de probabilidade por conta da ferramenta geoestatística, através de software com base GIS.

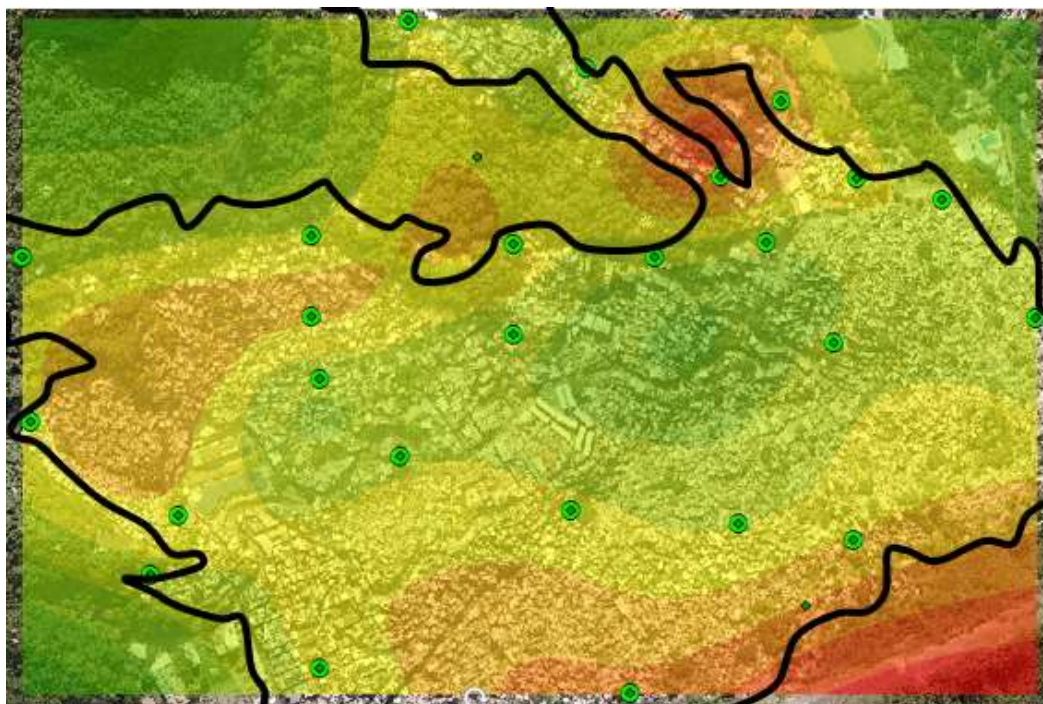
Na região norte da Comunidade, onde se situa a região mais alta do Laboriaux, e a porção noroeste da Rocinha, observa-se que o mapa tradicional classifica a susceptibilidade ao risco geotécnico, respectivamente, como alta/média e alta, enquanto que, nestes locais, o mapa probabilístico equivale à classificação média/baixa. Reside aí uma esperada divergência, que pode ser explicada por serem locais onde a incidência de laudos de vistoria é baixa, o que reduz a confiabilidade dos dois métodos.

O método empírico e o método probabilístico possuem vantagens e desvantagens, portanto se complementam. As principais vantagens e desvantagens estão indicadas na Tabela 36.





**Figura 111 - Mapa de Risco da Comunidade da Rocinha com utilização de modelo empírico (fornecido pela GEORIO, 2014)**



**Figura 112 - Mapa de susceptibilidade ao Risco da Comunidade da Rocinha com utilização de modelo probabilístico**



**Tabela 36 - Quadro comparativo entre Método Empírico x Método Probabilístico para definição de Mapas de Risco Geotécnico**

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Método empírico	- a subjetividade apresenta um aspecto positivo quando a experiência do profissional define algum caso particular de risco;	- subjetividade na avaliação do risco quando existem situações que geram dúvidas na classificação do risco;
	- avaliação mais detalhada e qualitativa em regiões onde não existem inventários ou informações pré-existentes que permitam classificar numericamente a susceptibilidade ao risco;	- dificuldade em áreas extensas e/ou descontínuas, devido a dependência do aspecto qualitativo nos critérios de avaliação;
	- em áreas acessíveis e pouco extensas onde a avaliação presencial é possível, a experiência do profissional pode identificar riscos não percebidos outro método;	- baixa confiabilidade na classificação da susceptibilidade ao risco em áreas não e/ou que não tenham tido acidentes prévios;
Método probabilístico	- combinação de avaliação qualitativa e quantitativa; - podem-se ainda atribuir várias faixas de classificação de probabilidade;	- a automatização dos cálculos pode mascarar algum resultado com entrada de dados incorreta, caso os resultados não sejam bem interpolados;
	- facilidade e rapidez na atualização da susceptibilidade ao risco;	- no caso de não existir banco de dados em quantidade suficiente, o método torna-se impreciso e pouco confiável;
	- versatilidade na elaboração do modelo geoestatístico, podendo-se considerar diversos condicionantes associados aos movimentos de massa, de acordo com a disponibilidade de dados.	- quando a qualidade das informações não é adequada, a resposta do modelo pode fornecer resultados pouco confiáveis;

## 6 CONCLUSÕES

A utilização de método probabilístico desenvolvido nesta tese, baseado em probabilidades de ruptura de taludes sucessivamente atualizadas a partir de novos deslizamentos, mostrou-se plenamente exitosa, comparando satisfatoriamente com mapas empíricos desenvolvidos previamente pela Fundação GeoRio. O procedimento desenvolvido nesta tese tem como grande vantagem, comparativamente aos mapas empíricos, a redução da subjetividade na elaboração dos mapas, já que as probabilidades são calculadas a partir de eventos pretéritos e, em seguida, atualizadas com base em novas ocorrências.

As probabilidades atualizadas por formulação bayesiana, que dão origem aos mapas de susceptibilidade ao risco propostos, são estimadas pela conjugação da distribuição Beta e da distribuição de Bernoulli, resultando em uma fórmula fechada de simples aplicação prática. Dessa forma, as probabilidades são calculadas em pontos amostrais previamente determinados, em função de sua relevância. As probabilidades calculadas nos pontos amostrais são então interpoladas para toda a área de estudos, através de estimativas geoestatísticas.

A metodologia adotada para elaboração do modelo probabilístico priorizou a utilização de dados de ocorrências confiáveis não apenas com relação a sua localização, como também no que se refere às premissas adotadas para classificação da agressividade dos riscos relacionando danos causados pelos movimentos de massa.

No decorrer do desenvolvimento de toda a pesquisa, foram observados diversos aspectos que influenciam nos resultados finais. Algumas informações são dignas de nota, com aspecto conclusivo, e pode-se relatar que:

- A fase inicial da pesquisa, que trata da coleta e seleção de dados de ocorrências deve ser criteriosamente estudada. Caso sejam escolhidos pontos cuja características geográficas sejam duvidosas, ou até mesmo estes pontos estejam relacionados a laudos com avaliação do risco indefinida, o modelo poderá ser comprometido por problemas que possuem relação de interdependência:

- O levantamento numérico de ocorrências por classe fornecerá quantidades imprecisas se a escolha dos pontos de referência for deficiente, caso a falha esteja na locação duvidosa da ocorrência;
  - Em consequência das observações acima, o cálculo de probabilidades estará incoerente, não matematicamente mas pelo seu significado físico, que não corresponderá à realidade dos fatos;
  - O modelo probabilístico sempre calculará probabilidades uma vez conhecidas as coordenadas  $x, y, z$ , mas reproduzirá informações não confiáveis que poderão nortear incorretamente decisões importantes de cunho técnico e político-social, envolvendo recursos públicos e, principalmente, vidas humanas.
- O método probabilístico associado à ferramenta geoestatística, para interpolação de curvas de isoprobabilidades, apresentou diversas vantagens:
    - Minimização da subjetividade na elaboração de mapas de susceptibilidade ao risco, face à combinação de modelo probabilístico (atualização bayesiana) e computacional (ferramenta geoestatística);
    - Apresentação de excelentes resultados no caso de atualização das informações, a partir do Teorema de Bayes, que incorpora o conceito de probabilidade condicional, ou seja, leva em conta eventos já conhecidos;
    - A atualização rápida e confiável das probabilidades reflete-se na elaboração de novos mapas de susceptibilidade ao risco, o que representa vantagem, uma vez que o risco geotécnico em áreas de encosta é um processo dinâmico;
    - A eficiência do modelo tende a aumentar com o tempo pelo crescente número de laudos a cada evento chuvoso, fazendo com que novas ocorrências caracterizem novos pontos, o que diminui a distância a ser interpolada e, por conseguinte, a incerteza;
    - A variabilidade espacial e temporal dos valores de probabilidade é considerada no modelo proposto, conforme o próprio estudo de

caso desta pesquisa, o que reproduz satisfatoriamente a realidade das ocorrências relacionadas aos desastres naturais.

