



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**PREVISÃO DE ALCANCES DE RUPTURAS DE TALUDES DE
BELO HORIZONTE POR MEIO DE RETROANÁLISES:
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO DO RISCO**

LUCIENE OLIVEIRA MENEZES

Belo Horizonte, 13 de junho de 2011

Luciene Oliveira Menezes

**PREVISÃO DE ALCANCES DE RUPTURAS DE TALUDES DE
BELO HORIZONTE POR MEIO DE RETROANÁLISES:
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO DO RISCO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Maria Giovana Parizzi

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

M543p Menezes, Luciene Oliveira
Previsão de alcances de rupturas de taludes de Belo Horizonte por meio de retroanálises [manuscrito]: uma contribuição para a gestão do risco / Luciene Oliveira Menezes. — 2011.
xiv, 102 f., enc. : il.

Orientador: Gustavo Ferreira Simões.
Coorientadora: Maria Giovana Parizzi.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 98-102.

1. Mecânica do solo – Teses. 2. Taludes (Mecânica do solo) – Teses. I. Simões, Gustavo Ferreira. II. Parizzi, Maria Giovana. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13 (043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

"Previsão de alcances de rupturas de taludes de Belo Horizonte por meio de retroanálises: uma contribuição para a gestão do risco"

Luciene Oliveira Menezes

Dissertação defendida e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Senhores:

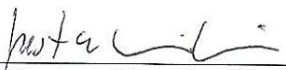

Prof.º Dr.º Gustavo Ferreira Simões


Prof.ª Dr.ª Maria Giovana Parizzi


Prof.º Dr.º Lúcio Flávio de Souza Villar


Prof.º Dr.º Eduardo Antônio Gomes Marques

Aprovada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes


Prof. Gustavo Ferreira Simões
Coordenador

Versão Final aprovada por



Prof.º Gustavo Ferreira Simões
Orientador

Belo Horizonte, 13 de junho de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, Clara, Pedro e Sofia, que pelo simples fato de existirem já me incentivam na busca de ser uma pessoa e uma profissional melhor. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao Prof.º Gustavo Ferreira Simões por sua dedicação e competência como professor e orientador, e por todo apoio oferecido no período do mestrado. Seus apontamentos e questionamentos foram muito importantes para a conclusão deste trabalho. Obrigada pela confiança e amizade.

À Prof.ª Giovana Parizzi por ter aceitado a co-orientação desta pesquisa. Obrigada pelas visitas ao campo, pelas informações sobre os taludes e geologia tão bem vindas para mim, e principalmente por sua disposição em ajudar.

Aos professores Eduardo Marques e Lúcio Villar pela participação em minha banca e pelos comentários e sugestões. Aos demais professores do Mestrado do Departamento de Transportes e Geotecnia da UFMG pelos ensinamentos e incentivo. Em especial à Prof.ª Judy Mantilla pelo apoio de sempre.

Aos amigos de mestrado, especialmente Luciane Campos e Thiago Borges, pelo companheirismo e torcida uns pelos outros. E a todos os amigos que me apoiaram neste período. Vocês foram verdadeiros suportes, com suas palavras de carinho e coragem.

Ao meu marido Estevam pelo companheirismo e incentivo.

Ao Prof.º Oldrich Hungr por ter cedido a licença do programa DAN-W, e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Estou feliz por ter chegado o tempo de encerrar mais uma etapa. E outras virão... Agradeço a Deus por todas as oportunidades de aprendizado e por Suas manifestações de amor em minha vida. Muito Obrigada!

Meus sinceros agradecimentos.

*Querem que vos ensine
o modo de chegar à ciência verdadeira?
Aquilo que se sabe, saber que se sabe;
aquilo que não se sabe, saber que não se sabe;
na verdade é este o saber.*

(Confúcio)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	II
SUMÁRIO	IV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE QUADROS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 <u>Objetivo geral</u>	5
1.2.2 <u>Objetivos Específicos</u>	5
1.3 Justificativa	5
1.4 Estrutura da dissertação	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Avaliação de riscos de rupturas de Taludes.....	8
2.2 Tipos de movimento de massa e sua caracterização.....	17
2.3 Características geológicas e geotécnicas de Belo Horizonte	19
2.4 Modelagem reológica.....	27
2.4.1 <u>Conceitos e modelos</u>	27
2.4.2 <u>A ferramenta DAN-W</u>	33
3 METODOLOGIA	41
3.1 Definição dos taludes a serem retroanalizados	41
3.2 Definição dos dados de entrada para cada modelo reológico	41
3.3 Realização das simulações de alcance pelo programa DAN-W	42
3.4 Alcances simulados <i>versus</i> alcance de campo e definição dos parâmetros reológicos	44
3.5 Avaliação da compatibilidade do modelo reológico com a ruptura do talude.....	44
3.6 Aplicação dos parâmetros obtidos na simulação de outro talude	45
4 RESULTADOS	46

4.1	Talude Ponteio	46
4.1.1	<u>Histórico e descrição da área</u>	46
4.1.2	<u>Topografia</u>	48
4.1.3	<u>Retroanálises do Talude Ponteio 1</u>	50
4.1.4	<u>Previsão de alcance Ponteio 2</u>	55
4.2	Talude Planetóides	56
4.2.1	<u>Histórico e descrição da área</u>	56
4.2.2	<u>Topografia</u>	57
4.2.3	<u>Retroanálises</u>	59
4.3	Talude Taquaril	63
4.3.1	<u>Histórico e descrição da área</u>	63
4.3.2	<u>Topografia</u>	64
4.3.3	<u>Retroanálises</u>	65
4.4	Talude Engenho Nogueira	70
4.4.1	<u>Histórico e descrição da área</u>	70
4.4.2	<u>Topografia</u>	71
4.4.3	<u>Retroanálises</u>	73
4.5	Talude Juliana	76
4.5.1	<u>Histórico e descrição da área</u>	76
4.5.2	<u>Topografia</u>	77
4.5.3	<u>Retroanálises</u>	79
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
5.1	Adequação dos modelos reológicos para cada talude	82
5.2	Propriedades reológicas retroanalizadas e referências bibliográficas	85
5.3	Metodologia proposta para pesquisas futuras	89
6	CONCLUSÕES	90
6.1	Aplicabilidade da análise dinâmica para taludes de Belo Horizonte	91
6.1.1	<u>Relação entre o modelo reológico e o material geotécnico</u>	91
6.1.2	<u>Previsão de alcances por retroanálises como contribuição para a gestão de risco</u>	92
6.1.3	<u>Potencialidades e limitações do programa DAN-W</u>	94
6.2	Recomendações e sugestões para pesquisas futuras	96
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

P	Pressão interna atuante entre blocos [kPa]
T	Pressão interna resistente entre blocos [kPa]
F	Pressão resultante na base de cada bloco [kPa]
H_i	Média das alturas adjacentes a cada bloco [m]
B_i	Largura do bloco [m]
ds	Espessura infinitesimal
v'_i	Velocidade inicial de cada bloco [m/s]
v_i	Velocidade de cada bloco ao final de um intervalo de tempo [m/s]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
S'_i	Deslocamento inicial em coordenadas curvilíneas de cada bloco [m]
S_i	Deslocamento em coordenadas curvilíneas de cada bloco ao final de Δt [m]
h_j	Média de profundidade para nova posição do bloco após Δt
V_j	Volume para nova posição do bloco após Δt
k	Coefficiente de pressão lateral [adimensional]
k_a	Coefficiente de pressão lateral ativo [adimensional]
k_p	Coefficiente de pressão lateral passivo [adimensional]
a_c	Aceleração centrífuga
R	Raio de curvatura [m]
M	Mudança no momento resultante devido a material erodido ou depositado
m	Massa de cada bloco
A	Área da base do bloco [m ²]
r_u	Fator ou coeficiente de poropressão [adimensional]
c	Constante de cisalhamento para o modelo reológico plástico [kPa]
n	Coefficiente de rugosidade para o modelo reológico turbulento [kPa]

S_u	Resistência ao cisalhamento em condição não drenada [kPa]
D_{max}	Profundidade máxima da seção transversal do talude [m]
B	Largura da seção transversal do talude [m]
H	Profundidade da seção transversal retangular equivalente do talude [m]

Letras Gregas

α	Ângulo na base do bloco (ou talude) com a horizontal [graus]
ϕ	Ângulo de atrito interno do material, ou de interface entre materiais [graus]
γ	Peso específico natural do material [kN/m ³]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [kPa.s]
ζ	Coefficiente de turbulência
Δt	Intervalo de tempo [s]
$\Delta \epsilon_j$	Incremento de deformação tangencial [adimensional]
Δ	Acréscimo

Subscritos

i	Índice correspondente à extremidade dos blocos
j	Índice correspondente à massa dos blocos

Sobrescritos

°	Ângulo em graus
'	Índice correspondente à condição inicial

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1- Cicatrizes de rupturas em Teresópolis, janeiro de 2011 (http://veja.abril.com.br/multimedia/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro)	3
FIGURA 1.2- Danos associados às corridas de massa em Teresópolis, janeiro de 2011 (http://veja.abril.com.br/multimedia/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro)	3
FIGURA 1.3- Corrida de detritos na Rua Patagônia, região Centro-Sul de BH, em 05-01-2011 (http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2011/01/05/interna_gerais,201836/cratera-e-deslizamento-de-barranco-interditam-vias-da-regiao-centro-sul-de-bh.shtml)	4
FIGURA 2.1- Matriz proposta para classificação do risco de escorregamentos em Belo Horizonte (Campos, 2011).....	11
FIGURA 2.2- Métodos propostos para avaliação de riscos (Cerri, 2001 <i>apud</i> Hansen, 1984).....	12
FIGURA 2.3- Ângulo de sombra (β) (Pacheco, 2001)	15
FIGURA 2.4- Geologia do município de Belo Horizonte e taludes típicos (Modificado de Silva <i>et al.</i> 1995 e Viana 2000, <i>apud</i> Parizzi, 2004).....	21
FIGURA 2.5- Tipos de rupturas decorrentes da relação espacial das discontinuidades em maciços rochosos. a) Modelos de Hoek & Bray (1981) e b) Modelos de Pitéu & Martin (1981) para rupturas planares (Parizzi, 2004).	22
FIGURA 2.6- Analogia da solução de análise de estabilidade de taludes e análise do comportamento mecânico de corridas de massa	27
FIGURA 2.7- Taxa de deformação x esforço cisalhante (Macias <i>et al.</i> 1997).....	31
FIGURA 2.8- Solução Lagrangeana para a massa deslocada em coordenadas curvilíneas (Hungr, 1995)	34
FIGURA 2.9 - Forças agindo no contorno de um bloco deslizando infinitesimal (Hungr, 1995).....	34
FIGURA 2.10- Definição do coeficiente k – razão entre tensão tangencial e normal variando ao longo do caminho (Hungr, 1996).....	37
FIGURA 3.1 – Superfície de ruptura e geometria do talude Juliana após lançamento no DAN-W.	43
FIGURA 3.2- Superfície de ruptura e geometria do talude Juliana após lançamento no DAN-W. ..	43
FIGURA 4.1- Vista do Talude Ponteio em 2002 (Parizzi, 2004).....	47

FIGURA 4.2- Vista do Talude Ponteio em 2003 (Fonte site www.deflor.com.br).....	47
FIGURA 4.3- Vista da tela metálica antes de romper, sofrendo a pressão do tálus (acervo pessoal Parizzi)	48
FIGURA 4.4 - Vista do Talude Ponteio em 2010.....	48
FIGURA 4.5 – Planta topográfica Talude Ponteio (Modificada de Parizzi, 2004)	49
FIGURA 4.6 - Croquis do perfil longitudinal Ponteio 1 – geometria antes e após ruptura de 2002.	50
FIGURA 4.7- Variação do alcance com o peso específico no modelo friccional - Talude Ponteio 1	51
FIGURA 4.8- Alcance x ângulo de atrito da interface no modelo friccional- Talude Ponteio 1	51
FIGURA 4.9- Alcance x Resistência não-drenada no modelo plástico- Talude Ponteio 1	53
FIGURA 4.10- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham – Talude Ponteio 1	54
FIGURA 4.11- Alcance x ângulo de atrito no modelo Coulomb-Viscoso – Talude Ponteio 1	55
FIGURA 4.12- Talude Planetóides abaixo da BR 356. Cicatrizes de ruptura no topo e na base (Fevereiro/2010).	56
FIGURA 4.13- Detalhe da cicatriz no topo do Talude Planetóides (Fevereiro/2010).....	57
FIGURA 4.14- Corte na base do talude Planetóides (Março/2010).	57
FIGURA 4.15 – Planta topográfica Talude Planetóides (Parizzi, 2004)	58
FIGURA 4.16- Perfil longitudinal Talude Planetóides (Parizzi, 2004).....	59
FIGURA 4.17- Alcance x ângulo de atrito de interface para diferentes fatores r_u , no modelo friccional – Talude Planetóides.....	60
FIGURA 4.18- Alcance x Resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Planetóides	61
FIGURA 4.19- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham - Talude Planetóides	62
FIGURA 4.20- Taquaril. a) depósito de tálus amarelado, b) tálus avermelhado, c) aterro. (Parizzi, 2004)	63
FIGURA 4.21- Planta topográfica Talude Taquaril (Parizzi, 2004).....	64
FIGURA 4.22- Perfil longitudinal Talude Taquaril (Parizzi, 2004).....	65
FIGURA 4.23- Alcance x ângulo de atrito de interface para diferentes r_u , modelo friccional- Talude Taquaril	66

FIGURA 4.24- Alcance x resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Taquaril.....	68
FIGURA 4.25- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham - Talude Taquaril	69
FIGURA 4.26- Alcance x ângulo de atrito na base no modelo Coulomb-Viscoso - Talude Taquaril	70
FIGURA 4.27- Vista geral das ravinas do Talude Engenho Nogueira em 2003 (Parizzi, 2004)	71
FIGURA 4.28- Planta topográfica do Talude Engenho Nogueira em 2002 (Parizzi, 2004)	72
FIGURA 4.29- Perfil AB da Ravina 1, com horizontes de solo e superfície de ruptura de 2003 (Parizzi, 2004).....	73
FIGURA 4.30- Alcance x ângulo de atrito para diferentes fatores r_u , no modelo friccional – Talude Eng. Nogueira	75
FIGURA 4.31- Alcance x resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Engenho Nogueira	76
FIGURA 4.32- Vista da ruptura do Talude Juliana e muro de 2,8m que serviu de anteparo (Urbel, 2010)	77
FIGURA 4.33- Levantamento Planialtimétrico do Talude Juliana (Urbel, 2010).....	78
FIGURA 4.34- Perfil longitudinal do Talude Juliana (Urbel, 2010).....	78
FIGURA 4.35- Alcance x ângulo de atrito na superfície de ruptura, no modelo friccional- Talude Juliana	80
FIGURA 4.36- Alcance x resistência não-drenada no modelo Plástico- Talude Juliana	81
FIGURA 5.1 - Metodologia sugerida na análise dinâmica de previsão de alcances pelo programa DAN-W.....	89
FIGURA 6.1- Avaliação da vulnerabilidade segundo Campos (2011) e alcances de taludes tratados nesta pesquisa.....	93
FIGURA 6.2 – Seção transversal considerada pelo programa DAN-W (Hungr, 2004).....	95

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2-1- Conceitos referentes a análise de riscos (Zuquete, 1993 <i>apud</i> Bandeira, 2003).....	9
QUADRO 2-2- Mortalidade esperada em Hong Kong (Pacheco, 2001).....	14
QUADRO 2-3- Fator de vulnerabilidade VS (Pacheco, 2001).....	14
QUADRO 2-4- Atividades necessárias para avaliar a distância de deslocamento e velocidade dos escorregamentos potenciais (Fell <i>et. al</i> ,2008).....	16
QUADRO 2-5- Classificação dos Movimentos de Massa (Augusto Filho, 1992).....	18
QUADRO 2-6- Classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978).....	18
QUADRO 2-7- Resultados de retroanálises de estabilidade de taludes (Parizzi, 2004)	22
QUADRO 2-8- Parâmetros geotécnicos das amostras do tálus que cobre o Talude Ponteio (Parizzi, 2004)	23
QUADRO 2-9- Parâmetros geotécnicos das amostras do tálus que cobre o Talude Planetóides (Parizzi, 2004).....	24
QUADRO 2-10- Parâmetros geotécnicos do saprolito e dos depósitos que cobrem o Talude Taquaril (Parizzi, 2004)	25
QUADRO 2-11- Parâmetros geotécnicos dos solos do Talude Engenho Nogueira (Parizzi, 2004) .	26
QUADRO 2-12- Características, uso e referências bibliográficas de modelos dinâmicos a partir de Hungr (1995).....	29
QUADRO 2-13- Valores de viscosidade dinâmica.	30
QUADRO 2-14- Valores de viscosidade (Macias <i>et al</i> , 1997).....	31
QUADRO 2-15- Equações de T (resistência na base da corrida), dados de entrada e breve descrição dos modelos reológicos.....	39
QUADRO 4-1- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Ponteio.....	52
QUADRO 4-2- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Ponteio 2.....	55
QUADRO 4-3- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Planetóides	61
QUADRO 4-4- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Taquaril	67
QUADRO 4-5- Resultado da retroanálise no modelo Bingham – Talude Taquaril	69

QUADRO 4-6- Limites de ângulo de atrito definidos para a retroanálise do Talude Engenho Nogueira.....	74
QUADRO 4-7- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Engenho Nogueira.....	75
QUADRO 4-8- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Juliana.....	80
QUADRO 5-1- Adequação dos modelos reológicos para cada talude estudado.....	82
QUADRO 5-2- Propriedades reológicas dos taludes estudados, e obtidas na literatura técnica para diferentes modelos	87
QUADRO 6-1- Modelos reológicos compatíveis e classificação do material e movimento de massa dos taludes.....	91

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade da metodologia de análise dinâmica para previsão de alcances de rupturas de taludes do município de Belo Horizonte. Foram realizadas retroanálises de casos conhecidos de cinco rupturas utilizando o programa DAN-W, versão 10, de análise dinâmica, desenvolvido por Hungr (1995). Esta ferramenta computacional permite a análise dinâmica de rupturas a partir de oito modelos reológicos, dentre eles merecem destaque os modelos friccional e fluido newtoniano. Para o modelo friccional, os parâmetros reológicos são o ângulo de atrito na base da superfície de ruptura e o coeficiente de poropressão r_u , e para o modelo fluido newtoniano, o parâmetro reológico é a viscosidade dinâmica. O valor do parâmetro retroanalizado foi definido como o ponto de interseção das curvas de simulações de alcance obtidas pelo programa DAN-W com a reta do alcance observado em campo. A compatibilidade de cada modelo para cada talude foi avaliada considerando os seguintes aspectos: se o comportamento simulado pelo programa DAN-W reflete o observado em campo; se as curvas de simulação apresentam comportamento lógico e definido, e se o resultado da retroanálise está coerente com os dados de ensaios ou da bibliografia. A escolha dos taludes privilegiou aqueles com geologia representativa da região de Belo Horizonte, com geometria conhecida antes e após ruptura, e com ensaios de caracterização e resistência executados. Os taludes escolhidos foram denominados Talude Ponteio, Talude Planetóides, Talude Taquaril, Talude Engenho Nogueira e Talude Juliana. Os parâmetros reológicos obtidos foram comparados com a bibliografia. Foi observado que para todos os taludes retroanalizados, o modelo friccional apresentou os melhores resultados e o modelo fluido newtoniano não convergiu. Para o talude Ponteio, além de determinar os parâmetros reológicos por retroanálise foi realizada uma aplicação destes parâmetros em uma outra ruptura que ocorreu no mesmo talude Ponteio posteriormente ao evento utilizado na retroanálise, especificamente próxima à crista do mesmo, após ter sido implantada solução de estabilização com tela metálica e manta vegetal. O objetivo desta simulação foi verificar qual a contribuição da solução de estabilização implantada na diminuição do alcance da corrida de detritos. Obteve-se como resultado que a solução de estabilização adotada não conseguiu evitar a ruptura do talude, mas, diminuiu o alcance da ruptura para aproximadamente 1/5 (um quinto) do alcance previsto pelo programa DAN-W, caso não houvesse a tela metálica e cobertura vegetal. A metodologia de previsão de alcances por meio de análise dinâmica mostrou-se aplicável a taludes de Belo Horizonte, desde que a etapa de retroanálise de um caso similar ao talude que se deseja prever alcance seja realizada, e os critérios de compatibilidade do modelo reológico sejam atendidos.

Palavras Chaves: *estabilidade de encostas, corrida de detritos, modelagem numérica, risco geológico-geotécnico.*

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the applicability of the dynamic analysis methodology to predict the runout of slope failures in Belo Horizonte and to obtain rheological parameters of the studied materials. Five retro-analysis of well documented slope failures were carried out, using the model DAN-W (Dynamic Analysis of Landslides), release 10, developed by Hungr (1995). This computational tool allows the dynamic analysis of landslides using eight different rheological models and with different parameters. The frictional model uses friction angle at the sliding surface and the pore-pressure coefficient r_u as rheological parameters. To the Newtonian fluid model, the rheological parameter is the dynamic viscosity. The values of the back-analyzed parameters were defined as the intersection between the observed field values of the sliding mass reaches and those simulated using the models. The compatibility of each model to each slope was evaluated considering the following aspects: if the behavior simulated reflects what was observed in the field; if the simulated curves show logical and defined behavior, and if the results of the retro-analysis are consistent with results obtained in tests carried out or in the bibliography. The selection of the slopes favored those with a representative geology of the area of Belo Horizonte, with well known geometry before and after the failure, and with characterization and strength tests information. The slopes chosen were denominated Ponteio Slope, Planetoides Slope, Taquaril Slope, Engenho Nogueira Slope and Juliana Slope. The rheological parameters were compared with the literature. It was observed that for all slopes back-analyzed, the frictional model showed better results and the Newtonian fluid model did not converge. The rheological parameters obtained in the back-analysis of Ponteio Slope were also used to simulate another failure, occurred in 2005, after a stabilization solution, using bioengineering techniques associated with soil nailing, was implemented in 2003. The purpose of this simulation was to verify the contribution of the stabilization solution in decreasing the extent of debris flow. It was observed that the stabilization solution could not prevent the slope failure, but it decreased the extent of failure to approximately 1/5 of the reach estimated with DAN-W program, assuming no stabilization. The methodology to predict slope failures reaches using dynamic analysis proved applicable to Belo Horizonte slopes, since a back-analysis of a similar case is previously performed and the compatibility criteria of the rheological model are achieved.

Key Words: *slope stability, debris flow, numerical modeling, geological-geotechnical risk*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As grandes metrópoles convivem com questões de crescimento desordenado, ocupação irregular em áreas de risco, retirada de vegetação em taludes naturais, cortes e aterros inadequados em encostas. Estas questões associadas a fatores intrínsecos ao local, como a litologia e hidrologia da região, podem desencadear rupturas de taludes com conseqüências materiais e sociais, inclusive com perdas de vidas humanas. Estudos geológicos e geotécnicos dos condicionantes e mecanismos de ruptura dos solos locais, avaliação do risco e suscetibilidade e possíveis danos ocasionados pelos acidentes em taludes, possibilitam ao poder público o planejamento de ações preventivas e mitigadoras destes acidentes, bem como a elaboração de planos de contingência.

Na análise quantitativa (probabilística) do risco geológico-geotécnico, o mesmo pode ser obtido pela multiplicação entre suscetibilidade e vulnerabilidade, sendo a suscetibilidade a probabilidade de ocorrência de um acidente, e a vulnerabilidade as conseqüências ou danos deste acidente. Este tipo de análise é essencial para o estabelecimento de programas racionais de gerenciamento de risco, mas pouco testados em nosso país, pois, necessitam de um banco de dados consistente e medidas objetivas (Ministério das Cidades & UFPE, 2008). O risco pode ser minimizado ou erradicado por ações intervencionistas do homem, como obras de pequeno, médio ou grande porte, e ações preventivas e sociais de apoio à comunidade para uma convivência consciente com a situação de risco (Cerri, 2001).

Na determinação da suscetibilidade são necessários estudos dos mecanismos e condicionantes de ruptura de taludes de uma região, bem como dos fatores desencadeantes dos movimentos de massa, para, posteriormente, delimitar áreas com probabilidade de ocorrência de eventos danosos. Para os mecanismos e condicionantes de rupturas em taludes do município de Belo Horizonte destaca-se a pesquisa desenvolvida por Parizzi (2004).

A vulnerabilidade pode ser expressa como a predisposição de um sujeito, sistema ou elemento ser afetado por um acidente. No caso de acidentes envolvendo taludes, a previsão do alcance destas rupturas torna-se relevante, pois permite a estimativa dos danos materiais e de vidas humanas possível de ocorrer. Nesta pesquisa entende-se por alcance a distância a partir da base da ruptura do talude até o ponto máximo em que o material deslizado pode chegar.

Os métodos qualitativos (relativos) de análise de risco geológico-geotécnico são baseados na comparação entre situações de risco identificadas e no estabelecimento de níveis de risco (por exemplo, baixo, médio, alto e muito alto). Não são realizados cálculos probabilísticos quanto à ocorrência dos movimentos de massa, mas os conceitos de suscetibilidade e vulnerabilidade são mantidos. Eles têm como característica a dependência da experiência do técnico que relatou a ruptura e dos critérios adotados na avaliação do risco. Os métodos qualitativos são recomendados pelo Ministério das Cidades para avaliação preliminar de risco nos municípios (Ministério das Cidades & UFPE, 2008).

Atualmente a previsão de alcance de rupturas de taludes no município de Belo Horizonte para mapeamento de risco é realizada qualitativamente, baseada na observação de inúmeros casos de rupturas registrados e na vasta experiência dos profissionais que atuam nesta área. Segundo Campos (2011) foram criados critérios relacionando as possibilidades de alcance ao risco, por exemplo, a relação altura do talude *versus* afastamento da base do talude até a edificação de 1 para 1 indica risco baixo, a relação de 2 para 1 risco médio, e de 3 para 1 risco alto de dano a edificação e ou aos moradores.

O método de previsão de alcances avaliado nesta pesquisa utiliza modelos reológicos para análise dinâmica das rupturas. Esta metodologia é bastante utilizada e já testada largamente para previsão de alcances de corridas de massa, avalanches e similares de grande alcance (Hungr, 1995). No Brasil, uma possível aplicação direta da análise dinâmica seriam as corridas de massa que ocorreram no estado do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011. Na FIG. 1.1 apresenta-se uma foto aérea destas rupturas, especificamente na cidade de Teresópolis, onde as cicatrizes dos escorregamentos que deram origem às corridas de lama estão visíveis, e demonstram a ordem de grandeza do volume de material mobilizado nestas rupturas. Já na FIG. 1.2 apresenta-se uma casa destruída pela corrida de massa, exemplificando o dano causado por este desastre natural ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro.

Pretendeu-se nesta pesquisa avaliar a aplicabilidade da metodologia de análise dinâmica para corridas de massa e escorregamentos de pequeno alcance típicos de taludes do município de Belo Horizonte. O objetivo foi contribuir com uma metodologia racional na previsão de alcances de rupturas, a ser utilizada em casos isolados de deslizamentos, ou em conjunto com a análise qualitativa da vulnerabilidade para mapeamento de risco, já empregada no município.

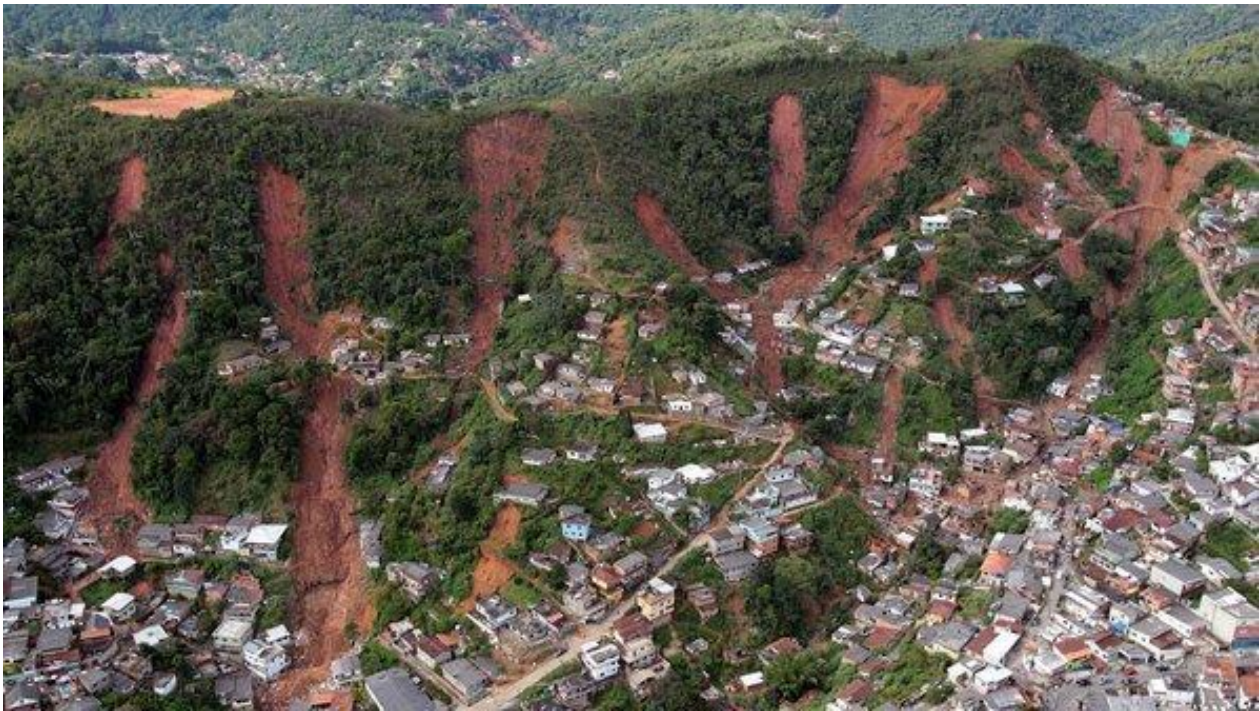


FIGURA 1.1- Cicatrizes de rupturas em Teresópolis, janeiro de 2011 (<http://veja.abril.com.br/multimedia/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro>)



FIGURA 1.2- Danos associados às corridas de massa em Teresópolis, janeiro de 2011 (<http://veja.abril.com.br/multimedia/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro>)

Não são observados no município de Belo Horizonte relatos de grandes corridas de massa, porém, os depósitos de tálus em taludes de filito, proveniente de rupturas planares, em cunha e tombamentos desta rocha, sofrem fluxo ou corrida de detritos em diversos taludes da cidade,

principalmente na região sul e centro-sul, ocasionando interrupções de tráfego devido ao acúmulo do material nas vias de trânsito, podendo também causar danos materiais e até perdas de vidas humanas. Na FIG. 1.3 apresenta-se um exemplo deste tipo de ruptura, ocorrida na região Centro-Sul de Belo Horizonte. Escorregamentos planares em aterros sobre filito e circulares em solo residual de gnaiss também são movimentos de massa característicos de Belo Horizonte. Uma corrida de lama de maior porte ocorreu em um talude de solo residual de gnaiss no bairro Juliana, região norte da cidade. Neste acidente a lama alcançou cerca de quarenta metros. A causa do acidente foi detectada como um vazamento de água na rede oficial, que aumentou os níveis de poropressão no talude, desencadeando uma ruptura em condições não drenadas (Urbel, 2010). A observação deste acidente sugere a hipótese que em condições de elevadas poropressões, ou devido a chuvas excepcionais ou vazamentos de rede de água ou esgoto, o solo residual de gnaiss do local pode estar sujeito a corridas de lama. Os tipos de ruptura citados, comuns em Belo Horizonte, são os principais causadores de perdas de vidas humanas por desastres naturais, principalmente devido à ocupação irregular em áreas de risco.



FIGURA 1.3- Corrida de detritos na Rua Patagônia, região Centro-Sul de BH, em 05-01-2011 (http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2011/01/05/interna_gerais,201836/cratera-e-deslizamento-de-barranco-interditam-vias-da-regiao-centro-sul-de-bh.shtml)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade da metodologia de análise dinâmica utilizando o modelo DAN-W (*Dynamic Analysis of Landslides*) para previsão de alcances de rupturas de taludes no município de Belo Horizonte, por meio de retroanálises de casos conhecidos e documentados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter, por meio de retroanálises, os parâmetros reológicos dos materiais dos taludes que sofreram ruptura, utilizando o programa de modelagem reológica DAN-W;
- Comparar os parâmetros reológicos encontrados com dados da literatura;
- Avaliar a adequação de cada modelo reológico disponível no programa DAN-W para cada talude estudado;
- Realizar uma aplicação da metodologia de análise dinâmica, utilizando parâmetros reológicos obtidos nesta pesquisa, e avaliar resultado.
- Analisar as limitações e a aplicabilidade da ferramenta computacional DAN-W para taludes típicos de Belo Horizonte.

1.3 Justificativa

O Ministério das Cidades, criado em 2003, pensando na minimização e erradicação do risco das rupturas de taludes em encostas urbanas e na necessidade de se criar uma diretriz unificada entre as cidades para o tratamento do risco geológico-geotécnico e socioambiental, desenvolveu o Programa Nacional de Capacitação das Cidades, com cursos de treinamento em diversas áreas, inclusive de prevenção de riscos. O programa incentiva o intercâmbio entre órgãos municipais responsáveis pela gestão do risco e universidades, para o desenvolvimento de estudos e disseminação do conhecimento. Portanto, pesquisas que possam contribuir com a avaliação dos riscos, com temas como a previsão de alcances para determinação da vulnerabilidade, estão de acordo com uma diretriz federal e também municipal, pois o município é o ente federal responsável por aplicar as políticas urbanas.

As corridas de detritos de tálus, comuns em taludes de filito no município de Belo Horizonte, ocasionam a interrupção do trânsito local, causando danos econômicos, e os transeuntes ficam vulneráveis a serem atingidos pelos detritos. Escorregamentos planares e circulares nas áreas de

risco em Belo Horizonte são as principais causas de acidentes envolvendo mortes, principalmente em vilas e favelas. Corridas de lama não são muito comuns, mas, a que aconteceu no bairro Juliana com alcance de aproximadamente 40 metros, devido a um vazamento de água, teve como consequência dois óbitos, e atingiu outras moradias a jusante sem grandes danos.

