

Ecidinéia Pinto Soares


BIBLIOTECA CENTRAL  
- UFV -

529.553

23.12.96

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE DA MINA DE ÁGUAS  
CLARAS - MBR: UMA VISÃO PROBABILÍSTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

<b>UFV</b>	BIBLIOTECA	BBT	OBRA	RG000720436
	CLASSIFICAÇÃO T 624.151363 / S676a / 1996			
TÍTULO Análise de estabilidade de um talude da mi				
				
129151		BBT		

T  
624.151363  
5676a  
1996  
ex.1

Conselheiro  
D.D. 19. ed. 624.151363  
1996

Conselheiro  
D.D. 19. ed. 624.151363  
1996

Prof. José Carlos Virgili

Prof. Sérgio Antônio Rohm

**VIÇOSA**  
**MINAS GERAIS - BRASIL**  
**NOVEMBRO - 1996**

Orientador

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S676a  
1996

Soares, Ecidinéia Pinto, 1963-  
Análise de estabilidade de um talude da mina de Águas  
Claras - MBR: uma visão probabilística / Ecidinéia Pinto  
Soares. - Viçosa : UFV, 1996.  
66p. : il.

Orientador: Benedito de Souza Bueno  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Taludes - Estabilidade. 2. Taludes - Análise probabilística. 3. Taludes - Análise determinística. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

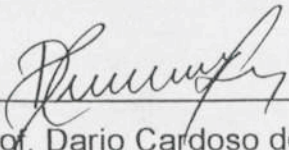
CDD. 19.ed. 624.151363  
CDD. 20.ed. 624.151363

**Ecidinéia Pinto Soares**

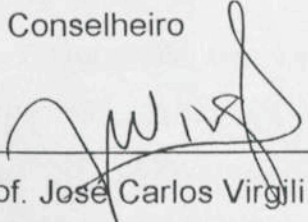
**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE DA MINA DE ÁGUAS  
CLARAS - MBR: UMA VISÃO PROBABILÍSTICA**

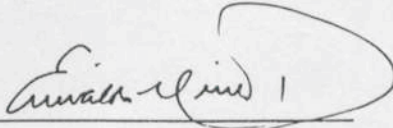
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

APROVADA - 29 de março de 1996.

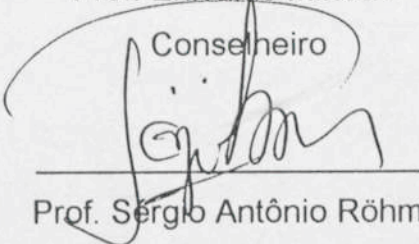
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dario Cardoso de Lima

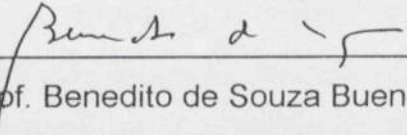
Conselheiro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Carlos Virgili

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Enivaldo Minette

Conselheiro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sérgio Antônio Röhm

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Benedito de Souza Bueno  
Orientador

## AGRADECIMENTO

A

Francelina de Almeida Pinto Soares e  
Ecídia Maria Pinto Soares.

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de estudo.

A Minerações Brasileiras Reunidas S/A - MBR, pelo fornecimento dos dados necessários, em especial ao geólogo René de Souza Viel, pela atenção dispensada desde o início do trabalho.

Aos Professores do Departamento de Matemática da UFV, Bráz Moura Freitas, Olimpio Hiroshi Miyagaki e Laerte Dias de Carvalho, pela atenção nas sugestões.

Aos Professores Dario Cardoso de Lima, Envaldo Minetta, Eduardo Antônio Gomes Marques, Maria Lúcia Caijuri e, em especial, ao Professor José Carlos Virgílio, pelo profissionalismo e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Professor Benedito de Souza Bueno, pela orientação segura e eficiente.

A todos os colegas de curso, que o transformaram em um trabalho de equipe, especialmente a Claudia Brandt, Eduardo Meccedo Bhering, Rogério Mercandelle Sartana, Germano Silva Lopes e Eduardo Inácio Baptista.

A Antonio Ananias de Mendonça e a todos os funcionários, professores e estudantes do Setor de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFV, em especial à Cristina Beatriz Costa Vasconcelos e ao João Carlos dos Santos, pela constante colaboração.

## AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de estudo.

A Minerações Brasileiras Reunidas S/A - MBR, pelo fornecimento dos dados necessários, em especial ao geólogo René de Souza Viel, pela atenção dispensada desde o início do trabalho.

Aos Professores do Departamento de Matemática da UFV, Bráz Moura Freitas, Olímpio Hiroshi Miyagak e Laerte Dias de Carvalho, pela atenção nas sugestões.

Aos Professores Dario Cardoso de Lima, Enivaldo Minette, Eduardo Antônio Gomes Marques, Maria Lúcia Calijuri e, em especial, ao Professor José Carlos Virgili, pelo profissionalismo e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Professor Benedito de Souza Bueno, pela orientação segura e eficiente.