- Com a utilização da ferramenta de interpolação em um software de base GIS é possível definir diversas faixas de probabilidade de determinada classe em quaisquer pontos do maciço. No caso desta pesquisa foram definidas 9 faixas de probabilidade distribuídas por toda a superfície modelada.

Como o mapa convencional e o mapa de risco se complementam, é imprescindível contar com a experiência e o conhecimento técnico do profissional especializado nos mecanismos de deflagração de movimentos de massa e de todos os processos envolvidos no problema (geólogo, engenheiro geotécnico ou de áreas afins).

Sem a contribuição desses profissionais, não é possível calibrar os diversos modelos de cálculo de modo a produzir estimativas realistas. Exemplo da importância da avaliação profissional na elaboração do modelo foi a necessidade de vistorias em locais com alta susceptibilidade ao risco, uma vez que a proposta probabilística aqui apresentada, por si só, não contemplaria os locais onde inexitem registros de ocorrências geotécnicas.

Em resumo, pode-se concluir que, a partir da experiência da construção de modelo probabilístico aplicado à comunidade da Rocinha, a elaboração de Mapas de Susceptibilidade ao Risco com utilização de ferramenta probabilística, com uso posterior de estimativa geoestatística, pode ser extrapolada a outras regiões do Maciço, ou de qualquer outra região que atenda aos requisitos mínimos para desenvolvimento do modelo, desde que os critérios estabelecidos na fase inicial de aquisição de dados sejam confiáveis e tecnicamente justificados.

Como as probabilidades foram calculadas a partir de acidentes e incidentes reais, decorrentes em sua maioria de deslizamentos em períodos chuvosos intensos, os mapas de probabilidade retratam, com boa acurácia, as probabilidades de ruptura dos taludes na área estudada.

Mapas de Risco que supostamente reproduzam mais fielmente a realidade devem nortear a elaboração de Planos de Gerenciamento de Risco, o que implicará na gestão dos recursos públicos de modo mais eficiente e racional, além de tecnicamente mais adequado, objetivando, acima de tudo, reduzir a incerteza na

estimativa do risco geotécnico, com o menor custo possível, sem prescindir do objetivo principal, que é preservar a vida humana.

## REFERÊNCIAS

AGUILERA, C.E.T., Aplicação de métodos de análise de estabilidade de taludes de grande altura em mineração. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 167 p., 2009.

AHRENDT, A. Movimentos de Massa Gravitacionais - Proposta de um sistema de previsão: Aplicação na área urbana de Campos de Jordão - SP. São Paulo, SP. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 360 p., 2005.

ATLAS NACIONAL DO BRASIL. 3.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro. ABMS/ABGE/PUC-Rio, v.2,p.721-723. 1992.

BACHMAIER, M.; BACKES, M. Variogram ou Semivariogram Understanding the variance in a variogram. Precision agriculture, v.9., n.3, p. 173-175, 2008.

BARTON, N.R.; CHOUBEY, V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mech. p54, 1977.

BANDIS, S.C.. Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength and Deformation of Rock Joints. Tese de Doutorado. The University of Leeds., 1980.

BENESSIUTI, M.F., Estudos dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaiss da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá – SP. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Bauru.128p., 2011.

BIENIAWSKI, Z.T. *Engineering classification of jointed rock masses*.Trans.S.Afr. Inst.Civ. Eng., v.15, p. 335-343, 1973

BIGARELLA, J.J.; PASSOS, E. Estruturas e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis. Ed. Da UFSC, p.877-1436, 2003.

BLOOM, A.L. Superfície da Terra. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

BOARD M., CHACON E., VARONA P. e LORIG L. *Comparative analysis of toppling behavior at Chuquicamata open-pit mine*. Chile. Trans. Instn Min. Metall (sect. A: Min. Industry). 1995.

BOLT, B. A.; HORN, W.L.; MACDONALD, G.A.; SCOTT, R.F. Geological Hazards. Berlim. Springer-Verlag, 238p., 1975.

BONFARINE, H. <https://www.ime.usp.br/~hbolfar/> (notas de aula).São Paulo. 2013.

CAVA, L.T. Potencial e perspectivas para o carvão mineral do estado do Paraná. Paraná: Mneropar, 1985.

CARREGÃ, D.L. E BALZAN, G. Aspectos do comportamento de encostas argilosas no creep. II PSL/IICOBRAE, Rio de Janeiro, Vol.1, p. 233-241. 1997.

CASSETI, V. Geomorfologia, [S.l.]. Disponível em <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em 09/01/2017. 2005.

CERRI, L.E.S.; CARVALHO, C.S. Hierarquização de situações de risco em favelas no Município de São Paulo, Brasil – Critérios e Metodologia. In Simpósio Latino-Americano sobre Riscos Geológicos Urbano, v.1, pp.150-157. São Paulo-SP. ABGE. 1992.

CESAR, C. L. Notas de aula do professor Dr. Claudio Lenz Cesar: [www.ifi.unicamp.br/~lenz/Econofisica/](http://www.ifi.unicamp.br/~lenz/Econofisica/). Campinas,SP. 2013.

CHIANN, C. Notas de aula da professora Dr<sup>a</sup> Chang Chiann. Departamento de Estatística – IME USP.



[https://www.ime.usp.br/~chang/home/mae116/aulas/Aula%206\\_distribui%E7%E3o%20Normal.pdf](https://www.ime.usp.br/~chang/home/mae116/aulas/Aula%206_distribui%E7%E3o%20Normal.pdf). São Paulo, SP. 2009

CHORLEY, R.J.; SCHUMM, S.A.; SUGDEN, D.E.; *Geomorphology*. Cambridge: Methuen, 606p. 1984.

CONTI, A. Desenvolvimento de um Modelo Matemático Transiente para Previsão de Escorregamentos Planares em Encostas. 131f. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ. 2012.

CORDING, E.J. et al. *Methods for geotechnical observations and instrumentation in tunneling*. Rep. nº UILU-ENG 75 2022, Dept. of Civ. Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, v.1 e 2, 566 p.1975.

CORREIA, P. Notas de aula. Modelação e Estimação: Uma introdução à geoestatística. 2010.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C.; Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico. INPE, São José dos Campos, SP, 1996.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C.; Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico ao Ordenamento Territorial. INPE, São José dos Campos, SP, 2001.

CRUDEN, D., & VARNES, D.J. *Landslides: type and processes*. In: TURNER, A.K; SCHUSTER, R.L. *Landslides investigation and mitigation*. Washington: Transportation Research Board, National Research Council - Special Report, 247. Cap3, p.36-75, 1996.

DAI, F.C.; LEE, C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, v.42, n.3-4, p.213-228, Jan 2002.

DIXON, W.J.; MASSEY, F.J. Introduction to statistical analysis. New York: McGraw Hill, 488p. 1957

DREW, D. Processos Interativos Homem-Meio Ambiente. São Paulo, Difel., 1986.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; CUNHA, S. ed Geomorfologia e meio ambiente, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, cap.3 p.123-194. 1996.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. Revista Brasileira de Geomorfologia, UGB. Vol.2, nº1. P51-71. 2001.

FILHO, O.A; VIRGILLI, J.C. "Estabilidade de Taludes", Inc: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (eds), Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE, p269., 1998.

FIOLHAIS, C. "DE RERUM NATURA".

<http://dererummundi.blogspot.com.br/2010/04/matematica-do-azar.html>. 2010.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 2ª. Ed. Curitiba: Ed. UFPR, 604p., 2009.

FRANCH, F.A.J.P. Influência do tipo de revestimento superficial no fluxo não saturado e sua influência na estabilidade de taludes. 223f. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2008.

FRASCA, M.H.B.; SARTORI, P.L.P. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 587p. 1998.

GEORIO; "Manual Técnico de Encostas". 2ª Ed. Rio de Janeiro. Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro. 2014.

GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 483p. 1997.

GRASSELLI, G. Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description. Tese de Doutorado. Ecolé Polytechnique Federale de Lausanne. 2001.

GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S. Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

GUIDICINI, G & NIEBLE, C.M. “Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação”. São Paulo: Editora da USP. P.216. 1984.

GUIDICINI, G & NIEBLE, C.M. “Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação”. São Paulo: Edgard Blucher. 1983.

GUIDICINI, G., & NIEBLE, C. Estabilidade de taludes naturais de escavação. São Paulo. Edgar Blüchen. p. 170., 1976.

GUIMARAES, R.F.et al. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. Engineering Geology. V69, n.1-2, p.99-108, abr.2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952\(02\)00263-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952(02)00263-6). Disponível em: <http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0013795202002636?httpAccept=text/xml>.