Segundo Macias *et al.* (1997) a simulação do alcance e velocidade das corridas obtidos através da modelagem reológica são dados importantes para serem utilizados em projetos de contenção ou correção de áreas afetadas. Que seja do conhecimento da autora, não existem dados de parâmetros reológicos de solos de Belo Horizonte e este estudo busca contribuir com resultados preliminares.

Análises paramétricas das rupturas permitem, por meio da simulação de vários cenários, indicar a relação entre os níveis de poropressão (por exemplo, através do fator r_u) e o alcance das corridas. Nesta pesquisa foram realizadas retroanálises dinâmicas paramétricas, por meio da variação dos parâmetros reológicos entre limites inferiores e superiores pré-definidos, obtendo vários cenários de alcance e compreendendo para os taludes estudados, qual a influência da variação dos dados de entrada, por exemplo o fator r_u ou o ângulo de atrito do material, no alcance das rupturas.

1.4 Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação, com a descrição dos temas tratados em cada capítulo desta pesquisa encontra-se a seguir:

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema proposto, com descrição dos objetivos e justificativas para esta pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica contendo informações relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, presentes na literatura técnica. Fazem parte dos temas pesquisados a análise de risco geológico-geotécnico, conceitos de movimentos de massa, geologia de Belo Horizonte, modelagem reológica, funcionamento do programa DAN-W, bem como a descrição dos modelos reológicos disponíveis nesta ferramenta computacional.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada na definição dos taludes a serem estudados e na definição dos dados de entrada para realização das previsões de alcance pelo programa DAN-W, bem como critérios adotados nas simulações. Também são descritos os critérios de compatibilidade utilizados na avaliação de adequação de cada modelo reológico para cada talude. Por fim, cita-se de

forma sucinta a metodologia adotada para a realização de uma aplicação dos dados desta pesquisa em uma situação hipotética.

No Capítulo 4 os resultados das simulações de alcances pelo programa DAN-W são apresentados. Cada talude estudado foi tratado em um sub-capítulo que se inicia com um histórico das rupturas do talude e descrição da área, topografia, dados de entrada, e posteriormente são apresentados os resultados das simulações de alcance pelo programa DAN-W para os modelos reológicos possíveis para cada talude. Foram realizados comentários dos resultados após as simulações.

No Capítulo 5 foi realizada uma discussão dos resultados de forma comparativa entre os taludes, e entre os modelos reológicos. A análise dos resultados foi feita em termos qualitativos, por meio de análise de compatibilidade de cada modelo reológico do programa DAN-W com cada talude estudado; e em termos quantitativos, comparando os resultados dos parâmetros reológicos obtidos pelo programa DAN-W com resultados obtidos na bibliografia.

No Capítulo 6 as conclusões são apresentadas. Verificou-se se os objetivos propostos para esta pesquisa foram atendidos e foi realizada uma discussão sobre a relação entre o modelo reológico e o material geotécnico de cada talude, bem como uma reflexão sobre como esta pesquisa pode contribuir com a gestão do risco geológico-geotécnico e potencialidades e limitações do programa DAN-W. Também foram apresentadas recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Avaliação de riscos de rupturas de Taludes

Uma discussão sobre o que é risco geológico e como quantificá-lo ou qualificá-lo, torna-se necessária para entender como a geologia e a geotecnia podem contribuir para minimização ou erradicação deste risco. Alguns conceitos inerentes à avaliação de risco são tratados por Augusto Filho *et al.* (1990a). Evento trata de um fato já ocorrido, no qual não foram registradas consequências danosas sociais e/ou econômicas relacionadas diretamente a ele. Acidente refere-se a um fato já ocorrido, onde foram registradas consequências danosas sociais e/ou econômicas (perdas e danos). Risco representa a possibilidade ou probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas, estruturas físicas, sistemas produtivos) ou a um segmento da mesma. É uma condição potencial de ocorrência de um acidente.

Segundo Bandeira (2003), outros autores também discutiram os conceitos que envolvem risco, entre eles Zuquete (1983), que apresenta alguns conceitos conforme QUADRO 2.1, e Varnes (1984), que define:

- *Natural hazard*: probabilidade de ocorrência de um fenômeno dentro de um certo período de tempo e de uma determinada área (suscetibilidade);
- Risco (*risk*): número de perdas de vidas, de danos às pessoas e propriedades, e de atividades econômicas interrompidas devido ao fenômeno;
- Zoneamento: divisão de áreas homogêneas com graus de perigo atual ou potencial devido a movimentos de massa;
- Vulnerabilidade: grau de perda de um determinado elemento ou conjunto de elementos de risco, devido à ocorrência de um fenômeno natural;
- Elemento de risco: população, propriedades e atividades econômicas em uma determinada área de risco;
- Risco específico: grau esperado de perda devido a um fenômeno natural.

QUADRO 2-1- Conceitos referentes a análise de riscos (Zuquete, 1993 *apud* Bandeira, 2003)

TERMOS	CONCEITOS
EVENTO	Fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo;
EVENTO PERIGOSO (HAZARD)	Representa um perigo (latente) que se associa a um fenômeno de origem natural, que se manifesta em um lugar específico, em tempo determinado, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens e/ou no meio ambiente;
PROCESSO PERIGOSO	Conjunto de fenômenos que antecedem o evento perigoso puro hazard, e que é tomado erroneamente como sinônimo deste.
VULNERABILIDADE	Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso (hazard), correspondendo à predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais)
RISCO	É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor limite (considerado normal ou aceitável), para um lugar específico, durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um “hazard” e vulnerabilidade dos elementos (seres humanos, residências, etc.) expostos.

Há muitas propostas de equações voltadas à avaliação de riscos, mas a equação mais genérica e didática é $R = P \times C$, em que R é o risco; P é a probabilidade (se quantificada) ou frequência (F), ou possibilidade de ocorrência de um evento, ou seja, P é a suscetibilidade (S) de uma área à ocorrência de um determinado evento; e C representa as consequências ou danos sociais ou econômicos potenciais, ou vulnerabilidade (V) (Cerri, 2001). O mesmo autor cita Shook (1997), o qual acrescenta a gestão de risco na equação supracitada, minimizando ou erradicando o próprio risco: $R = P \times C \times \text{Gestão do risco}$. A importância da gestão do risco na atualidade é indiscutível, e uma gestão pobre ou inexistente equivale a valores elevados para “R” na equação, enquanto uma boa gestão equivale a valores baixos (em geral varia entre 0 a 1).

Nogueira (2002) também acrescenta o grau de gerenciamento na equação de risco, por meio da seguinte equação: $R = P (fA) * C (fV) * g^{-1}$, em que o grau de gerenciamento (g) deve indicar o estágio de planejamento e implementação de ações e obras para controle da ameaça (A) e da vulnerabilidade (V).

Conforme Ministério das Cidades & UFPE (2008), sob indicação da Organização das Nações Unidas (ONU), a etapa preliminar para implantação de um programa de gestão de riscos em

um município deve ser a identificação de riscos, através do conhecimento do local, das ameaças, e dos fatores condicionantes e deflagradores para cada área de risco. Dentre alguns autores que contribuíram com a etapa de identificação dos riscos do município de Belo Horizonte citam-se Silva (1995), que contribuiu com o mapa geológico da região de Belo Horizonte, envolvendo também outros aspectos como hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais; e Parizzi (2004) que estudou os condicionantes e mecanismos de ruptura de taludes de solos típicos da região metropolitana do município de Belo Horizonte.

Campos (2011) desenvolveu um importante trabalho de reanálise da classificação dos riscos geológicos-geotécnicos utilizada pela URBEL – Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte, e sugeriu mudanças com o intuito de diminuir a subjetividade da avaliação do risco. A partir da análise de fichas de vistoria de um período de dois anos, propôs uma matriz qualitativa (FIG. 2.1) que classifica o risco como muito alto (MA), alto (A), médio (M) e baixo (B). Os fatores de risco que influenciam a classificação são os condicionantes geológicos-geotécnicos; os agentes potencializadores do movimento de massa (sendo CA: com agentes, SA: sem agentes); a relação entre altura do talude e distância da base do talude até a edificação (sendo 1/1: baixo risco, 2/1: médio risco, 3/1: alto risco); os indicadores de movimentação do talude (sendo CI: com indicadores, SI: sem indicadores) e a vulnerabilidade da edificação (V1: médio a bom padrão construtivo, V2: baixo padrão construtivo). Após a geração da matriz, Campos (2011) realizou uma correlação dos dados obtidos com um sistema de pontos considerando pesos para cada fator, e incluiu na classificação do risco, além dos fatores já citados, fatores atenuantes e agravantes. Como atenuantes entendem-se obras de minimização ou erradicação do risco, estrutura do talude favorável à estabilidade e probabilidade da edificação ser atingida por uma ruptura ser mínima ou nula devido à distância considerável em relação à base do talude. Como fator agravante tem-se a vulnerabilidade social dos moradores, que expressa a baixa possibilidade dos moradores colaborarem com o entendimento e monitoramento do risco no local.

	V1	V2
CA 1/1 CI	M	A
CA 1/1 SI	B	M
CA 2/1 CI	A	MA
CA 2/1 SI	M	A
CA 3/1 CI	MA	MA
CA 3/1 SI	A	MA
SA 1/1 CI	B	M
SA 1/1 SI	B	B
SA 2/1 CI	M	A
SA 2/1 SI	B	M
SA 3/1 CI	A	MA
SA 3/1 SI	M	A

FIGURA 2.1- Matriz proposta para classificação do risco de escorregamentos em Belo Horizonte (Campos, 2011)

O mapeamento de risco é ferramenta importante na etapa de identificação e constitui ferramenta de gestão para o poder público. Ele pode ser feito de duas formas: *zoneamento de risco*, onde setores são delimitados, compreendendo várias moradias, e avaliados com um grau de risco; e *cadastramento de risco*, onde o risco é avaliado de forma pontual, moradia por moradia, como por exemplo a avaliação de riscos realizada pela URBEL (FIG. 2.1). Para o caso do zoneamento de risco, pode ocorrer que uma área caracterizada como de risco alto apresente moradias com graus de risco diferentes, portanto pode-se concluir que há uma generalização (Ministério das Cidades & UFPE, 2008). Tanto para o zoneamento quanto para o cadastramento, o conhecimento do alcance provável do movimento de massa possível de ocorrer na área em estudo é um fator relevante para caracterizar de forma mais assertiva a vulnerabilidade de uma área ou moradia, e, juntamente com a avaliação de outros fatores, obter o grau de risco.

Bolt *et al.* (1975) cita que a metodologia de análise de risco pode ser qualitativa, na qual a suscetibilidade e vulnerabilidade são obtidas de forma relativa, através da comparação com situações de risco já identificadas; ou quantitativa, através da probabilidade de ocorrência de determinado evento, em um intervalo de tempo. Na análise qualitativa, o risco é classificado, por exemplo, como baixo, médio e alto, e na análise quantitativa incorpora-se a probabilidade de ocorrência do processo e a distribuição probabilística das consequências.

As análises quantitativas tendem a ter maior objetividade na análise de risco, em relação às análises qualitativas, porém a forma em que os dados foram coletados e o método de análise dos dados também influenciam na objetividade.

Cerri (2001) apresenta um fluxograma, conforme FIG.2.2, levando em conta a influência da coleta e análise de dados na objetividade. Percebe-se que mesmo para uma coleta de dados

quantitativa, caso a análise dos dados seja realizada por meio de estimativas, como uso da experiência e confirmações, a objetividade da análise de risco é considerada média pelo autor. E para as estimativas qualitativas a objetividade da análise de risco é considerada sempre baixa, conforme sugere o autor.

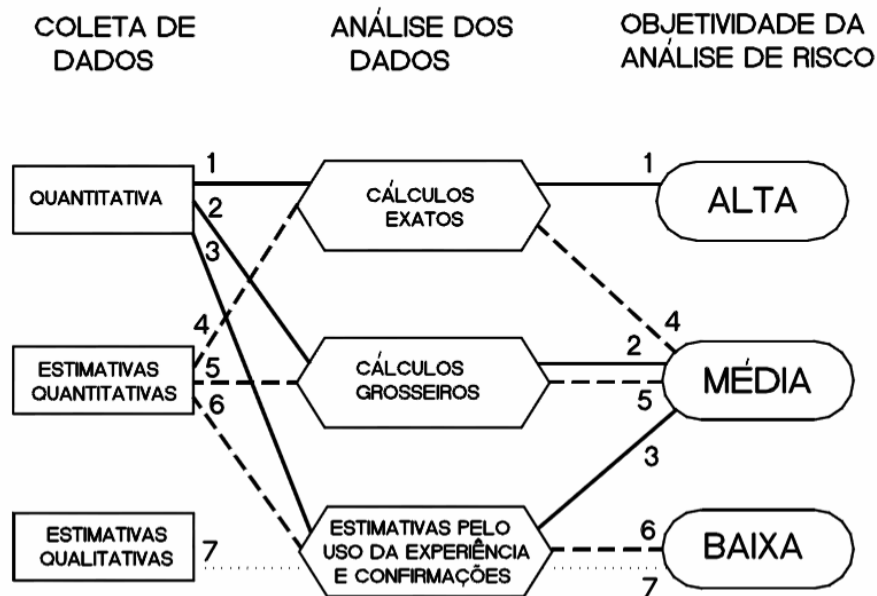


FIGURA 2.2- Métodos propostos para avaliação de riscos (Cerri, 2001 *apud* Hansen, 1984)

Os modelos utilizados em análise de risco, sejam qualitativos ou quantitativos, são uma tentativa de reproduzir ou descrever um fenômeno natural de forma simplificada, portanto, apresentam limitações, mesmo com alta objetividade. Gomes (2006) realiza uma discussão sobre os tipos de modelagem de previsão, características e limitações. Este mesmo autor cita, a partir de Montgomery & Dietrich (1984) e Fernandes *et al* (2001), os principais procedimentos utilizados na modelagem de previsão de movimentos de massa:

- análises a partir de distribuição de movimentos de massa no campo, em que o conhecimento dos movimentos de massa ocorridos no passado tem aplicação limitada à mesma área dos eventos catalogados;
- análises a partir de mapeamentos geomorfológicos ou geotécnicos, limitados pela subjetividade utilizada na atribuição de notas;
- modelos com bases estatísticas, com limitações relacionadas às simplificações e generalizações quanto aos fatores condicionantes dos movimentos de massa e à incapacidade de prever as alterações destes fatores com o tempo, como por exemplo, flutuações do nível de água;

d) modelos matemáticos, cuja aplicação e desenvolvimento têm crescido, principalmente os que utilizam equações de análise de estabilidade das encostas em conjunto com modelos hidrológicos na previsão de movimentos de massa (Montgomery & Dietrich, 1994; Wu & Sidle, 1995; Pack *et al.*, 1998; van Asch *et al.*, 1999; Terlien *et al.*, 1995; Iverson, 2000; Gritzner *et al.*, 2001; Baum *et al.*, 2002; Chen & Lee, 2003; Savage *et al.*, 2003; van Beek & van Asch, 2003).

Em relação ao aspecto vulnerabilidade, recentemente distintas metodologias vêm sendo aplicadas para avaliar os danos causados pelas rupturas de taludes, seja por meio de medidas de volume mobilizado de escorregamento ou de trajetórias de detritos, áreas de alcance, distância da moradia ao topo ou base dos taludes e aterros. Fuchs *et al.* (2007) realizou uma pesquisa bibliográfica e discutiu como o valor da vulnerabilidade em termos quantitativos (de 0 a 1) ou qualitativos tem sido obtido a partir da observação ou previsão das rupturas de taludes.

Augusto Filho (2001, *apud* Ministério das Cidades & UFPE, 2008) estimou que os materiais mobilizados percorrem aproximadamente 70% da altura dos taludes na região da Serra do Mar em Caraguatatuba (SP), ou seja uma relação de 1/0,7 (altura talude/alcance), mas o Plano de Defesa Civil de São Paulo, pelo menos em caráter provisório, adota a relação de 1/1 para a altura do talude em relação ao alcance de escorregamento.

Campos (2011) relatou que para a análise da vulnerabilidade ou possíveis danos de uma moradia ou moradores serem atingidos por materiais mobilizados, a prefeitura de Belo Horizonte adotou em sua ficha de avaliação do risco a seguinte correlação: para altura do talude em relação ao afastamento da edificação à base do talude de 1/1 o risco é considerado baixo, para a relação de 2 para 1 o risco é considerado médio, e de 3 para 1, alto. Entende-se que está implícito nesta correlação a estimativa que alcances de corridas ou escorregamentos em Belo Horizonte geralmente não ultrapassam a medida da altura do talude. Por isto, edificações com afastamento da base do talude maior que a altura do talude são consideradas sem risco, considerando o aspecto alcance da ruptura. Para a avaliação de risco final outros fatores são considerados, como por exemplo a probabilidade de ocorrência da ruptura.

Pacheco (2001) apresenta um modelo racional, quantitativo, com bases estatísticas para determinar a vulnerabilidade de uma moradia ou área, através da determinação da mortalidade esperada para um escorregamento. Este modelo foi concebido por Wong *et. al* (1997), baseado em levantamentos estatísticos provenientes de um banco de dados de deslizamentos de taludes da cidade de Hong Kong de cerca de 35.000 taludes, que inclui mais de 5.000 escorregamentos. A mortalidade esperada pode ser expressa por $E[N]$ conforme EQ. 2.1:

$$E[N] = E[N_R] \times S \times V_S \quad [2.1]$$

Em que:

$E[N_R]$ é a mortalidade esperada em um deslizamento de referência, com 10m de largura e $50m^3$ de volume, obtida pelo QUADRO 2.2;

S é um fator de escala (relação entre a largura do deslizamento real e a largura do deslizamento de referência);

V_S é o fator de vulnerabilidade espacial, obtido pelo QUADRO 2.3, a partir do ângulo de sombra, determinado em campo conforme a FIG. 2.3.

QUADRO 2-2- Mortalidade esperada em Hong Kong (Pacheco, 2001)

NUMERO DE GRUPO	OBJETO	MORTALIDADE ESPERADA $E[N_R]$
1	- Edifícios com alta densidade de ocupação; - Áreas abrigadas com alta densidade de ocupação; - Rodovias principais com alta densidade de tráfego e de pedestres	3.0
2-a	- Edifícios com baixa densidade de ocupação; - Áreas abrigadas com baixa densidade de ocupação;	2.0
2-b	- Estradas (que não rodovias principais) com alta densidade de tráfego e pedestres; - Instalações de infra-estrutura e locais de construção	1.0
3	- Estradas com moderada densidade de tráfego veicular ou de pedestres; - Espaços públicos abertos densamente utilizados	0.25
4	- Estradas com baixa densidade de tráfego ou de pedestres; - Espaços públicos abertos pouco utilizados	0.03
5	- Estradas com baixíssima densidade de tráfego ou de pedestres; - Áreas remotas	0.001

QUADRO 2-3- Fator de vulnerabilidade VS (Pacheco, 2001)

INSTALAÇÕES	INTERVALOS DO ÂNGULO DE SOMBRA (β)					
	$>50^\circ$	$45^\circ - 50^\circ$	$40^\circ - 45^\circ$	$35^\circ - 40^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$25^\circ - 30^\circ$
Edifícios	0.95	0.83	0.48	0.17	0.04	0.0025
Estradas	0.95	0.95	0.83	0.48	0.15	0.01

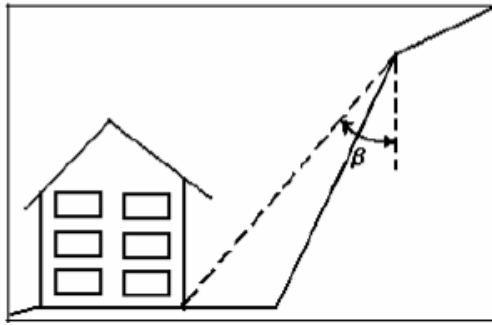


FIGURA 2.3- Ângulo de sombra (β) (Pacheco, 2001)

Um trabalho de relevância para a análise e avaliação de risco é o de Fell *et. al* (2008). A partir da observação da existência de um grande número de métodos distintos para o mapeamento de perigo de escorregamento que tem sido testados e aplicados em diferentes contextos por mais de 30 anos, do reconhecimento da necessidade de uma terminologia unificada, e da constatação que chegou a hora na qual o zoneamento de risco quantitativo é possível, o Comitê Técnico de Escorregamentos e Encostas artificiais (denominado JTC-1) organizou um manual para o zoneamento de susceptibilidade de perigo e risco de escorregamento para o planejamento e uso do solo (Fell *et. al*, 2008). O Comitê JTC-1 é composto por membros das associações internacionais ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), IAEG (*International Association for Engineering Geology and the environment*) e ISRM (*International Society for Rock Mechanics*).

Segundo Fell *et. al* (2008) os métodos utilizados para avaliar os dados de um zoneamento podem ser métodos básicos, intermediários ou avançados. Os métodos envolvem atividades específicas que são apresentadas para se ter um entendimento comum de como o zoneamento está sendo realizado. Ainda segundo os autores, a caracterização de escorregamentos pela distância e velocidade de deslocamento (aspectos relacionados com a vulnerabilidade) pode ser realizada conforme QUADRO 2.4.

QUADRO 2-4- Atividades necessárias para avaliar a distância de deslocamento e velocidade dos escorregamentos potenciais (Fell *et. al*,2008)

Método de Análise de Distância de Deslocamento e Velocidade	Atividades
Básico	Coletar e avaliar informações históricas sobre distâncias de deslocamento e velocidade
	Avaliar distâncias de deslocamento limitantes a partir de dados geomorfológicos e depósitos de deslizamentos antigos
	Avaliar a provável distância de deslocamento e velocidade a partir de considerações sobre a classificação de deslizamentos potenciais, geologia e topografia
	Com base nesta informação, avaliar o (maior) limite provável de distância de deslocamento para cada classificação de deslizamento em potencial.
Intermediário	As mesmas atividades do nível básico mais:
	Avaliar os mecanismos prováveis de deslizamento e a classificação do solo nos deslizamentos
	Utilizar métodos empíricos baseados no ângulo de distância de deslocamento ou ângulo de sombra para avaliar a distância de deslocamento levando em conta a incerteza dos métodos empíricos e dados colhidos.
Avançado	As mesmas atividades do nível intermediário mais:
	Investigar propriedades geotécnicas dos materiais do declive assim como requerem os modelos numéricos
	Utilizar modelos numéricos para modelar a distância e velocidade de deslocamento

No QUADRO 2.4 mostra-se que a utilização de modelos numéricos na previsão de distância de deslocamento e velocidade de escorregamentos é considerado um método de análise avançado em zoneamento de risco. Alguns modelos matemáticos que utilizam conceitos de reologia, especificamente para previsão de alcances de rupturas, são tratados no item 2.4 desta pesquisa.

A aplicação de modelos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG ou GIS, em inglês) para o zoneamento de escorregamentos tem crescido, com métodos diversificados e modelagem qualitativa ou quantitativa dos dados. Estes modelos podem combinar as informações geográficas com outros programas de análise de estabilidade de taludes, modelagem reológica e previsão de alcances, ou mesmo com análise de dados de forma empírica, ou a partir de parecer técnico de um profissional. Na área de aplicação de modelos baseados em SIG pode-se citar Gomes (2006) e Guinau (2007).

2.2 Tipos de movimento de massa e sua caracterização

Segundo Hutchinson (1968, apud Bandeira, 2003) os movimentos gravitacionais de massa são aqueles induzidos pela gravidade, como escorregamentos de encostas e tombamento de blocos rochosos. Os movimentos induzidos por um agente de transporte como a água ou o vento, como a erosão, são denominados processos de transporte de massa.

Conforme a NBR11682:2009 – Estabilidade de Encostas, os tipos de movimento de massa podem ser divididos em quedas ou rolamento, definido como o desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre, ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento; tombamento, movimento em forma de balsa com eixo da base; escorregamento, definido como movimento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies; e escoamento, com propriedades de fluido, podendo ser lento (rastejo) ou rápido (corridas).

Cerri (2001) faz uma pesquisa bibliográfica de várias classificações dos movimentos de massa, e adota a classificação de Augusto Filho (1992), por apresentar de forma sintética os movimentos gravitacionais de massa, descrevendo as características do movimento, do material e da geometria dos diferentes processos de instabilização. No QUADRO 2.5 é apresentada a classificação de Augusto Filho (1992).

Parizzi (2004), Deere & Patton (1971), Augusto Filho (1992), Turner (1996), Fernandes & Amaral (1996), Georio (2000) observam que movimentações de colúvios podem transicionar para fluxo de detritos, dependendo da espessura da camada de colúvio: movimentos envolvendo espessos depósitos são geralmente relacionados com escorregamentos circulares lentos e raramente exibem subsequente desagregação e fluxo. Por outro lado, movimentações em encostas com finas espessuras de colúvios exibem um movimento inicial translacional, que pela e subsequente desagregação do material, evolui para um fluxo de detritos.

Segundo Bandeira (2003), a classificação de Varnes (1978) ainda é uma das mais utilizadas em todo o mundo, sendo considerada a classificação oficial da *International Association of Engineering Geology* – IAEG. Esta classificação será adotada neste trabalho, por ser simples e se basear no tipo de movimento e nas características do material transportado, e também por classificar o movimento de massa tipo escoamento com maior detalhe: corrida de rocha, corrida de detritos (*debris flow*) para solo predominantemente grosso, e corrida de lama (*mud flow*) para solo predominantemente fino. No QUADRO 2.6 apresenta-se a classificação segundo Varnes (1978).

QUADRO 2-5- Classificação dos Movimentos de Massa (Augusto Filho, 1992)

PROCESSO	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO-MATERIAL-GEOMETRIA
RASTEJO (<i>CREEP</i>)	<ul style="list-style-type: none"> vários planos de deslocamento (internos); velocidades muito baixas (cms/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; geometria indefinida.
ESCORREGAMENTOS (<i>SLIDES</i>)	<ul style="list-style-type: none"> poucos planos de deslocamento (externos); velocidades médias (m/h) e altas (m/s); pequenos a grandes volumes de material; geometria e materiais variáveis: <p>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.</p>
QUEDAS (<i>FALLS</i>)	<ul style="list-style-type: none"> sem planos de deslocamento; movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; velocidades muito altas (vários m/s); material rochoso pequenos a médios volumes; geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. <p>ROLAMENTO DE MATAÇÃO TOMBAMENTO</p>
CORRIDAS (<i>FLAWS</i>)	<ul style="list-style-type: none"> muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa de movimentação); movimento semelhante ao de um líquido viscoso; desenvolvimento ao longo de drenagens; velocidades médias a altas; mobilização de solo, rocha detritos e água; grandes volumes de material; extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

QUADRO 2-6- Classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978)

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL		
	ROCHA	SOLO (ENGENHARIA)	
		PREDOMINANTEMENTE GROSSO	PREDOMINANTEMENTE FINO
QUEDA (<i>FALL</i>)	Queda de rocha	Queda de detritos (debris)	Queda de solo
TOMBAMENTO (<i>TOPPLE</i>)	Tombamento de rocha	Tombamento de detritos (debris)	Tombamento de solo
ESCORREGAMENTO (<i>SLIDE</i>)	Escorregamento em rocha	Escorregamento em detritos (debris)	Escorregamento em solo
ESPALHAMENTO (<i>SPREAD</i>)	Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos (debris)	Espalhamento de solo
CORRIDA/ESCOAMENTO (<i>FLOW</i>)	Corrida de rocha	Corrida de detritos (debris)	Corrida de lama

2.3 Características geológicas e geotécnicas de Belo Horizonte

Conforme Silva (1995) e Parizzi (2004), na geologia do município de Belo Horizonte ocorrem três litologias principais, as quais são apresentadas na FIG. 2.4.

1) Domínio de Rochas do Complexo Belo Horizonte, que representa cerca de 70% do território, constituído por gnaiss tipo bandado (litotipo mais comum), gnaiss milonitizado e gnaiss de granulação grossa. Segundo Parizzi (2004), os tipos de ruptura mais comuns são: planar nos horizontes A e B de solo residual, e rupturas circulares maiores que alcançam o horizonte C, caso haja ocorrência de chuvas intensas e este horizonte esteja exposto. Os condicionantes às rupturas são feições erosivas no interior do maciço, onde geralmente ocorrem as rupturas. Ações antrópicas, como o desmatamento e cortes, expõem o horizonte C tornando-o mais suscetível a escorregamentos. No horizonte C foram encontrados resultados de coesão nula para saprólitos, e baixa, até 10 kPa, para solos saprolíticos. Os taludes deste domínio estudados nesta pesquisa foram o Talude Engenho Nogueira, indicado na FIG. 2.4, e o Talude Juliana, localizado no bairro Juliana. Para o Talude Engenho Nogueira, inspeções de campo realizadas por Parizzi (2004) indicaram um manto de intemperismo bem desenvolvido sobre gnaiss de granulação média a grossa, em bairro com baixo padrão construtivo. O Talude Juliana localiza-se na regional Venda Nova. Segundo dados fornecidos pela Urbel (2010), localmente foi observado solo residual de gnaiss em contato com uma camada de aterro pouco espessa, provavelmente do mesmo material, e coesão em ensaio de compressão simples não drenado (S_u - resistência não drenada) igual a 11,8 kPa, em solo próximo ao talude Juliana, com a mesma litologia.

2) Domínio das rochas metasedimentares, que representa 30% do território, cuja litologia é diversa, representada por uma sucessão de camadas de rochas representadas por: itabirito da Formação Cauê, dolomito da Formação Gandarela, filito da Formação Gandarela, quartzito da Formação Cercadinho, filito da Formação Cercadinho, filitos e termos subordinados das Formações Fecho do Funil, Taboões, Barreiro e do Grupo Sabará e quartzito da formação Taboões. Os tipos de ruptura predominantes observados por Parizzi (2004) para este domínio foram rupturas planares, em cunha e tombamentos, condicionados pela relação entre descontinuidades, fraturas, foliações e face do talude. Fatores geomorfológicos, como concavidade da encosta, e fatores antrópicos, como cortes inadequados, atuam como agentes preparatórios aos escorregamentos. A intensidade e duração das chuvas determinam o momento e frequência das rupturas. Os tipos de ruptura citados são apresentados na FIG. 2.5. Para estas litologias, Parizzi (2004) definiu 4 taludes representativos: Talude Ponteio, Talude Patagônia, Talude Planetóides e Talude Rio Acima, dentre os quais os Taludes Ponteio e Planetóides foram objeto de estudo desta pesquisa. O Talude Ponteio localiza-se

na “Curva do Ponteio”, BR 356, e é constituído por quartzitos e filitos intercalados, pertencentes à Formação Cercadinho, parcialmente cobertos por depósitos de vertentes. O Talude Planetóides, localizado na Rua Planetóides do Bairro Alto Santa Lúcia, possui a mesma litologia do Ponteio, porém, totalmente coberto por depósitos de vertente (Parizzi, 2004).

3) Manto de intemperismo e depósitos superficiais: manto de intemperismo é encontrado no Complexo Belo Horizonte. Depósitos superficiais são encontrados sobre os maciços rochosos da sequência metasedimentar. As rupturas principais observadas por Parizzi (2004) nos depósitos superficiais são fluxo de detritos e rupturas planares, que em sua maioria não alcançam a profundidade da interface depósito/maciço rochoso, são condicionadas pela granulometria siltosa da matriz do talus formado na superfície e influenciadas por ações antrópicas como construção de moradias em aterro e cortes inadequados. Chuvas intensas podem causar rupturas que alcancem a interface depósito/ maciço. O talude representativo para esta litologia é o Talude Taquaril, localizado em bairro de padrão construtivo baixo (Favela do Taquaril, na divisa entre os municípios de Sabará e Belo Horizonte), assentado sobre xistos e filitos do Grupo Sabará. No local há também grande quantidade de aterros e depósitos de vertentes. O Conjunto Taquaril apresentou uma média anual de 80 escorregamentos para o período de 1994 a 2000, sendo a maior média de ocorrências de toda região leste (Parizzi, 2004).

Parizzi (2004) também realizou retroanálises dos taludes citados, utilizando programas de análise de estabilidade de taludes que utilizam o método de equilíbrio limite das fatias. Os resultados estão apresentados no QUADRO 2.7. Durante as análises, variava-se o fator r_u entre 0 e 0,45 até a obtenção do fator de segurança igual a 1. Os limites inferiores e superiores dos parâmetros reológicos utilizados nesta pesquisa, como dados de entrada no programa DAN-W, tem como base o valor médio obtidos nas retroanálises realizadas por Parizzi (2004). Os ensaios de caracterização e resistência dos taludes estudados por Parizzi (2004) estão apresentados nos QUADROS 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11.