A todos os colegas de curso, que o transformaram em um trabalho de equipe, especialmente a Claudia Brandt, Eduardo Macedo Bhering, Rogério Mercandelle Santana, Germano Silva Lopes e Eduardo Inácio Baptista.

A Antônio Ananias de Mendonça e a todos os funcionários, professores e estudantes do Setor de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFV, em especial à Cristina Beatriz Costa Vasconcelos e ao Júlio Carlos dos Santos, pela constante disponibilidade.

## BIOGRAFIA

ECIDINÉIA PINTO SOARES, filha de Cicuro Soares e Francelina de Almeida Pinto Soares, nasceu em 7 de dezembro de 1963, na Cidade do Rio de Janeiro/RJ.

Em julho de 1988, graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em Belo Horizonte.

De 1988 a 1993, trabalhou na área de Engenharia Geotécnica, na iniciativa privada.

Em fevereiro de 1993, concluiu o Curso de Especialização em Engenharia de Barragens pela Universidade Federal de Ouro Preto, em Ouro Preto-MG.

Em março de 1994, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

## BIOGRAFIA

**ECIDINÉIA PINTO SOARES**, filha de Cícero Soares e Francelina de Almeida Pinto Soares, nasceu em 7 de dezembro de 1963, na Cidade do Rio de Janeiro/RJ.

Em julho de 1988, graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em Belo Horizonte.

De 1986 a 1993, trabalhou na área de Engenharia Geotécnica, na iniciativa privada.

Em fevereiro de 1993, concluiu o Curso de Especialização em Engenharia de Barragens pela Universidade Federal de Ouro Preto, em Ouro Preto-MG.

Em março de 1994, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

3.3. Análises da área de interesse.....	32
3.3.1. Aspectos geológicos.....	32
3.3.2. Aspectos hidrogeológicos.....	38
3.4. Estudos previamente realizados.....	38
3.4.1. Ensaio de laboratório.....	38
3.4.2. Relatórios realizados.....	40
3.5. Tratamento dos parâmetros.....	43
3.5.1. Resumo dos dados analisados.....	43
<b>4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....</b>	<b>47</b>
4.1. Aspectos gerais.....	47
4.2. Análise determinística.....	49
4.2.1. Análises de sensibilidade.....	49
4.2.2. Análises das superfícies de ruptura.....	53
4.2.3. Análise das parcelas de resistência.....	54
4.3. Análise probabilística.....	54
4.3.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado.....	56
4.3.2. Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição.....	56
	<b>Página</b>
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
EXTRATO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivo e justificativa da análise.....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Considerações iniciais.....	6
2.2. Métodos e procedimentos.....	12
2.2.1. Teoria da Probabilidade e Estado-Limite.....	12
2.2.1.1. Segurança das estruturas segundo o Eurocódigo.....	13
2.2.2. Teoria da Confiabilidade.....	16
3. DESCRIÇÃO DA ÁREA ANALISADA.....	26
3.1. Área de estudo.....	26
3.2. Histórico do deslizamento do <i>Morro do Patrimônio</i> .....	28

3.3. Análises da área de interesse.....	32
3.3.1. Aspectos geológicos.....	32
3.3.2. Aspectos hidrogeológicos.....	38
3.4. Estudos previamente realizados.....	38
3.4.1. Ensaios de laboratório.....	38
3.4.2. Relatórios realizados.....	40
3.5. Tratamento dos parâmetros.....	43
3.5.1. Resumo dos dados analisados.....	45
4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....	47
4.1. Aspectos gerais.....	47
4.2. Análise determinística.....	49
4.2.1. Análises de sensibilidade.....	49
4.2.2. Análises das superfícies de ruptura.....	53
4.2.3. Análise das parcelas de resistência.....	54
4.3. Análise probabilística.....	54
4.3.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado.....	56
4.3.2. Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição Normal.....	56
4.4. Comentários.....	60
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

Quadro 4 - Função de distribuição cumulativa, $F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$ , para distribuição normal.....	18
---	----

Quadro 5 - Probabilidade de ruptura.....	24
--	----

Quadro 6 - Grau de alteração/coerência.....	35
---	----

Quadro 7 - Características e tipos de eventos possíveis de ocorrer no "pil" da mina.....	37
--	----

Quadro 8 - Resumo dos parâmetros de hemília obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR).....	45
---	----

Quadro 9 - Média dos parâmetros do Quadro 8.....	45
--	----

Quadro 10 - Resumo dos parâmetros de labirito obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR).....	45
---	----