GUSMÃO FILHO, J.A. Encostas Urbanas: Aspectos ambientais, sociais e políticos. II COBRAE, Rio de Janeiro, vol.3, p.315-331. 1997.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31: 181-216. 1999.

HARR, M.E, “Reliability Based Design in Civil Engineering”, Dover Publications, Inc, Mineola, New York, 1987.

HEARN, G.J.; GRIFFITHS, J.S. Landslide Hazard Mapping and Risk Assessment. In: J.S. Griffiths, (Ed). Land Surface Evaluation for Engineering Practice. Geological Society. London. Engineering Geology Special Publications, 18, 43-52. 2001.

HOEK, E.; BRAY, J.W. Rock slope engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy. 358p. 1981.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. Engineering rock mechanics and introduction to the principles. Amsterdam. Pergamon, 2007

HUTCHINSON, J.N.(1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 5, Lausanne. Resumos, Rotterdam, Balkema, p.3-29. 1988.

IBGE. Manual Técnico de Pedologia. Rio de Janeiro, 316p. Manuais técnicos em geociências, n.4 2ªed. Edição limitada, para divulgação junto à comunidade científica das áreas de Pedologia e ciências correlatas presentes ao evento. 2007.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS., v15, p.89-97, 1978.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities. Lisboa. 1977.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J.Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr.15:319-368., 1978.

ISRM, Rock Characterization Testing and Monitoring. Suggested Method of International Society of Rock Mechanics. Pergamon Press, 211p. 1981.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of rock masses. São Paulo: ABGE/CBRM 132P. 1983.

- JENNY, H. *Factors of soil formation*. New York: McGraw-Hill. 281p. 1941.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, J.C.H. *Mining geostatistics*. New York: Academic Press, 600p. 1978.
- JOURNEL, A.G. Non parametric estimation of spatial distributions. *Journal of International Association for Mathematical Geology*; v.15, n.3, 468p. 1983.
- KANJI, M.A. Resistência ao cisalhamento de interfaces solo-rocha. In: *Semana Paulista de Geologia Aplicada, I.*, São Paulo. Anais. APGA, 1969.
- KERTZMAN, F.F.& DINIZ, N.C. “As abordagens de solos utilizadas na geologia aplicada ao meio ambiente”. In: *Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.* ABGE/IPT (Digeo), coordenação geral Omar Yazbek Bitar, São Paulo. 1995.
- KOCH, G.S.; LINK, R.F. *Statistical analysis of geological data*. New York: Dover Publications, v.1. 375p. 1971.
- LACERDA, W.A.; SANDRONI, S.S. Movimentos de Massas Coluviais. In: *Mesa Redonda Sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas*. Pp 1-19, Rio de Janeiro. 1985.
- LACERDA, W.A.& DINIZ, V.M. Estabilidade em Três Dimensões de uma Língua Coluvionar Infinita e Estreita Confinada em Solo Residual, In: *III COBRAE*, Rio de Janeiro. 2001.
- LANDIM, P.M.B. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. 2.ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Unesp, 253p. 2003.
- LEVINE, D. M. et al. *Estatística: teoria e aplicações*. Rio de Janeiro. 2008.
- LOPES, L.F.D. Apostila de Estatística. [www.inf.ufsc.br/~verav/LIVROS/LIVROS/Luis%20Felipe%20Dias%20Lopes.pdf](http://www.inf.ufsc.br/~verav/LIVROS/LIVROS/Luis%20Felipe%20Dias%20Lopes.pdf) DE-UFSM. 139p. 2003.

MARANHÃO, R.J.L. Introdução à pesquisa mineral. 2ª ed. Fortaleza: ETENE, 682p. 1983.

MATHERON, G. Le variables régionalisées et leur estimation. Paris: Masson, 1965.

McMAHON, B.K. *Indices related to the mechanical properties of jointed rock*: Proc. 9th Symp. Rock Mech., Am. Inst. Min. Metall. & Pet. Eng., Golden, Colo., p. 117-128., 1968.

MUABI, P.P. <http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm98/icm25/pag1.htm> 1999.

OLEA, R.A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Kansas: Kansas Geology Survey, 1984.

OLEA, R.A. Geostatistics for engineers and Earth scientists. Boston: Kluwer Academic Publishers, 303p. 1999.

OLIVEIRA, M.T. Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG. Viçosa, MG 279p, 2009.

PAMPLONA, J.; VALENTE, T. Avaliação do risco à ocorrência de movimentos de massa: proposta de uma metodologia. Comunicações Geológicas. Especial II, 923-926. IX CNG2º CoGePLiP, Porto. 2014.

PATTON, F.D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock. Proc. 1st Cong.Int.Soc Rock Mech., Lisbon 1. 509-513. 1966.

PATTON, F.D., HENDRON JR., A.J. General Report on "Mass Movements". International Congress of International Association of Engineering Geology, São Paulo, Brazil, Proceedings. V-GR.57., 1974.

PEARSON, E.S. & HARTLEY, H.O. Biometrika Tables for Statisticians, vol. II. Cambridge University Press, London. 1972

PEDRON, F.A.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C.; KAMINSKI, J.; Solos urbanos- Revisão Bibliográfica. ISSN0103-8478.UFSM, Santa Maria, RS., p7. 2004.

PERAZZOLO, L. Estudo do Comportamento de Dois Taludes da Formação Serra Geral. 150p. Porto Alegre, RS, Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS. 2003.

PENTA, F. "*Frane in movimenti franosi*". 3ªed., Ed.Siderea, Roma.,1963.

PICANÇO, J.L. Movimentos gravitacionais de massa, tragédias de verão. Scientific American Brazil, 2010.

PINHEIRO, J.I.D.; CARVAJAL, S.S.R.;CUNHA, S.B.; GOMES, G.C. Probabilidade e Estatística: Quantificando a Incerteza. Rio de Janeiro.544p. 2012.

PINTO, R.C. *et al* . Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, Estado do Paraná. Maringá, PR. Geoinf: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia.p.3-27., 2012.

PINTO, R.C. *et al*. Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa.Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Maringá, v.5, n.1, p.102-124, 2013.

PINTO, R.C. *et al*. Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa. Maringá, PR. Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia.p.102-124., 2013.

RAMIREZ, J.D. Mecanismo de Ruptura por Tombamento Bloco – Flexural; Caso Talude Noroeste – Mina Tintaya. Peru. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. RJ.150p., 2006.

RAMSAY, J.G.; HUBER, M.I. The techniques of modern structural geology. London: Academic Press. 700p. 1987.

RICO, A.; CASTILHO, H. *La ingeniería de suelos em las vias terrestres*. Ed. Limusa, México, v.1, 459p. 1978.

ROCHA, D.F.N. Estudo do deslizamento em descontinuidades com rugosidade definida – Simulação numérica do comportamento mecânico. Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto. Porto – Portugal. 104p.,2015.

RODRIGUEZ, T.T. Proposta de Classificação Geotécnica para Colúvios Brasileiros. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ. 370p. 2005.

SALAMUNI, E. Notas de aula de geologia estrutural (aula 4). [www.neotectonica.ufpr.br/aula-geologia/aula4.pdf](http://www.neotectonica.ufpr.br/aula-geologia/aula4.pdf). 2006.

SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. & BAUM, R.L. Modeling time-dependent areal slope stability. In: *Landslide: Evaluation and Stabilization*, Lacerda, Ehrlich, Fontoura. & Sayão (eds). Proceedings of the ninth International Symposium on Landslides. Rio de Janeiro, A A Balkema. V.1, p. 23-36. 2004.

SAYÃO, A.S.F.J., LIMA, A.P., SPRINGER, F.O. *et al.*, “Design and Instrumentation Aspects of a 40m High Nailed Slope”. In: *Proceedings of the 16º Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16º ICSMGE, Osaka, Japan, set. 2001.

SELBY, M.J. *Hillslope Materials and Processes*.Oxford:2ed. Oxford University Press, Oxford, 451p, 1993.

SESTINI, M.F. Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE 7511-TDI/724. 144p. 1999.

SIBCS. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 306p. 2006.



SILVA, J.; Condicionantes Geológicas na Estabilidade de Taludes ao Longo da Rodovia BR 101 no Trecho Itaguaí – Angra dos Reis (RJ). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1991.

SILVA, M.A. Aplicações de Inteligência Computacional na Área de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, RJ. Tese (Doutorado) Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 235p., 2016.

SILVA, G.D.G. Comparação dos Modelos de Coulomb e de Barton para a Resistência Tangencial de Descontinuidades Rochosas. Mestrado em Engenharia Civil (Dissertação). Universidade do Porto. Porto, Portugal. 151p., 2015.

SISTEMA Brasileiro de Classificação de Solos. SiBCS. 2ed. Rio de Janeiro. EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 306p. 2006.

SMITH, K. Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster. London and New York, Routledge, 389p. (2ª edição). 1996.