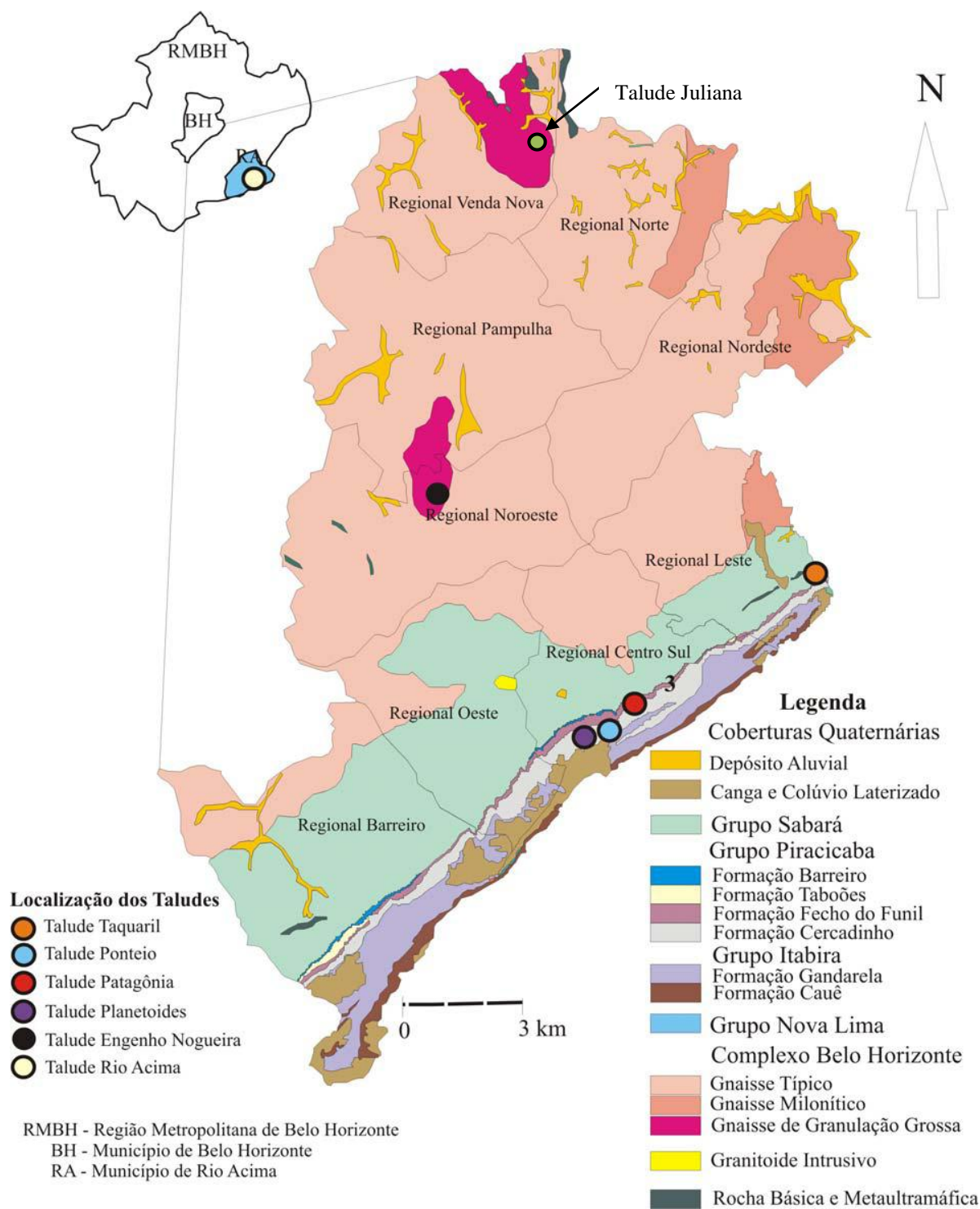


FIGURA 2.4- Geologia do município de Belo Horizonte e taludes típicos (Modificado de Silva *et al.* 1995 e Viana 2000, *apud* Parizzi, 2004).

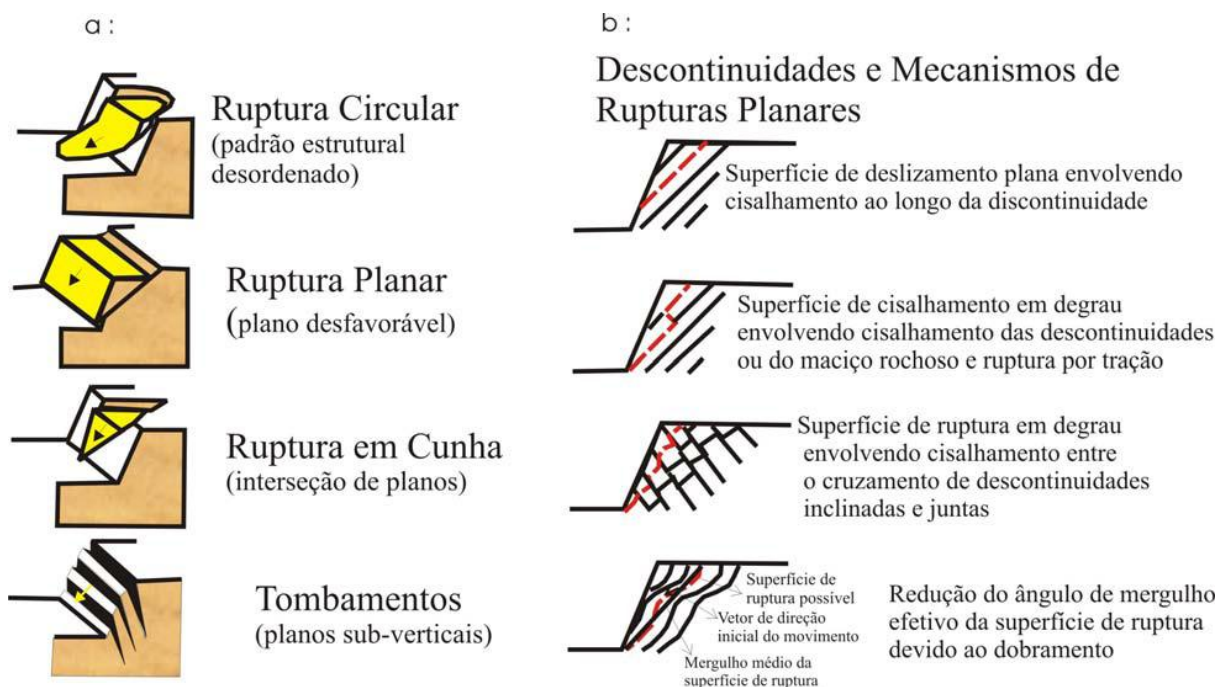


FIGURA 2.5- Tipos de rupturas decorrentes da relação espacial das discontinuidades em maciços rochosos. a) Modelos de Hoek & Bray (1981) e b) Modelos de Pitéu & Martin (1981) para rupturas planares (Parizzi, 2004).

QUADRO 2-7- Resultados de retroanálises de estabilidade de taludes (Parizzi, 2004)

Talude	Rocha de origem	Tipo de solo	Profundidade da superfície de ruptura h (m)	C (kPa)	ϕ (°)	Fator r_u *
Ponteio	Não foi realizada retroanálise do Tálus					
Planetóides	Filito	Tálus superfície superior	2.5	2	28	0.23 (superfície superior)
	Filito	Tálus superfície inferior	2.5	2	28	0.12 (superfície inferior)
Taquaril	Filito e grauvaca	Tálus amarelado	1.5	4	33	0.47
	Filito e grauvaca	Tálus vermelho	1.5	4	34	0.3
Eng. Nogueira (Ravina 1, compartimento 1)	Gnaisse	Horizonte A	0 a 0.9 m	22	25	0.15
		Horizonte B	média de 1,5	20	31	0.15
		Horizonte C	Até 2m	10	32	0.15
		sapolito	até 12m	0	33	0.15

$$* r_u = u / \gamma_{nat} \cdot h$$

onde γ_{nat} é o peso específico natural do solo, h a profundidade da superfície de ruptura e u a poropressão.

QUADRO 2-8- Parâmetros geotécnicos das amostras do tálus que cobre o Talude Ponteio (Parizzi, 2004)

Amostra	Ponto de coleta da amostra no talude	ρ_s g/cm ³	ρ_{nat} g/cm ³	ρ_d g/cm ³	LL %	LP %	e	n %	c kPa	ϕ graus	Granulometria (%)					Classificações		
											Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	SUCS	SUCS*
P1	Topo (Aterro)	2.89	1.7	1.63	31	NP	0.8	44	6	29 ⁰	6	54	14	18	1	7	Silte arenoso	Silte arenoso
2A	Topo	3.03	1.5	1.34	30	NP	1.3	56	-----		1	37	10	4	13	37	Cascalho siltoso com areia	Silte com areia
2B	Topo	2.94	1.5	1.34	41	NP	1.2	57	-----		2	48	11	4	6	29	Cascalho siltoso com areia	Silte com areia
2C	Topo	2.91	1.5	1.34	41	NP	1.2	57	-----		3	71	2	1	4	19	Silte cascalhento	Silte
3A	Meio	2.96	1.3	1.18	38	NP	1.5	60	-----		2	41	8	10	6	33	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
3B	Meio	2.97	1.3	1.18	41	NP	1.5	60	-----		4	58	6	2	5	24	Silte cascalhento	Silte com areia
3C	Meio	2.95	1.3	1.18	37	NP	1.5	60	0	29 ⁰	4	56	8	4	6	26	Silte cascalhento com areia	Silte com areia
1	Base	2.92	1.3	1.18	37	NP	1.5	60	0	29 ⁰	2	31	8	7	4	48	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
2	Base	2.94	1.3	1.18	38	NP	1.5	60	-----		2	53	6	5	4	31	Silte cascalhento com areia	Silte com areia
3	Base	2.93	1.3	1.18	40	NP	1.5	60	-----		2	50	7	5	5	32	Cascalho siltoso com areia	Silte com areia

ρ_s - massa específica dos grãos; ρ_{nat} - massa específica natural; ρ_d - massa específica seca; LL - limite de liquidez; LP - limite de Plasticidade; NP = não Plástico
e - índice de vazios; n - porosidade; c - coesão (kPa); ϕ - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica

* apenas da matriz, desprezada a fração pedregulho

QUADRO 2-9- Parâmetros geotécnicos das amostras do talus que cobre o Talude Planetóides (Parizzi, 2004)

Amostra	Ponto de coleta da amostra no talude	ρ_s g/cm ³	ρ_{nat} g/cm ³	ρ_d g/cm ³	LL %	LP %	e	n %	c kPa	ϕ graus	Granulometria (%)					Classificação		
											Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	SUCS	SUCS*
PL-base	Base	2.99	2.02	1.65	38	NP	0.8	44	0	28°	3	34	13	9	8	34	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
PL-base2	Base	3.06	2.02	1.65	34	NP	0.9	47	--	----	2	22	26	6	2	63	Cascalho siltoso com areia	Areia siltosa
PL-base3	Base	3.03	2.02	1.65	29	NP	0.8	44	--	----	3	19	13	15	6	44	Cascalho siltoso com areia	Areia siltosa
PL-1a	Meio	3.04	1.87	1.64	38	NP	0.9	47	--	----	3	35	14	9	6	33	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
PL-1b	Meio	3.08	1.87	1.64	35	NP	0.9	47	0	30°	2	49	11	8	4	27	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
PL-1c	Meio	2.95	1.87	1.64	36	NP	0.8	44	--	----	12	21	9	7	5	46	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
PL-2a	Topo	3.04	1.87	1.64	34	NP	0.9	47	--	----	3	33	16	12	7	29	Areia siltosa com cascalho	Silte arenoso
PL-2b	Topo	3.02	1.87	1.64	37	NP	0.8	44	10	28°	4	34	13	9	6	35	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
PL-2c	Topo	3.01	1.87	1.64	34	NP	0.8	44	--	----	3	36	17	11	5	28	Areia siltosa com cascalho	Silte arenoso

ρ_s - massa específica dos grãos; ρ_{nat} - massa específica natural; ρ_d - massa específica seca; LL - limite de liquidez; LP - limite de Plasticidade; NP - não Plástico
e - índice de vazios; n - porosidade; c - coesão (kPa); ϕ - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica

* apenas da matriz, desprezada a fração pedregulho

QUADRO 2-10- Parâmetros geotécnicos do saprolito e dos depósitos que cobrem o Talude Taquaril (Parizzi, 2004)

Amostra	Tipo de amostra	ρ_s g/cm ³	ρ_{nat} g/cm ³	ρ_d g/cm ³	LL %	LP %	e	n %	c kPa	ϕ graus	Granulometria (%)					Classificação		
											Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	SUCS	SUCS*
Taq-1	Tálus vermelho	2.79	1.38	1.21	40	18	1.3	57	0	34 ^o	25	35	14	6	6	14	Argila magra arenosa com cascalho	Argila magra arenosa
Taq-2	Tálus vermelho	2.78	1.38	1.21	40	18	1.3	57	----	----	21	33	10	4	4	28	Argila magra cascalhenta com areia	Argila magra com areia
Taq-3	Aterro	2.77	1.34	1.22	41	26	1.3	57	----	----	29	35	13	4	5	14	Argila magra arenosa com cascalho	Argila magra com areia
Taq-4	Saprolito	2.82	1.74	1.55	34	NP	0.8	45	24	16 ^o	13	36	18	6	5	22	areia siltosa com cascalho	Silte arenoso
Taq-5	Tálus amarelo	2.75	1.48	1.33	33	NP	1.1	52	6	33 ^o	4	25	13	7	4	47	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
Taq-6	Tálus vermelho	2.76	1.38	1.33	40	21	1.1	52	----	----	26	44	16	4	2	7	Argila magra com areia	Argila magra com areia
Taq-7	Tálus amarelo	2.78	1.48	1.33	40	NP	1.1	52	----	----	11	36	12	5	8	29	Cascalho siltoso com areia	Silte arenoso
Taq-8	colúvio	2.77	1.48	1.25	42	NP	1.2	55	10	28 ^o	10	60	28	1	1	0	Silte arenoso	Silte arenoso
Taq-9	Tálus amarelo	2.80	1.48	1.25	36	NP	1.2	55	----	---	6	45	23	3	4	19	Silte arenoso com cascalho	Silte arenoso

ρ_s - massa específica dos grãos; ρ_{nat} - massa específica natural; ρ_d - massa específica seca; LL - limite de liquidez; LP - limite de Plasticidade; NP - não Plástico
e - índice de vazios; n - porosidade; c - coesão (kPa); ϕ - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica.

* apenas da matriz, desprezada a fração pedregulho

QUADRO 2-11- Parâmetros geotécnicos dos solos do Talude Engenho Nogueira (Parizzi, 2004)

Amostra	Tipo de amostra	ρ_s g/cm ³	ρ_{nat} g/cm ³	ρ_d g/cm ³	LL %	LP %	e	n %	c kPa	ϕ graus	Granulometria (%)					Classificação SUCS	
											Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa		Pedregulho
E1	saprolito	2.63	1.23	1.2	36	NP	1.2	54	0	33	9	31	28	30	2	0	Areia siltosa
E2	saprolito	2.60	1.23	1.2	31	NP	1.2	54	--	----	6	29	35	29	1	0	Areia siltosa
E3	saprolito	2.63	1.23	1.2	30	NP	1.2	54	--	----	5	25	37	33	0	0	Areia siltosa
E4	Saprolito de dique	2.78	1.65	1.31	48	18	1.1	53	--	----	15	50	19	12	2	2	Argila magra arenosa
E5	Horizonte B	2.70	1.37	1.20	50	29	1.3	56	20	31	32	27	21	18	2	0	Argila magra arenosa
E6	Solo saprolítico	2.67	1.45	1.29	34	NP	1.1	52	10	32	9	35	37	19	0	0	Areia siltosa
E7	colúvio	2.67	1.37	1.20	32	12	1.2	55	--	----	11	31	32	25	1	0	Areia argilosa
E8	Solo saprolítico	2.60	1.45	1.29	29	NP	1.0	50	--	----	5	24	31	37	2	0	Areia siltosa
E9	Horizonte A	2.64	1.37	1.20	46	32	1.2	55	22	25	46	16	19	15	3	1	Argila magra arenosa

ρ_s - massa específica dos grãos; ρ_{nat} - massa específica natural; ρ_d - massa específica seca; LL - limite de liquidez; LP - limite de Plasticidade; NP - não Plástico
e - índice de vazios; n - porosidade; c - coesão (kPa); ϕ - ângulo de atrito; argila magra = argila não plástica.

2.4 Modelagem reológica

2.4.1 Conceitos e modelos

Fazendo uma analogia da análise de estabilidade de taludes com a análise do comportamento mecânico das corridas de massa, a partir de conceitos de análise de tensões e deformações em solos (Azevedo, 2007), pode-se dizer que para a resolução dos dois problemas temos de um lado as incógnitas e de outro as equações governantes. As incógnitas podem ser fatores de segurança, deslocamentos, tensões e velocidades. As equações governantes são as de equilíbrio de forças e momentos, equações de compatibilidade de deformações e deslocamentos, e equações constitutivas e/ou critérios de resistência, bem como as condições de contorno do problema. Quando o número de incógnitas for igual ao número de equações governantes mais as condições de contorno, temos que o problema é determinado.

Para a análise de estabilidade de taludes, as equações governantes podem ser obtidas por um modelo da estática, como por exemplo, o método de equilíbrio limite das fatias de Bishop, acoplado com um critério de resistência, por exemplo, de Mohr-Coulomb. Já para a análise do comportamento das corridas de massa, as equações governantes podem ser obtidas por um modelo dinâmico, baseado na mecânica do contínuo, como por exemplo, a solução lagrangeana para as equações de movimento, acoplado com um modelo ou equações constitutivas, como por exemplo, um modelo reológico. O critério de resistência, para a análise de estabilidade, e o modelo reológico, para a análise dinâmica, determinam o valor da resistência na superfície de ruptura, ou base da corrida de massa. Na FIG. 2.6 apresenta-se um esquema desta analogia.

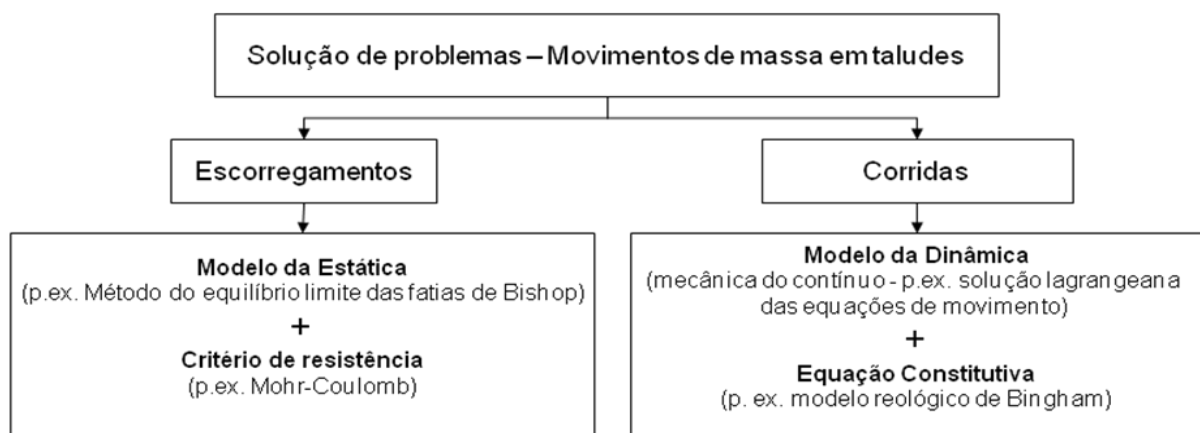


FIGURA 2.6- Analogia da solução de análise de estabilidade de taludes e análise do comportamento mecânico de corridas de massa

Um estudo detalhado sobre o funcionamento do movimento de massa tipo fluxo ou corrida de detritos, de rocha, de lama e modelos mecânicos utilizados para representar este tipo de movimento de massa e suas particularidades, bem como aplicações da modelagem reológica e estudos de caso são encontrados em Takahashi (2007). Na presente pesquisa pretende-se uma abordagem mais sucinta dos aspectos teóricos dos modelos e equações constitutivas, tendo como foco a verificação da aplicabilidade dos modelos reológicos apresentados no programa DAN-W para os taludes de Belo Horizonte.

Em relação aos modelos da dinâmica adotados nos estudos de corridas de massa pode-se dividi-los em duas categorias: modelos idealizando uma massa de aparência regular, que se move em relação a um ponto, e modelos baseados na mecânica do contínuo. Modelos considerando uma massa regular têm a limitação óbvia de não considerar as deformações internas. Enquanto eles podem prover uma razoável aproximação do movimento em relação ao centro de gravidade do deslizamento, não podem simular o movimento da frente da corrida, o que é um dos mais importantes aspectos da análise de percurso.

Os modelos baseados na mecânica do contínuo podem também se dividir em duas categorias: baseados em sistema de coordenadas fixo (euleriano), onde o mesmo não se modifica a medida que o deslizamento avança; e sistema de coordenadas móvel (lagrangeano), que são vantajosos por acompanhar a grande irregularidade do movimento de uma corrida de massa. No QUADRO 2.12 apresentam-se as características, uso e referências bibliográficas de modelos dinâmicos que tem como conceito a massa de aparência regular, e modelos baseados na mecânica do contínuo citados por Hungr (1995).

Em relação às equações constitutivas, alguns conceitos de mecânica dos fluidos são apresentados para melhor entendimento dos diferentes modelos reológicos. A palavra reologia vem do grego *rheo*= fluxo e *logos*= estudo, sendo sugerida pela primeira vez por Bingham e Crawford, para descrever o fluxo, no caso de materiais líquidos e deformação, no caso de materiais sólidos. A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida e no QUADRO 2.13 apresentam-se valores desta constante para alguns fluidos, entre eles a água.

Embora a viscosidade seja comumente usada para caracterizar um material, ela pode ser inadequada para descrever o comportamento mecânico de uma substância, em especial fluidos não-newtonianos, como os solos em geral. Daí a importância de conhecer as características do modelo reológico utilizado, das hipóteses adotadas e quais os parâmetros envolvidos.

QUADRO 2-12- Características, uso e referências bibliográficas de modelos dinâmicos a partir de Hungr (1995)

Modelos	Características	Uso	Referências Bibliográficas	
Massa de aparência regular	Previsão razoável do movimento em relação ao centro de gravidade do deslizamento. Não considera deformações internas e não podem simular o movimento da frente da corrida, o que é um dos aspectos importantes da análise do percurso.	Avalanches de rochas	Koerner (1976), Perla <i>et.al.</i> (1980), Hutchinson (1986), Evans <i>et. al.</i> ; Heim (1932)	
Baseados na mecânica do contínuo	Coordenadas fixas (sistema euleriano)	Baseados na equação de fluxo turbulento (Manning)	Cálculo de rotas de enchentes na hidráulica	Strelkoff, 1970
		Baseados no conceito de fluxo laminar linear viscoso (newtoniano) e fluxo visco-plástico (Bingham)	Rupturas de barragem	Jeylapan, 1981
		Solução para o fluxo de Bingham aplicada em enchentes	Corridas de lama em enchentes de canais para talude finito	United States of Corps Engineers (1985) e Fred (1988) com solução similar baseada na lei de conservação de energia.
		Baseados em um programa existente de fluxo newtoniano para aceitar o modelo reológico bilinear (BVSMAC)	Avalanches de rochas	Desenvolvido por Dent (1982) e usado por Sousa & Voight (1991)
		Modelo tridimensional friccional considerando o coeficiente de poropressão não drenada	Avalanches de rochas	Sassa (1988)
		Modelos híbridos entre conceito de massa regular e mecânica do contínuo	Avalanches de rochas	Kobayashi & Kagawa (1987) e Mc Even & Malin (1989)
	Coordenadas móveis (sistema lagrangeano)	Modelo bidimensional lagrangeano friccional, com algoritmo capaz de simular pressões internas em condições não hidrostáticas	Apropriado para fluxo de material granular e não apropriado para material fluido.	Savage & Hutter (1989)
		Modelo bidimensional lagrangeano, com complexa fórmula reológica combinando efeitos friccional e viscoso.	Desenvolvido para deslizamentos marinhos e também usado para avalanches de rochas	Norem <i>et. al.</i> (1990)

Um fluido newtoniano é um fluido em que cada componente da tensão cisalhante (τ) é proporcional ao gradiente de velocidade (v) na direção normal a essa componente. A constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica (μ), ou seja, a tensão é diretamente proporcional à taxa de deformação (p. ex.: água, ar, óleos), conforme EQ. 2.2.

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

[2.2]

QUADRO 2-13- Valores de viscosidade dinâmica.

Fluido	Viscosidade (kPa·s)
álcool etílico	2,480E-07
acetona	3,260E-07
metanol	5,970E-07
álcool propílico	2,256E-06
benzeno	6,400E-07
água	1,003E-06
nitrobenzeno	2,000E-06
mercúrio	1,700E-05
ácido sulfúrico	3,000E-05
óleo de oliva	8,100E-05
oleo de rícino	9,850E-04
glicerol	1,485E-03
polímero derretido	1,000E+00
piche	1,000E+04
vidro	1,000E+37
sangue	4,000E-06

O fluido não Newtoniano é um fluido cuja viscosidade varia proporcionalmente com a cinética que se imprime a esse mesmo fluido, respondendo de forma quase instantânea. Para exemplo, tem-se a mistura de farinha com água que, dependendo da energia cinética que recebe, pode ser um sólido ou um líquido. Se o movimento que se lhe imprime for rápido, esta mistura torna-se um sólido e assim que se cessa o movimento, esta se transforma novamente em líquido.

Existem modelos reológicos que consideram o material como uma mistura de sólidos com fluidos, como é o caso do modelo de Bagnold (1954, *apud* Macias *et al.*, 1997) o qual foi um dos pioneiros a realizar um estudo experimental misturando esferas sólidas em um fluido viscoso de comportamento newtoniano. Variando-se a concentração de partículas, determinou-se a relação adimensional entre a taxa de deformação (N) e o esforço cisalhante (G^2) atuantes nas misturas de detritos. Na FIG. 2.7 apresenta-se a relação $N \times G^2$, onde N é conhecido como número de Bagnold, análogo ao número de Reynolds, e determina regiões de comportamento mecânico das corridas: para $N > 450$, o comportamento é inercial dependendo muito mais da força dispersiva entre as partículas proveniente da colisão umas com as outras; para $N < 40$, tem-se a região de comportamento macroviscoso, onde a resistência a dispersão é controlada pela viscosidade do fluido; e $40 < N < 450$, tem-se a região de comportamento de transição, onde a resistência é tanto devida à pressão dispersiva quanto viscosidade (Macias *et al.*, 1997).

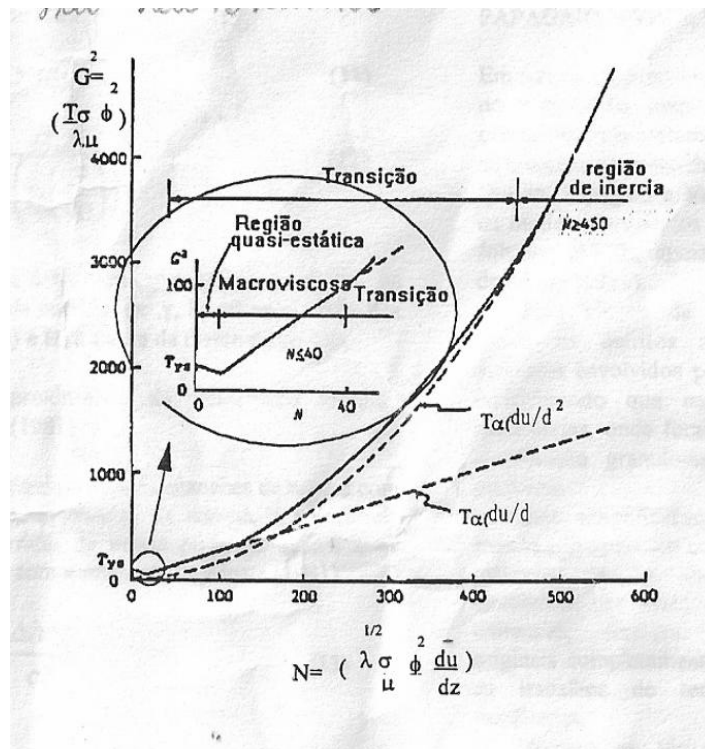


FIGURA 2.7- Taxa de deformação x esforço cisalhante (Macias *et al.* 1997)

Macias *et al.* (1997) citam que existem dois procedimentos para análise do comportamento de corridas de massa: relações empíricas, obtidas por observações de campo e medições, e relações analíticas, obtidas por retroanálises, baseadas nas características geométricas das corridas e parâmetros reológicos, principalmente representados pela viscosidade e tensão de escoamento. No mesmo trabalho, o autor realiza retroanálise de corridas de massa no Rio de Janeiro, utilizando os modelos analíticos de Bagnold (1954) e Johnson (1971), com a previsão da velocidade segundo Mears (1981), e encontra valores para a viscosidade conforme QUADRO 2.14. Ainda conforme o autor, a diferença nos valores da viscosidade deve-se ao fato de o conceito de viscosidade ser diferente para os dois modelos. No modelo de Johnson a viscosidade é representativa para o material como um todo, e no modelo de Bagnold a viscosidade é representativa para o material mais fino (matriz), o qual é, intuitivamente, menos resistente que a mistura blocos-matriz (detritos).

QUADRO 2-14- Valores de viscosidade (Macias *et al.*, 1997).

Corrida ou autor	Viscosidade kPa.s	
	Bagnold	Johnson
Quitite (corrida)	0,092	3,44
Papagaio (corrida)	0,165	1,79
V. Encantado (corrida)	0,209	-
Sharp & Nobles (1953)	0,2 a 0,6	-
Lu & Cruden (1996)		25 a 32
Johnson (1970)		0,076
Hungr et al (1984)	3.0 (Corridas com espessura > 2m)	

Hungr (1996) aplicou os modelos Friccional e Bingham, bem como Voelmy, em 23 casos de corridas de detritos, rocha, lama ou neve. Os alcances destas corridas situavam-se entre 200m a 10000m, portanto, uma faixa bem ampla. Para o modelo friccional, foram encontrados nas retroanálises realizadas através do programa DAN-W, ângulos de atrito entre 8 e 23°. Para o modelo de Bingham as tensões de escoamento variaram entre 16 e 400 kPa e a viscosidade entre 1.6 e 50 kPa.s. No modelo Voelmy, mais adequado para avalanches de neve (Koerner, 1976 *apud* Hungr, 1996), foram encontrados coeficientes friccionalis entre 0.03 e 0.21, e coeficientes de turbulência entre 100 e 1000 m/s².

Coussout *et al.* (1998) relata que vários acidentes envolvendo fluxo de detritos mostraram que o material teve comportamento de fluido visco-plástico, confirmado pela espessura das áreas deposicionais encontradas em campo. O modelo de Bingham é um exemplo de um modelo clássico que considera o material com comportamento visco-plástico. Ainda segundo Coussout *et al.* (1998), outras pesquisas tem proposto o uso do modelo de Herschel-Bulkley para aplicação a fluxo de detritos de solos finos, com fração fina (> 40µm) maior que 10%. Os autores também observam que para materiais granulares o comportamento friccional torna-se predominante e a adoção do modelo de Bagnold (1954) tem apresentado bons resultados conforme estudos de Pierson *et. al* (1990), Takahashi (1991) e Arattano & Savage (1994).

Bertolo (2005) fez um estudo comparativo de aproximadamente 15% de alcances documentados de rupturas tipo corrida de detritos no Yosemite Vale, Califórnia, com simulações de alcances pelo programa DAN-W e pelo também programa de modelagem reológica FLO-2D (O'Brien *et al.*, 1993). Inicialmente, o autor fez a calibração dos parâmetros reológicos dos programas, por meio de retroanálises em três rupturas conhecidas. Depois utilizou os parâmetros retroanalizados nas simulações de outras corridas. Os modelos reológicos utilizados por Bertolo (2005) foram friccional, com ângulo de atrito retroanalizado de 36°, Voelmy, e Bingham, com viscosidade de Bingham entre 0,8 e 1 kPa.s e tensão de escoamento de 0,15 a 0,3 kPa.

O fluxo de detritos é um dos tipos de movimento de massa mais danoso e com comportamento bastante complexo, o que dificulta a modelagem dos fatores que os influenciam. Iverson & Denlinger (2001) e Iverson (1997) descrevem os mecanismos e as formulações físicas que envolvem o fluxo de detritos, para um material composto de uma mistura de parte sólida e fluida, proveniente de escorregamentos que desencadeiam avalanches. A característica central destes modelos é usar informações sobre a profundidade e volume deslocados, bem como as equações de conservação de energia.

Uma importante questão no estudo dos movimentos de massa é determinar em que circunstâncias um movimento tipo escorregamento pode se transformar em uma corrida de massa. Segundo Iverson *et al.* (1997), observações de campo, experiências de laboratório e análises teóricas indicam que escorregamentos podem desencadear os fluxos de detritos por três processos: 1) ruptura generalizada pelo critério de Mohr-Coulomb em taludes íngremes de solos, rocha ou outro sedimento; 2) liquefação parcial ou completa do solo ou massa devido à elevada poropressão, 3) conversão da energia translacional de um escorregamento em energia vibracional interna (p.ex, por aumento da temperatura granular). Estes processos podem ocorrer de forma independente ou simultaneamente e sinergicamente. Os autores observam que trabalhos recentes sobre mobilização de fluxo de detritos descrevem uma interação semelhante, mas invocam modelos mecânicos onde o comportamento do fluxo é constante e governado por submodelos reológicos de Bingham e Bagnold. Em contrapartida, os autores enfatizam e apresentam modelos que consideram a influência da variação das poropressões e da temperatura granular no comportamento do fluxo, como por exemplo, em modelos que utilizam o conceito de talude infinito em uma dimensão, e que fornecem informações quantitativas de como a poropressão e a temperatura granular podem influenciar a transição da ruptura por Mohr-Coulomb para a liquefação.

Gomes (2006) também tratou de corridas de massa a partir de escorregamentos, com o objetivo de desenvolver uma metodologia que combine modelos matemáticos de predição de escorregamentos e de corridas de massa, para determinar as áreas mais suscetíveis à ocorrência destes fenômenos. Toda a análise foi desenvolvida sobre um modelo digital do terreno (MDT), ou seja, espacialmente. A localização das áreas mais suscetíveis a escorregamentos foi realizada com o software SHALSTAB, o qual combina o modelo de estabilidade da encosta por taludes infinitos com um modelo hidrológico. O software FLO-2D de modelagem reológica foi utilizado para as simulações das corridas de massa a partir das cicatrizes de escorregamentos, e a combinação do resultado do FLO-2D com o SHALSTAB determinaram as áreas afetadas.

2.4.2 A ferramenta DAN-W

Segundo Hungr (1995) as corridas de massa, conhecidas em suas diversas formas como corridas de detritos, avalanches de detritos, corridas de terra ou lama e avalanches de rocha estão entre os mais perigosos e destruidores tipos de movimento de massa. Seu potencial para destruição frequentemente não pode ser reduzido por medidas de estabilização das áreas de origem. Engenheiros de análise de riscos precisam incluir na análise a estimativa do percurso das corridas. Parâmetros do percurso incluem máxima distância atingida ou alcance, velocidades, espessura e

distribuição dos depósitos, e o comportamento em curvas e obstáculos do caminho. Uma das maneiras de prever estes parâmetros é através da modelagem dinâmica, utilizando, por exemplo, uma ferramenta computacional como o programa DAN-W.