Quadro 11 - Média dos parâmetros do Quadro 10.....	45
--	----

Quadro 12 - Parâmetros utilizados para o cálculo determinístico do FS.....	50
Quadro 13 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $c'$ .....	50
Quadro 14 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $\phi'$ .....	53
Quadro 15 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $\gamma$ .....	54
Quadro 16 - Planilha para o cálculo do FS pelo método de Janbu.....	55
Quadro 17 - Cálculo das parcelas relativas a $c'$ e $\phi'$ .....	58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critério para análise probabilística da estabilidade de um talude.	11
Quadro 2 - Valores para $P_{ft}$ .....	14
Quadro 3 - Valores para quantificação dos coeficientes de segurança parciais para cálculo de estruturas geotécnicas.....	15
Quadro 4 - Função de distribuição cumulativa, $F_u = \int_{-\infty}^u f(u) du$ , para distribuição normal.....	19
Quadro 5 - Probabilidade de ruptura.....	24
Quadro 6 - Graus de alteração/coerência.....	35
Quadro 7 - Características e tipos de eventos possíveis de ocorrer no "pit" da mina.....	37
Quadro 8 - Resumo dos parâmetros de hematita obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR).....	45
Quadro 9 - Média dos parâmetros do Quadro 8.....	45
Quadro 10 - Resumo dos parâmetros de itabirito obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR).....	46
Quadro 11 - Média dos parâmetros do Quadro 10.....	46

Quadro 12 - Parâmetros utilizados para o cálculo determinístico do <i>FS</i> .....	50
Quadro 13 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $c'$ .....	50
Quadro 14 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $\phi'$ .....	53
Quadro 15 - Análise de sensibilidade para o parâmetro $\gamma$ .....	54
Quadro 16 - Planilha para o cálculo do <i>FS</i> pelo método de Janbu.....	55
Quadro 17 - Cálculo das parcelas relativas a $c'$ e $\phi'$ .....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Função de Estado-Limite ( $Z$ ) e Índice de Confiabilidade ( $\beta$ ).....	18
Figura 2 - Modelo de distribuição resistênciadevolatilização.....	24
Figura 3 - Localização da área analisada.....	27
Figura 4 - Mapa geral da cave da MAC.....	29
Figura 5 - Seção S1 - Morro do Patrimônio.....	31
Figura 6 - Mapeamento geológico-esvaziada da MAC.....	33
Figura 7 - Exemplo de apresentação de resultados de um talude seco, de uma análise probabilística.....	48
Figura 8 - Exemplo de apresentação de resultados para um talude de 50 m de altura, de uma análise probabilística para diferentes posições de nível d'água.....	48
Figura 9 - Relação entre Fator de Segurança ( <i>FS</i> ) e Coesão Efetiva ( $c$ ).....	51
Figura 10 - Relação entre Fator de Segurança ( <i>FS</i> ) e Ângulo do Ato ( $\phi$ ).....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Função de Estado-Limite ( $Z$ ) e Índice de Confiabilidade ( $\beta$ ). .....	18
Figura 2 - Modelo de distribuição resistência/solicitação. ....	24
Figura 3 - Localização da área analisada. ....	27
Figura 4 - Mapa geral da cava da MAC. ....	29
Figura 5 - Seção S1 - <i>Morro do Patrimônio</i> . ....	31
Figura 6 - Mapeamento geológico-estrutural da MAC. ....	33
Figura 7 - Exemplo de apresentação de resultado, de um talude seco, de uma análise probabilística. ....	48
Figura 8 - Exemplo de apresentação de resultado, para um talude de 60 m de altura, de uma análise probabilística para diferentes situações de nível d'água. ....	48
Figura 9 - Relação entre Fator de Segurança ( $FS$ ) e Coesão Efetiva ( $c'$ ). ....	51
Figura 10 - Relação entre Fator de Segurança ( $FS$ ) e Ângulo de Atrito ( $\phi'$ ). .	52

## EXTRATO

SOARES, Ecidinéia Pinto, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 1996. *Análise de estabilidade de um talude da mina de Águas Claras - MBR: uma visão probabilística*. Professor Orientador: Benedito de Souza Bueno. Professores Conselheiros: Dario Cardoso de Lima e Enivaldo Minette.

Nos últimos anos, muito se tem discutido a respeito do desenvolvimento de novas técnicas da Engenharia Civil, em especial no que concerne às análises probabilísticas. Considerando-se a exigência do mercado, que cada vez mais impõe soluções de engenharia que garantam a segurança e diminuam os custos das obras civis, novos métodos e novas técnicas são continuamente pesquisados. Esta questão é clara quando se trata de projetos de estabilidade de taludes que, tradicionalmente, empregam métodos determinísticos em suas análises. As ferramentas e técnicas habitualmente usadas no dimensionamento de taludes, quer sejam analíticas, quer sejam gráficas e a duas ou três dimensões, geralmente não levam em conta a variabilidade e a dispersão dos parâmetros em questão. É possível estabelecer modelos estatísticos para todos os parâmetros geológico-