SOARES, A. Sequential indicator simulation with correction for local probabilities. Math, Geol., v.30, n.6, p761-765. 1998.

SOARES, A. Geoestatística para ciências da terra e do ambiente. 2ed. Lisboa: IST Press, 2006.

U.S.DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Survey Manual. Washington, D.C.,; Supplement to Agriculture Handbook, n.18. 1962.

U.S.DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, D.C. U.S. Department of Agriculture. Agriculture handbook, n.436. 754 p. 1975.

U.S.DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Survey Manual. Washington, D.C.; U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, n.430. 1984.

STURARO, J.R. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento. Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos – USP/São Carlos, São Carlos, SP. 183pp. 1994.

SUZUKI, S. Dissertação de Mestrado. Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Coluviais ao Longo do Oleoduto Curitiba-Paranaguá. Rio de Janeiro. 329p. 2004.

TERZAGHI, K. "Mechanisms of Landslides", The Geological Society of America – Engineering Geology (Berkey), 123p. 1950.

THOMAS, M.F. Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates, 2ed. London: MacMillan, 332p. 1979.

TOMINAGA, L.K.; PEJON, O. J. & BASTOS, C. A. (coord.). Diagnóstico preliminar da cartografia geotécnica e geoambiental no Brasil. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. eds. Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. São Carlos, 2004.

TOMINAGA, L.K. Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. 2007.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., & AMARAL, R. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo, SP, Brasil: CTP. Instituto Geológico de São Paulo. 196p., 2009.

TRICART, J. The landforms of the humid tropics, forests and savanas. London: Longman, 306p. 1972.

TROEH, F.R. Landform equations fitted to contour maps. American Journal of Sciences (263). Pg 616-627; 1965.

TUTTLE, S.D. Landforms and landscapes. Iowa: Ed. Brown, 136p. 1970.

TWIDALE, C.R. Structural Landforms – Landforms Associated with granitic rocks, faults and folded strata. Cambridge: The MIT Press, 247p. 1971.

TWIDALE, C.R. Granite Landforms – Landforms Associated with granitic rocks, faults and folded strata. Amsterdam: Elsevier, 372. p. 1982.

UN-ISDR. UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. Vol. II – Annexes. Geneva: UNISDR, 2004.

VALLEJO, G. Ingeniería geológica. Madrid [etc]. Pearson., 2002.

VALLEJO, L.I.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. Ingeniería Geológica, Pearson Educación, Madrid, 715p. 2005.

VAN WESTEN, C.J. Application of geographic information system to landslide hazard zonation. ITC Publication, Enschede, The Netherlands, 15: 245p. 1993.

VARNES, D.J. Landslides types and processes. In: EKEL, E.B.(Org). Landslides and engineering practice. Washington: National Academy of Sciences, 1958.

VARNES, D.J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER & KRIZEK. Landslides: analyses and control. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC. p.11-33., 1978.

VARNES, D.J. Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice. UNESCO Press, Paris. 56p, 1984.

VEYRET, Y. Riscos: O homem como agressor e vítima do meio ambiente – São Paulo: Contexto. 1ª Edição, 1ª Reimpressão. 320 p. 2007.

WACKERNAGEL, H. Multivariate geostatistics: an introduction with applications. 3ed. Springer-Verlag, 2003.

WALDRON, L.J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. J. Soil Sci. Soc. Am., 41, p.843-849, 1977.

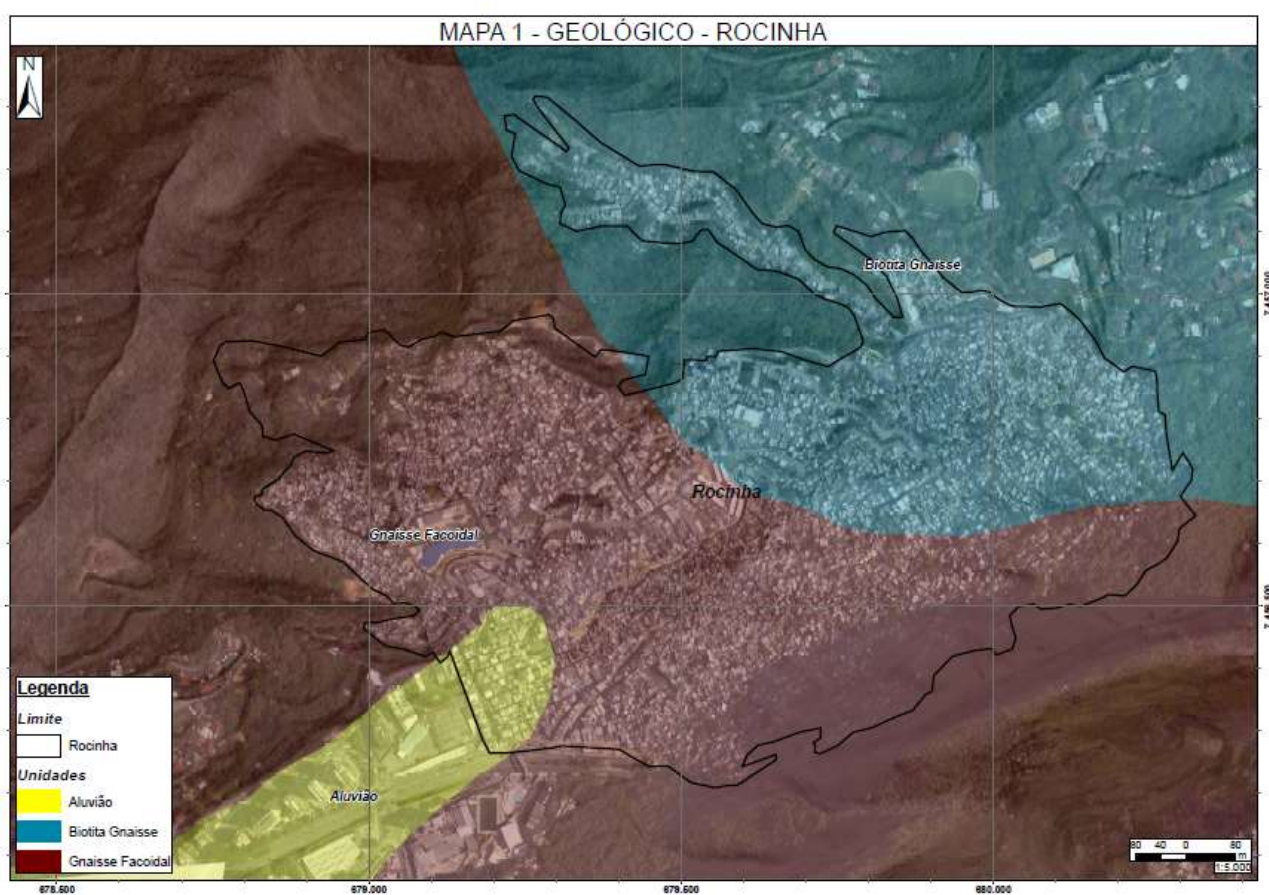
WALDRON, L.J.; DAKESSIAN, S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased shear resistance from root properties. *Soil Science*, 132, p.427-435, 1981.

WLI – WORLD LANDSLIDE INVENTORY. “Multilingual Landslide Glossary”. International Geotechnical Societes-Unesco Working Party on World Landslide Inventory (Chairman: DM Cruden). Bitech, Richmond. British Columbia.p.32. 1993.

YAMAMOTO, J.K; LANDIM, P.M.B. *Geoestatística: Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Oficina dos textos, 215 p.; 2013.