O programa DAN-W é baseado na solução Lagrangeana para a equação de movimento e permite a seleção de vários materiais reológicos, cujas propriedades podem variar ao longo do caminho de escorregamento ou dentro da massa mobilizada. Todas as informações deste item 2.4.2 foram extraídas de Hungr (1995 e 2010), por ser este autor o criador desta ferramenta computacional.

O programa DAN-W realiza as análises em condições bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D), e sua resposta é apresentada em coordenadas curvilíneas conforme FIG 2.8.

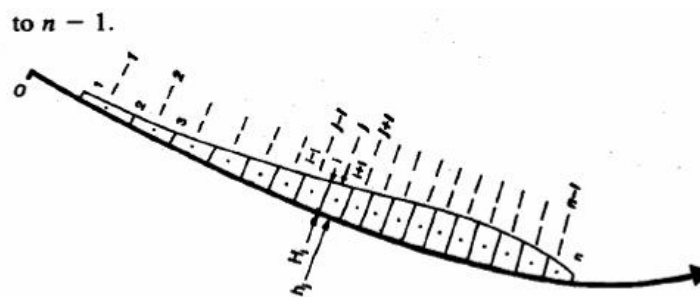


FIGURA 2.8- Solução Lagrangeana para a massa deslocada em coordenadas curvilíneas (Hungr, 1995)

Considerando as forças atuantes (P) e resistentes (T) apresentadas na FIG. 2.9, a força resultante F, agindo na base de cada bloco, consiste na componente tangencial do peso, mais a pressão resultante interna P, menos a força cisalhante resistente na base do deslizamento T.

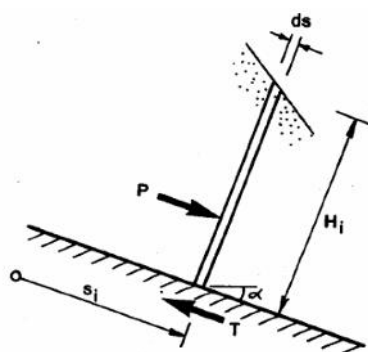


FIGURA 2.9 - Forças agindo no contorno de um bloco deslizante infinitesimal (Hungr, 1995)

A equação de equilíbrio é descrita, conforme EQ.2.3:

$$F = \gamma H_i B_i ds \cdot \sin \alpha + P - T \quad [2.3]$$

Em que:

γ – peso específico do material (kN/m^3);

H_i – média das alturas adjacentes a cada bloco.

B_i – largura do bloco;

ds – espessura infinitesimal;

α – ângulo da base do bloco com a horizontal.

A nova velocidade de cada bloco no final do intervalo de tempo é obtida a partir da velocidade inicial v'_i , por integração numérica da segunda lei de Newton ($F=ma$), conforme EQ.2.4:

$$v_i = v'_i \frac{g(F\Delta t - M)}{\gamma H_i B_i ds} \quad [2.4]$$

Em que,

γ - o peso específico de cada bloco,

Δt - o intervalo de tempo e

g - a aceleração da gravidade.

O termo M é o momento de um fluxo resultante de erosão ao longo do percurso ou entrada de material na corrida e será descrito a seguir. Quando o volume dos blocos é considerado constante durante a corrida este valor é zero.

Uma segunda integração é usada para obter o deslocamento em coordenadas curvilíneas, S_i , de cada bloco após cada intervalo de tempo (EQ.2.5).

$$S_i = S'_i + \frac{\Delta t}{2} (v_i + v'_i) \quad [2.5]$$

A nova posição das extremidades dos blocos é agora conhecida, bem como os volumes de material entre cada extremidade. A média de profundidade de cada bloco é determinada de modo a manter constante o volume de cada bloco, V_j (EQ. 2.6):

$$h_j = \frac{2V_j}{(S_{i+1} - S_i)(B_{i+1} + B_i)} \quad [2.6]$$

A nova profundidade de cada extremidade do bloco é calculada a partir da média das profundidades dos blocos adjacentes, conforme EQ. 2.7:

$$H_{i=} = \frac{h_{j-1} + h_j}{2} \quad [2.7]$$

O último bloco é assumido como triangular, então:

$$H_1 = \frac{h_1}{2} \quad H_n = \frac{h_{n-1}}{2} \quad [2.8]$$

O coeficiente de pressão lateral, k , é definido como a razão entre a tensão normal e tangencial na massa deslizante. A magnitude de k depende das deformações e sua determinação será mostrada nas seções seguintes. O coeficiente k é determinado para as extremidades entre blocos (índice i) e para a massa de blocos (índice j). O gradiente de pressão longitudinal para cada extremidade do bloco é obtido pela média dos blocos adjacentes, utilizando a EQ. 2.9, onde s_j é o valor do deslocamento em coordenadas curvilíneas para cada centro de bloco.

$$k_i \frac{dH}{ds} = \frac{1}{2} \left[\frac{k_j (h_j - H_i)}{s_j - S_i} + \frac{k_{j-1} (H_i - h_{j-1})}{S_1 - s_{j-1}} \right] \quad [2.9]$$

O incremento de deformação tangencial em cada bloco é calculado a partir dos deslocamentos das extremidades de blocos adjacentes (Δ significa acréscimo de tempo), conforme EQ. 2.10:

$$\Delta \epsilon_j = \frac{(S_{i+1} - S_i) - (S'_{i+1} - S'_i)}{S'_{i+1} - S'_i} \quad [2.10]$$

O problema está agora totalmente definido e a solução pode ser processada.

➤ O termo P de pressão interna entre blocos:

A pressão longitudinal P exercida pelo bloco anterior no bloco posterior é determinada a partir da hipótese que o fluxo é aproximadamente paralelo à base e a pressão P aumenta linearmente com a profundidade (EQ.2.11).

$$P = -k\gamma \frac{dh}{ds} \left(1 + \frac{a_c}{g}\right) H_i B_i \cos \alpha ds \quad [2.11]$$

Na EQ. 2.11 o termo $k(dh/ds)$ é obtido pela EQ.2.9, e a_c é definido como v_i^2/R .

Em um fluido sobre condições hidrostáticas de pressão, o coeficiente de pressão lateral k é sempre igual a 1. Se a maior parte da massa que flui é um material granular com atrito, o coeficiente

k depende da tensão tangencial de compressão e pode variar entre os coeficientes ativos (k_a) e passivos (k_p). Isto reflete a rigidez longitudinal da massa que escoa. Por exemplo, considerando uma avalanche de rochas compostas principalmente por fragmentos de material granular seco, movendo-se sobre uma camada de base liquefeita com atrito desprezível, os dois coeficientes podem mover-se entre o coeficiente ativo de Rankine de 0,2 e coeficiente passivo de Rankine de 5. A massa nestas condições será muito mais relutante a espalhar ou contrair do que em condições como um fluido, conforme FIG. 2.10.

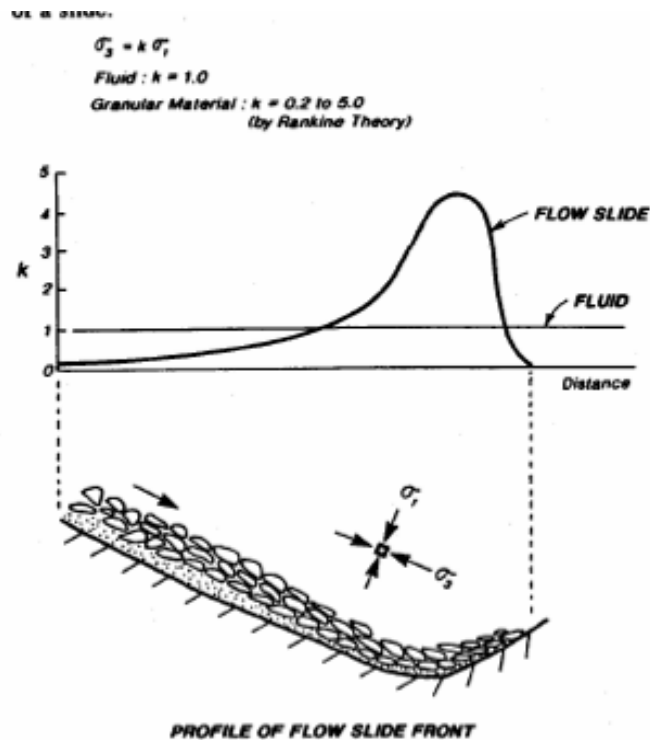


FIGURA 2.10- Definição do coeficiente k – razão entre tensão tangencial e normal variando ao longo do caminho (Hungar, 1996).

No programa DAN-W, o valor de k_j é assumido baseado na tensão tangencial prevalecente em cada bloco. Inicialmente todos os blocos iniciam em uma condição intermediária, com $k=1$. Após cada intervalo de tempo, o incremento da deformação $\Delta \epsilon_j$ é calculado conforme EQ. 2.10. O coeficiente k_j então é aumentado ou diminuído conforme EQ. 2.12:

$$k_j = k_j' + S_c \Delta \epsilon_j \quad [2.12]$$

O coeficiente de rigidez S_c é obtido como $(k_p - k_a) / 0.05$ para compressão, ou $(k_p - k_a) / 0.025$ para tração. Os valores mínimos e máximos para k_j podem corresponder aos estados ativo e passivo. A influência quantitativa da magnitude do coeficiente de rigidez não é grande. Savage & Hutter

(1989) utilizaram vários valores de k fixando este coeficiente como passivo em zonas comprimidas, e ativo em zonas de tração.

➤ O termo T de resistência ao fluxo

A resistência na base do fluxo, força T, depende do modelo reológico adotado e é função de diferentes parâmetros da corrida. A relação entre T e outros parâmetros é baseada na hipótese que a tensão cisalhante no plano tangencial à base da corrida aumenta linearmente com a profundidade normal. Isto, juntamente com uma dada equação constitutiva reológica, determina a distribuição do perfil da velocidade com a profundidade e a equação de T. Sete alternativas reológicas são apresentadas no QUADRO 2.15, com a respectiva equação de T, dados de entrada ou parâmetros reológicos e breve descrição de cada modelo reológico disponível no programa DAN-W.

➤ O termo M – momento de fluxo de material erodido ou agregado

Deposição ou arrastamento de material na base ou nos lados do fluxo podem ser simulados pela mudança de volume dos blocos em cada intervalo de tempo por uma quantidade pré-determinada proporcional à distância percorrida. A erosão ou deposição pode ser assumida em percentagens constantes da área da seção transversal por unidade de deslocamento. A mudança de volume seria aplicada em zonas pré-determinadas no percurso da corrida.

O Termo M, momento de fluxo na EQ. 2.4, reflete a mudança no momento resultante devido ao acréscimo de volume dos blocos.

A segunda lei de Newton em termos de momento é:

$$\frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = F$$

[2.13]

QUADRO 2-15- Equações de T (resistência na base da corrida), dados de entrada e breve descrição dos modelos reológicos.

Modelo	Fórmula da resistência na base da corrida (T)	Dados de entrada ou parâmetros reológicos	Descrição
Friccional	$T = A_i \cdot \gamma \cdot H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) (1 - r_u) \tan \phi$ <p>A_i – area da base do bloco; γ – peso específico natural (kN/m³); H_i – média das alturas adjacentes ao bloco; a_c – aceleração centrífuga; r_u – coeficiente de poropressão; ϕ – ângulo de atrito (°).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Fator r_u de poropressão • Ângulo de atrito interno do material • Ângulo de atrito na base da corrida 	T é função somente da tensão efetiva normal na base do deslizamento. Esta tensão depende da profundidade do fluxo, peso específico do material e poropressão
Newtoniano	$T = \frac{3A_i v_i \mu}{H_i}$ <p>v – média das velocidades; μ – viscosidade dinâmica do fluido</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Viscosidade dinâmica • Ângulo de atrito interno do material 	T é uma função linear da velocidade do fluxo com a viscosidade dinâmica. A resistência ao fluxo é determinada pela equação de Poiseville
Plástico	$T = cA_i$ <p>c - cte de resistência ao cisalhamento (p. ex. Su)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Resistência não-drenada • Ângulo de atrito interno do material 	Controlada por uma constante de resistência ao cisalhamento (c), por exemplo a resistência não-drenada (Su)
Turbulento	$T = A_i \gamma v_i^2 n^2 H_i^{\left(-\frac{1}{3}\right)}$ <p>n - coeficiente de rugosidade</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Coeficiente de turbulência • Ângulo de atrito interno do material 	T é função do quadrado da velocidade. Para fluxo de água, a equação de Manning, com o coeficiente de rugosidade (n)
Bingham	$v_i = \frac{H_i}{6\mu} \left(\frac{2T}{A_i} - 3\tau + \frac{\tau^3 A_i^2}{T^2} \right)$ <p>μ – viscosidade de Bingham τ - tensão de escoamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Tensão de escoamento • Viscosidade de Bingham • Ângulo de atrito interno do material 	T é função da profundidade do fluxo, velocidade, tensão de escoamento (τ) e viscosidade de Bingham (μ). A velocidade média do fluxo é proveniente da hipótese de um acréscimo linear da resistência ao cisalhamento com a profundidade.
Coulomb-Viscoso	$\tau = \gamma H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) (1 - r_u) \tan \phi$	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Ângulo de atrito na base da corrida • Fator r_u • Viscosidade de Bingham • Ângulo de atrito interno do material 	A tensão de escoamento de Bingham pode ser dependente da tensão normal efetiva. Este modelo foi utilizado para deslizamentos por autores como (e.g. Morgenstern 1967).
Voelmy	$T = A_i \left[\gamma H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) \tan \phi + \gamma \frac{v_i^2}{\xi} \right]$ <p>ξ - coeficiente de turbulência</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso específico natural • Coeficiente friccional • Coeficiente de turbulência • Ângulo de atrito interno do material 	Este modelo, introduzido por Voelmy (1955) para avalanches de neve, contém um termo friccional e um termo turbulento.

Enquanto m e v são a massa e velocidade acrescentada aos blocos e Δ acréscimo de tempo ou massa (termo i é omitido por simplicidade).

Após um intervalo de tempo a velocidade e a massa mudam. Desprezando o termo de segunda ordem, o novo momento é conforme a EQ. 2.14.

$$mv + \Delta(mv) = (m + \Delta m)(v + \Delta v) = mv + \Delta mv + \Delta vm \quad [2.14]$$

Da EQ. 2.14 obtém-se:

$$\Delta(mv) = \Delta mv + \Delta vm \quad [2.15]$$

Se ocorrer acréscimo de material estacionário na massa que se desloca, a mudança no momento é dada pela EQ. 2.15 , e substituindo a EQ. 2.15 na EQ. 2.13 e rearranjando tem-se o acréscimo de velocidade como na EQ. 2.16.

$$\Delta v = \frac{F\Delta t - \Delta mv}{m} \quad [2.16]$$

Como a massa dos blocos vizinhos é dada por $\gamma H_i B_i \frac{ds}{g}$, isto leva que o termo momento de fluxo (M) na EQ. 2.4 é igual a Δmv , enquanto Δm é o incremento de massa no intervalo de tempo. Se por outro lado a quantidade Δm de material for negativa, ou seja, houver deposição de material durante um intervalo de tempo, isto é, remover da malha de referência uma velocidade v e remover uma parte do momento igual a Δmv . Neste caso o momento de fluxo M é igual a zero na EQ. 2.4.

Esta formulação para o Momento de Fluxo (M) era apenas teórica quando Hungr (1995) fez esta descrição. Na versão atual do programa DAN-W (versão 10) este módulo já está implementado.

3 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo de avaliar a aplicabilidade da análise dinâmica pelo programa DAN-W para previsão de alcances de rupturas de taludes do município de Belo Horizonte, bem como obter parâmetros reológicos dos materiais, a seguinte sequência metodológica foi adotada:

- a. Definição dos taludes a serem retroanalisados
- b. Definição dos dados de entrada para cada modelo e cada talude
- c. Realização das simulações de alcance pelo programa DAN-W
- d. Comparação das previsões com os alcances observados em campo
- e. Avaliação de compatibilidade do modelo reológico com cada ruptura
- f. Definição dos parâmetros reológicos retroanalisados
- g. Aplicação de previsão de alcance com parâmetros obtidos nesta pesquisa
- h. Comparação dos resultados com bibliografia
- i. Análise de potencialidades e limitações do programa DAN-W

3.1 Definição dos taludes a serem retroanalisados

O critério para definição dos taludes retroanalisados denominados Ponteio, Planetóides, Engenho Nogueira e Taquaril foi a representatividade dos mesmos em relação à geologia local, e a disponibilidade de dados destes taludes necessários para a realização das retroanálises utilizando o programa DAN-W. Estes dados são: conhecimento da geometria antes e após a ruptura, bem como a profundidade da superfície de ruptura; alcance da massa deslocada, parâmetros de resistência, fator r_u de propressão, peso específico natural dos materiais. O talude Juliana foi escolhido pelos motivos já citados para os outros taludes, mas, principalmente por ter atingido um alcance de 40m, considerado elevado para taludes de Belo Horizonte.

3.2 Definição dos dados de entrada para cada modelo reológico

Os parâmetros de entrada são distintos para cada modelo reológico, porém, a definição dos limites inferiores e superiores destes parâmetros seguiram a mesma lógica, independente do modelo reológico em estudo. A seguir são descritos os critérios e a metodologia adotados para definição dos dados de entrada e seus limites inferiores e superiores.

- Os dados de entrada não são valores fixos, pois, podem variar segundo um desvio padrão. Por isto foi adotado o procedimento de retroanálise paramétrica para todos os taludes estudados, ou seja, realização de várias simulações, com dados de entrada que variam de um limite inferior a limite superior.
- O desvio padrão dos dados de entrada não era conhecido para nenhum dos casos estudados nesta pesquisa. Portanto os resultados pontuais dos ensaios de resistência ao cisalhamento da rocha e do material sobreposto para o caso dos taludes Ponteio e Planetóides, e resistência ao cisalhamento do solo para os taludes Taquaril e Engenho Nogueira, bem como os resultados das retroanálises das rupturas para condição de equilíbrio, realizadas por Parizzi (2004) para os taludes Planetóides, Taquaril e Engenho Nogueira, foram indicações dos limites inferiores e superiores destes dados. Para o talude Juliana a referência para o limite inferior e superior dos parâmetros de resistência foi o estudo da Urbel (2010), que indica um valor de resistência não drenada do solo residual de gnaiss do local e também o resultado de uma retroanálise para a condição de equilíbrio limite do talude.
- Para casos de dados de entrada em que não eram conhecidos resultados de ensaios, bem como resultados de retroanálises, foi adotado o método de tentativa e erro, de maneira a aproximar o alcance obtido pelo programa DAN-W ao alcance de campo, e obter indicações dos limites inferiores e superiores dos dados de entrada e parâmetros reológicos. Este método foi adotado principalmente nos modelos Newtoniano, de Bingham e Coulomb-Viscoso.
- Com exceção do modelo fluido newtoniano, os demais modelos possuem mais de um dado de entrada passível de variação simultânea. Foram realizadas simulações e criados gráficos para contemplar várias possibilidades de variação conjunta dos dados de entrada.

3.3 Realização das simulações de alcance pelo programa DAN-W

Após a definição dos dados de entrada, as simulações foram realizadas aceitando as recomendações do programa DAN-W para o número mínimo de fatias que dividem o material mobilizado (50) e para o intervalo de tempo de execução do algoritmo. O intervalo de tempo não tem um valor mínimo e máximo, pois o programa DAN-W sugere o mesmo a cada simulação.

A versão do programa DAN-W utilizada nas simulações é de número 10. A versão anterior foi testada para todos os taludes, e inúmeros casos apresentaram problemas de convergência. O autor do programa (Hung, 1995) enviou comunicado e solicitou a substituição da versão anterior pela de número 10, confirmando que a versão anterior do programa apresentava problemas de convergência.

A FIG. 3.1 é uma vista da tela do DAN-W após o lançamento da superfície de ruptura prevista, e da geometria do Talude Juliana. A geometria dos taludes pode ser lançada pela importação de um arquivo de desenho (.dxf) ou por meio de coordenadas de pontos conhecidos, lançados um a um. Para a presente pesquisa, todos os taludes foram lançados ponto a ponto, pois não se tinha disponível os arquivos eletrônicos com os desenhos das geometrias.

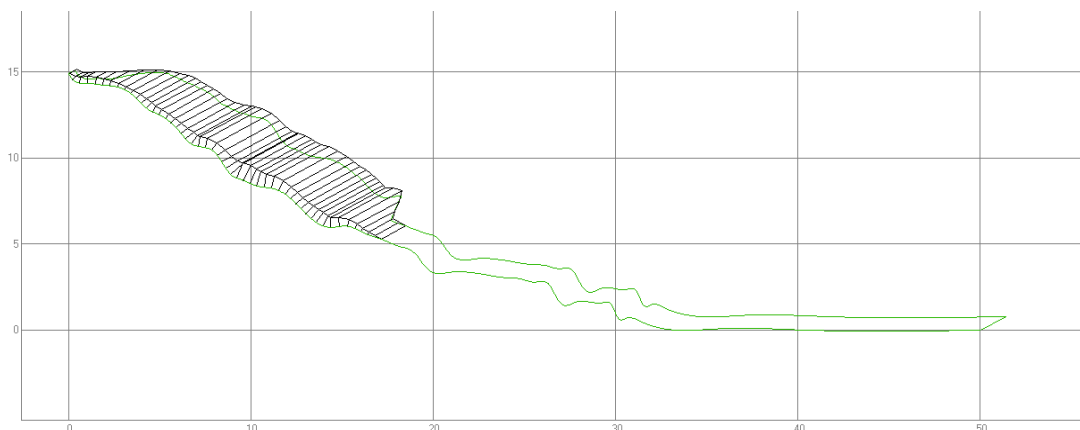


FIGURA 3.1 – Superfície de ruptura e geometria do talude Juliana após lançamento no DAN-W.

Após o lançamento da geometria, um modelo reológico é escolhido para análise, e são preenchidos os parâmetros de entrada para dar início à simulação de ruptura. Após o término da simulação a medida do alcance (A) é determinada. Este procedimento foi adotado em todos os taludes desta pesquisa.

Na FIG. 3.2 apresenta-se uma vista da tela do DAN-W após a simulação de ruptura, com a indicação do alcance do deslizamento.

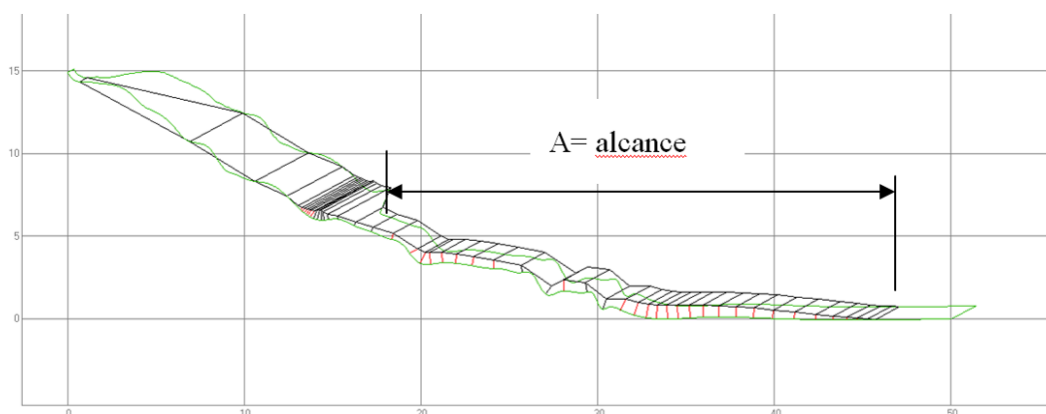


FIGURA 3.2- Superfície de ruptura e geometria do talude Juliana após lançamento no DAN-W.

3.4 Alcances simulados *versus* alcance de campo e definição dos parâmetros reológicos

No mesmo gráfico de simulações de alcances de um determinado talude, para um modelo reológico foi acrescentada a reta do alcance real, observado em campo. A interseção entre as curvas com os resultados simulados e a reta de alcance de campo foi considerada o ponto de resultado da retroanálise.

3.5 Avaliação da compatibilidade do modelo reológico com a ruptura do talude

Para a avaliação de compatibilidade do modelo reológico para cada tipo de ruptura foram criados critérios que possibilitaram uma análise qualitativa dos diversos modelos. Para o modelo ser classificado como “Compatível”, três critérios, descritos a seguir, devem ser atendidos:

- *Critério 1:* A curva de simulações de alcances do programa DAN-W para o modelo reológico interceptou a reta do alcance de campo.
- *Critério 2:* A curva de simulações de alcances do programa DAN-W para o modelo reológico possui comportamento lógico e definido.
- *Critério 3:* Os parâmetros retroanalizados pelo programa DAN-W são coerentes com parâmetros de retroanálises da superfície de ruptura obtidos em literatura técnica. As seguintes restrições se aplicam a este critério:

. PD (Parâmetros desconhecidos) – Parâmetros reológicos da superfície de ruptura não encontrados na literatura técnica, portanto, não foi possível a comparação com os parâmetros reológicos retronalizados pelo programa DAN-W.

. PNC (Parâmetros Não Coerentes) – Parâmetros reológicos da superfície de ruptura encontrados na literatura técnica não são coerentes com os parâmetros reológicos retronalizados pelo programa DAN-W, mas, os critérios 1 e 2 foram atendidos.

Outras classificações para os modelos reológicos, utilizadas na discussão dos resultados desta pesquisa foram “Não satisfatório”, e “Não convergiu”. “Não satisfatório” indica que os critérios de compatibilidade não foram atendidos. E “Não convergiu” indica problemas do programa para finalizar os cálculos, como interrupções, resultados irrealis, ou ruptura que escoava indefinidamente.

3.6 Aplicação dos parâmetros obtidos na simulação de outro talude

Os parâmetros reológicos obtidos na retroanálise do Talude Ponteio 1 foram utilizados em uma previsão de alcance hipotética para o Talude Ponteio 2, que é o mesmo talude 1 porém, com perfil topográfico diferente.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta o histórico e descrição da área de cada talude estudado, a topografia destes taludes, os dados de entrada utilizados para as simulações de alcance pelo programa DAN-W, bem como os resultados obtidos nessas simulações.

4.1 Talude Ponteio

4.1.1 Histórico e descrição da área

A descrição da litologia do Talude Ponteio encontra-se no item 2.3 deste trabalho. Parizzi (2004) faz um histórico do talude Ponteio desde a abertura da rodovia BR 356 até 2003. Sucessivas movimentações foram registradas desde o corte efetuado para a abertura da rodovia, até os dias atuais. Escorregamentos planares, em cunha e tombamentos da rocha de filito tem gerado detritos que se acumulam na superfície do talude formando um depósito de tálus. Em períodos chuvosos o tálus sofre corridas de detritos, interrompendo parte da rodovia e causando transtornos no trânsito. Um ponto de ônibus que se localizava no pé deste talude foi interditado no início de 2010 para evitar acidentes envolvendo pessoas.

Na década de 80, parte do talude foi coberto por tela metálica, grampos de ancoragem (com 50 cm de comprimento) e concreto projetado. O material solto foi utilizado como aterro na formação das bermas de equilíbrio, sendo que existem locais de até 2m de espessura deste aterro de material proveniente do filito. Parte da estrutura se rompeu, formando uma cicatriz de escorregamento conforme FIG. 4.1



FIGURA 4.1- Vista do Talude Ponteio em 2002 (Parizzi, 2004)

Em 2003 a cicatriz foi coberta por tela metálica fixada ao solo por grampos de até 6m de profundidade, e tratamento com cobertura vegetal e mantas de bioengenharia, conforme FIG. 4.2.



FIGURA 4.2- Vista do Talude Ponteio em 2003 (Fonte site www.deflor.com.br)

Em dezembro de 2005, o talude sofreu nova movimentação. O tálus que ainda estava coberto pelo concreto projetado, localizado na crista do talude (indicação na FIG. 4.2), sofreu corrida de detritos e empurrou a tela metálica que se rompeu. Na FIG.4.3 é possível ver a tela metálica antes do seu rompimento, sendo pressionada pelo tálus que deslizou da crista. A feição atual do talude é a mostrada na FIG. 4.4.



FIGURA 4.3- Vista da tela metálica antes de romper, sofrendo a pressão do tálus (acervo pessoal Parizzi)



FIGURA 4.4 - Vista do Talude Ponteio em 2010

4.1.2 Topografia

A planta topográfica utilizada para modelar o talude Ponteio no programa DAN-W foi a apresentada por Parizzi (2004), conforme FIG. 4.5. Dois perfis longitudinais distintos foram utilizados na modelagem reológica, os quais se denominam Ponteio 1 e Ponteio 2.

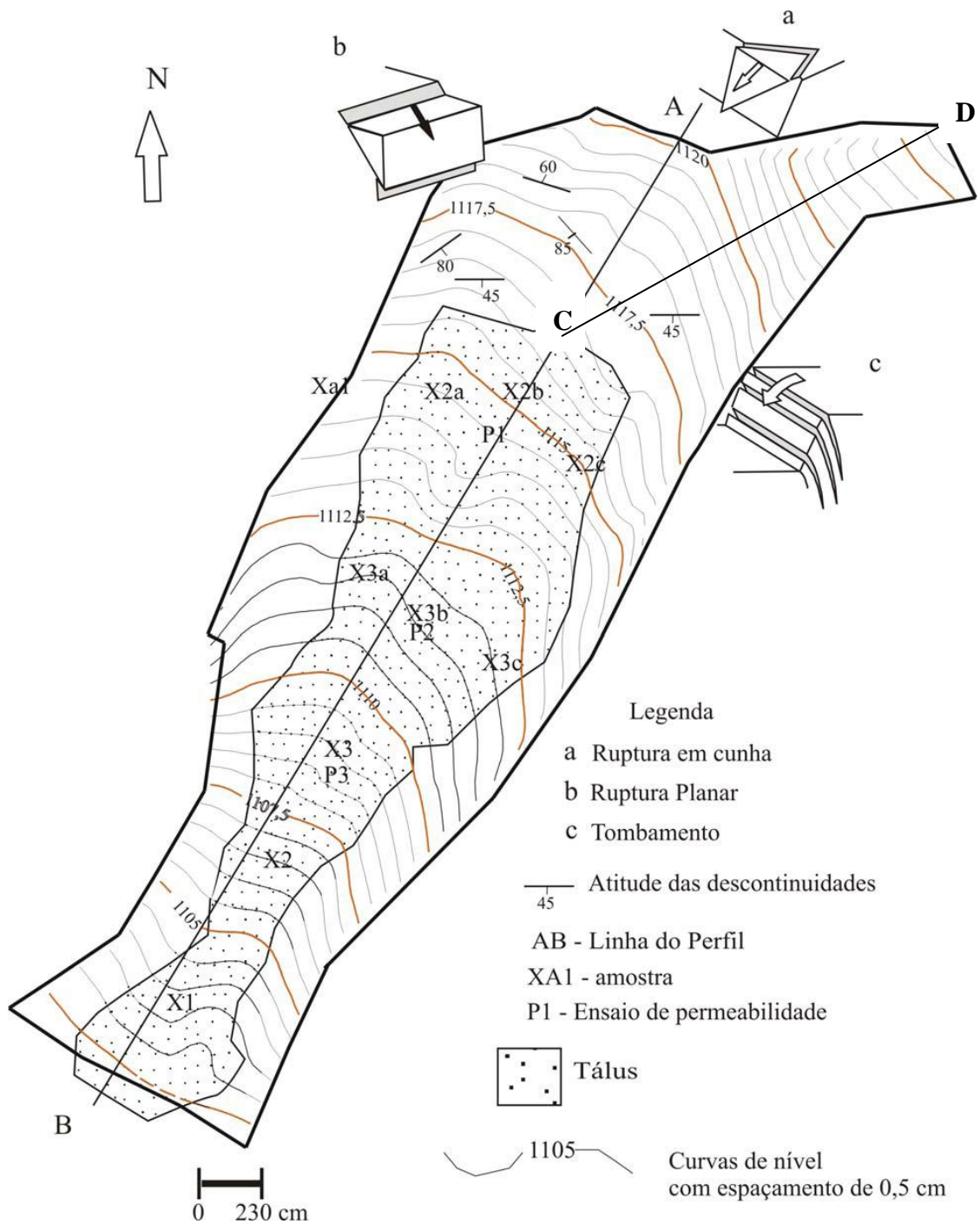


FIGURA 4.5 – Planta topográfica Talude Ponteio (Modificada de Parizzi, 2004)

• Ponteio 1

O Ponteio 1 é o perfil longitudinal CB, conforme indica FIG. 4.5 e FIG. 4.6, tendo 15,2 m de altura e inclinação média de 23,5°. Este perfil é correspondente ao cenário de 2002, geometria anterior à corrida de detritos de 2005. No ano de 2002 Parizzi observou uma corrida de detritos, com alcance de 3,3m, ou seja, ocupou todo o passeio de 4,8m (a geometria antes da ruptura já ocupava 1,5m do passeio). Com o alcance conhecido, foi possível a retroanálise dos parâmetros reológicos.

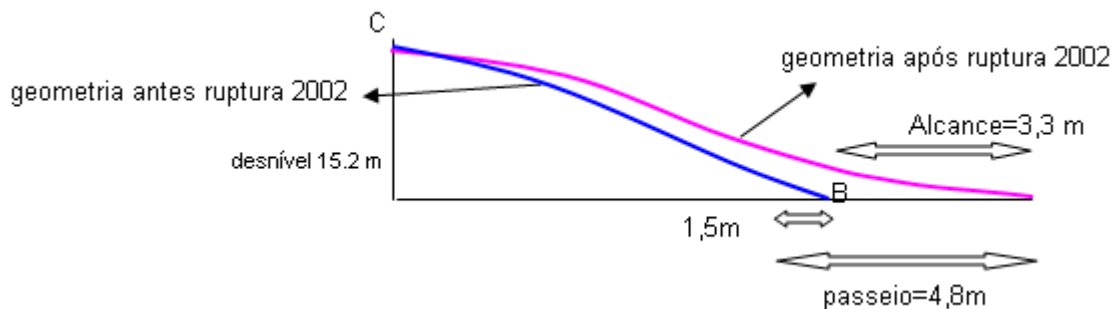


FIGURA 4.6 - Croquis do perfil longitudinal Ponteio 1 – geometria antes e após ruptura de 2002

• Ponteio 2

O Ponteio 2 é o perfil longitudinal DCB, conforme indica FIG. 4.5, tendo altura de 9m (trecho DC) e inclinação de 28,5° no trecho DC e trecho CB conforme Ponteio 1. Este perfil foi utilizado para previsão de alcance de uma corrida de detritos hipotética, considerando que a intervenção de 2003 (tela metálica e manta de biogenharia) não foi realizada. Foram utilizados parâmetros reológicos obtidos na retroanálise do Ponteio 1. O objetivo desta simulação foi realizar uma aplicação dos parâmetros reológicos obtidos pelo DAN-W e verificar qual a contribuição da solução de estabilização na diminuição do alcance da corrida de detritos.