geotécnicos envolvidos em uma análise de estabilidade e, por meio de métodos específicos, definir probabilidades de ruptura. Em um enfoque probabilístico, o profissional de Geotecnia pode incorporar à sua análise o grau de confiabilidade que ele possui a respeito dos dados de cada estudo em particular. É com base nessas premissas que este trabalho foi desenvolvido, tomando-se como caso de estudo o deslizamento ocorrido na Mina de Águas Claras, pertencente a Minerações Brasileiras Reunidas S/A, em 29 de abril de 1992. Para o estudo determinístico realizado, chegou-se a um fator de segurança de 1,12, valor atualmente aceito dentro de determinados limites de risco para a mineração. Para o mesmo caso, foi acrescentada uma análise probabilística que forneceu resultado igual a 42,9% como probabilidade de ruptura, valor esse inaceitável dentro dos limites estabelecidos como referência. Mediante a análise dos resultados alcançados, foi demonstrada a clara vantagem em se procederem às análises conjuntas dos métodos determinístico e probabilístico, obtendo-se informações adicionais importantes acerca das decisões a serem tomadas para a resolução do problema em questão.

*Erivaldo Pinto, M.Sc., Federal University of Viçosa, november. Stability of a slope in the Águas Claras - MBR mining: a probabilistic view. Advisor: Benedito de Souza Gusmão. Committee members: Dario Cardoso de Lima and Erivaldo Minatta.*

Developments in research methodology applied to Civil Engineering, particularly probability analysis, have been discussed. Methods and techniques are continuously analyzed for engineering solutions increasing safety and decreasing costs of civil works. This question becomes clear as one deals with slope stability projects. Traditionally, these projects apply deterministic procedures. Most common tools and techniques used in slope measurement usually do not take into account parameter variability. However, it is possible to fit statistical models for all geologic-geotechnic parameters involved in a stability analysis. Using specific procedures is thus feasible to define fracture probabilities. Under a probabilistic framework, geotechnics professionals may include confidence limits concerning the data of each specific study. The present research was based on those arguments. The sliding occurred in April 29, 1992 at the Águas Claras Mine was used as a case study. Results obtained

show the advantage of applying the deterministic and probabilistic procedures. First, the probabilistic approach is more easily applied to the specific problem.

## ABSTRACT

SOARES, Ecidinéia Pinto, M.S., Federal University of Viçosa, november, 1996. *Stability of a slope in the Águas Claras - MBR mining: a probabilistic view*. Advisor: Benedito de Souza Bueno. Committee members: Dario Cardoso de Lima and Enivaldo Minette.

Developments in research methodology applied to Civil Engineering, particularly probability analysis, have been discussed. Methods and techniques are continuously analysed for engineering solutions increasing safety and decreasing costs of civil works. This question becomes clear as one deals with slope stability projects. Traditionally, these projects apply deterministic procedures. Most common tools and techniques used in slope measurement usually do not take into account parameter variability. However, it is possible to fit statistical models for all geologic-geotechnic parameters involved in a stability analysis. Using specific procedures is thus feasible to define fracture probabilistics. Under a probabilistic framework, geotechnics professionals may include confidence limits concerning the data of each specific study. The present research was based on those arguments. The slinding occurred in April 29, 1992 at the Águas Claras Mine was used as a case study. Results obtained

show the advantages of employing both deterministic and probabilistic procedures. Further import information is additionally provided on the specific problem.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Generalidades

A prática da engenharia exige, cada vez mais, soluções que estreitem ao máximo a relação segurança/economia. Nesse contexto, uma das áreas de maior destaque é, sem dúvida, aquela concernente aos problemas de estabilidade de taludes. Um exemplo clássico é o projeto de taludes para mineração a céu aberto, onde os riscos de ruptura convivem com a operação econômica "par e passu", à medida que se processa a extração mineral. Se, por um lado, taludes íngremes implicam menores volumes de escavação de material, portanto, menores custos de exploração, por outro lado eles podem pôr em risco valores materiais e humanos de considerável magnitude. Conviver com tais riscos, em que um acidente de grande porte pode contrapor-se aos custos de soluções mais conservadoras, faz parte do cotidiano das atividades minerais. No campo rodoviário, também com raras exceções, adota-se a igual postura.

Ao longo dos anos, apesar dos esforços da comunidade geotécnica mundial em somar conhecimentos acerca dos mecanismos de ruptura e dos métodos de análise de estabilidade de taludes, acidentes continuam

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Generalidades

A prática da engenharia exige, cada vez mais, soluções que estreitem ao máximo a relação segurança/economia. Nesse contexto, uma das áreas de maior destaque é, sem dúvida, aquela concernente aos problemas de estabilidade de taludes. Um exemplo clássico é o projeto de taludes para mineração a céu aberto, onde os riscos de ruptura convivem com a questão econômica "pari e passu", à medida que se processa a extração mineral. Se, por um lado, taludes íngremes implicam menores volumes de escavação de estéril e, portanto, menores custos de exploração, por outro lado eles podem pôr em risco valores materiais e humanos de considerável magnitude. Conviver com tais riscos, em que um acidente de grande porte pode contrapor-se aos custos de soluções mais conservadoras, faz parte do cotidiano das atividades mineiras. No campo rodoviário, também com raras exceções, adota-se igual postura.