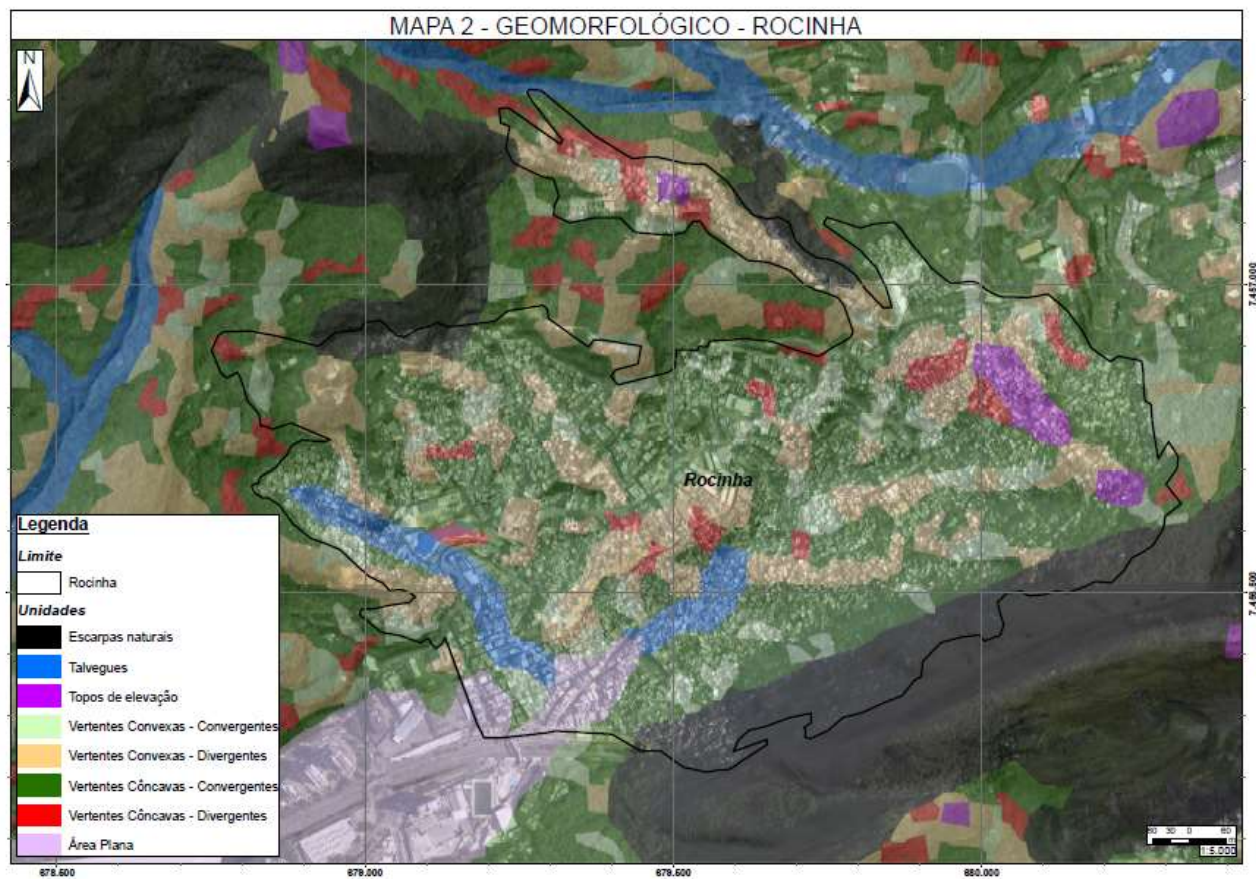
## ANEXOS

## Mapa geológico da Rocinha



(relatório GEORIO/RL-ROC-BAS-01C)

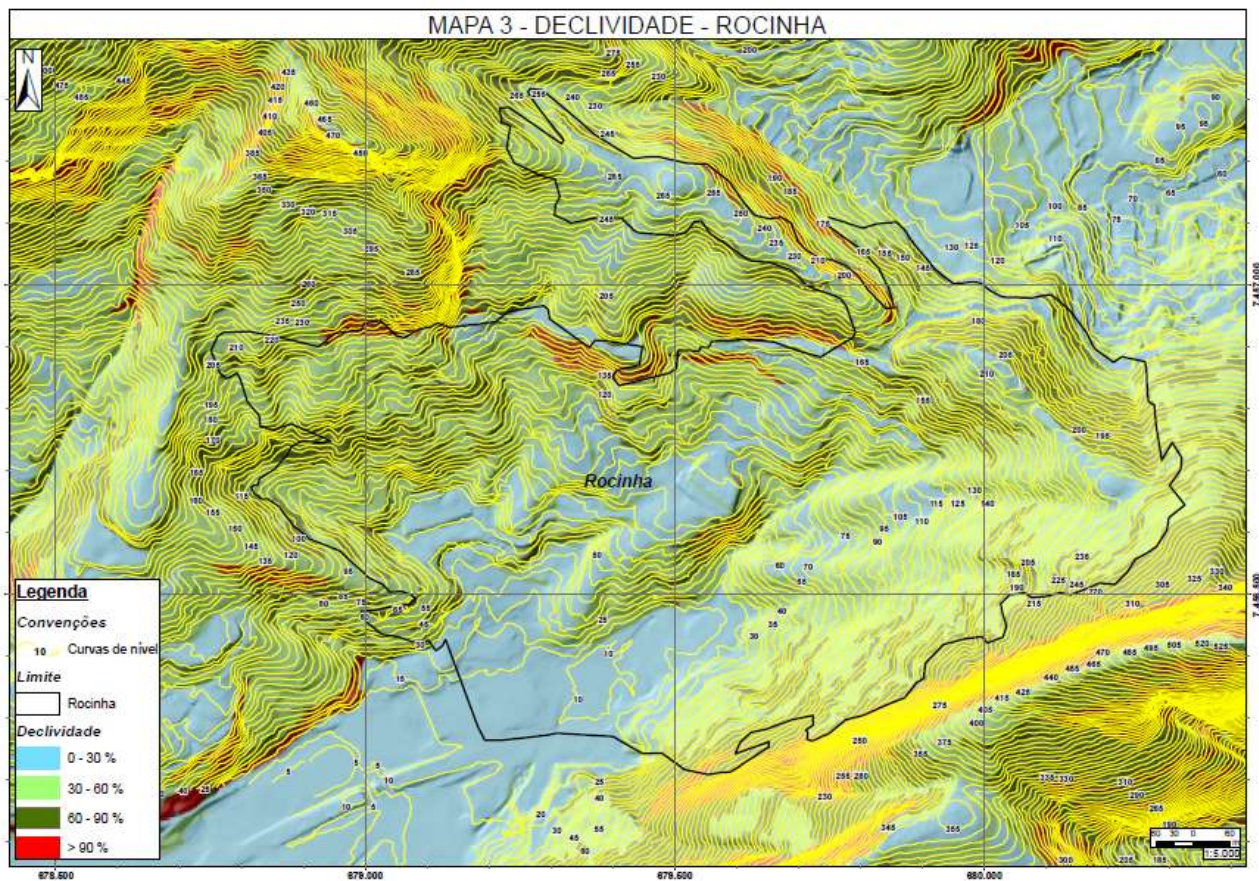
## Mapa geomorfológico da Rocinha



(relatório GEORIO/RL-ROC-BAS-01C, 2010)

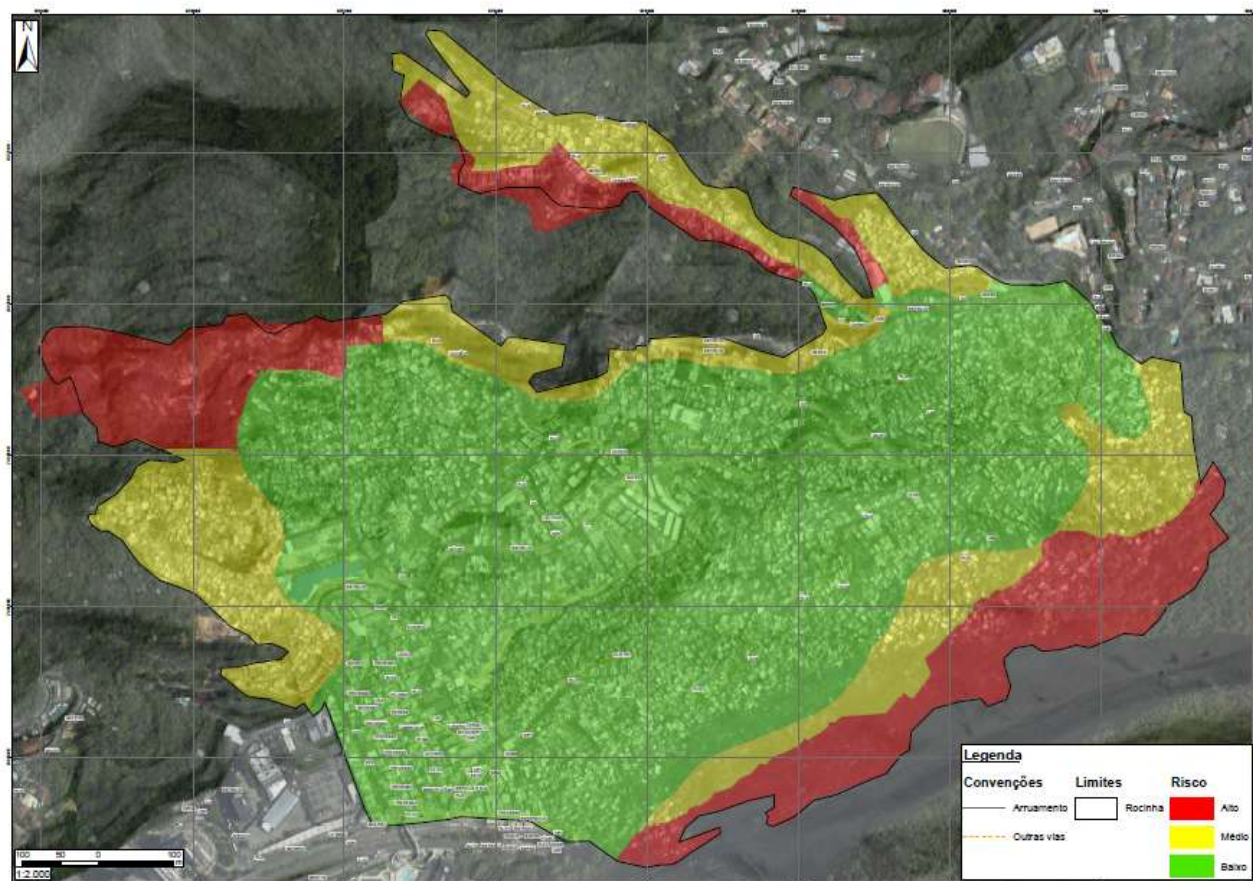


## Mapa de declividades da Rocinha



(relatório GEORIO/RL-ROC-BAS-01C, 2010)