4.1.3 Retroanálises do Talude Ponteio 1

Foram realizadas retroanálises considerando os modelos Friccional, Plástico, Bingham e Coulomb-Viscoso. O modelo newtoniano apresentou problemas de convergência para este talude.

Os parâmetros de resistência, obtidos em ensaio de cisalhamento direto, e o peso específico do tálus foram obtidos por Parizzi (2004):

- Ângulo de atrito do tálus: 29°
- Ângulo de atrito do filito: 17°
- Coesão do tálus: 0 a 6 kPa
- Coesão do filito: 15 kPa
- Peso específico: 13 a 17 kN/m³
- Fator r_u : 0,12 a 0,23 (obtidos para o Talude Planetóides, mesma litologia que Ponteio) para fator de segurança igual a 1.

A partir destes parâmetros de resistência foram realizadas as retroanálises. O alcance de campo, que para o talude Ponteio foi de 3,3 m, também foi utilizado nas retroanálises.

Modelo reológico friccional

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito da interface entre o tálus e o filito e o fator r_u . A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: O peso específico foi fixado em seu valor superior de 17 kN/m^3 . A variação do peso específico não influencia o alcance conforme FIG. 4.7.
- O fator r_u varia entre 0,12 e 0,23 conforme Parizzi (2004).
- O ângulo de atrito de interface varia entre 17° e 30° . Limite inferior definido como o ângulo de atrito do filito, e limite superior um grau acima do ângulo de atrito do tálus.
- O ângulo de atrito do tálus foi fixado em 29° .

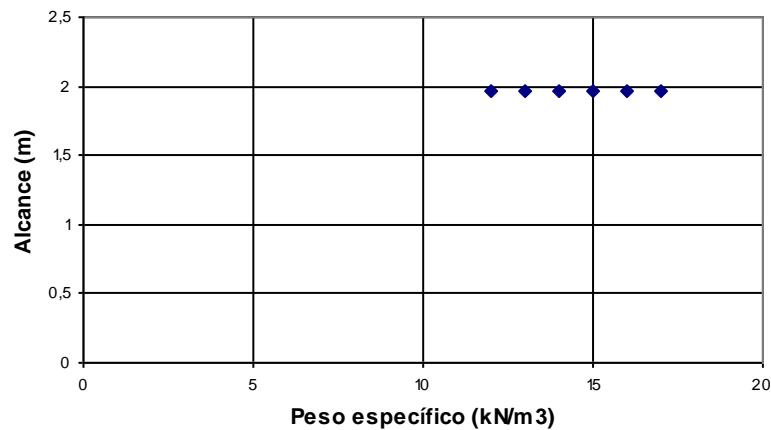


FIGURA 4.7- Variação do alcance com o peso específico no modelo friccional - Talude Ponteio 1

Na FIG. 4.8 apresentam-se os resultados de 84 simulações de alcances para pares de variação de ângulo de atrito de interface e fator r_u . O ponto de encontro entre as curvas e a reta correspondente ao alcance de campo (3,3 m) é o resultado da retroanálise, que se encontra no QUADRO 4.1.

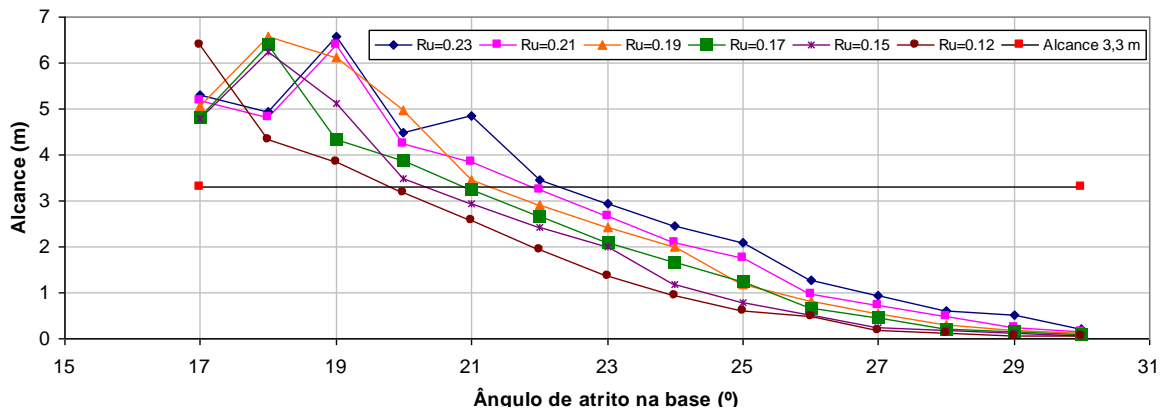


FIGURA 4.8- Alcance x ângulo de atrito da interface no modelo friccional- Talude Ponteio 1

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.8 e dos resultados das retroanálises apresentados no QUADRO 4.1 permite os seguintes comentários:

1- Quanto maior o fator r_u , maior o alcance. Foram observados alguns pontos fora desta tendência, o que pode ter sido causado pela menor precisão do programa para pequenos alcances.

2- Quanto maior o ângulo de atrito da interface menor o alcance.

3- Para fator r_u entre 0,12 e 0,23 os ângulos de atrito de interface retroanalizados pelo programa DAN-W estão entre 19,8° e 22,3°. Os ângulos de atrito retroanalizados estão coerentes com a faixa entre 17° e 30°, porém, não foi encontrado na literatura técnica o ângulo de atrito da superfície de ruptura.

QUADRO 4-1- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Ponteio

Fator r_u	Ângulo de atrito da interface
0.12	19.8
0.15	20.4
0.17	20.9
0.19	21.3
0.21	21.9
0.23	22.3

Modelo reológico plástico

O parâmetro reológico a ser obtidos pela retroanálise é a constante de cisalhamento ou resistência não-drenada do material. A faixa de variação dos valores desse parâmetro, bem como do peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: análise realizada com 13 kN/m³, 15 kN/m³ e 17 kN/m³, pois a variação do peso específico influencia o alcance para este modelo.
- Resistência não-drenada: entre 1 e 5 kPa, obtida por tentativa e erro, de forma a aproximar o alcance simulado com o observado em campo.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 29°

A análise das simulações, que estão apresentadas na FIG. 4.9, permite as observações a seguir.

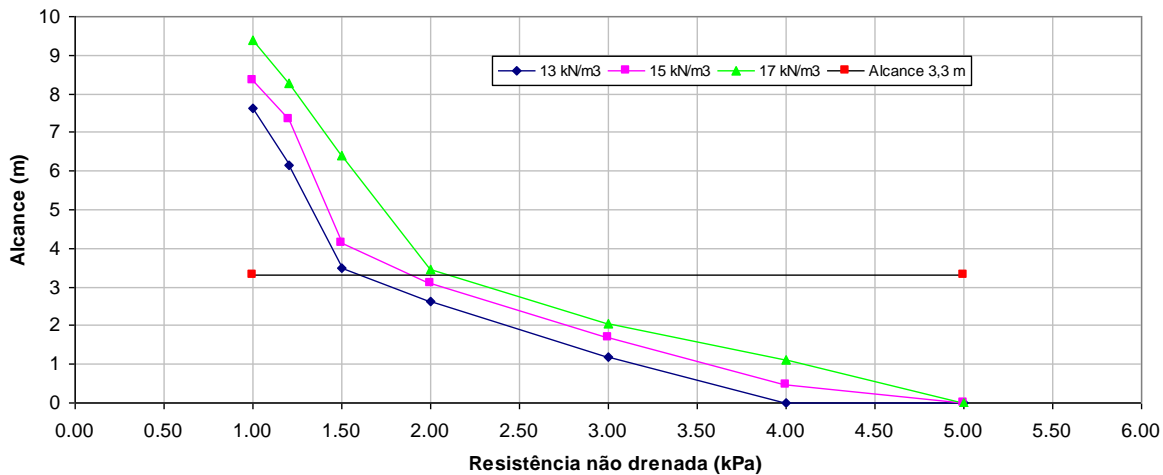


FIGURA 4.9- Alcance x Resistência não-drenada no modelo plástico- Talude Ponteio 1

1- O resultado da retroanálise da resistência não drenada para alcance de 3,3m é 1,6 kPa para peso específico de 13 kN/m³; 1,9 kPa para 15 kN/m³; e 2,1 kPa para 17 kN³.

2- Quanto maior a resistência não-drenada menor o alcance.

3- Observa-se que uma pequena variação da resistência não-drenada influencia o alcance: para peso específico de 13 kN/m³, o aumento da resistência não drenada de 1 kPa para 2 kPa diminui o alcance de 7,5 m para 2,5 m, o que é bastante significativo para rupturas de pequeno alcance como o caso do Talude Ponteio.

Modelo reológico Bingham

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são a tensão de escoamento e a viscosidade de Bingham. A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 17 kN/m³, pois sua variação não influencia o alcance.
- Tensão de escoamento: análises com tensões de escoamento de 0,5 e 1 kPa.
- Viscosidade de Bingham: entre 0 e 20 kPa.s.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 29°.

Os valores da tensão de escoamento e viscosidade foram obtidos por tentativa e erro, de maneira a aproximar o alcance obtido ao alcance de campo.

A análise das simulações, apresentadas na FIG. 4.10, permite as seguintes observações:

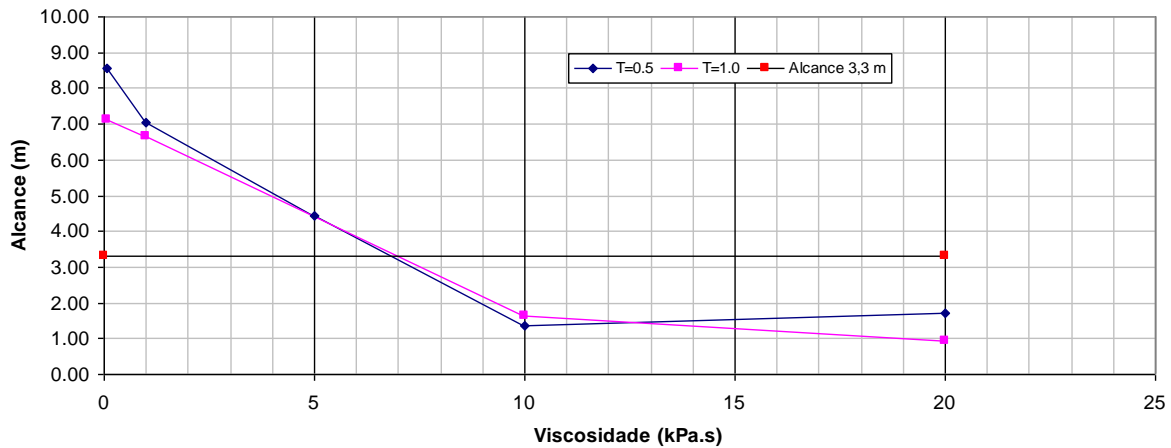


FIGURA 4.10- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham – Talude Ponteio 1

1- Resultado da retroanálise para tensão de escoamento $T = 0.5$ kPa é $6,8$ kPa.s e para $T = 1.0$ kPa, viscosidade de 7.0 kPa.s.

2- Para viscosidades de até 10 kPa.s observa-se que a relação entre alcance e viscosidade é inversamente proporcional. Após 10 kPa.s o alcance é praticamente constante.

Modelo reológico Coulomb-Viscoso

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são a viscosidade de Bingham, o fator r_u e o ângulo de atrito da superfície de ruptura. A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 17 kN/m^3 , pois sua variação não influencia o alcance.
- Viscosidade de Bingham: este parâmetro foi fixado em 0.05 kPa.s, valor determinado por tentativa e erro, de maneira a aproximar o alcance obtido ao alcance de campo.
- O fator r_u variando entre $0,12$ e 0.23 .
- O ângulo de atrito na base da corrida variando entre 17° e 31° . Limite inferior definido como o ângulo de atrito do filito (17°) e limite superior como o ângulo de atrito do tálus (31°).

A análise das simulações, apresentadas na FIG. 4.11, permite as observações a seguir.

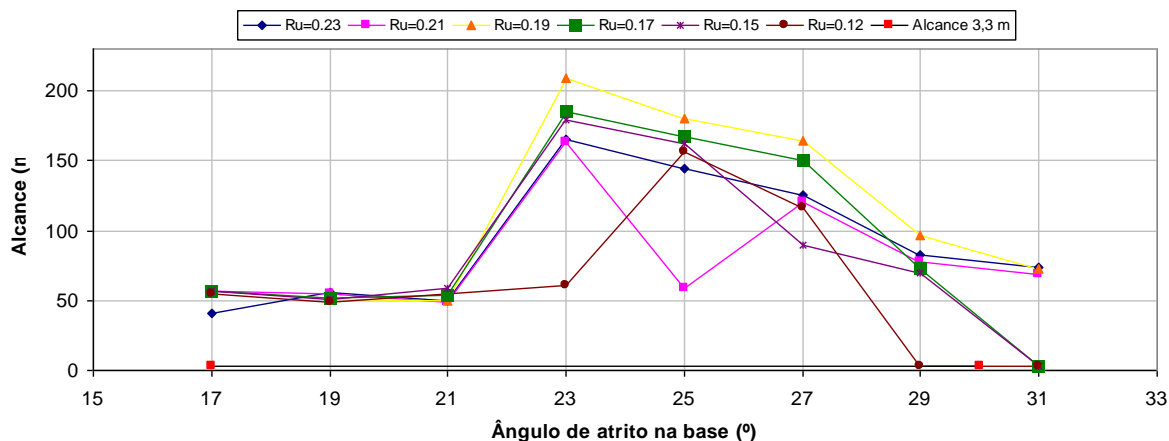


FIGURA 4.11- Alcance x ângulo de atrito no modelo Coulomb-Viscoso – Talude Ponteio 1

1- Não foi possível um comportamento lógico e definido. As curvas de simulações não interceptaram a curva de alcance de campo. Resultado não foi satisfatório.

4.1.4 Previsão de alcance Ponteio 2

Modelo reológico friccional

Para o perfil longitudinal do Talude Ponteio 2, com os parâmetros reológicos obtidos para o Talude Ponteio 1, obteve-se um alcance da corrida de detritos com média de 17,7m conforme QUADRO 4.2. Este resultado é 5,4 vezes maior que o alcance observado em campo, de 3,3m. Portanto, esta simulação indica que a solução de tela metálica e bioengenharia adotada em 2003 não conseguiu evitar a ruptura do tálus, porém, minimizou os danos quando diminuiu o alcance da corrida para aproximadamente 1/5 (um quinto) do alcance previsto pelo DAN-W.

QUADRO 4-2- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Ponteio 2

Fator ru	Ângulo de atrito da interface	Alcance a partir do ponto C (FIG.4.5)	Alcance a partir do ponto B (FIG. 4.5)
0.12	19.8	51,44	17,64
0.15	20.4	51,56	17,76
0.17	20.9	51,42	17,62
0.19	21.3	51,60	17,80
0.21	21.9	51,32	17,52
0.23	22.3	51,61	17,81

4.2 Talude Planetóides

4.2.1 Histórico e descrição da área

A localização do Talude Planetóides, bem como sua litologia estão descritos no item 2.3. Parizzi (2004) faz um histórico do talude desde a abertura da BR 356, localizada no topo do talude até o ano de 2003. Na FIG. 4.12 pode-se verificar a posição do Talude em relação à BR 356, e na FIG. 4.13 apresenta-se o detalhe da cicatriz de ruptura no topo deste talude.



FIGURA 4.12- Talude Planetóides abaixo da BR 356. Cicatrizes de ruptura no topo e na base (Fevereiro/2010).

A partir de análise de foto aérea de 1953, Parizzi (2004) observou que material de corte de filito já era lançado no talude Planetóides. Este material gerou um depósito de tálus, que vem sofrendo movimentações sucessivas, como corrida de detritos, a cada período chuvoso. O material proveniente da ruptura interrompe parcialmente ou totalmente o trânsito da Rua Planetóides, gerando transtornos para a população vizinha. Para minimizar os impactos para essa população, máquinas fazem a limpeza do material e executam cortes quase verticais na base do talude, o que a princípio soluciona o problema do trânsito, mas torna o talude mais susceptível à ruptura no próximo período chuvoso. Outros fatores que aumentam a suscetibilidade do talude a rupturas é a forma côncava do mesmo, que favorece a concentração de águas pluviais (Parizzi, 2004). Na FIG. 4.14 observa-se o corte executado na base do talude.

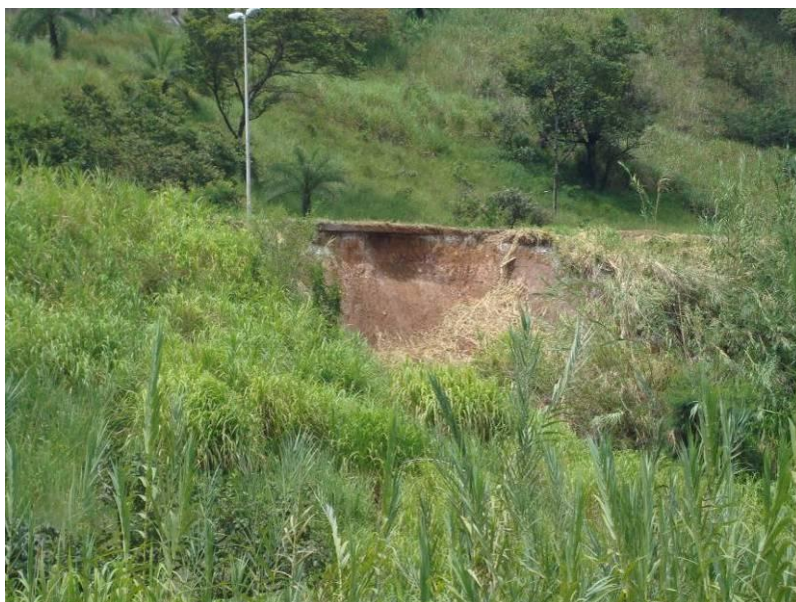


FIGURA 4.13- Detalhe da cicatriz no topo do Talude Planetóides (Fevereiro/2010).



FIGURA 4.14- Corte na base do talude Planetóides (Março/2010).

4.2.2 Topografia

O talude Planetóides tem inclinação média de 30° e altura de 40m. Parizzi (2004), por meio de investigação geofísica, identificou algumas superfícies de rupturas superficiais e outras próximas à interface do talus com o filito, a cerca de 3m de profundidade. A planta topográfica está apresentada na FIG. 4.15 e o perfil longitudinal com a indicação de duas superfícies de ruptura na FIG. 4.16. Estes dados topográficos foram utilizados nas retroanálises pelo programa DAN-W.

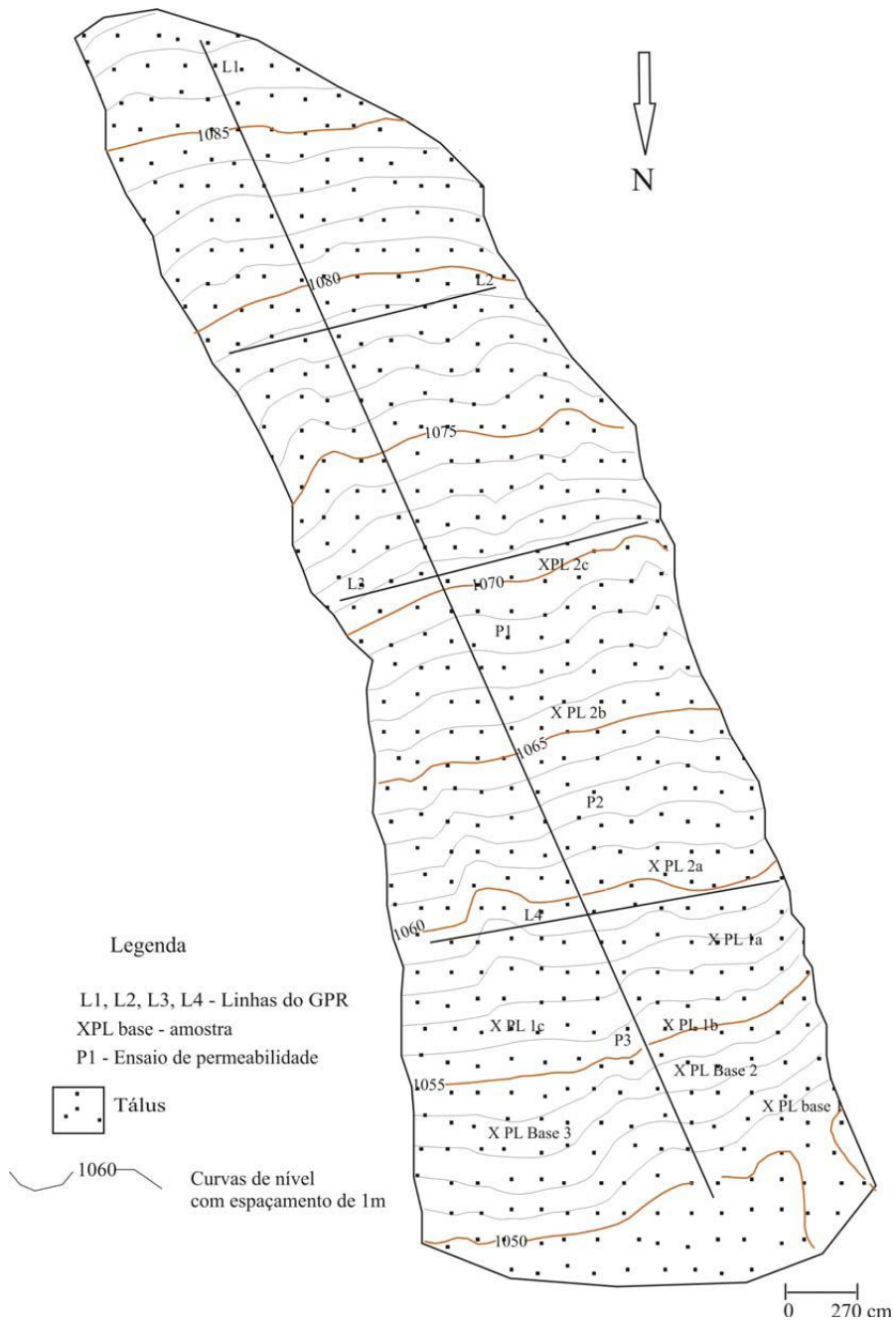


FIGURA 4.15 – Planta topográfica Talude Planetóides (Parizzi, 2004)

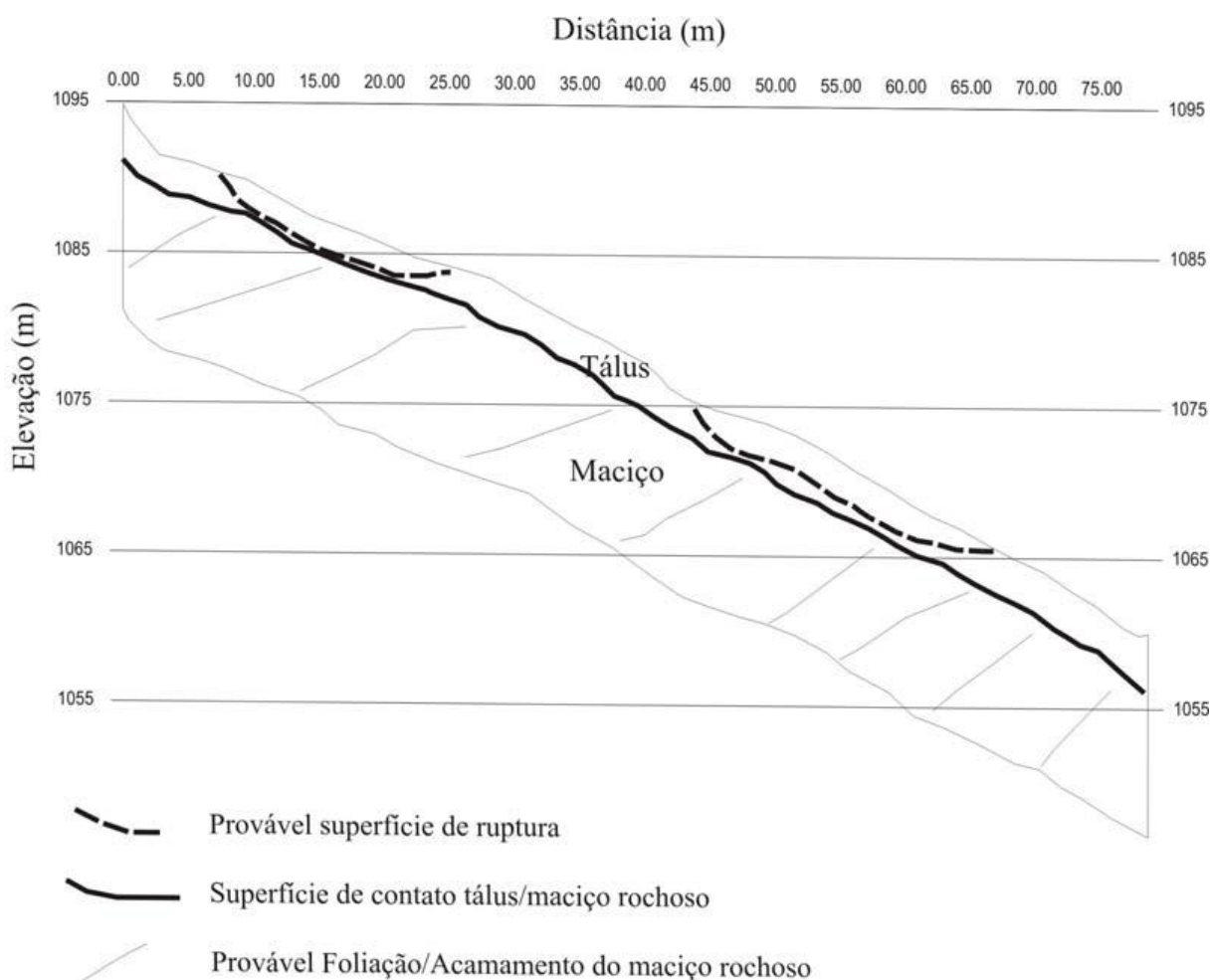


FIGURA 4.16- Perfil longitudinal Talude Planetóides (Parizzi, 2004)

4.2.3 Retroanálises

Foram realizadas retroanálises considerando os modelos Friccional, Bingham e Plástico. O modelo Newtoniano apresentou problemas de convergência. O modelo Coulomb-Viscoso não foi satisfatório, apresentando resultados de alcance acima de 200 m para várias combinações de ângulo de atrito e viscosidade.

Os parâmetros de resistência, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, e peso específico do tálus, foram obtidos por Parizzi (2004):

- Ângulo de atrito do tálus: 28 a 30°
- Ângulo de atrito do filito: 17° (adotado como o mesmo que Talude Ponteio)
- Coesão do tálus: 0 a 10 kPa
- Coesão do filito: 15 kPa (adotado como o mesmo que Talude Ponteio)
- Peso específico: 18 kN/m³
- Retroanálise para superfície de ruptura de 2,5m: coesão 2 kPa, ângulo de atrito de 28°, e fator r_u de 0,12 a 0,23

A partir destes parâmetros de resistência foram feitas as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN-W. O alcance de campo, que para o talude Planetóides foi de 7,7m, também foi utilizado nas retroanálises.

Modelo reológico friccional

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito da interface entre o tálus e o filito e o fator r_u . A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: O peso específico foi fixado em seu valor superior de 18 kN/m^3 . A variação do peso específico não influencia o alcance.
- O fator r_u variando entre 0,12 e 0,23 conforme Parizzi (2004).
- O ângulo de atrito de interface variando entre 17° e 30° . Limite inferior definido como o ângulo de atrito do filito, e limite superior ao ângulo de atrito do tálus.
- O ângulo de atrito interno do tálus foi fixado em 30° .

Apresenta-se na FIG. 4.17 as simulações de alcances para pares de variação de ângulo de atrito de interface e fator r_u , bem como reta com o alcance de campo.

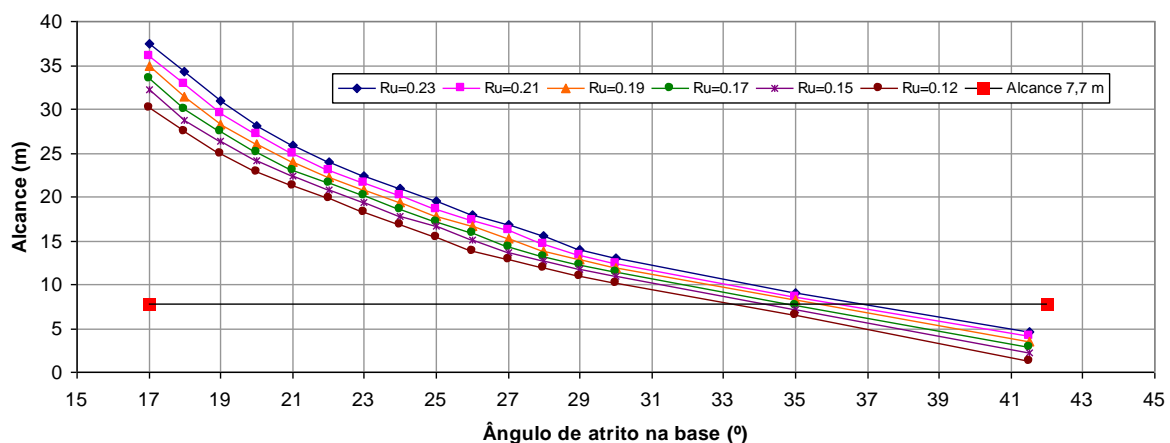


FIGURA 4.17- Alcance x ângulo de atrito de interface para diferentes fatores r_u , no modelo friccional – Talude Planetóides

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.17 permite os seguintes comentários:

- 1- O resultado da retroanálise encontra-se no QUADRO 4.3.

QUADRO 4-3- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Planetóides

r_u	Ângulo de atrito da interface
0.12	33.5°
0.15	34 °
0.17	35°
0.19	35.5°
0.21	36°
0.23	36.9°

2- Observa-se que quanto maior o ângulo de atrito menor o alcance, e quanto maior o fator r_u maior o alcance.

Modelo reológico plástico

O parâmetro reológico a ser obtido pela retroanálise é a constante de cisalhamento ou resistência não-drenada do material. A faixa de variação dos valores desse parâmetro, bem como do peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: análise realizada com 15 kN/m^3 e 19 kN/m^3 , pois, a variação do peso específico influencia o alcance para este modelo.
- Resistência não-drenada: de 2 a 16 kPa, pelo método de tentativa e erro.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 30° .

Na FIG. 4.18 apresenta-se as simulações de alcances para diferentes resistências.

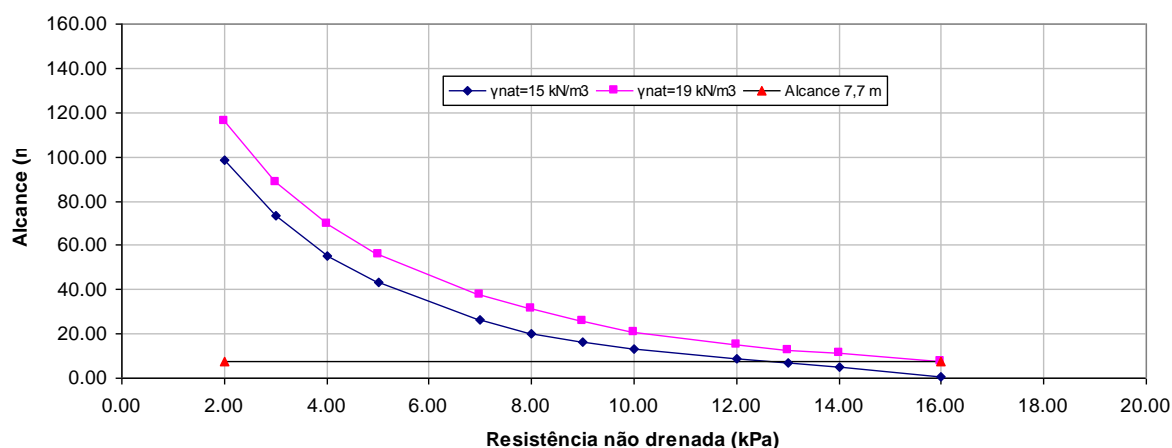


FIGURA 4.18- Alcance x Resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Planetóides

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.18 permite as seguintes observações:

1- Os valores da resistência não-drenada retroanalisados para alcance de 7,7m são 13 kPa para peso específico de 15 kN/m^3 e 16 kPa para peso específico de 19 kN/m^3 .

2- A variação do peso específico influencia o valor do alcance, para a mesma resistência não-drenada. Para resistência não-drenada de 14 kPa, os valores do alcance são 4,85m e 11,01m respectivamente para os pesos específicos naturais de 15 e 19 kN/m^3 .

Modelo reológico Bingham

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são a tensão de escoamento e a viscosidade de Bingham. A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 18 kN/m^3 , pois, sua variação não influencia o alcance.
- Tensão de escoamento: análises com tensões de escoamento de 5, 8 e 10 kPa.
- Viscosidade de Bingham variando entre 0,05 e 10 kPa.s.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 30° .

Na FIG. 4.19 apresentam-se as simulações de alcances para diferentes resistências.