Ao longo dos anos, apesar dos esforços da comunidade geotécnica mundial em aperfeiçoar os conhecimentos acerca dos mecanismos de ruptura e dos métodos de análise de estabilidade de taludes, acidentes continuam

acontecendo com relativa freqüência, na sua maioria relacionados a taludes naturais urbanos e a períodos de chuvas intensas. No Brasil, isso se deve ao crescimento desordenado das cidades, que se iniciou com o desenvolvimento do parque industrial desencadeado a partir do final da década de 50. Além disso, os registros de acidentes são falhos e, só recentemente, dados mais confiáveis tornaram-se disponíveis ao meio técnico. Parcela considerável de escorregamentos urbanos é pouco estudada, e o grosso das informações disponíveis é de cunho jornalístico. Assim, torna-se importante qualquer contribuição de caráter científico que se faça à questão da estabilidade de taludes naturais em nosso País.

Não só na área geotécnica, como em todos os campos da ciência, percebe-se que fases muito produtivas de estudos e pesquisas seguem-se de desastres, demonstrando a importância do aprimoramento de critérios de projeto para as obras civis.

Em taludes de mineração, vale a pena ressaltar dois acidentes recentes não só pela magnitude, como pela importância dentro do contexto de atividades geotécnicas mineiras, quais sejam:

(i) *Ruptura da Barragem de Rejeitos da Mina do Fernandinho em Itabirito (MG), ocorrida em maio de 1986*: de acordo com PARRA e LASMAR (1987), tratava-se de uma barragem de mineração alteada com o próprio rejeito. Este era lançado em camadas de grande espessura (1 a 2 m), sem qualquer compactação. No momento do acidente, a barragem tinha cerca de 40 m de altura, e trabalhavam no seu topo três caminhões e uma pá-carregadeira, que foram envolvidos, juntamente com seus operadores, e arrastados pela massa liquefeita. Segundo esses autores, o escorregamento ocorreu pelo fato de a inclinação e a altura do talude de jusante não estarem compatíveis com a resistência ao cisalhamento do material empregado e com as pressões neutras desenvolvidas no corpo da barragem.

(ii) *Ruptura do Morro do Patrimônio, situado na Mina de Águas Claras (MAC), pertencente a Minerações Brasileiras Reunidas S/A (MBR), Município de Nova Lima (MG), ocorrida em abril de 1992*: ruptura de um talude dentro da MAC, conhecido como *Morro do Patrimônio*, que fazia parte de uma área tombada pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Esse deslizamento,

felizmente, não acarretou perdas humanas. O acidente ocorreu por volta das seis horas, já no momento da troca de turno dos operários, havendo apenas três equipamentos trabalhando próximo do local. A massa de minério deslocada alcançou uma distância de 500 m dentro da cava da mina.

Ressalta-se que os danos associados a taludes compactados são mais raros pelo fato de que estes apresentam constituições mais homogêneas, são conhecidos mais intimamente e adequam-se mais freqüentemente aos mecanismos de ruptura que formam o arcabouço de sustentação dos métodos de estabilidade disponíveis.

A importância de se dispor de ferramentas apropriadas para análises de estabilidade, ao lado do conhecimento técnico dos condicionantes geológico-geotécnicos, que podem impor formas particulares de comportamento ao maciço, é um aspecto inquestionável na análise de estabilidade de taludes.

A grande maioria dos processos de dimensionamentos de taludes disponíveis se baseia, do ponto de vista geotécnico, em um enfoque determinístico. Tal forma de análise consiste na seleção de valores adequados para as variáveis dominantes no processo e no cálculo dos fatores de segurança dos taludes contra ruptura, quantificando-se a relação entre a resistência interna do maciço e as solicitações de projeto, para determinado problema em questão. Fica implícita a inclusão, nos cálculos, das incertezas que vêm da variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do material do talude e das próprias solicitações impostas, visto que estas dependem também do peso específico do material. Todos esses parâmetros podem apresentar variabilidade espacial significativa que nem sempre é detectada ou incluída nas análises de estabilidade convencionais.

Mais recentemente, a questão da estabilidade de encostas vem, também, sendo tratada por intermédio de uma outra abordagem: o enfoque probabilístico, que objetiva reconhecer as incertezas e variabilidades básicas dos parâmetros geotécnicos dominantes. Pelas distribuições de probabilidade, tais parâmetros são definidos de maneira que os resultados obtidos sejam expressos, também, por meio de distribuições de probabilidade. Procura-se, dessa forma, explicitar o grau de confiança nas variáveis envolvidas, desde as

suas definições até o emprego dos resultados alcançados (TEIXEIRA JR. e VIRGILI, 1984).