## Mapa de risco com base empírica da Rocinha

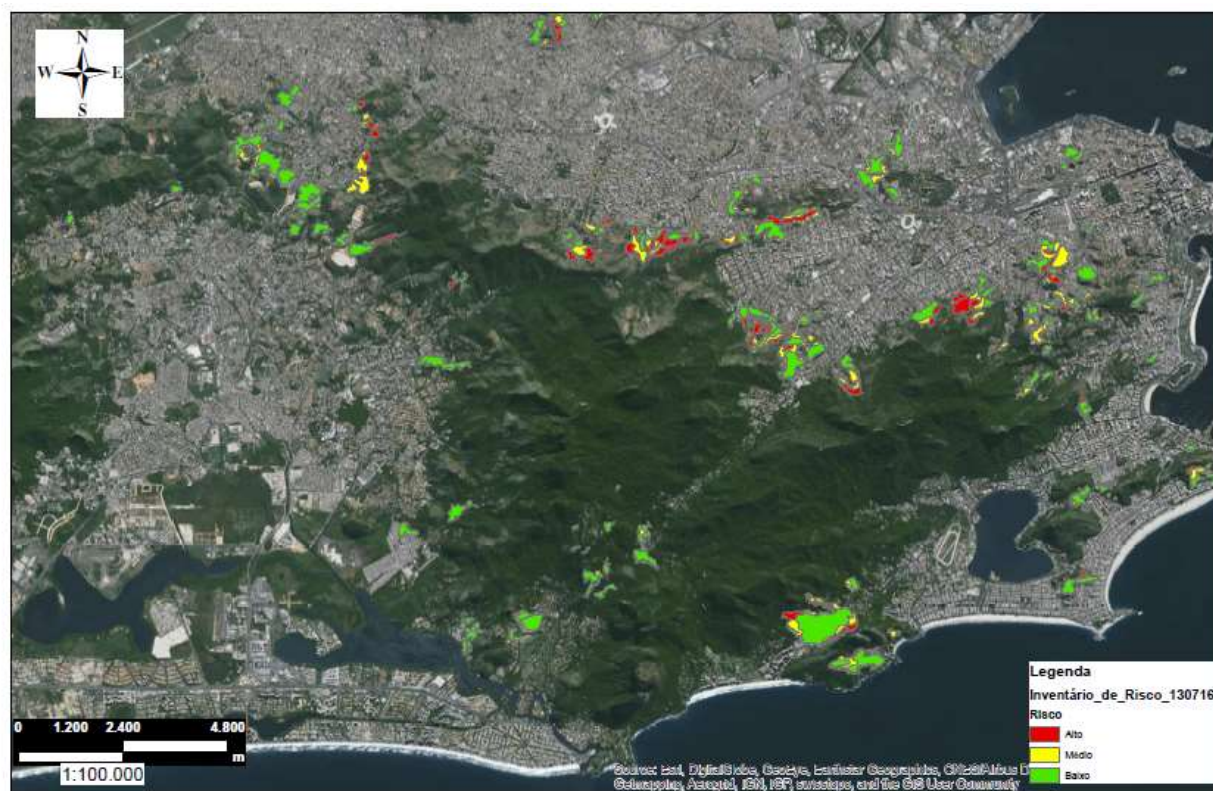


(GEORIO/Gerência de Geologia, 2014)





## Mapa de risco com base empírica do Maciço da Tijuca



(GEORIO/Gerência de Geologia, 2014)

Relatório fotográfico (fotos aéreas)

(apêndice)

Laudos de vistoria

(apêndice)

Informações do registro de ocorrências e classificação de risco de todos os laudos nos períodos de estudo

## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NO ANO DE 1996

DATA	LAUDO	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
13/11/1996	907/96	Estrada Gavea 375	L4	2
11/11/1996	920/96	Rua 2	L10	2
05/02/1996	127/96	Est Gavea 520 - trav bela vista 13	L8	2,3
13/02/1996	200/96	Est Gavea 150 prox caixa da CEDAE	L2	2,3
13/02/1996	273/96	Rua Dioneia 200	L7	1,2
14/02/1996	512/96	Est Gavea s/n - Rua 1 Beco 56 casa 5	L4	1,2
29/02/1996	508/96	Est Gavea 199 casa 28 - vertente Gavea morro 2 irmaos	L5	1,2
14/02/1996	470/96	Est Gavea 250 - casa 8 - Laboriaux	L2	2,3
13/02/1996	496/96	Rua 1 - Macega - jusante escarpa rochosa Morro 2 Irmãos	L6	2,3
14/02/1996	468/96	idem	L6	2,3
05/03/1996	433/96	Vila Verde, travessa 32 - Laboriaux	L8	1,2
10/06/1996	643/96	Est Gavea 514 , e 486	L8	1
29/02/1996	658/96	Est Gavea 558	L9	1
29/02/1996	659/96	Est Gavea 259	L2	1
29/07/1996	710/96	idem beco 41	L2	1
26/07/1996	751/96	idem beco 1	L2	1
31/08/1996	757/96	idem beco 1 /27	L2	1
27/07/1996	764/96	idem - est gavea 259 - campinho da Macega	L2	1
29/08/1996	765/96	Rua 1 - Bica da Palmira - beco 1/118 - casa3	L6	1,2
12/09/1996	779/96	Est Gavea 259 Rua 1 beco 1/61 - Macega	L2	1
11/01/1996	725/96	Rua Dionéia 737	L7	2
11/09/1996	803/96	Est Gavea 199 casa 28 - vertente Gavea morro 2 irmaos	L5	1,2
25/11/1996	960/96	Rua 1 259 - casa 47	L11	1
22/10/1996	924/96	Rua 1, Rua 5 e Rua 113	L6	2



## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NO ANO DE 2010

DATA	B.O.	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
27/01/2010	1571/2010	RUA DIONÉIA E/F Nº 333 MINI PADARIA E MERCADINHO ESPERANÇA	L16	3
26/01/2010	0993/2010	RUA 2 - TRAVESSA 13 (PRÉDIO DE 2 PAVIMENTOS NO Nº 50 E 60)	L4	2
02/02/2010	1250/2010	RUA 1 Nº 153 CASA 1A	L6	2
08/03/2010	X	RUA DIONÉIA, 308	L16	2
08/03/2010	X	ESTRADA DA GÁVEA, 308	L18	2 2 (574)
08/03/2010	X	RUA DIONÉIA, 321	L16	2
08/03/2010	X	RUA DIONÉIA 733	L15	2
08/03/2010	X	RUA DIONÉIA, 812 (FINAL DA RUA - ANTIGA GARAGEM ÔNIBUS)	L15	2
09/03/2010	1714/2010	RUA DA MATA - BECO E, 16 - VILA VERDE	L19	1
16/03/2010	4083/2010	RUA DIONÉIA EM FRENTE AO Nº 309	L18	2
16/03/2010	4079/2010	TRAVESSA DO VALE, 42	L15	2
07/04/2010	X	TRAVESSA E CASA 03, 11, 14, 20, 06 - VILA VERDE	L19	2 X5
07/04/2010	X	Rua José Inácio, 25	L12	2 X4
07/04/2010	X	Beco E, atrás do Bar do Ricardo - Vila Verde /TRAV. E CASAS 03, 11, 14 E 20	L19	2
07/04/2010	X	RUA da Ladeira, 40	L19	2
07/04/2010	X	RUA Dionéia, 317, 590 CASAS 309, 311, 311A, 317, 317 FDS, 321, 321 FDS	L16	2 X7
07/04/2010	X	RUA Dionéia, 398 (Bar do baixinho)	L16	2
07/04/2010	X	RUA JOSÉ INÁCIO, 34, 45, 46, 46B, 48 - LABORIAUX	L12	2 X5
29/03/2010	4320/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 147 - RUA 1 ( 1ª PAVIMENTO ENTRADA 1 E 2)	L14	2
07/04/2010	X	RUA MARIA DO CARMO, 120 - LABORIAUX	L13	2
07/04/2010	X	RUA MARIA DO CARMO, 80 - LABORIAUX	L13	2
11/04/2010	X	ESTRADA DA GÁVEA, 199	L14	2 X2 (163)
12/04/2010	X	RUA DIONÉIA, ALTURA DO N.º 309	L16	2
12/04/2010	06164/2010	ESTRADA DA GÁVEA 259 RUA 1 - ROÇA	L18	2 X2 (257)
12/04/2010	06248/2010	RUA 1 - PEDRA	L4	2
12/04/2010	06185/2010	RUA DIONÉIA 180	L17	2 2x3(814)
12/04/2010	06167/2010	RUA JOSE INACIO 25 - LABORIAUX	L12	2
12/04/2010	7586/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 369 - TRAVESSA 49 OU 53	L4	2 X2 (466)
13/04/2010	6428/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - VILA 199 - TRAVESSA 17	L14	2



## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NO ANO DE 2010

DATA	B.O.	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
13/04/2010	6429/2010	RUA 1 - CAMINHO DO TERREIRÃO - TRAVESSA 27 - TERREIRÃO	L5	2 X2 (459)
13/04/2010	6430/2010	RUA 1 - CAMINHO DO TERREIRÃO - TRAVESSA 27 - TERREIRÃO	L5	2 2 x4 (584)
13/04/2010	6431/2010	RUA LABORIAUX, S/Nº - TRECHO INTERMEDIÁRIO - LABORIAUX	L13	2
13/04/2010	6432/2010	RUA LABORIAUX, S/Nº - TRECHO FINAL - LABORIAUX	L12	2
13/04/2010	6433/2010	RUA LABORIAUX, S/Nº - TRECHO FINAL À MONTANTE - LABORIAUX	L12	2
12/04/2010	6434/2010	RUA LABORIAUX, S/Nº - TRECHO FINAL TOPO DE MONTANTE - LABORIAUX	L12	2
03/05/2010	9577/2010	RUA MARIA DO CARMO, 19 A 80 E RUA JOSÉ INÁCIO, 02 E 347 -LABORIAUX	L13	2 X2
04/05/2010	8001/2010	RUA DIONÉIA, 321 CASA 01	L16	2 2 (568)
05/05/2010	9220/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 197 FDS	L14	2
04/05/2010	8950/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 520 - BECO E, N.º 08 - VILA VERDE	L8	2
04/05/2010	8004/2010	RUA DIONÉIA, 309	L16	2
04/05/2010	7998/2010	RUA DIONÉIA, 321 CASA 01	L16	2
04/05/2010	8002/2010	RUA DIONÉIA, 321 CASA 05 FDS	L16	2
04/05/2010	8003/2010	RUA DIONÉIA, 321 CASA 08 FDS	L16	2
04/05/2010	7999/2010	RUA DIONÉIA, 321 CASA 14 FDS	L16	2
16/04/2010	6167/2010	RUA JOSÉ INÁCIO, 25 CASA 03	L12	2
13/05/2010	8005/2010	RUA DIONÉIA,317 FDS / ESTRADA DA GÁVEA, 199	L16	2
13/05/2010	8006/2010	RUA DIONÉIA,321 FDS - CASA 8	L16	2
13/05/2010	8000/2010	RUA DIONÉIA,321 A	L16	2
13/05/2010	9608/2010	RUA 1 S/Nº - BECO 37	L5	2
13/05/2010	9219/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 199	L14	2
13/05/2010	4061/2010	RUA DIONÉIA Nº 812	L15	2 2 (242)
13/05/2010	7183/2010	RUA DIONÉIA, 741 - CASAS 1 E 2	L15	2 X2
27/05/2010	7819/2010	RUA 1 S/Nº - BECO 37 - BASE DO TALUDE	L5	2
27/05/2010	10520/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 259 - RUA 1 S/Nº (constantes ocorrencias geotecnicas laudo218)	L18	2 X2 (195)
17/06/2010	3986/2010	RUA DIONÉIA Nº 321 E OUTROS - COM. ROCINHA	L16	2
17/06/2010	11412/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 458	L9	2 X2 (226)
17/06/2010	1122/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 259 - RUA 1	L18	2
28/06/2010	7650/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 520 - TRAVESSA DO VALE Nº 14L	L8	2

## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NO ANO DE 2010

DATA	B.O.	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
28/06/2010	12505/2010	ESTRADA DA GÁVEA Nº 259 - RUA 1 - TRAVESSA 53	L18	2
16/07/2010	9809/2010	RUA 04 Nº 24	L10	3
16/07/2010	11535/2010	RUA JOSÉ INÁCIO PERTO DO Nº 09 E	L12	2
20/07/2010	13164/2010	RUA JOSÉ INÁCIO, 13 - LABORIAUX	L12	2
16/07/2010	13163/2010	RUA MARIA DO CARMO, 26 - COMUNIDADE LABORIAUX	L13	2
16/07/2010	13086/2010	RUA VILA, 28 - COMUNIDADE LABORIAUX	L12	2
16/07/2010	12504/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 242	L2	2 X2 (786)
16/07/2010	12590/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - TERREIRÃO	L18	2
16/07/2010	11354/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - TRAVESSA 31 / 16, CASA 04	L18	2
16/07/2010	6950/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - TRAVESSA 53, CASA 10	L18	2
16/07/2010	12513/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA 01 - TRAVESSA 53, CASA 120	L18	2
23/07/2010	13588/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 369 - RUA 01 CASA B	L4	2
01/07/2010	7743/2010	CAMINHO DO TERREIRÃO S/Nº - TRAVESSA 22, CASA 8	L5	2
01/07/2010	10791/2010	CAMINHO DO TERREIRÃO S/Nº - TRAVESSA 27, CASA 2	L5	2
26/07/2010	11987/2010	CAMINHO DO TERREIRÃO, 02 (PRÓXIMO AO KINKAS)	L5	2
22/07/2010	12512/2010	RUA UM - TRAVESSA ONZE S/Nº - CAMINHO DO TERREIRÃO	L5	2
22/07/2010	13468/2010	RUA UM - TRAVESSA ONZE, 45 - CAMINHO DO TERREIRÃO	L5	2
16/07/2010	11547/2010	TRAVESSA 51 / 40 - ÁREA DA MACEGA S/Nº	L6	2
22/07/2010	11880/2010	ESTRADA DA GÁVEA - MACEGA	L4	2
03/08/2010	13928/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 449 PREDIO 27 FDS APT 201	L17	3
17/08/2010	X	ESTRADA DA GÁVEA, 199 CASA 48 - PROXIMO AO PRÉDIO DO ROGÉRIO	L14	2
13/08/2010	X	ESTRADA DA GÁVEA, 545 - AO LADO DA MANDINHA MÓVEIS	L9	2
23/09/2010	13924/2010	BECO DA PAZ, CASA 11 - VILA VERDE	L20	2
21/10/2010	14023/2010	CAMINHO DO TERREIRÃO	L5	2
04/11/2010	16665/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 461 CASA 5	L9	2
03/11/2010	16566/2010	ESTRADA DA GÁVEA, 461 FDS	L9	2

## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NOS ANOS DE 2011 À 2014

DATA	LAUDO	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
07/02/2011	0226/2011	RUA TRAMPOLIM 558 -	679312 / 7456749	L22 2,3
	0227/2011	EST GAVEA 545	679020 / 7456368	L22 1
06/09/2011	0669/2011	RUA 2 - Nº55	679772 / 7456569	L23 2,3
03/02/2011	0832/2011	EST GAVEA 150		L24 2
16/04/2010	0840/2011	R JOSE INACIO 25 LABORIAUX	679551 / 7457108	L12 2 x2
23/12/2011	*BO17027/2011	ESTRADA DA GÁVEA - TRAVESSA SAMARITANA, 73A		L25 2
22/12/2011	*BO16987/2011	RUA 1 - TRAVESSA 47		L26 2
	0391/2012	R DIONEIA 732		L15 2
03/01/2012	BO 044/12	RUA 1 - ROCINHA, 25, CAMINHO DO TERREIRÃO, TRAVESSA 25		L5 2
06/01/2012	BO 17254/2011	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - TRAVESSA 8, 500 CASA 1		L14 2,3
03/01/2012	BO 17445/2011	ESTRADA DA GÁVEA, 310 CASA 03		L18 2
30/01/2012	BO 1005/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 259 RUA 01 - TRAVESSA 33, CASA 13		L18 2
15/02/2012	BO 3057/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 461 CASA 10, APTº 201		L22 3
07/03/2012	BO 5469/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - TRAVESSA 13, 220 CASA 1		L18 3
29/02/2012	OF 22/2012	RUA CAMINHO DO TERREIRÃO, 5/Nº - PERTO DA PEDRA		L5 2
30/03/2012	BO 6864/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 461, CASA 10		L22 3
13/04/2012	BO 7275/2012	RUA DIONÉIA, 317, 318 E 319		L16 2
10/05/2012	BO 9719/2012	BECO DA PAZ, 33 - VILA VERDE		L27 2
18/05/2012	BO 10305/2012	RUA DOIS, 37D		L23 2
31/05/2012	BO 10.668/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - TRAVESSA 24, CASA 15		L18 2
01/06/2012	BO 11291/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - BECO 01 - TRAVESSA 13 - CASA 39		L18 2
13/06/2012	BO 12.258/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 461 CASA 10, APTº 201		L22 3
26/06/2012	12.580/2012	BECO E, MATA VILA VERDE		L19 3
12/07/2012	13.780/2012	ESTRADA DA GÁVEA, N 262 - RUA 1		L26 3
08/06/2012	x	RUA DIONÉIA, 732 / TRAVESSA ISMAEL		L15 2
17/08/2012	15.690/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 256-RUA 1, CASA 110		L18 2
17/08/2012	11.386/2012	RUA DIONÉIA, A/L Nº 712		L15 3
17/08/2012	15.689/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 323		L4 2



## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NOS ANOS DE 2011 À 2014

DATA	LAUDO	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
25/06/2012	X	RUA 1 - TRAVESSA 27 - CASA 13	L26	2
03/09/2012	15426/2012	ESTRADA DA GÁVEA, 237	L26	3
10/09/2012	16700/2012	RUA DIONÉIA, 80 (OFICINA DO NEI)	L17	3
21/06/2012	X	RUA 1 - VILA VERMELHA (ACESSO PELA EST DA GÁVEA, 225)	L26	3
01/10/2012	17456/2012	RUA VILA VERDE/ BECO DA PAZ, 46	L27	3
26/10/2012	18654/2012	RUA DIONÉIA, 794	L15	2
21/11/2012	19831/2012	CAMINHO DO TERREIRÃO EM FRENTE AO N.º 42	L5	3
21/11/2012	19352/2012	RUA JOSÉ INÁCIO, 33 - CASA A	L12	3
21/08/2012	X	TRAVESSA ELIEZER, 22 PRÓX A BIROSCA DA DONA ROSANA	X	2
29/04/2013	0489/2013	EST DA GAVEA 252 679880 / 745696	L18	3
26/04/2013	0529/2013	EST DA GAVEA 259 BECO REGINA 680156 / 745661	L18	3
27/04/2013	0530/2013	EST DA GAVEA 259 BECO REGINA 680070 / 745661	L18	2,3
06/06/2013	0558/2013	EST DA GAVEA 199 7456928 / 680150	L14	1
15/01/2013	0595/2013	RUA 1 - VILA RAIZ 07 - ROUPA SUJA 679743 / 745642	L11	1
24/01/2013	0596/2013	TRAV VILA VERDE 17 - LABORIAUX 679355 / 745716	L12	2
15/07/2013	0602/2013	EST GAVEA 199 - TRAV 7 - 108 680148 / 745692	L14	2,3
01/04/2013	6911/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 252	L18	3
01/04/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - BECO REGINA	L18	1
03/04/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - BECO REGINA - PROX AO CHICO BIGODE	L18	2
13/05/2013	9954/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - CASA 15 FUNDOS	L14	2
24/04/2013	10387/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA UM TRAVESSA 27 CASA 13	L18	2
04/07/2013	12562/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - TRAVESSA 07 - 108	L14	2
11/10/2013	18342/2013	RUA DIONÉIA, 800 - CASA 19	L15	2
31/10/2013	19244/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 262	L18	2
05/11/2013	19975/2013	TRAVESSA DO VALE, 20 - CACHOPA	L20	2,3
03/12/2013	21037/2013	RUA JOSÉ INÁCIO, 36 - LABORIAUX	L12	2,3
02/01/2013	21853/2012	RUA JOSÉ INÁCIO, S/N.º - LABORIAUX	L12	2,3
11/01/2013	0766/2013	TRAVESSA BETANIA, 09	L12	2
08/01/2013	21999/2012	RUA MARIA DO CARMO - LABORIAUX	L13	2

## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NOS ANOS DE 2011 À 2014

DATA	LAUDO	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
18/01/2013	01300/2013	RUA JOSÉ INÁCIO, 17	L12	2
21/01/2013	01755/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 461, CASA 10	L22	2
21/01/2013	01866/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 262	L18	2
21/01/2013	01838/2013	TRAVESSA ESPERANÇA, 18	L9	2
23/01/2013	1104/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 394	L27	3
15/01/2013	21690/2012	VILA RAIZ, 07 CASA 01	X	2
24/01/2013	01420/2013	RUA MARIA DO CARMO	L13	2,3
18/02/2013	3953/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 247 A, APT 301	L18	3
20/02/2013	3444/2013	RUA 1, TRAVESSA 58 CASA 10	L5	3
15/02/2013	3497/2013	RUA 1, CASA 660	L5	2
24/01/2013	903/2013	TRAVESSA VILA VERDE, 17 - LABORIAUX	L12	2
06/02/2013	5881	Estrada Gávea 21 A	X	2
06/02/2013	5922	Travessa Vila Verde nº 21 - casa A - Rocinha	L12	2
15/03/2013	6692/13	Rua Gávea - Rua Um 285 -	L5	2
11/03/2013	4734/2013	RUA UM, MACEGA, CASA 32	L6	2,3
12/03/2013	5323/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA 1 CASA 38 FDS	L18	2
20/03/2013	X	RUA MARIA DO CARMO, 73 FDS	L13	3
20/03/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 199 BECO 07 CASA 08A	L14	2
21/03/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 259 TRAVESSA 33 SUBINDO PELA CRECHE MARIA-MARIA	L18	2
01/04/2013	6911/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 252	L18	2
01/04/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - BECO REGINA	L18	2
03/04/2013	X	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - BECO REGINA - PROX AO CHICO BIGODE	L18	2
13/05/2013	9954/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - CASA 15 FUNDOS	L14	2
24/04/2013	10387/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA UM TRAVESSA 27 CASA 13	L18	2
04/07/2013	12562/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - TRAVESSA 07 - 108	L14	2
11/10/2013	18342/2013	RUA DIONÉIA, 800 - CASA 19	L15	2
31/10/2013	19244/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 262	L18	2
05/11/2013	19975/2013	TRAVESSA DO VALE, 20 - CACHOPA	L20	2
03/12/2013	21037/2013	RUA JOSÉ INÁCIO, 36 - LABORIAUX	L12	2

## OCORRÊNCIAS SELECIONADAS NOS ANOS DE 2011 À 2014

DATA	LAUDO	ENDEREÇO	LOCAL	CLASSIFICACAO
02/01/2014	23106/2013	CAMINHO DO TERREIRÃO, 259 - TRAVESSA VINTE, 45	L5	3
27/12/2013	23433/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 242 - RUA DA FONTE, 5/Nº - VILA VERDE	L18	2
17/01/2014	01276/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 262	L18	2
09/01/2014	24174/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 242 - RUA DA FONTE, 5/Nº - VILA VERDE	L18	2
08/01/2014	24894/2013	ESTRADA DA GÁVEA, 369 - RUA DOIS	L4	2
10/01/2014	24646/13	ESTRADA DA GÁVEA, 461 - CASA 10		2
16/01/2014	129/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA 1 Nº 52	L18	2
21/01/2014	4734/13	RUA UM, MACEGA, CASA 32	L6	2
06/02/2014	2468/2014	LADEIRA DA CACHOPA, 12	L20	2
05/02/2014	2437/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - TRAVESSA 75 FDS	L14	2
21/03/2014	5118/2014	RUA DIONÉIA, 800	L15	2
04/04/2014	6152/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 160 - VILA CRUZADO	L24	2
12/06/2014	9603/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 259 - RUA 1 Nº 38 CS 04	L18	2
14/07/2014	10797/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 520 - BECO DA PAZ, 33 CASA 11 - VILA VERDE	L22	2
31/07/2014	11492/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - TRAVESSA 8 CASA 15 - TERREIRÃO	L14	2
21/08/2014	12795/2014	ESTRADA DA GÁVEA, 199 - VILA 199 - TRAVESSA 07	L14	2
15/10/2014	X	ESTRADA DA GÁVEA, 580 - EM FRENTE AO CLUBE EMOÇÕES	L22	2
23/10/2014	16392/2014	ESTRADA DA GÁVEA E/F 389	X	2
14/11/2014	X	RUA DIONÉIA, 340	L16	2
12/12/2014	20524/2014	TRAVESSA ESPERANÇA, 19 - ROUPA SUJA	L9	2