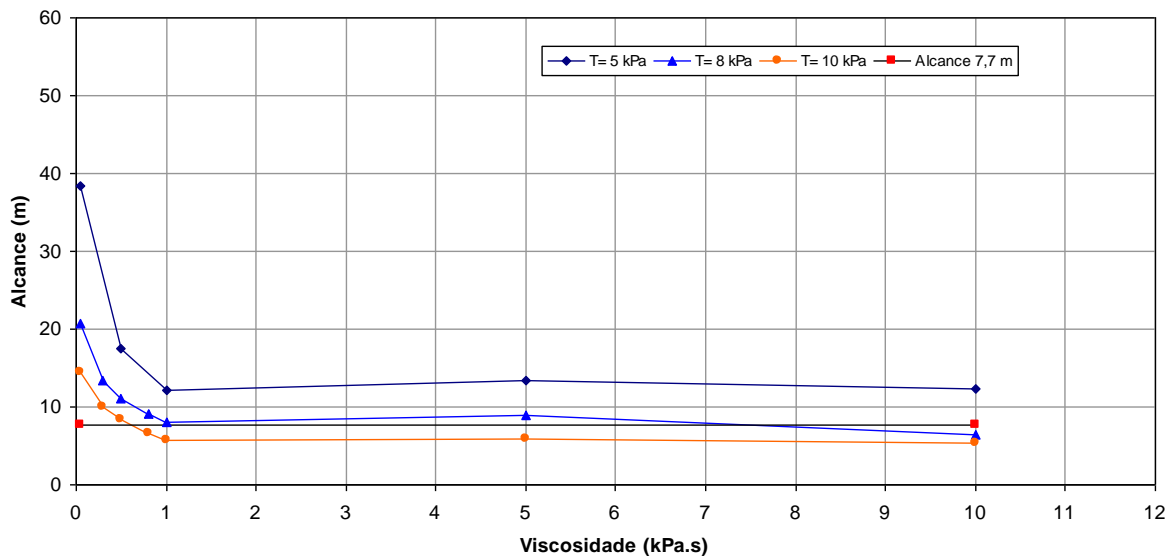


FIGURA 4.19- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham - Talude Planetóides

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.19 permite as seguintes observações:

1- Somente as curvas de alcances para tensão de escoamento de 8 e 10 kPa interceptaram o alcance de campo. O resultado da retroanálise foi viscosidades de 0,8 kPa.s e 7,3 kPa.s para tensões de escoamento de 10 e 8 kPa.

2- Iniciou-se com tensões da ordem de 0,5 kPa e 2 kPa, porém os alcances foram muito elevados, mesmo para altas viscosidades (ordem de 100 kPa.s).

3- Para o intervalo de viscosidades entre 0 e 1 kPa.s a influencia no alcance é maior que para viscosidades maiores que 1 kPa.s. Para o trecho 0 e 1 kPa.s um pequeno aumento da viscosidade diminui significativamente o alcance, por exemplo, de 0,05 para 0,3 kPa.s o alcance diminui de 20,65m para 13,48m (T=8 kPa). Para viscosidades maiores que 1 kPa.s alcance praticamente constante.

4.3 Talude Taquaril

4.3.1 Histórico e descrição da área

A localização do Talude Taquaril, bem como sua litologia e caracterização geológico-geotécnica encontra-se no item 2.3. Segundo Parizzi (2004), a ocupação do bairro Taquaril foi feita de maneira inadequada, em áreas íngremes e sem infraestrutura básica para receber as moradias. Para agravar a situação do local, os moradores fazem cortes acentuados no filito, descartam o material do corte para áreas abaixo, dando origem a um depósito inconsistente sobre a rocha. As moradias são assentadas a jusante dos cortes em áreas instáveis, com fundações apoiadas nos depósitos inconsistentes provenientes de aterro compactado de filito. Aproximadamente 60% da área do bairro ou vila Taquaril encontra-se em risco alto e iminente em períodos chuvosos. O talude Taquaril possui um tálus amarelado proveniente de filito, tálus avermelhado e aterro, e representa bem os taludes da região. Na FIG. 4.20 observam-se os depósitos existentes no talude.



FIGURA 4.20- Taquaril. a) depósito de tálus amarelado, b) tálus avermelhado, c) aterro. (Parizzi, 2004)

4.3.2 Topografia

A topografia do talude conforme FIG. 4.21, e o perfil longitudinal com as superfícies de ruptura conforme FIG. 4.22 foram obtidos em Parizzi (2004). Estes dados foram utilizados para as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN-W.

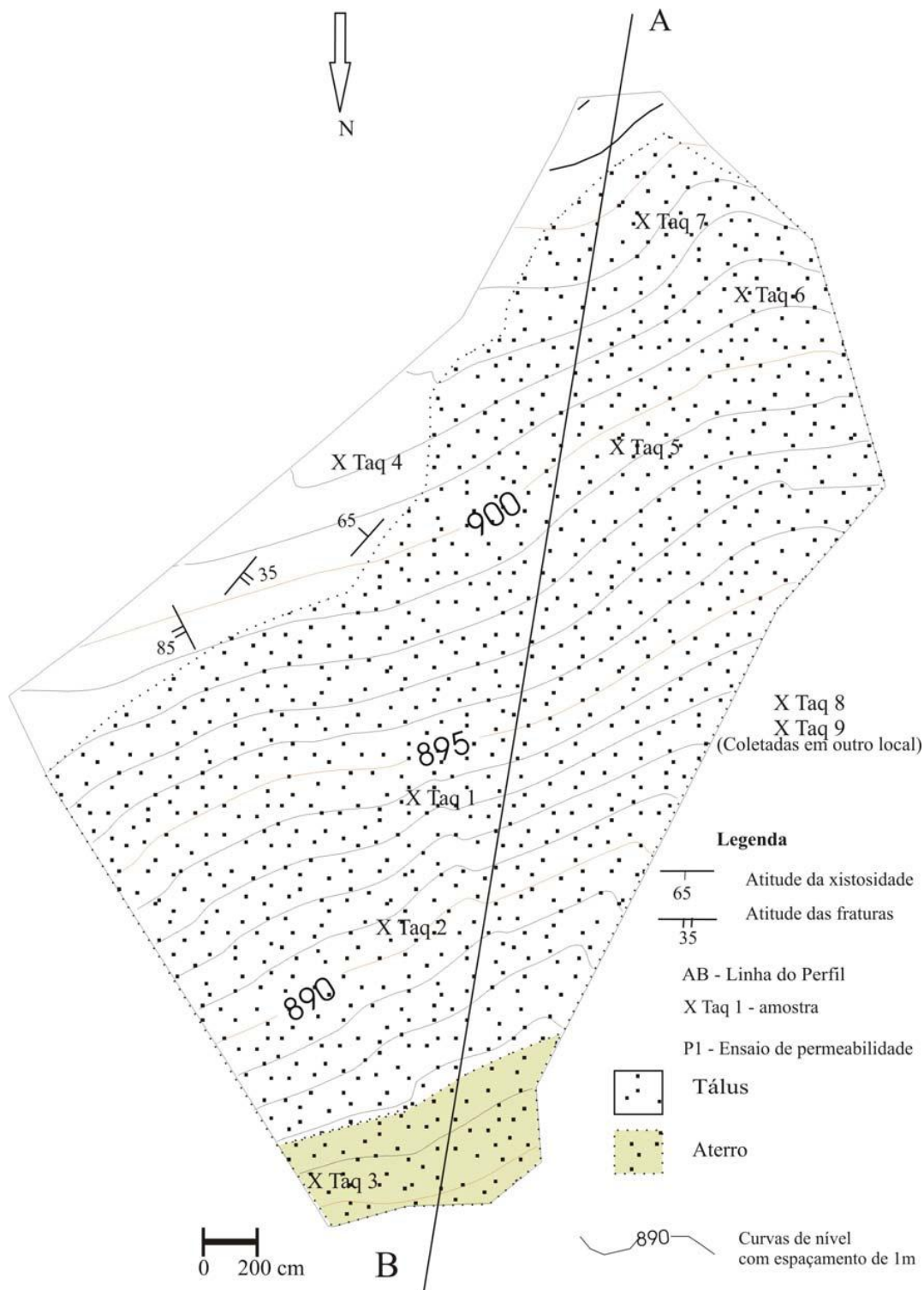


FIGURA 4.21- Planta topográfica Talude Taquaril (Parizzi, 2004)

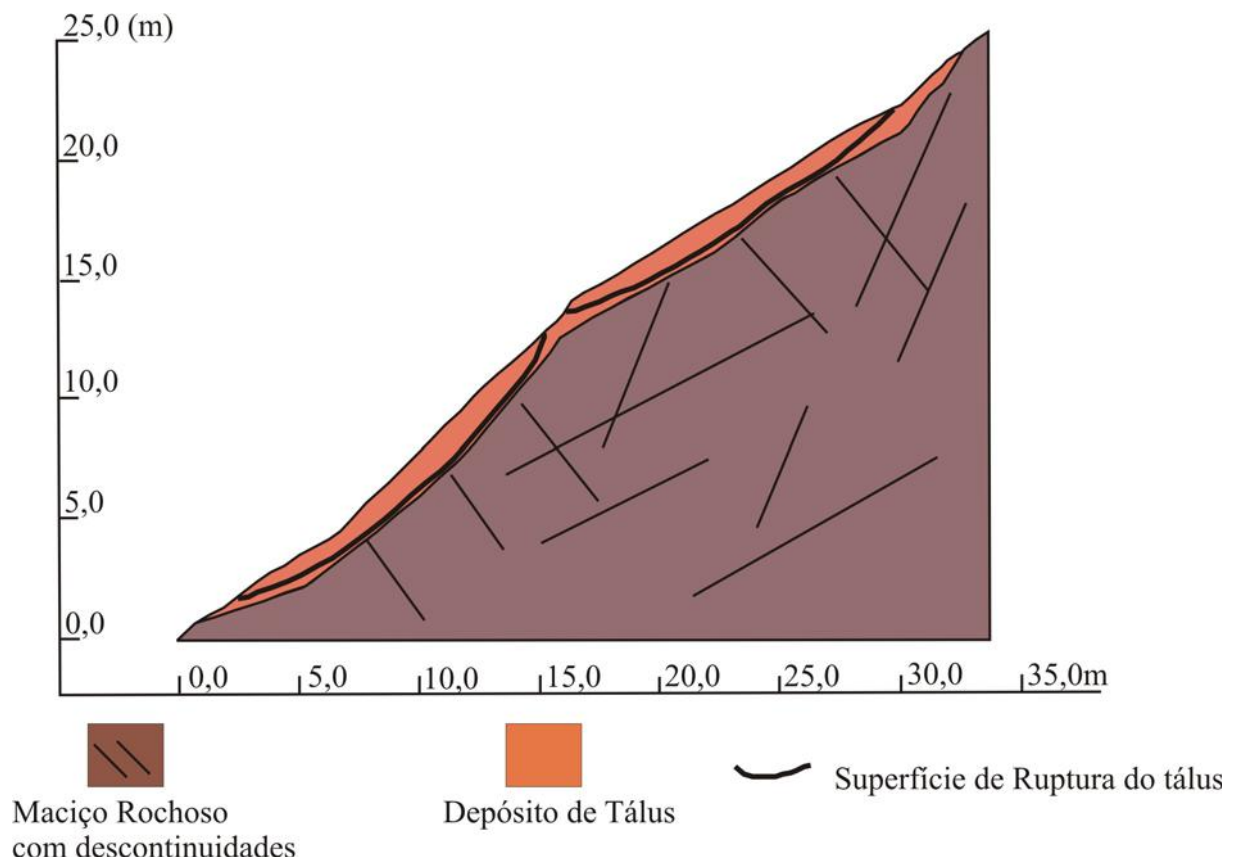


FIGURA 4.22- Perfil longitudinal Talude Taquaril (Parizzi, 2004)

4.3.3 Retroanálises

Foram realizadas retroanálises considerando os modelos Friccional, Plástico, Bingham e Coulomb-viscoso. O modelo Newtoniano não convergiu. Os parâmetros de resistência, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, e peso específico são dados de Parizzi (2004):

- Ângulo de atrito do tálus: 33 a 34°
- Ângulo de atrito do filito: 16°.
- Coesão do tálus: 0 a 6 kPa.
- Coesão do filito: 24 kPa.
- Peso específico: 15 kN/m³.
- Fator r_u : 0,3 a 0,47.

Parizzi (2004), por meio de retroanálises para a condição de equilíbrio limite, obteve valores para a coesão de 4 kPa e ângulo de atrito de interface entre 33° e 34° para profundidade de superfície de ruptura de 1,5m.

A partir destes parâmetros de resistência foram realizadas as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN-W. O alcance de campo, que para o talude Taquaril foi de aproximadamente 12m, também foi utilizado nas retroanálises.

Modelo reológico friccional

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito da superfície de ruptura e o fator r_u . A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: O peso específico foi fixado em 15 kN/m^3 .
- O fator r_u variando entre 0,25 e 0,50, próximos aos retroanalizados por Parizzi (2004) que foram 0,3 e 0,47.
- O ângulo de atrito da superfície de ruptura variando entre 20° e 44° . Limite inferior definido como um pouco superior ao ângulo de atrito do filito (16°), pois, com 16° o alcance simulado foi muito superior ao observado em campo. Limite superior acima do ângulo de atrito do depósito superficial, que no caso é 34° .
- O ângulo de atrito do tálus foi fixado em 34° .

Na FIG. 4.23 apresenta-se simulações de alcances para pares de variação de ângulo de atrito de interface e fator r_u .

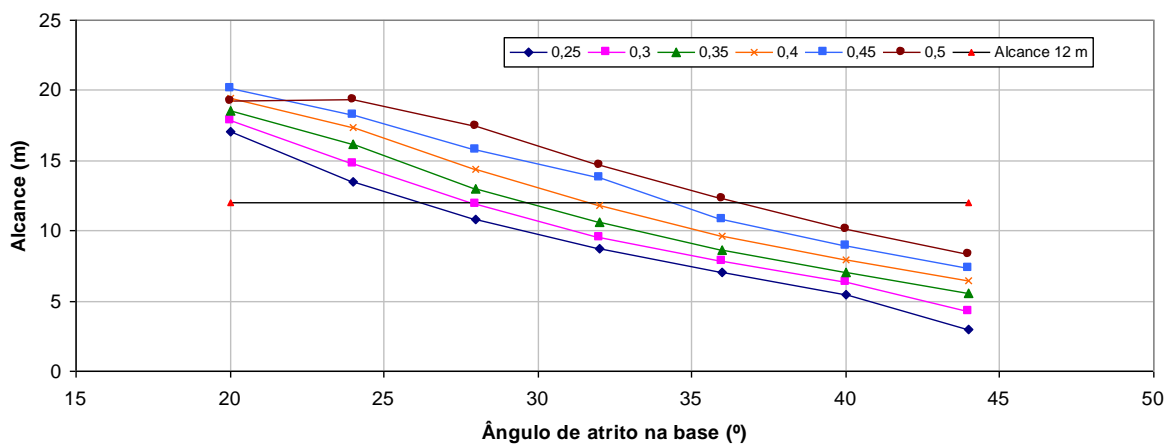


FIGURA 4.23- Alcance x ângulo de atrito de interface para diferentes r_u , modelo friccional- Talude Taquaril

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.23 permite os seguintes comentários:

- 1- O resultado da retroanálise para alcance de 12 m está apresentado no QUADRO 4.4.

QUADRO 4-4- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Taquaril

r_u	Ângulo de atrito da interface
0.25	26°
0.3	28°
0.35	29.8°
0.4	31.9°
0.45	34.5°
0.5	36.5°

Observa-se que para fator r_u de 0,45 o resultado da retroanálise foi ângulo de atrito de 34,5°, coerente com o resultado de Parizzi (2004) que foi entre 33 e 34°.

2- Quanto maior o ângulo de atrito menor o alcance. Para o mesmo ângulo de atrito 34°, aumentando o r_u de 0,25 a 0,5, o alcance aumenta de 8 m para 13 m (62%).

Modelo reológico plástico

O parâmetro reológico a ser obtido pela retroanálise é a constante de cisalhamento ou resistência não-drenada do material. A faixa de variação dos valores desse parâmetro, bem como do peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: análise realizada com 15 kN/m³ e 19 kN/m³, pois a variação do peso específico influencia o alcance para este modelo.
- Resistência não-drenada: de 2 a 12 kPa (obtida por tentativa e erro buscando aproximar o alcance simulado do alcance de campo).
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 34°

Na FIG. 4.24 apresentam-se simulações de alcances para diferentes resistências.

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.24 permite as seguintes observações:

- 1- Os valores da resistência não-drenada retroanalizados para alcance de 12m estão entre 8,5 e 10,8 kPa, para pesos específicos naturais de 15 a 19 kN/m³.
- 2- A variação do peso específico influencia o valor do alcance, para a mesma resistência não-drenada. Para resistência não-drenada de 10 kPa, os valores do alcance são 4,8m e 15m respectivamente para os pesos específicos naturais de 15 e 19 kN/m³.
- 3- Quanto maior a resistência não-drenada menor o alcance.

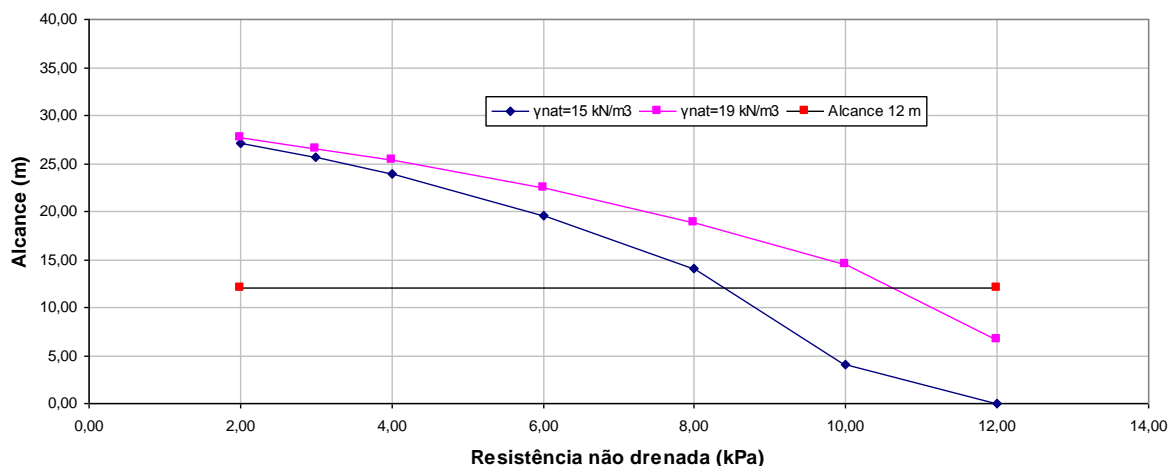


FIGURA 4.24- Alcance x resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Taquaril

Modelo reológico Bingham

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são a tensão de escoamento e a viscosidade de Bingham. A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 15 kN/m^3 , pois sua variação não influencia o alcance.
- Tensão de escoamento: análises com tensões de escoamento de 2, 5, e 7 kPa. Iniciou-se com tensões da ordem de 0,5 kPa, porém o comportamento pós-ruptura foi irreal, com o material em movimento de subida e descida no talude posterior ao estudado. Portanto, a tensão de escoamento mínima adotada foi 2 kPa. Tensões de escoamento da ordem de 10 kPa (aproximadamente a resistência ao cisalhamento sem coesão estimada em 10,62 kPa) apresentaram resultados de alcance mais altos que de campo, portanto o limite superior da tensão de escoamento foi definido como 7 kPa.
- Viscosidade de Bingham: este parâmetro retroanalísado variou entre 0.05 e 100 kPa.s.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 34° .

Na FIG. 4.25 apresenta-se as simulações de alcances para diferentes resistências.

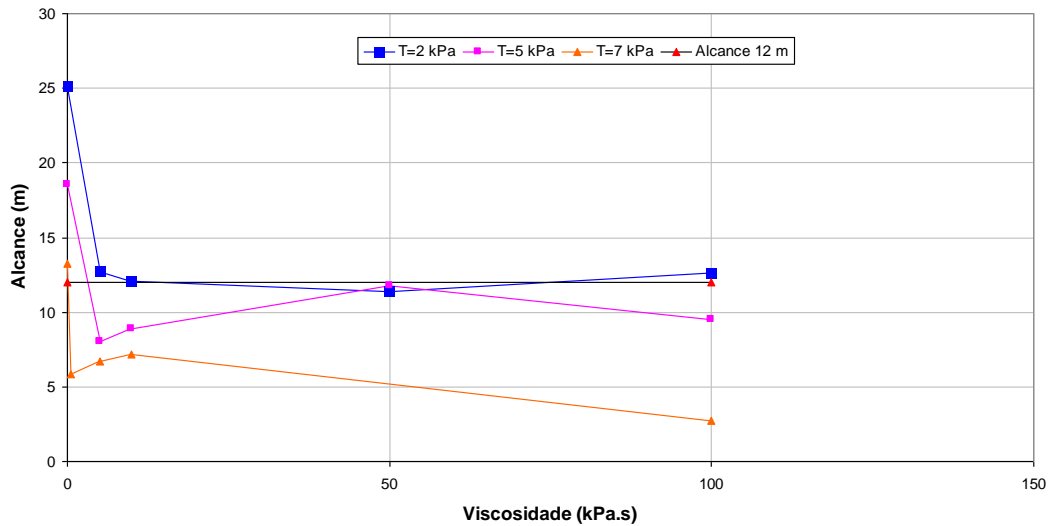


FIGURA 4.25- Alcance x viscosidade no modelo de Bingham - Talude Taquaril

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.25 permite as seguintes observações:

1- O resultado da retroanálise está apresentado no QUADRO 4.5.

QUADRO 4-5- Resultado da retroanálise no modelo Bingham – Talude Taquaril

T	Viscosidade (kPa.s)
2	15
5	3
7	0.05

2- O modelo apresentou-se muito sensível a pequenas alterações na tensão de escoamento: para tensão de 5 kPa viscosidade correspondente ao alcance de 12 m (campo) de 3 kPa.s; e para tensão de 7 Kpa, viscosidade correspondente ao alcance de campo de 0.05 kPa.s.

3- Para viscosidades abaixo de 10 kPa, observou-se a relação alcance versus viscosidade inversamente proporcional. Para viscosidades acima de 10 kPa.s, observou-se uma tendência à valores constantes do alcance.

Modelo reológico Coulomb-Viscoso

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito da superfície de ruptura, o fator r_u , e a viscosidade de Bingham. A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 15 kN/m^3 , pois sua variação não influencia o alcance.
- Viscosidade de Bingham: este parâmetro retroanalísado foi fixado em 3200 kPa.s, por ser a viscosidade retroanalísada no modelo newtoniano.

- O fator r_u varia entre 0,25 e 0,45, próximos aos retroanalizados por Parizzi (2004) que foram 0,3 e 0,47.
- O ângulo de atrito de interface varia entre 20° e 44° . Limite inferior definido como um pouco superior ao ângulo de atrito do filito (16°), pois, com este ângulo de atrito o alcance simulado foi muito superior ao observado em campo e limite superior o ângulo de atrito do tálus.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 34° .

Na FIG. 4.26 apresenta-se gráfico com as simulações de alcances para diferentes valores do fator r_u .

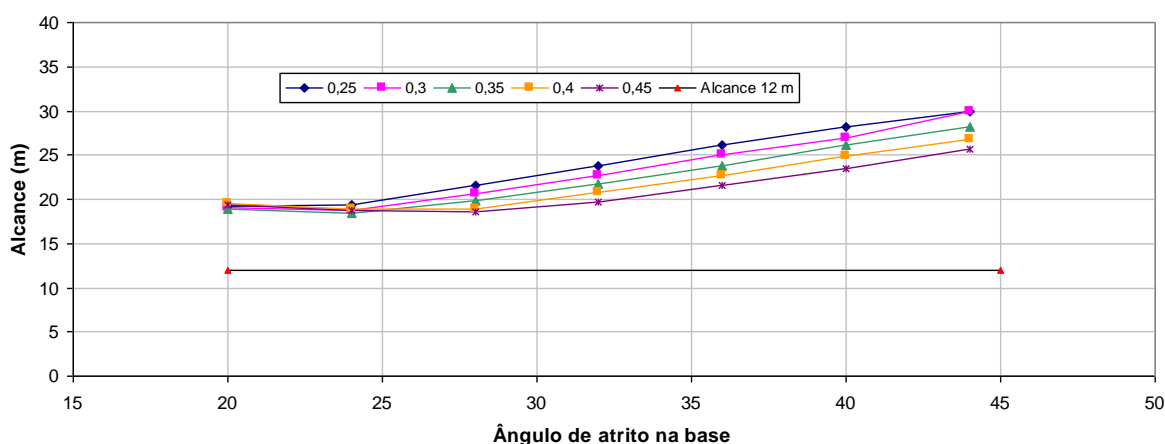


FIGURA 4.26- Alcance x ângulo de atrito na base no modelo Coulomb-Viscoso - Talude Taquaril

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.26 permite as seguintes observações:

- 1- Quanto maior o ângulo de atrito na base, maior o alcance. Este comportamento é incompatível com o observado em campo e com a teoria de Mohr-Coulomb adotada pelo modelo, pois, quanto maior a resistência na base, o alcance da ruptura deveria ser menor. Este resultado foi considerado não satisfatório.
- 2- Não foram obtidos parâmetros retroanalizados, pois, a reta do alcance de campo não teve ponto comum com a curva de alcances obtida pelo programa DAN-W.

4.4 Talude Engenho Nogueira

4.4.1 Histórico e descrição da área

A localização do Talude Engenho Nogueira, sua litologia e caracterização geológico-geotécnica encontra-se no item 2.3. Segundo Parizzi (2004) o Talude Engenho Nogueira representa

bem os taludes sujeitos a ruptura da região do Complexo Belo Horizonte, com feições erosivas que progridem para escorregamentos sucessivos, colocando em risco as moradias à montante e jusante. Cortes nestes taludes típicos, principalmente expondo o Horizonte C, mais erodível, tornam o talude mais susceptível a escorregamentos circulares de maior porte, fato observado no talude Engenho Nogueira, especificamente no Compartimento 1, Ravina 1, que será estudado neste trabalho. Na FIG. 4.27 apresenta-se uma vista geral do talude em 2003, com a identificação da Ravina 1, 2 e 3.



FIGURA 4.27- Vista geral das ravinas do Talude Engenho Nogueira em 2003 (Parizzi, 2004)

4.4.2 Topografia

A topografia do talude conforme FIG. 4.28, e o perfil longitudinal com as superfícies de ruptura e horizontes de solo conforme FIG. 4.29 foram obtidos em Parizzi (2004). Estes dados foram utilizados para as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN-W. Somente foram retroanalizados pelo programa DAN-W o perfil longitudinal AB da Ravina 1, Compartimento 1.

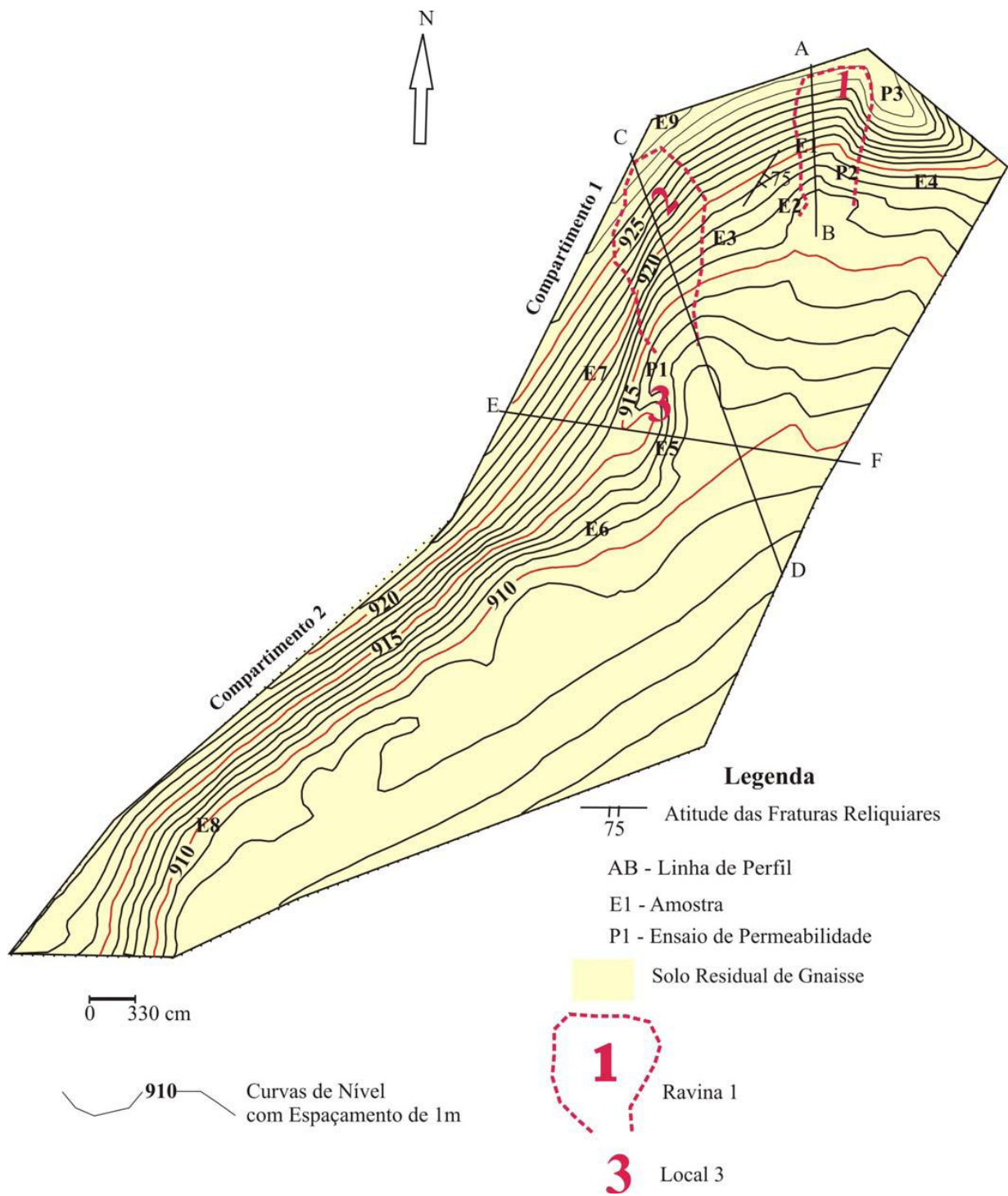


FIGURA 4.28- Planta topográfica do Talude Engenho Nogueira em 2002 (Parizzi, 2004)

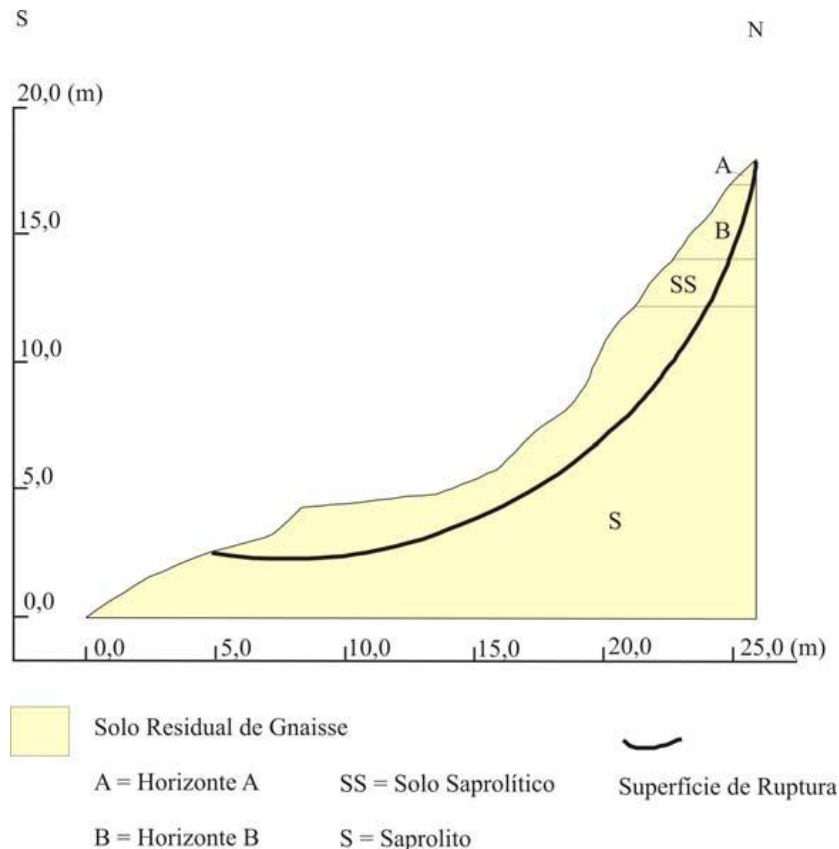


FIGURA 4.29- Perfil AB da Ravina 1, com horizontes de solo e superfície de ruptura de 2003 (Parizzi, 2004)

4.4.3 Retroanálises

Foram realizadas retroanálises dos parâmetros reológicos considerando os modelos Friccional e plástico. Os modelos Newtoniano, Bingham e Coulomb-Viscoso não convergiram ou tiveram resultados não-satisfatórios combinados com não convergência. Os parâmetros de resistência, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto e retroanálises, e peso específico para os materiais do Talude Engenho Nogueira são dados de Parizzi (2004), para a região da Ravina 1:

- Ângulo de atrito do Horizonte A: 25°
- Coesão do Horizonte A: 22 kPa.
- Ângulo de atrito do Horizonte B: 31°.
- Coesão do Horizonte B: 20 kPa
- Ângulo de atrito do Horizonte C: 32°
- Coesão do Horizonte C: 10 kPa.
- Ângulo de atrito do saprolito: 33°.
- Coesão do saprolito: 0 kPa.
- Peso específico: 12 a 14 kN/m³.
- Fator r_u : 0,15.

A partir destes parâmetros de resistência foram feitas as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN. O alcance de campo, que para o talude Engenho Nogueira foi de 12m, também foi utilizado nas retroanálises.

Modelo reológico friccional

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito na superfície de ruptura e o fator r_u . A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: o peso específico foi fixado em 14 kN/m^3 .
- O fator r_u varia entre 0,11 e 0,19: limites estipulados pelo fator r_u obtido nas retroanálises de Parizzi (2004), que foi 0,15, mais ou menos 0,04.
- O ângulo de atrito dos horizontes A, B, C e saprolito foram os obtidos por Parizzi (2004), com uma variação de $+ 6^\circ$ para o limite superior, e $- 6^\circ$ para o limite inferior, conforme QUADRO 4.6.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 33° .