Considerando a freqüência com que se trabalha com maciços em solos e, ou, rochas e a complexidade com que são constituídos, justifica-se plenamente o emprego de método um pouco mais laborioso como o probabilístico, a fim de obter resultados confiáveis. Outras justificativas podem ser citadas, como a amostragem dos maciços, cujos mapeamentos para ensaios poucas vezes são representativos. Erros em ensaios também são freqüentes no cotidiano de profissionais de Geotecnia, que têm consciência de sua existência, mas não conseguem computá-los. Enfim, em uma análise probabilística, existe a possibilidade de uma quantificação das incertezas consideradas relevantes para uma análise de estabilidade de taludes. MCMAHON (1971) referiu-se à estimativa da probabilidade de ruptura de um talude como sendo o principal problema geotécnico a ser enfrentado pelas mineradoras de todo o mundo.

No caso específico de taludes de mineração, VIRGILI E TEIXEIRA JR. (1985) ressaltaram que o ângulo de taludes representa o compromisso entre a economia e a segurança das escavações, cabendo à Geologia de Engenharia a função de otimizar a relação entre estes dois fatores, reafirmando a importância dessa ciência dentro do cotidiano de planejamento, projeto e operação das lavras mineradas. Além disso, dada a pequena duração dos taludes de mineração, cuja vida útil de modo geral é muito mais curta do que a dos taludes de uma obra civil, a mineração moderna é levada a projetar taludes muito íngremes, ou seja, com baixos fatores de segurança, sob pena de se tornar o empreendimento antieconômico. Desse modo, o profissional de Geotecnia fica sempre submetido ao trabalho próximo do limite da resistência do maciço, ou seja, próximo do limite de segurança da escavação. Isso implica, obviamente, a necessidade de ampliação e aprofundamento contínuo do estado da arte em engenharia de taludes.

O emprego de métodos probabilísticos em análises de estabilidade de taludes não deve ser visualizado, no entanto, como simples tentativa de substituição do valor do fator de segurança calculado da forma determinística por um correspondente valor de probabilidade de ruptura. O que parece ser

racional é utilizar um enfoque como complemento do outro, ou seja, acredita-se que ambos os procedimentos venham a ser analisados em conjunto, dando maior capacidade ao engenheiro geotécnico de ampliar seu senso crítico a respeito de determinado problema de estabilidade de taludes.

## 1.2 - Objetivo e justificativa da análise

### a) Objetivo

O presente trabalho teve por objetivos, buscar divulgar o emprego de métodos probabilísticos em Geotecnia e proceder ao estudo de caso, via retroanálise e com o emprego dos métodos determinístico e probabilístico, do acidente do talude do *Morro do Patrimônio*, na Mina de Águas Claras (MAC), pertencente a Minerações Brasileiras Reunidas S/A (MBR).

### b) Justificativa da análise

Como consequência da reunião dos fatores citados, apresenta-se este trabalho, que se diferencia dos demais já desenvolvidos no episódio do escorregamento do talude da MAC, pela forma de abordagem. Procurou-se aqui ressaltar os benefícios de se proceder a uma análise de estabilidade de talude conjunta com o emprego dos processos determinístico e probabilístico, enfatizando, contudo, a impossibilidade de se compararem os resultados dessas duas análises.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Considerações iniciais

Muito tem sido discutido, nos últimos anos, a respeito da forma com que certos problemas clássicos de engenharia vêm sendo abordados. CHOWDHURY (s.d.) considerou que escorregamentos de taludes são, dentre todas as estruturas geotécnicas, os tipos que apresentam rupturas mais freqüentes, resultando quase sempre em catástrofes com perdas materiais e humanas. Pode-se ampliar tal afirmação para todo o campo da Engenharia Civil. As causas de tais rupturas são, quase sempre, a falta de caracterização geotécnica adequada dos materiais constituintes dos maciços terrosos e rochosos e de seus condicionantes geológicos e, quando não, a falta absoluta de qualquer quantificação dos fatores de segurança das obras. O referido autor relatou, também, que análises de estabilidade confiáveis requerem sempre uma boa combinação entre métodos de análises simples e sofisticados. Argumentou, ainda, que os métodos tradicionais de cálculo merecem refinamentos e aperfeiçoamentos sistemáticos, enquanto os mais novos devem ser avaliados com cautela e espírito crítico.

Para realização de uma análise de estabilidade de taludes, todos os aspectos que envolvem o problema devem ser levantados e avaliados cuidadosamente, conforme sua importância dentro do caso particular estudado.

Quando o problema envolve maciços rochosos, sabe-se que estes são constituídos pela reunião da rocha-matriz, que pode ser entendida como a rocha dominante no complexo geológico, podendo ocorrer dentro de um mesmo maciço rochoso duas ou mais rochas-matriz e outros materiais, como as descontinuidades, que são entidades geológicas que interrompem a continuidade física do maciço.

Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisótipos e descontínuos. A complexidade que apresentam resulta da evolução geológica a que foram submetidos. Um maciço, por mais homogêneo que possa parecer, sempre apresenta estruturas importantes a serem estudadas em particular, cada uma trazendo contribuições importantes no comportamento do maciço quando submetido às solicitações de serviço. Basicamente, as características que interessam para estudo podem ser divididas em dois grandes grupos:

a) Referentes à matriz rochosa:

- litologia,
- alteração,
- características mecânicas e índices físicos,
- alterabilidade e
- expansibilidade.

b) Referentes às descontinuidades:

- atitude,
- frequência,
- número de famílias,
- abertura,
- preenchimento,
- rugosidade e
- persistência.

Observou-se que alguns fatores decisivos nas análises de estabilidade de taludes variaram entre limites relativamente estreitos, como o ângulo de

atrimento interno das rochas, enquanto outros variaram grandemente, tendo distribuições aleatórias com desvios consideráveis em relação ao valor médio, como a orientação espacial das descontinuidades em determinada parede de escavação. Essas variáveis podem ser medidas em laboratório e no campo, e podem-se associar a elas, com relativa facilidade, valores médios e desvios-padrão correspondentes.

Existem, no entanto, outros tipos de variáveis de importância vital para a análise de estabilidade de um talude e que apresentam grande dificuldade de quantificação, como a classificação das paredes das descontinuidades, se lisas, rugosas, preenchidas ou não, que se mostram subjetivas e dependentes de quem as classificou. Portanto, considera-se que, por mais completo e rigoroso que seja o procedimento adotado para quantificar as variáveis do problema, o julgamento do profissional de Geotecnia não poderá ser dispensado na avaliação dos dados de entrada do projeto nem na avaliação de risco de se escavar um talude com alto ângulo, visando à economicidade do empreendimento. Além disso, não se deve esquecer a caracterização da deformabilidade e resistência, bem como do estado de tensão do maciço como um todo, envolvendo a rocha-matriz e as descontinuidades. Assim, é necessário que se busque uma forma de análise em que todas essas características possam ser consideradas de maneira lógica e segura.

Vale ressaltar a importância que o conhecimento do maciço tem nas análises, tanto determinísticas quanto probabilísticas, possibilitando o trabalho com um modelo geomecânico o mais próximo possível da realidade.

GENEVOIS (1991) alertou para a necessidade de se considerar a variabilidade espacial dos parâmetros, ressaltando que insucessos passados possivelmente tiveram suas causas em função da falta de adequada caracterização das variáveis em questão.

Número razoável de publicações a respeito de análises probabilísticas tem sido discutido nos últimos anos, trazendo à tona novas variáveis e novas incertezas. Ressalta-se que não se procura simplesmente substituir um procedimento já há muito estudado por outro. O ganho de experiência é primordial na introdução de novos métodos, de modo a tentar se estabelecerem bases para comparações de resultados e suas implicações.

O presente trabalho enfocou também uma discussão essencial e um pouco esquecida na engenharia: o fator de segurança. Sabe-se que o *FS* é um importante conceito e o ponto de partida para todas as considerações a respeito de taludes. Porém, é importante dizer que sua interpretação depende da experiência pessoal do profissional de Geotecnia, do sentimento para valores calculados, ressaltando-se que diferenças simples no modelo geomecânico ou no método de análise escolhido conduzem a diferenças significativas nos valores de *FS*.

O cálculo do *FS* sob um conjunto de condições ou para dados estabelecidos de resistência, poro-pressão e geometria do talude constitui o principal objetivo de abordagens tradicionais. As armadilhas destas abordagens são bem conhecidas atualmente, embora um pouco desprezadas. Um valor único calculado é responsável por todas as incertezas trazidas nas análises, o que ocorre é que, acredita-se, tal questão necessita ser reobservada com maior critério. Nesse contexto de estreita margem de trabalho, as análises de risco para convivência controlada com a possibilidade de rupturas devem fazer parte do cotidiano das operações mineiras. Essas análises envolvem alguns aspectos fundamentais, citados por VIRGILI e TEIXEIRA JR. (1985 ), a saber:

- **Economia do projeto** - sem perder de vista a segurança, que é o aspecto mais importante em qualquer projeto, deve-se buscar a solução mais econômica dentre as várias alternativas que todo projeto sempre oferece. A economia do projeto não deve ser confundida com economia na sua elaboração. Nesse aspecto, não se pode prescindir de um programa de investigação e de análise criteriosa de todos os dados necessários ao perfeito entendimento do problema.

- **Nível de responsabilidade** - este pode ser associado a cada talude específico dentro da planta geral das escavações e prende-se a duas questões principais, que são a eventualidade de paralisação dos trabalhos em caso de ruptura e, ou, o soterramento de corpos mineralizados pelo deslizamento. Assim, taludes adjacentes a vias de acesso ou outras instalações do parque mineiro, ou ainda, taludes situados sobre mineralizações importantes sempre vão requerer maior responsabilidade.