QUADRO 4-6- Limites de ângulo de atrito definidos para a retroanálise do Talude Engenho Nogueira

Varição	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_C	ϕ_S
-6	19	25	26	27
-5	20	26	27	28
-2	23	29	30	31
0 (Parizzi,2004)	25	31	32	33
2	27	33	34	35
4	29	35	36	37
6	31	37	38	39

Nota: ϕ_A é o ângulo de atrito do Horizonte A, ϕ_B do horizonte B, ϕ_C do horizonte C ou solo saprolítico, e ϕ_S do saprolito.

Na FIG. 4.30 apresenta-se gráfico com simulações de alcances para pares de variação de ângulo de atrito de interface e fator r_u

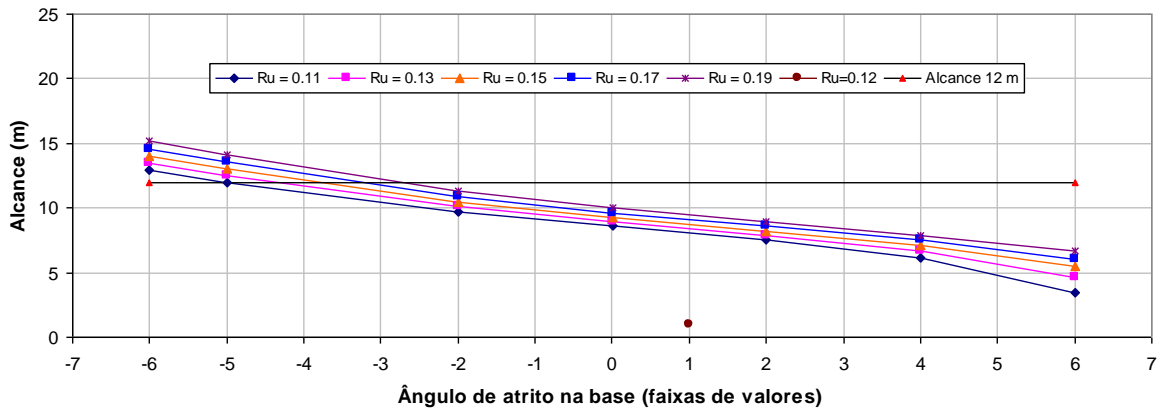


FIGURA 4.30- Alcance x ângulo de atrito para diferentes fatores r_u , no modelo friccional – Talude Eng. Nogueira

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.30 permite os seguintes comentários:

1- Resultado da retroanálise para alcance de campo de 12 m está apresentado no QUADRO 4.7.

QUADRO 4-7- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Engenho Nogueira

r_u	Ângulo de atrito da interface			
	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_C	ϕ_S
0,11	20	26	27	28
0,13	20,5	26,5	27,5	28,5
0,15	21,2	27,2	28,2	29,2
0,17	21,8	27,8	28,8	29,8
0,19	22,3	28,3	29,3	30,3

2- Para os valores dos ângulos de atrito obtidos nas retroanálises de Parizzi (2004), faixa de valores “0” no QUADRO 4.6, o alcance obtido pelo programa DAN está entre 8 e 10 m. Não coincidente com o observado em campo (12 m), mas, bem próximo.

3- Observa-se que quanto maior o ângulo de atrito menor o alcance, e quanto maior o fator r_u maior o alcance.

Modelo reológico plástico

O parâmetro reológico a ser obtido pela retroanálise é a constante de cisalhamento ou resistência não-drenada do material. A faixa de variação dos valores desse parâmetro, bem como do peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: análise realizada com 14 kN/m^3 e 19 kN/m^3 , pois, a variação do peso específico influencia o alcance para este modelo.
- Resistência não-drenada: de 1 a 13 kPa (obtida por tentativa e erro buscando aproximar o alcance simulado do alcance de campo).

- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 33°.

Na FIG. 4.31 apresenta-se gráfico com as simulações de alcances para diferentes resistências não-drenadas e pesos específicos.

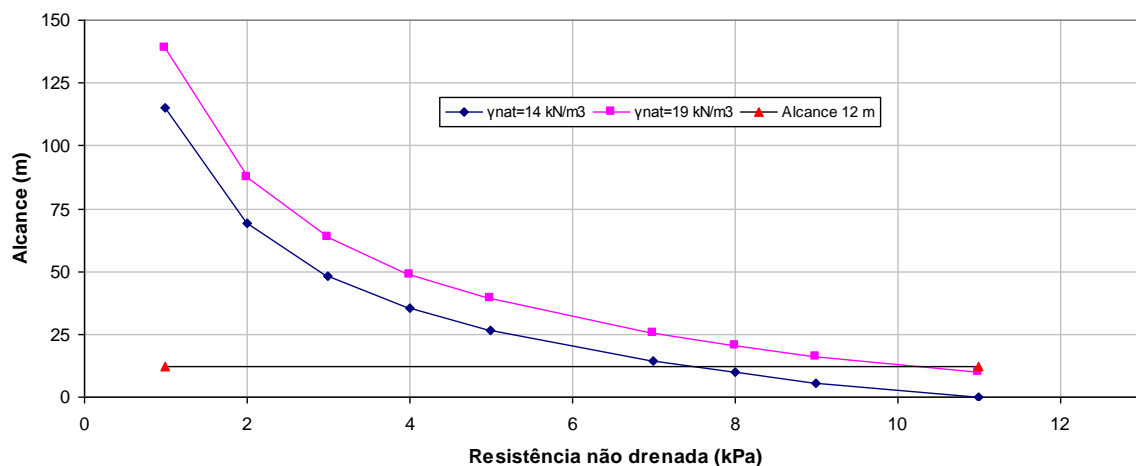


FIGURA 4.31- Alcance x resistência não-drenada no modelo plástico – Talude Engenho Nogueira

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.31 permite as seguintes observações:

- 1- De acordo com o gráfico das simulações realizadas, os valores da resistência não-drenada retroanalisados para alcance de 12m estão entre 7,6 e 10,3 kPa.
- 2- A variação do peso específico entre 14 e 19 kN/m³ influencia o valor do alcance, para a mesma resistência não-drenada. Para resistência não-drenada de 8 kPa, os valores do alcance são 11 e 23 m respectivamente para os pesos específicos naturais de 14 e 19 kN/m³. Valor de alcance para 19 kN/m³ pouco mais que o dobro do valor do alcance para 14 kN/m³.

4.5 Talude Juliana

4.5.1 Histórico e descrição da área

A localização do Talude Juliana, sua litologia e caracterização geológico-geotécnica encontram-se no item 2.3. Este talude sofreu uma corrida de lama na madrugada de 01 de fevereiro de 2008. O alcance desta corrida foi de aproximadamente 40m. O alcance poderia ser maior, mas a massa foi contida por obstáculos (muro de contenção, casa, muro de divisa). Segundo análise de técnicos da URBEL – Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte, a cicatriz de escorregamento era rasa, sugerindo uma ruptura planar a meia encosta. No dia do acidente verificou-se que havia um muro de contenção na base do talude, o qual sofreu ruptura próxima à altura de 1,8m, conforme FIG. 4.32.



FIGURA 4.32- Vista da ruptura do Talude Juliana e muro de 2,8m que serviu de anteparo (Urbel, 2010)

4.5.2 Topografia

A topografia do talude, conforme FIG. 4.33, e o perfil longitudinal com a superfície de ruptura conforme FIG. 4.34 foram obtidos em Urbel (2010). Estes dados foram utilizados para as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN-W.

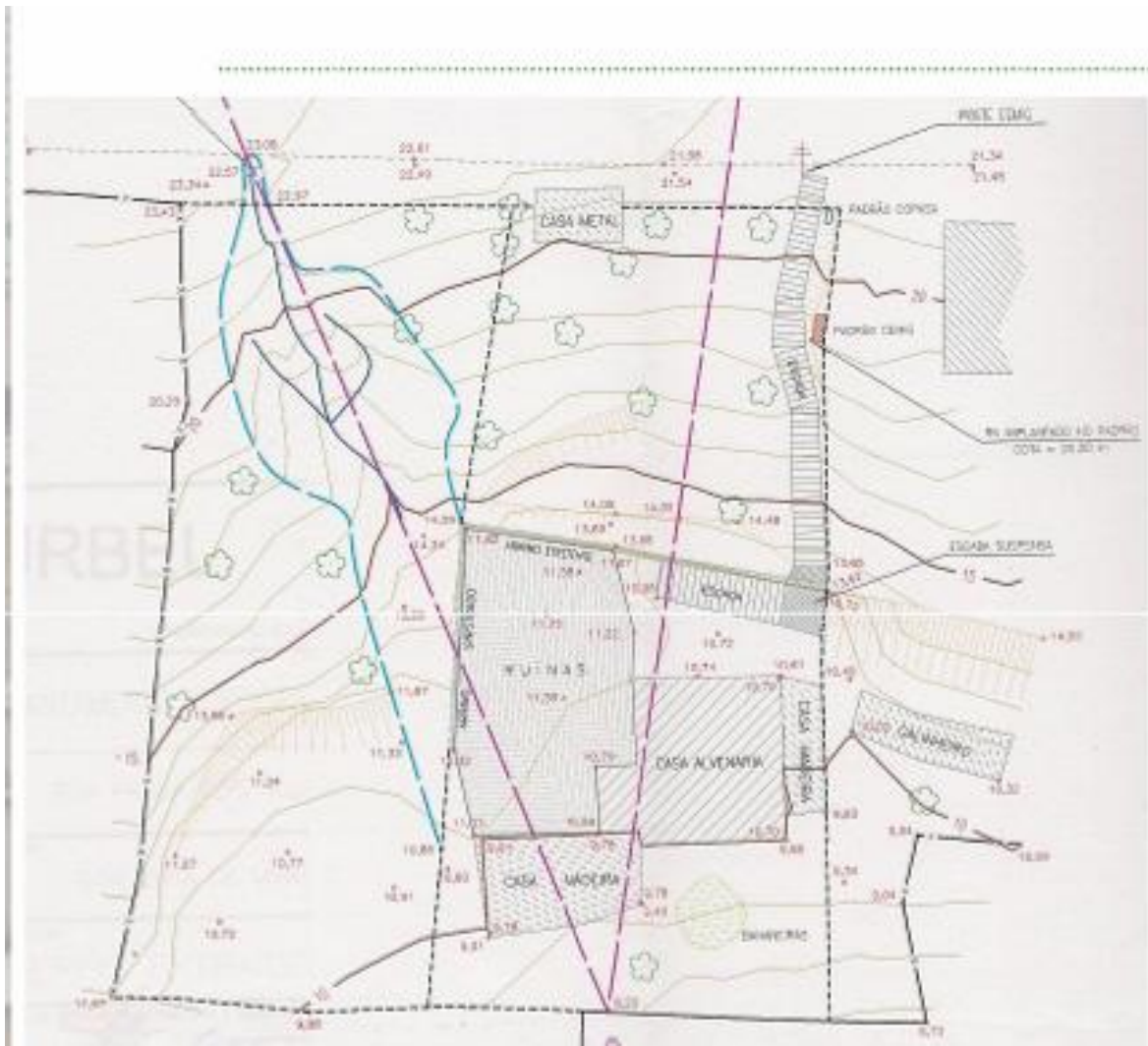


FIGURA 4.33- Levantamento Planialtimétrico do Talude Juliana (Urbel, 2010)

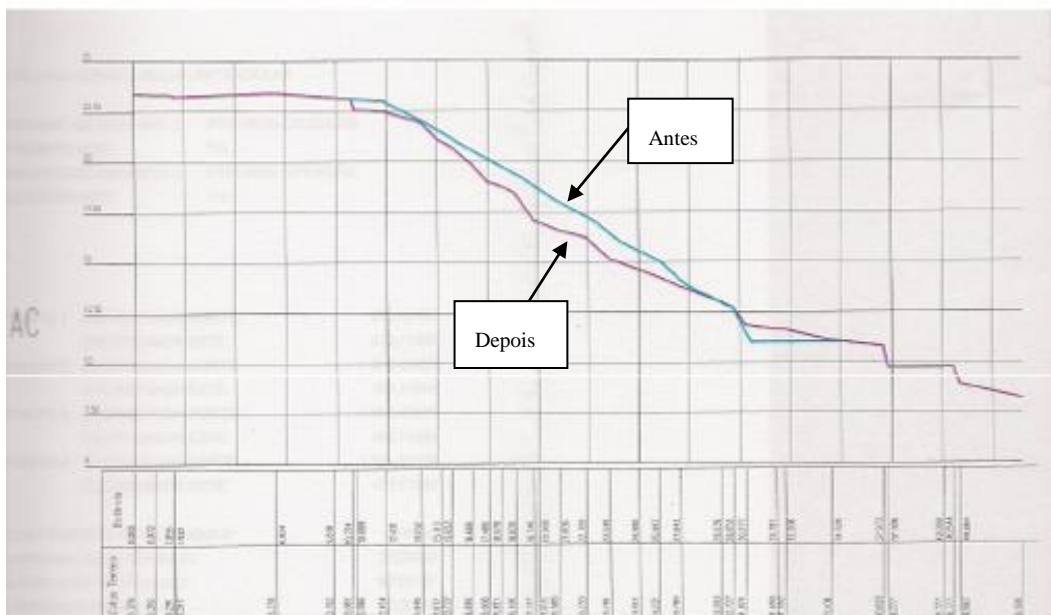


FIGURA 4.34- Perfil longitudinal do Talude Juliana (Urbel, 2010)

4.5.3 Retroanálises

Foram realizadas retroanálises dos parâmetros reológicos considerando os modelos Friccional e Plástico. Os modelos Bingham e Coulomb-Viscoso apresentaram resultados não satisfatórios e o Newtoniano não convergiu. Os parâmetros de resistência adotados foram os seguintes:

- Ângulo de atrito: 32° (como Horizonte C do talude Engenho Nogueira).
- Coesão: 10 kPa (como Horizonte C do talude Engenho Nogueira).
- Resistência não drenada: 11,8 kPa (conforme Urbel, 2010).
- Peso específico: 14 kN/m^3 como talude Engenho Nogueira.
- Fator r_u : 0,15 como talude Engenho Nogueira.

A partir destes parâmetros de resistência e variações para limites inferior e superior destes parâmetros foram feitas as retroanálises dos parâmetros reológicos pelo programa DAN. O alcance de campo, que para o talude Juliana foi de aproximadamente 40m, também foi utilizado nas retroanálises.

Modelo reológico friccional

Os parâmetros reológicos a serem obtidos pela retroanálise são o ângulo de atrito na superfície de ruptura e o fator r_u . A faixa de variação desses parâmetros, bem como o peso específico, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: fixado em 14 kN/m^3 .
- O fator r_u variando entre 0,15 e 0,40.
- O ângulo de atrito na base variando entre 5° e 40° .

Na FIG. 4.35 apresenta-se simulações de alcances para pares de variação de ângulo de atrito de superfície de ruptura e fator r_u .

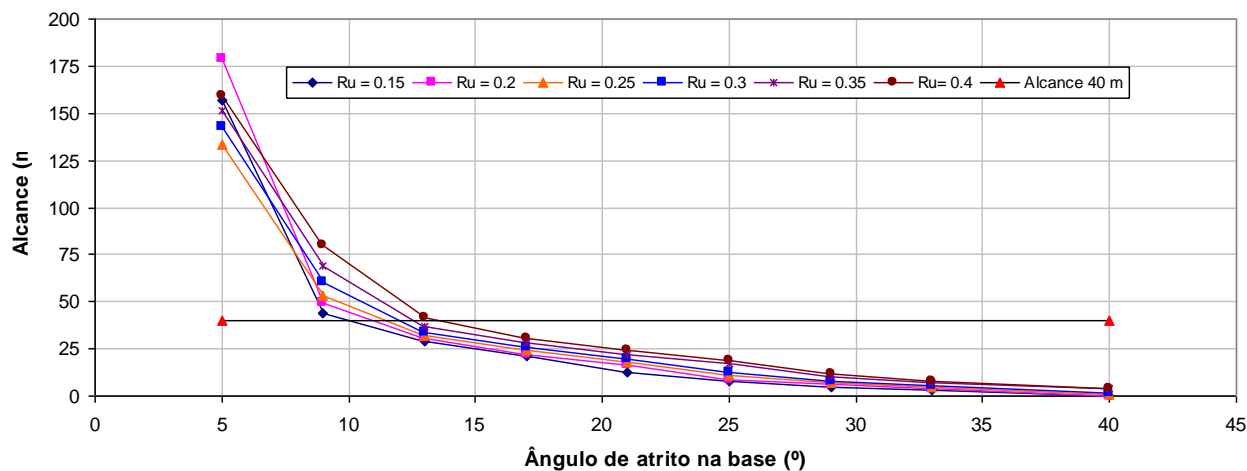


FIGURA 4.35- Alcance x ângulo de atrito na superfície de ruptura, no modelo friccional- Talude Juliana

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.35 permite as seguintes observações:

1- Considerando que o alcance observado em campo foi de 40m têm-se como resultado da retroanálise (pontos onde a reta de alcance 40 m encontra as demais curvas) os valores apresentados no QUADRO 4.8.

QUADRO 4-8- Resultado da retroanálise no modelo friccional – Talude Juliana

r_u	Ângulo de atrito da interface
0,15	10°
0.2	11°
0.25	12°
0.3	12,3°
0.35	12,5°
0.4	12,7°

2- Observa-se que quanto maior o ângulo de atrito menor o alcance. Porém, esta relação é mais preponderante para ângulo de atrito de 5 a 15° (onde alcance varia entre 180m e 25m). Para ângulos entre $15^\circ < \phi < 40^\circ$, a influência é menor, originando alcances de 30 e 0 m respectivamente.

3- Quanto maior o fator r_u maior o alcance, sendo esta relação mais perceptível para ângulos de atrito entre 5 e 15°.

Modelo reológico plástico

O parâmetro reológico a ser obtido pela retroanálise é a constante de cisalhamento ou resistência não-drenada do material. A faixa de variação dos valores desse parâmetro, bem como do peso específico e ângulo de atrito interno do material, utilizada nas retroanálises foi:

- Peso específico: análise realizada com 14 kN/m^3 e 19 kN/m^3 , pois, a variação do peso específico influencia o alcance para este modelo.
- Resistência não-drenada: de 0 a 4 kPa.
- Ângulo de atrito interno do material: fixado em 32° .

Na FIG. 4.36 apresenta-se um gráfico com as simulações de alcances para diferentes resistências não-drenadas e pesos específicos.

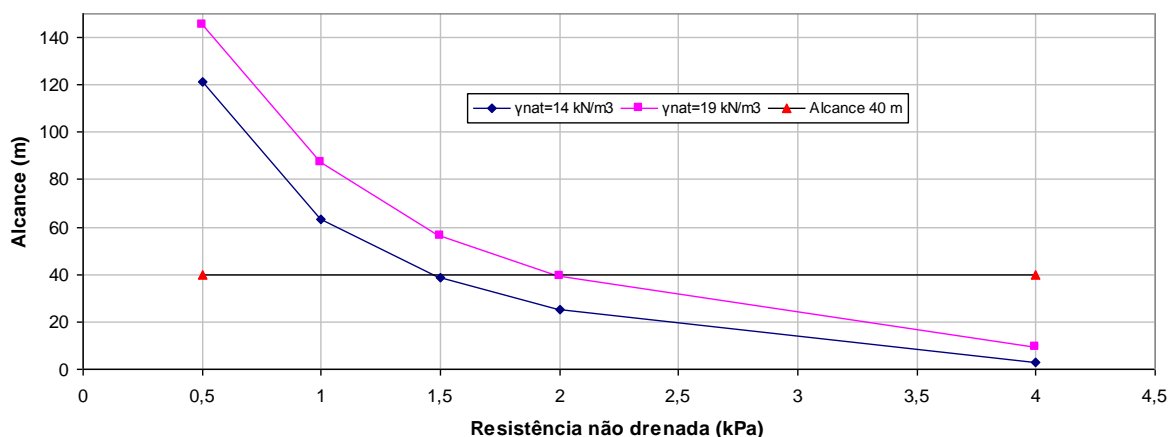


FIGURA 4.36- Alcance x resistência não-drenada no modelo Plástico- Talude Juliana

A análise das simulações apresentadas na FIG. 4.36 permite as seguintes observações:

- 1- O resultado da retroanálise para a resistência não-drenada foi de 1,5 a 2 kPa para pesos específicos entre 14 e 19 kN/m^3 .
- 2- A variação do peso específico entre 14 e 19 kN/m^3 influencia o valor do alcance, para a mesma resistência não-drenada. Para resistência não-drenada de 1 kPa, os valores do alcance são 60m e 90m respectivamente para os pesos específicos naturais de 14 e 19 kN/m^3 .
- 3- O valor da resistência não drenada retroanalizada entre 1,5 e 2 kPa é bem menor que o resultado encontrado na literatura para um solo similar com $S_u=11,8 \text{ kPa}$.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo contempla uma discussão e análise dos resultados comparativa entre os taludes, e entre os modelos. Foi realizada uma avaliação qualitativa dos modelos reológicos por meio de critérios de compatibilidade sugeridos nesta pesquisa, e como resultado obteve-se um quadro com a indicação de quais modelos reológicos mostraram-se mais adequados para cada talude. Também foi realizada uma avaliação quantitativa dos resultados, buscando a comparação com referências bibliográficas.

5.1 Adequação dos modelos reológicos para cada talude

No QUADRO 5.1 apresenta-se uma síntese da avaliação de compatibilidade dos diferentes modelos reológicos para cada talude estudado, a fim de identificar qual modelo se mostrou mais adequado para cada litologia. Os critérios de compatibilidade estão descritos na metodologia (Capítulo 3) desta pesquisa.

QUADRO 5-1- Adequação dos modelos reológicos para cada talude estudado.

Taludes	Modelo reológico				
	Friccional	Newtoniano	Plástico	Bingham	Coulomb-Viscoso
Ponteio 1	Compatível (PD)	Não convergiu	Compatível (PD)	Compatível (PD)	Não satisfatório
Planetóides	Compatível (PNC)	Não convergiu	Compatível (PD)	Não satisfatório	Não convergiu
Taquaril	Compatível	Não convergiu	Compatível (PD)	Não satisfatório	Não satisfatório
Eng. Nogueira	Compatível	Não convergiu	Compatível (PD)	Não convergiu	Não convergiu
Juliana	Compatível (PD)	Não convergiu	Compatível (PNC)	Não satisfatório	Não satisfatório

Talude Ponteio 1

Observa-se que os modelos friccional, plástico e Bingham apresentaram-se compatíveis com restrições. O ângulo de atrito de interface não era dado conhecido, o que impossibilitou a comparação com os resultados da retroanálise (ângulos de atrito entre 19,8 e 22,3°). Porém, as ordens de grandeza dos ângulos de atrito retroanalizados estão coerentes com o intervalo entre o ângulo de atrito da foliação do filito (17°) e ângulo de atrito do tálus (29°), conforme Parizzi (2004). Isto sugere uma adequação do modelo friccional ao talude Ponteio1. O modelo newtoniano não convergiu para varias tentativas de parâmetros de entrada. O talude escoava indefinidamente ou aparecia a mensagem de divisão por zero.

O modelo plástico mostrou-se compatível, com restrições, pois, não foram encontrados dados na literatura técnica, ou dados de ensaios para valores da resistência não drenada para comparar com o resultado da retroanálise que ficou entre 1,6 e 2,1 kPa.

Já o modelo Bingham mostrou-se compatível, com restrições, pois não foram encontrados dados na literatura técnica, ou dados de ensaios para comparar com os resultados da retroanálise que foram $T = 0.5$ kPa e 6,8 kPa.s, e para $T = 1.0$ kPa, viscosidade de 7.0 kPa.s. Estes valores de viscosidades estão dentro do valor máximo de viscosidade encontrado na literatura, 32 kPa.s (Lu & Cruden, 1996).

O modelo Coulomb-Viscoso mostrou-se não satisfatório por não atender aos três critérios de compatibilidade.

Talude Planetóides

Os modelos friccional e plástico mostraram-se compatíveis, mas, com restrições. Para o modelo friccional, os ângulos de atrito da superfície de ruptura obtidos pelo programa DAN, 33.5° a 36.9°, são superiores ao obtido por Parizzi (2004), que é 28°. Esta diferença pode ser justificada pelo fato do modelo não considerar a coesão, bem como os obstáculos. Um obstáculo possível e não considerado pelo programa DAN-W foi um aterro localizado no passeio oposto à base do talude, proveniente de material escavado do próprio talude.

Para o modelo Plástico não foi possível avaliar se os parâmetros retroanalizados são coerentes, pois, não foram encontrados valores destes parâmetros na literatura. Os valores de resistência não drenada para o modelo plástico foram entre 13 e 16 kPa.

O modelo Bingham mostrou-se não satisfatório, pois as curvas de simulações não interceptaram a reta de alcance de campo, e alcance praticamente constante a partir de viscosidade de 1 kPa.s.

Os modelos fluido newtoniano não convergiu. No modelo Coulomb-Viscoso o programa não convergiu ou interrompia cálculos para várias tentativas de parâmetros de entrada, ou resultava em alcances acima de 200m.

Talude Taquaril

O modelo friccional mostrou-se compatível sem restrições. O ângulo de atrito para $r_u = 0,45$ foi de $34,5^\circ$, resultado coerente com o obtido por Parizzi (2004) que foi 33° e 34° com r_u variando entre 0,3 e 0,47.

O modelo newtoniano não convergiu, apresentando divisão por zero, ou talude movimentando-se no fundo do vale indefinidamente. O modelo plástico apresentou-se compatível com restrições, pois, não foram encontrados dados na literatura técnica para a resistência não drenada deste material, para comparar com o resultado da retroanálise, o qual foi de 8,5 a 10,8 kPa.

O Modelo de Bingham forneceu resultados não satisfatórios, com pontos fora da tendência e grande variação de pares de tensão de escoamento e viscosidade para o mesmo alcance.

O Modelo Coulomb-Viscoso não atendeu aos três critérios de compatibilidade, sendo não satisfatório para o talude Taquaril. Apresentou como tendência principal, quanto maior o ângulo de atrito maior o alcance, resultado considerado ilógico. A reta de alcance de campo não interceptou as curvas de alcance do programa DAN-W.

Talude Engenho Nogueira

O modelo friccional mostrou-se a princípio compatível, com restrições. Os parâmetros obtidos pelo programa DAN para alcance de campo de 12 m e $r_u = 0,15$ ($21,2^\circ$; $27,2^\circ$; $28,2^\circ$; $29,2^\circ$) foram inferiores aos retroanalizados por Parizzi (2004), que são 25° , 31° , 32° e 33° respectivamente para Horizontes A, B, C e saprolito. Como hipótese, o alcance de campo da Ravina 1 pode ter sido um pouco menor, entre 8 e 10m, coerente com o obtido pelo programa DAN-W com os valores de ângulos de atrito obtidos por Parizzi (2004). O alcance de 12 m observado em campo pode ter material proveniente também da Ravina 2.

O modelo Newtoniano não convergiu apresentando divisão por zero.

O modelo plástico não atendeu ao critério 3, pois, não foram encontrados valores na literatura técnica para resistência não drenada. Portanto, não foi possível comparar com o valor retroanalisado pelo programa DAN, que ficou entre 7,6 e 10,3 kPa.

O Modelo de Bingham forneceu resultados não satisfatórios, com pontos de não convergência e grande alteração para resultados de alcances, para pequenas alterações de parâmetros de entrada.

O Modelo Coulomb-Viscoso não convergiu e o talude escoava indefinidamente para diversos valores de viscosidade.

Talude Juliana

O modelo friccional apresentou-se compatível com restrições, pois, não atendeu ao critério 3: não há dados de ensaio com o valor de ângulo atrito da superfície de ruptura para este caso. Mas, comparando com o ângulo de atrito do Talude Engenho Nogueira (32°), a retroanálise mostrou-se não coerente (10 a 12,7°).

O modelo newtoniano não convergiu, apresentando divisão por zero e interrompendo os cálculos.

O modelo plástico não atende ao critério 3, pois o parâmetro de resistência não drenada retroanalisado (entre 1,5 e 2 kPa) difere de parâmetro de ensaio (11,8 kPa), conforme informa a Urbel (2010).

Os modelos Bingham e Coulomb viscoso apresentaram-se não satisfatórios pelos resultados sem comportamento definido, com pontos fora da reta, e maioria das curvas de alcance pelo programa DAN não interceptaram a reta de alcance de campo.

5.2 Propriedades reológicas retroanalisadas e referências bibliográficas

No QUADRO 5.2 apresenta-se um resumo dos valores das propriedades reológicas obtidas pelas retroanálises, bem como resultados de parâmetros reológicos obtidos na bibliografia. Não foram encontradas referências bibliográficas, com valores de parâmetros reológicos para os modelos Plástico e Coulomb-Viscoso.

A comparação dos resultados deste trabalho com os obtidos na bibliografia foi realizada de maneira simplificada, levando-se em consideração que são alcances com ordem de grandeza diferente, materiais distintos, e em alguns casos movimentos de massa também distintos.

Pelo modelo friccional, Hungr (1996) encontrou ângulos de atrito entre 10 e 23°, Bertolo (2005) ângulos de atrito de 36°, e para os taludes deste trabalho os valores médios dos ângulos de atrito ficaram entre 10 e 36,9°. Um comportamento padrão foi observado nas curvas de alcance pelo programa DAN-W, e já esperado, foi que quanto maior o ângulo de atrito, menor o alcance. Portanto, os ângulos de atrito maiores deste trabalho estão coerentes com os pequenos alcances observados em campo. Segundo Hungr (1996) ângulos de atrito menores (próximos de 17°) estão relacionados à liquefação parcial na base da corrida, o que pode ter ocorrido com o Talude Juliana, o qual apresentou o menor resultado de ângulo de atrito retroanalisado (10°).

Os resultados para as sete retroanálises descritas em Hungr (1996) no QUADRO 5.2, são de rupturas que apresentaram os menores alcances entre as vinte e três rupturas retroanalisadas pelo autor. Mesmo sendo as menores rupturas, os alcances são consideráveis, com valores entre 200 m e 1800m. Esta ordem de grandeza é superior aos taludes retroanalisados neste trabalho, cujos alcances ficaram entre 3,3m e 40m.

Ainda para o modelo friccional, outro aspecto a ser considerado é a caracterização geológico-geotécnica dos materiais envolvidos. Para os taludes retroanalisados neste trabalho tem-se solo residual de gnaiss e/ou saprolito, talus proveniente da desagregação de filito, ou aterro também proveniente do filito. Estes materiais sofreram rupturas de pequeno alcance tipo escorregamentos ou corridas de massa. Os casos retroanalisados por Hungr (1996) são de rocha que sofreu corridas de rocha de grande porte ou avalanches, em regiões do Canadá. Já os casos analisados por Bertolo (2005) são de corridas de detritos e rocha, compostas por material grosseiro e pouca presença de argila. O local investigado por Bertolo (2005) é o Yosemite Valley, Califórnia, cuja rocha predominante é o granito, em contraposição ao filito e gnaiss, predominantes nos taludes desta pesquisa.

A comparação da bibliografia com os resultados do modelo Newtoniano deste trabalho não foi possível, pois, todos os resultados foram não convergentes. Como o solo é um fluido não newtoniano, a viscosidade para este caso não é uma constante. E quanto mais o solo é granular, conforme os solos deste estudo, a probabilidade do solo se comportar como um fluido newtoniano diminui. O que pode justificar a não convergência do modelo Newtoniano na presente pesquisa.

QUADRO 5-2- Propriedades reológicas dos taludes estudados, e obtidas na literatura técnica para diferentes modelos

Referências	Método de Análise	Caso ou talude	Alcance (m)	Modelos Reológicos				
				Friccional	Newtoniano	Plástico	Bingham	
				Ângulo de atrito (°)	Viscosidade (kPa.s)	Resistência não-drenada (kPa)	Tensão de escoamento (kPa)	Viscosidade de Bingham (kPa.s)
Presente trabalho	DAN-W	Ponteio	3,3	19,8 a 22,3	-	1,6 a 2,1	0,5 e 1	6,8 e 7
Presente trabalho	DAN-W	Planetóides	7,7	33,5 a 36,9	-	13 a 16	-	-
Presente trabalho	DAN-W	Taquaril	12	26 a 36,5	-	8,5 a 10,8	-	-
Presente trabalho	DAN-W	Eng. Nogueira	12	21,2 a 29,2	-	7,6 a 10,3	-	-
Presente trabalho	DAN-W	Juliana	40	10 a 12,7	-	1,5 a 2,0	-	-
Macias, 1997	Bagnold	Quitite	-	-	0,092	-	-	-
Macias (1997)	Jonhson)	Quitite	-	-	3,44	-	-	-
Macias (1997)	Bagnold	Papagaio	-	-	0,165	-	-	-
Macias (1997)	Jonhson	Papagaio	-	-	1,79	-	-	-
Macias (1997)	Bagnold	Vale Encantado	-	-	0,209	-	-	-
Lu & Cruden (1996)	Jonhson	Mount Cayley/ Canadá	-	-	25 a 32	-	-	-
Johnson (1970)	Jonhson		-	-	0,076	-	-	-
Hungr (1996)	DAN-W	Pandemonium Ck.	1600	13	-	-	-	-
Hungr (1996)	DAN-W	Avalanche Lake N.	1300	10	-	-	200	10
Hungr (1996)	DAN-W	Turbid CreeK	1800	17.5	-	-	-	-
Hungr (1996)	DAN-W	Kennedy River	200	23	-	-	50	10
Hungr (1996)	DAN-W	Mystery Creek	1600	17	-	-	90	9
Hungr (1996)	DAN-W	Lake of the woods	1500	20	-	-	200	10
Hungr (1996)	DAN-W	Madison Canyon	1400	16	-	-	100	20
Bertolo (2005)	DAN-W	Channel 1	1275	36	-	-	0.24	1
Bertolo (2005)	DAN-W	Channel 2	1480	36	-	-	0.15	0.8
Bertolo (2005)	DAN-W	Channel 4	652	36	-	-	0.3	1

Nota: Símbolo – significa que o programa não convergiu, ou não houve simulação

Os valores da viscosidade dinâmica encontrados em Macias (1997) e Lu & Cruden (1996) dizem respeito a rupturas de grandes alcances e com material com características predominantes de fluido, o que neste caso pode ter viabilizado a utilização da viscosidade dinâmica como parâmetro reológico. Porém, é importante ressaltar que os modelos de Bagnold e Johnson utilizados pelos autores citados consideram o material como uma mistura de sólidos e fluido, o que torna a viscosidade encontrada por estes modelos conceitualmente distinta da viscosidade dinâmica de fluidos newtonianos.

Conforme apresentado no QUADRO 5.2, Macias (1997) encontrou valores para a viscosidade entre 0,092 e 3,44 kPa.s; Johnson (1970) encontrou 0,076 kPa.s e Lu & Cruden (1996) encontraram valores entre 25 e 32 kPa.s. Os resultados obtidos por estes autores estão todos acima da viscosidade da água, que é 1×10^{-6} , e abaixo da viscosidade do piche que é 1×10^4 . A faixa de variação dos resultados é ampla. Portanto, ressalta-se a necessidade de retroanálises de casos conhecidos e similares aos que se deseja realizar previsão de alcances, através de modelos que tenham como parâmetro de entrada a viscosidade.

Os resultados para a constante de cisalhamento do modelo plástico, aqui exemplificada como a resistência não-drenada do material, também possuem ampla variação dependendo do talude envolvido, do alcance observado em campo e do material que deslizou. A resistência não-drenada variou entre 1,5 kPa, para o talude Juliana com alcance de 40 m, e 16 kPa, para o talude Planetóides com alcance de 7,7m. Não foram encontrados na bibliografia casos de utilização do modelo plástico que possibilitasse comparação com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Segundo Hungr (1996) o modelo de Bingham tem sido bastante utilizado para movimentos de massa tipo corridas ou avalanches de rocha. As tensões de escoamento observadas estão entre 50 e 200 kPa, e as viscosidades de Bingham, entre 9 e 20 kPa.s. Este resultado é coerente com o tipo de material mais grosseiro. Já em Bertolo (2005), cujos resultados são relativos a materiais mais fluidos, as tensões de escoamento variaram entre 0,15 e 0,3 kPa e a viscosidade de Bingham entre 0,8 e 1 kPa.s. O modelo de Bingham apresentou resultado satisfatório apenas para o Talude Ponteio, com tensão de escoamento entre 0,5 e 1 kPa, e viscosidade de Bingham entre 6,8 e 7 kPa.s. Observa-se que no talude Ponteio a tensão de escoamento e a viscosidade de Bingham são inferiores aos resultados de Hungr (1996), referentes às corridas de rocha, e superior aos resultados de Bertolo (2005) referentes à corridas de lama. Esta observação é coerente com o fato que o material do talude Ponteio é uma mistura de agregados e matriz fina, cujo movimento foi classificado por Parizzi (2004) como corrida de detritos. Ou seja, em relação à granulometria, o

talude Ponteio é intermediário entre os materiais estudados por Bertolo (mais finos) e materiais estudados por Hungr (mais grossos).

5.3 Metodologia proposta para pesquisas futuras

Na FIG. 5-1 sugere-se uma metodologia de previsão de alcances a ser utilizada em taludes de Belo Horizonte. Ressalta-se que esta metodologia é um resultado desta pesquisa, mas, ainda são necessárias outras aplicações da mesma, em taludes diversos, para comprovar sua eficácia.

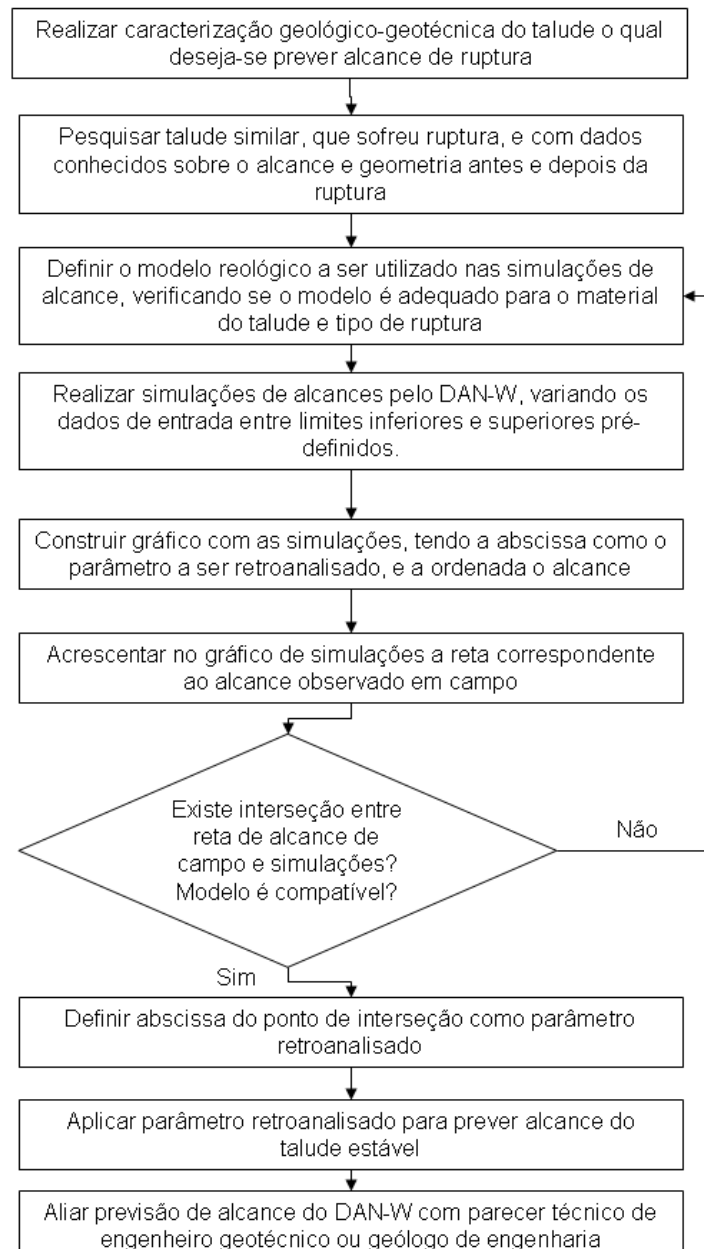


FIGURA 5.1 - Metodologia sugerida na análise dinâmica de previsão de alcances pelo programa DAN-W

6 CONCLUSÕES

A análise dinâmica para previsão de alcances é uma ferramenta bastante utilizada em rupturas de grande alcance. O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a aplicabilidade da ferramenta computacional DAN-W para a análise dinâmica de taludes e rupturas de menor alcance, comuns no município de Belo Horizonte. Este objetivo foi alcançado, e, como resultado, acredita-se que a análise dinâmica poderá ser utilizada em taludes de Belo Horizonte, observando as restrições referentes aos modelos mais adequados para cada litologia, bem como as recomendações, principalmente quanto à necessidade de realizar a retroanálise em talude similar ao estudado, antes da previsão de alcances com a utilização do programa DAN-W.

Observou-se que o modelo fluido newtoniano, o qual utiliza a viscosidade dinâmica como parâmetro reológico, não convergiu para nenhum dos taludes estudados. Como hipótese acredita-se que o modelo newtoniano seja mais indicado para corridas de lama, com o solo em estado mais fluido, o que não era o caso dos taludes desta pesquisa. Os parâmetros reológicos obtidos para todos os taludes foram do modelo friccional, o qual apresenta na literatura técnica poucos dados de aplicação para rupturas de pequeno alcance, porém mostrou-se o mais adequado para os casos tratados nesta pesquisa.

A limitação de dados na literatura técnica não foi somente para o modelo friccional, mas, para todos os modelos do programa DAN-W, aplicados em rupturas de pequeno alcance. Conforme apresentado no QUADRO 5.2, a comparação com dados da bibliografia foi realizada. Porém, os alcances das rupturas encontradas na bibliografia eram bastante superiores aos tratados nesta pesquisa. O que era esperado, já que esta pesquisa busca avaliar uma nova aplicação para a ferramenta DAN-W, que é a previsão de pequenos alcances. Acredita-se que o objetivo de comparar dados desta pesquisa com dados de bibliografia foi realizado, porém, com pouca representatividade, devido à diferença considerável entre a ordem de grandeza dos alcances.

Quanto ao objetivo de realizar uma aplicação dos parâmetros reológicos e demais análises obtidas nesta pesquisa, foi realizada uma previsão de alcance para uma situação hipotética do Talude Ponteio 2. Obteve-se como resultado que a solução de estabilização do talude com tela metálica e manta vegetal diminuiu o alcance para 1/5 do alcance simulado pelo programa DAN-W.

Demais objetivos específicos, como avaliar a adequação de cada modelo reológico para cada talude, e realizar análise de limitações e potencialidades da ferramenta DAN-W, encontram-se nos itens seguintes; bem como sugestões e recomendações para futuras pesquisas.

6.1 Aplicabilidade da análise dinâmica para taludes de Belo Horizonte

6.1.1 Relação entre o modelo reológico e o material geotécnico

Conforme apresentado no QUADRO 6.1, para as litologias estudadas nesta pesquisa os modelos Friccional e Plástico mostraram-se mais compatíveis, com resultados próximos da realidade observada em campo.

O modelo Friccional atendeu bem às rupturas de pequeno alcance, com predominância de material granular, e movimento pós-ruptura controlado pelo ângulo de atrito e peso específico da camada deslizante. Observa-se no QUADRO 6.1 que em quatro dos cinco taludes pesquisados a fração cascalho e/ou areia era predominante, concordando com Coussout *et al.* (1998) que sugerem para materiais granulares o comportamento friccional como predominante. Para o talude Juliana, a granulometria não era conhecida.

QUADRO 6-1- Modelos reológicos compatíveis e classificação do material e movimento de massa dos taludes

Talude	Classificação SUCS (Parizzi, 2004)	Movimento de Massa	Modelo reológico compatível
Ponteio	Cascalho siltoso c/areia, silte cascalhento	Corrida de detritos	Friccional e plástico
Planetóides	Cascalho siltoso c/ areia, areia siltosa com cascalho	Corrida de detritos	Friccional e plástico
Taquaril	Argila arenosa, silte arenoso	Escorregamento planar	Friccional e plástico
Eng. Nogueira	Areia siltosa, argila arenosa	Escorregamento circular	Friccional e plástico
Juliana	Não disponível	Corrida de lama	Friccional e plástico

O modelo plástico, cujo parâmetro reológico é uma constante relacionada à resistência, também apresentou resultados compatíveis para os taludes tratados. Este modelo é indicado para condições de ruptura não drenada, como a ocorrida no talude Juliana. Para uma análise conclusiva deste modelo seriam necessários estudos do potencial de liquefação dos solos tratados nesta pesquisa, e mais aplicações deste modelo em referências bibliográficas, as quais não foram encontradas.

Os movimentos de massa dos taludes investigados foram corrida de detritos, escorregamentos planar e circular, e corrida de lama, o que possibilita concluir que os modelos

Friccional e Plástico apresentaram bons resultados para corridas de massa, como já era esperado após análise da bibliografia, e também para escorregamentos. Ressalta-se que os escorregamentos desta pesquisa são de pequena espessura (1,5 m para o talude Taquaril e até 2,0 m para o talude Engenho Nogueira), o que pode ter contribuído para aplicabilidade dos modelos reológicos. Para espessuras superiores recomenda-se análise criteriosa de compatibilidade dos modelos, pois, o programa DAN-W pode não convergir para estes casos, conforme Hungr (2010).

6.1.2 Previsão de alcances por retroanálises como contribuição para a gestão de risco

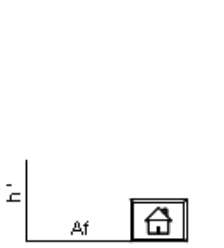


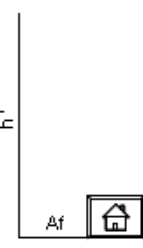



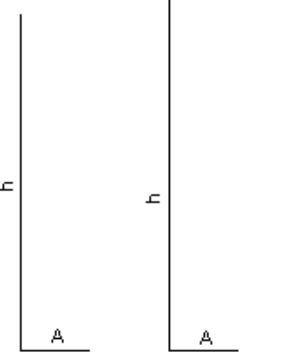
A presente pesquisa possibilitou uma reflexão sobre a previsão de alcances por retroanálises e a possibilidade de contribuição com a gestão do risco no município de Belo Horizonte.

A partir do trabalho desenvolvido por Campos (2011) a distância da massa rompida foi incluída na ficha de vistoria de ocorrências de deslizamentos em vilas e favelas de Belo Horizonte. Portanto, em curto prazo será possível realizar retroanálises em maior número de casos. Com os parâmetros obtidos nas retroanálises será possível prever alcances de rupturas de taludes típicos de Belo Horizonte com maior assertividade. O alcance de rupturas é um dos fatores importantes na análise de risco de escorregamentos em Belo Horizonte, revista por Campos (2011), e citada no capítulo 2.1 deste trabalho.

Outro aspecto de contribuição é a comparação da ordem de grandeza dos alcances das rupturas analisadas nesta pesquisa e o critério de classificação de risco para o fator afastamento da moradia em relação ao talude. Ressalta-se que o risco de uma moradia ser atingida pelo deslizamento é somente um dos fatores de risco, e a classificação final do risco deve ser obtida a partir do cruzamento de análise de risco de também outros fatores como: condicionantes e agentes potencializadores da ruptura, indicativos de movimentação, padrão construtivo dentre outros. Conforme Campos (2011), se a relação entre altura do talude e afastamento da edificação for abaixo de 1/1 a edificação é considerada sem risco para ser atingida pelo deslizamento; acima de 1/1 a edificação é considerada com risco baixo; acima de 2/1 risco médio e acima de 3/1 risco alto. As relações entre alturas dos taludes tratados nesta pesquisa (da base da superfície de ruptura ao topo do talude) e alcances observados em campo foram de 4,6 para o talude Ponteio; 4,8 para o talude Planetóides; 2,1 para o talude Taquaril; 1,3 para o talude Engenho Nogueira; e 0,2 para o talude Juliana. Estas relações estão ilustradas na FIG. 6.1.

Observa-se na FIG. 6.1 que a relação entre a altura do talude e o afastamento da edificação até a base do talude foi de 0,21/1, menor que 1/1, ou seja, a moradia seria considerada sem risco de ser atingida por um deslizamento. Porém, a mesma moradia sofreu danos pois foi atingida pelo

deslizamento que ocorreu no local. É importante ressaltar que o movimento de massa foi classificado como corrida de lama, ruptura atípica para taludes de Belo Horizonte, conforme relato pessoal de técnicos da URBEL. Sugere-se o monitoramento do banco de dados que está sendo criado com a informação de alcances, na região do Complexo Belo Horizonte, e caso seja considerável o número de rupturas similares ao talude Juliana, com alcances superiores à faixa de segurança de 1/1, recomenda-se a revisão deste critério de classificação de risco.

Relação altura do talude por afastamento da moradia x risco (Campos, 2011)	 <p>Sem Risco $h'/Af < 1/1$</p>	 <p>Risco Baixo $h'/Af = 1/1$</p>	 <p>Risco Médio $h'/Af = 2/1$</p>	 <p>Risco Alto $h'/Af = 3/1$</p>
Relação altura do talude por alcance da ruptura (dados da presente pesquisa)	 <p>T. Juliana $h/A = 0,2/1$</p>	 <p>T. Eng. Nogueira $h/A = 1,3/1$</p>	 <p>T. Taquaril $h/A = 2,08/1$</p>	 <p>T. Ponteio $h/A = 4,60/1$</p> <p>T. Planetóides $h/A = 4,81/1$</p>

Notas: T. é abreviação para talude; h' é a altura do talude; Af é afastamento da base do talude até a moradia; h é a altura do talude da base da superfície de ruptura até o topo; A é o alcance da ruptura a partir de sua base. Desenhos em escala.

FIGURA 6.1- Avaliação da vulnerabilidade segundo Campos (2011) e alcances de taludes tratados nesta pesquisa.

O talude Engenho Nogueira apresentou a relação altura/alcance de 1,3/1, caracterizando um risco baixo de atingir edificações. A modelagem reológica pode ser aplicada, com o objetivo de verificar qual a probabilidade de ocorrência de alcances desta magnitude na região, e responder a perguntas como: é uma probabilidade baixa? Pode ser caracterizada como risco baixo ou este critério pode ser revisto?

O talude Taquaril apresentou a relação altura/alcance de 2,08/1, caracterizando um risco médio de atingir edificações. A mesma metodologia proposta para o talude Engenho Nogueira pode ser aplicada na região do bairro Taquaril, ou regiões de litologias similares, para verificar também qual a probabilidade de ocorrência de alcances desta magnitude e se podem se enquadrar em risco

médio de serem atingidas pelas rupturas. Mais uma vez, a criação de um banco de dados de alcances de rupturas será bastante útil na verificação deste critério de classificação de risco.

Para os taludes Ponteio e Planetóides as relações altura/alcance observadas foram de 4,60/1 e 4,81/1 respectivamente, ou seja, são os menores alcances observados nesta pesquisa. Moradias afastadas a partir da relação altura do talude/afastamento de 3/1 já são consideradas com risco alto de serem atingidas pelos deslizamentos. Com a aplicação da modelagem reológica em um maior número de casos poderia se chegar a conclusão, por exemplo, que na região de litologia similar à dos taludes Ponteio e Planetóides somente a partir da relação altura/afastamento da moradia de 4/1 o risco seria considerado alto, pois os alcances observados são de pequena magnitude.

Em longo prazo, a previsão de alcances de rupturas por meio de retroanálises pode auxiliar na transição de um modelo atual de cadastramento de risco qualitativo, que já se mostra eficaz segundo opinião da autora, para um modelo de zoneamento de risco avançado, com modelos numéricos para modelar os alcances de rupturas conforme indicação de Fell *et al.* (2008), e, eventualmente, associar os modelos numéricos aos modelos baseados em SIG (Sistema de Informações Geográficas).

6.1.3 Potencialidades e limitações do programa DAN-W

Diversas aplicações da ferramenta DAN-W estão citadas no item 2 desta pesquisa, motivadas pelas principais potencialidades citadas a seguir:

- **Objetividade:** a análise dinâmica do programa DAN-W para estimativa de alcances, velocidades e espessuras de deposição de material mobilizado de corridas de massa é uma alternativa com maior objetividade que análises empíricas ou qualitativas.
- **Variedade de modelos reológicos disponíveis:** a diversidade de reologias permite a previsão de alcances desde rupturas de barragens para acumulação de água, de rejeitos e canais de drenagem, até rupturas de encostas com materiais rochosos, granulares ou finos.
- **Interface amigável:** a entrada de dados é relativamente simples e a saída de resultados é objetiva e de fácil entendimento.
- **Interface gráfica:** permite a visualização do talude em formato bidimensional, bem como da seção transversal e da simulação do percurso da corrida no vídeo, possibilitando a visualização de possíveis erros.

Existem algumas situações de campo que não podem ser reproduzidas pelo programa. Isto não é uma particularidade do programa DAN-W, mas sim de modelagem em si, que tenta descrever um fenômeno natural de forma simplificada. As limitações relevantes observadas no programa DAN-W são:

- Instabilidades devido às mudanças bruscas na forma ou declividade do percurso: para o talude Juliana o primeiro perfil longitudinal simulado ficou instável devido a um muro de contenção localizado na base do talude. Resolveu-se esta instabilidade aplicando uma pequena inclinação para este muro, antes vertical.
- A seção transversal é lançada no programa DAN-W de forma aproximada: somente sessões transversais retangulares são consideradas internamente pelo programa. O que ele permite é encontrar uma seção retangular cuja área seja equivalente à área real da seção transversal. A partir dos dados de entrada D_{max} (profundidade máxima) e B (largura) da seção real, informa-se um fator de correção para a variável D_{max} . Internamente o programa calcula o valor de H (profundidade da seção transversal retangular) através da multiplicação do fator de correção por D_{max} . O valor calculado para H multiplicado por B deve ser igual ao valor da área da seção transversal real. Para seção transversal real elíptica o fator de correção é 0,67; para seção triangular, o fator é 0,5; e para seção retangular o fator é 1, conforme FIG. 6.2.

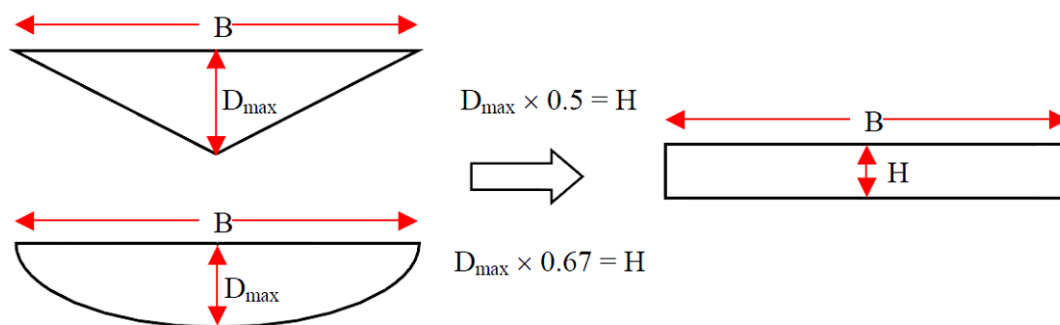


FIGURA 6.2 – Seção transversal considerada pelo programa DAN-W (Hungar, 2004)

- Não considera obstáculos: uma casa existente no percurso não pode ser incorporada devido à instabilidade gerada por mudança brusca de direção. Pode-se utilizar o recurso de estimar a quantidade de material depositado neste ponto devido ao obstáculo, porém, ainda é uma estimativa.
- Instabilidades ou problemas de convergência no caso de profundidades de superfícies de rupturas maiores ou circulares: o programa DAN-W é recomendável apenas para pequenas

profundidades, e rupturas tipo planar. Para as espessuras dos taludes desta pesquisa (máximo 2,5m para o talude Planetóides) não ocorreram instabilidades.

- Não considera mudanças de direção do percurso: o modelo é bidimensional e não reproduz o efeito de curvas no trajeto e a energia que a massa mobilizada perde quando troca de direção. O percurso é considerado um perfil longitudinal único. Esta limitação foi diminuída na versão utilizada, que permite estimar uma porcentagem de material que fica depositado ao longo do percurso.
- Recomenda-se a utilização do programa DAN-W a partir da versão 10. Na presente pesquisa uma versão anterior foi utilizada inicialmente, e foram verificados maiores problemas de convergência. Todos os cálculos realizados em versão anterior foram repetidos na versão 10 do Programa DAN-W. No manual do programa, versão 10 (Hungar, 2010) o autor cita que foi implementado novo algoritmo nesta nova versão que removeu muito, ou praticamente todos, os problemas de instabilidade.

6.2 Recomendações e sugestões para pesquisas futuras

A análise dinâmica para previsão de alcances é uma metodologia quantitativa, com análise dos dados através de cálculos exatos. Conforme FIG. 2.2, a objetividade da análise de risco é influenciada pela análise dos dados, mas também pela coleta de dados. A análise de dados quantitativa, mas, com estimativas (mesmo que quantitativas) na coleta de dados geram uma média objetividade na análise de risco. Porém, se a coleta de dados e análise for quantitativa e com cálculos exatos a análise de risco é considerada com alta objetividade. Medidas de alcances e profundidade de superfícies de ruptura, utilizadas nas retroanálises, obtidas por meio de estimativas, diminuem a objetividade da análise de risco geotécnico com utilização do programa DAN-W. Recomenda-se, por exemplo, que os alcances de rupturas de taludes de Belo Horizonte sejam registrados por levantamento topográfico, antes e após ruptura; ou, na impossibilidade deste procedimento, medidas com equipamento tipo trena. A elaboração de inventários das rupturas com medidas objetivas de alcance e outras variáveis facilitarão futuras aplicações de modelagem reológica e avaliações quantitativas de risco. Estimativas de alcance por fotografias, ou inferências a partir do volume do material mobilizado, diminuem a objetividade do processo. As superfícies de ruptura também podem ser obtidas por investigações geofísicas.

Em relação aos ensaios de resistência ao cisalhamento dos materiais, recomenda-se o conhecimento do desvio padrão destes ensaios, para auxiliar a definição dos limites inferiores e superiores dos dados de entrada nas retroanálises paramétricas realizadas pelo programa DAN-W.

Para pesquisas futuras sugere-se:

- Mapa de alcances possíveis de rupturas para uma área experimental: a partir de mapa de inclinações e topografia de uma região, ensaios de resistência ao cisalhamento e caracterização geotécnica dos materiais, bem como casos de rupturas conhecidas da região, realizar o mapa de previsão de alcances através de retroanálises paramétricas pelo programa DAN-W.
- Reflexão e ou verificação da caracterização atual qualitativa do risco de dano às edificações por rupturas de taludes de Belo Horizonte, através de análise dinâmica de previsão de alcances.
- Aplicação da modelagem reológica na previsão de alcances de rupturas para solos com potencial de liquefação, como por exemplo, barragens de rejeito de mineração.
- Elaboração de planos de contingência e análise de risco de rupturas de barragens de rejeito de mineração e aterros sanitários, a partir de previsão de alcances pelo programa DAN-W.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARATTANO, M.; SAVAGE, W. Z. *Modelling debris flow as kinematic waves*. Bulletin of IAEG, 49, 95-105, 1994 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais. Simpósio Latino Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, p. 334-341, 1990a.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; MACEDO, E. S. *Carta Geotécnica da Serra do Mar*. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6º, Salvador, 1990b.

AUGUSTO FILHO, O. *Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica*. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de encostas, 1a COBRAE, Rio de Janeiro. Anais, II: 721 – 733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. 2001 *apud* MINISTÉRIO DAS CIDADES & UFPE. *Curso de Capacitação - Gestão e Mapeamento de Riscos Sócioambientais*. Disponível em: <<http://www.eproinfo.mec.gov.br>>

AZEVEDO, Izabel Christina Duarte. *Análise de Tensões e Deformações em Solos*. Viçosa: Ed. UFV, 2007.

BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes. *Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe – PE*. 2003. 209p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

BERTOLO, P.; WIECZOREK, G. F. *Calibration of numerical models for small debris flow in Yosemite Valley, Califórnia, USA*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 993-1001, 2005.

BOLT, B. A.; HORN, W. L.; MACDONALD, G. A.; SCOTT, R. F. *Geological Hazards*. Berlim, Springer-Verlag, 238p., 1975.

CAMPOS, L. C. *Proposta de reanálise do risco geológico - geotécnico de escorregamentos em Belo Horizonte - Minas Gerais*. 2011. 139p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CERRI, Leandro Eugênio da Silva. *Subsídios para a seleção de alternativas de medidas de prevenção de acidentes geológicos*. 2001. 79 p. Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista – Unesp, para o concurso público de títulos e provas para a obtenção do título de Livre-Docente, na Disciplina Geologia Ambiental, do Departamento de Geologia Aplicada, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, do Câmpus de Rio Claro (SP).

COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology 102, pp. 84-111, 2008.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. *Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: teoria, evidências de campo e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis*. Revista Brasileira de Geomorfologia, 2(1), pp. 51-71, 2001.

FUCHS, S.; HEISS, K.; HÜBL, J. *Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment*. Nat. Hazards Earth System Sciences, 7, 495–506, 2007.

GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso. *Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa*. 2006. 102 p. Tese de doutorado submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, como requisito parcial para obtenção do grau de doutor em Ciências.

GUINAU, M.; VILAJOSANA, I.; VILAPLANA, V.M. *GIS-based debris flow source and runout susceptibility*. Nat. Hazards Earth System Sciences., 7, 703–716, 2007

HOEK, E., BRAY, J. *Rock Slope Engineering*. London, Institution of Min. Metall & Elsevier Applied Science. 358p, 1981.

HUNGR, O. *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flow, and avalanches*. Canadian Geotechnical Journal, 32: p. 610-623, 1995.

HUNGR, O. *Rock Avalanche runout prediction using a dynamic model*. Landslides, Senneset (ed), Balkema, Rotterdam, 1996.

HUNGR, O. *Manual of DAN-W Release 10 – Dynamic Analysis of Landslides*. Fonte <<http://www.clara-w.com>> March, 31, 2010.

HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: Encyclopedia of Geomorphology. New York: Ed. R.W. Fairbridge. Reinhold Book, 1968 *apud* BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes. *Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe – PE*. 2003. 209p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R.G. *Debris Flow Mobilization from Landslides*. Annual Revision Earth Planet Science, 25: p.85-138, 1997.

IVERSON, R. M.; DENLINGER, R. P. *Mechanics of Debris Flow and Debris Laden Flash Floods*. Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada. 25 a 29 de março, 2001.

JOHNSON, A. M. *Physical processes in geology*. Freeman Cooper, San Francisco, 1970 *apud* MACIAS, J.; AMARAL, C.; VARGAS JR, E. *Retroanálise do Comportamento Mecânico das Corridas de Massa de 1996 no Rio de Janeiro: Determinação da Velocidade de Deslocamento e da Viscosidade dos Materiais Envolvidos*, 2nd Pan-American Symposium on Landslides. Rio de Janeiro. Vol. 1, p. 243-251. 1997

- JOHNSON, A. M. *Debris Flow*. In. Slope Instability. Edited by D. Brunsten and D.B. Prior. John Wiley & Sons, New York, pp.257-360, 1984 *apud* MACIAS, J.; AMARAL, C.; VARGAS JR, E. *Retroanálise do Comportamento Mecânico das Corridas de Massa de 1996 no Rio de Janeiro: Determinação da Velocidade de Deslocamento e da Viscosidade dos Materiais Envolvidos*, 2nd Pan-American Symposium on Landslides. Rio de Janeiro. Vol. 1, p. 243-251. 1997
- JOHNSON A. M. *Physical processes in geology*. Freeman Cooper and Co., San Francisco, Calif., 1970 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.
- KOERNER, H. J. *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches*. Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fleisschneelawinen. Rock Mechanics, 8:225-256, 1976 *apud* HUNGR, O. *Rock Avalanche runout prediction using a dynamic model*. Landslides, Senneset (ed), Balkema, Rotterdam, 1996.
- LU, Z. Y. & CRUDEN, D.M. *Two debris flow modes on Mount Cayley, British Columbias*. Canadian Geotechnical Journal, 33: p. 123-139, 1996.
- MACIAS, J.; AMARAL, C.; VARGAS JR, E. *Retroanálise do Comportamento Mecânico das Corridas de Massa de 1996 no Rio de Janeiro: Determinação da Velocidade de Deslocamento e da Viscosidade dos Materiais Envolvidos*, 2nd Pan-American Symposium on Landslides. Rio de Janeiro. Vol. 1, p. 243-251. 1997
- MINISTÉRIO DAS CIDADES & UFPE. *Curso de Capacitação - Gestão e Mapeamento de Riscos Sócioambientais*. <<http://www.eproinfo.mec.gov.br>>, 2008.
- MONTGOMERY, D. R. & DIETRICH, W. E. *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*. Water Resources Research, 30, pp. 1153-1171, 1984
- NOGUEIRA, Fernando Rocha. *Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal*. Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- PACHECO, M. *Frequency distribution of mortality in cut and fill slope*. Revista Solos e Rochas. V. 24, n. 1, jan-abr, 2001.
- PACHECO, M.; PINHAL, A.; EINSFELD, R. *Gerenciamento de risco geotécnico por previsões de mortalidade de deslizamentos*. III Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Rio de Janeiro, 2001.
- PARIZZI, Maria Giovana. *Condicionantes e mecanismos de ruptura em taludes da região metropolitana de Belo Horizonte, MG*. Contribuições às Ciências da Terra – Série D, v.10, 2004. 211p. Tese (Doutorado em Geociências, concentração em Geodinâmica Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C.; ELMIRO, M. A. T. *Chuvas e Escorregamentos de Taludes em Belo horizonte, MG*. Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, Florianópolis. Anais: GEDN/UFSC, p.29-43, 2004.

PHILLIPS, C. J.; DAVIES, T. R. H. *Determining rheological parameters of debris flow material*. Geomorphology, 4, 101-110, 1991 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

PIERSON, T. C.; JANDA, R. J.; THOURET, J.; BORRERO, C. A. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 november 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. J. Volcan. Geoth. Res., 41, 17-66, 1990 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

SHOOK, G. *An assessment of disaster risk and its management in Thailand*. Disasters, v.21, n.1, p.77-88, 1997 *apud* CERRI, Leandro Eugênio da Silva. *Subsídios para a seleção de alternativas de medidas de prevenção de acidentes geológicos*. 2001. 79 p. Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista – Unesp, para o concurso público de títulos e provas para a obtenção do título de Livre-Docente, na Disciplina Geologia Ambiental, do Departamento de Geologia Aplicada, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, do Câmpus de Rio Claro (SP).

SILVA, A. S., CARVALHO, E. T, FANTINEL, L. M., ROMANO, A. W., VIANA, C. S. *Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte*. Convênio: PMBH, SMP, FUNDEP/ UFMG. 490p. (Relatório Final), 1995.

TAKAHASHI, T. *Debris flow*. IAHR Monograph Series, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1991 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

TAKAHASHI, Tamotsu. *Debris flow-Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Published by Taylor & Francis Group, London, UK, 2007.

URBEL, Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte. *Dados sobre a ruptura do talude Juliana*. Informação não publicada, estudo interno desta empresa, 2010.

VARNES, D.J. *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO, Paris, pp.63, 1984.

VARNES, D.J. *Slope movement types and processes. Landslides analysis and control*. WASHINGTON, D. C., National Academy of Sciences, pp.11-33, 1978.

WHIPPLE, K.; DUNNE, T. The influence of debris flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. Geol. Soc. Am. Bull, 104, 887-900, 1992 *apud* COUSSOUT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. *Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 8, p. 865-868, Ago. 1998.

WONG, H. N.; HO, K.; CHAN, Y. C. *Assessment of Consequences of Landslide*. Workshop on Landslide Risk Assessment in Practise, Honolulu, February 1997, in Landslide Risk Assessment, Cruden and Fell (Editors), Balkema, Rotteerdam *apud* PACHECO, M. *Frequency distribution of mortality in cut and fill slope*. Revista Solos e Rochas. V. 24, n. 1, jan-abr, 2001.

ZUQUETE, L. V. *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamento e guia para elaboração*. Tese de livre docência EESC/USP, São Carlos. 2v, 1983 *apud*

BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes. *Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe – PE*. 2003. 209p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003