Outro fator que determinará a responsabilidade do talude é a sua altura. Quanto mais alto for o talude, maior a probabilidade de ocorrer grande ruptura, que poderá tanto implicar a paralisação das operações por destruição de acessos quanto a necessidade de remoção do material mobilizado. A responsabilidade de um talude será imediatamente influenciada, também, pelo seu caráter provisório ou permanente, ou seja, quanto maior a vida útil de um talude, tanto maior será a sua responsabilidade. Assim, dentro da programação de decapagem de uma mina, poderá haver taludes escavados, em uma primeira etapa, com duração pequena (não definitivos), que posteriormente desaparecerão ao longo do processo de expansão das escavações, na direção dos taludes definitivos.

• **Variabilidade dos dados geológico-geotécnicos envolvidos e das incertezas correspondentes** - sabe-se que meios descontínuos como os maciços rochosos não se comportam de acordo com as hipóteses empregadas nos métodos determinísticos, em que são consideradas a homogeneidade e a isotropia dos materiais analisados. Tal fato impõe a seleção e hierarquização das variáveis mais importantes que intervêm no problema, bem como a utilização de critérios estatísticos de amostragem de dados, para se tentar obter um equacionamento da relação entre solicitações e resistências disponíveis.

No aspecto que se refere ao nível de responsabilidade, deve-se ter em mente, também, que existem vários critérios para análise de risco de determinado empreendimento, com a ressalva de que cada análise feita admite um critério, dependendo de suas características. PRIEST e BROWN (1983), por exemplo, apresentaram um critério para a análise probabilística da estabilidade de taludes, resumido no Quadro 1, que tem como base a consequência da ruptura do talude.

Nesse quadro, tem-se a probabilidade admissível de ruptura correspondente a determinados fatores de segurança, exemplificados para casos diferentes de rupturas. Observa-se, também, sua correspondência com o nível de responsabilidade de cada talude, como citado por VIRGILI e TEIXEIRA JR. (1985).

Quadro 1 - Critério para análise probabilística da estabilidade de um talude

<i>Conseqüência de Ruptura</i>	<i>Exemplos</i>	<i>FS Mínimo</i>	<i>P<sub>r</sub> (FS &lt; 1,0)</i>	<i>P<sub>r</sub> (FS &lt; 1,5)</i>
Não séria	Bancos individuais Taludes baixos e temporários e que não sejam adjacentes a vias de acesso	1,3	0,1	0,2
Moderadamente séria	Todo talude de natureza permanente ou semipermanente	1,6	0,01	0,1
Muito séria	Taludes de tamanho médio a alto, perto de vias de acesso ou acima de instalações permanentes da mina	2,0	0,003	0,05

Fonte: PRIEST e BROWN (1983).

Em face do exposto, mostraram-se claras as vantagens de métodos que, apesar de mais trabalhosos, conduzam a resultados mais seguros, em que as incertezas possam ser levadas em consideração nas análises.

EINSTEIN e BAECHER (1983), referindo-se também ao que foi citado, apresentaram, em artigo, um ciclo de análise de decisão, realçando a interligação entre as duas análises, em que esse ciclo parte da *Fase Determinística*, passando a seguir para a *Fase Probabilística*, *Fase de Informações*, *Decisão*, *Coleta de Novas Informações*, *Banco de Dados* e *Novas Informações*, retornando à *Fase Determinística*. Registra-se aqui, portanto, uma sugestão para a execução de um estudo seguro, detalhado e sempre atualizado de um empreendimento.

Sabe-se que muito está ainda por se discutir a respeito de análises de estabilidade, principalmente no enfoque relativo às análises probabilísticas, podendo ser citado o trabalho desenvolvido por YEGULALP e MAHTAB (1983), que aperfeiçoaram um método estatístico abrangente, que permitirá

prever a distribuição das propriedades mecânicas da rocha intacta em função das suas dimensões físicas.

## 2.2. Métodos e procedimentos

Os processos de cálculo de estabilidade de taludes visam determinar, para dada geometria, que nível de solicitação pode levar um maciço a uma condição de ruptura. Do ponto de vista determinístico, assume-se que haverá sempre um risco de ruptura, independentemente do valor numérico calculado para o Fator de Segurança ( $FS$ ), cujo significado intrínseco deve estar associado a situações reais vivenciadas. Por essa razão, organismos nacionais e internacionais recomendam, para tipos de obras e situações específicas consideradas nos projetos, valores diferentes para os fatores de segurança. Em uma visão probabilística, é comum associar-se o valor de  $FS$  à probabilidade de ocorrência de uma ruptura, como apresentado no Quadro 1.

Os métodos de cálculo do fator de segurança baseados no prisma determinístico foram descritos, com detalhes, em textos clássicos como de LAMBE e WITHMAN (1979), HOEK e BRAY (1981) e LEE et al. (1983), dentre outros; por esta razão, não foram aqui considerados.

Quanto aos métodos probabilísticos, de divulgação mais recente, muitos têm sido desenvolvidos, com base no conceito de dimensionamento pelos estados-limite. Serão apresentados neste trabalho dois desses métodos, a saber: *Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado* e *Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição Normal*.

### 2.2.1. Teoria da Probabilidade e Estado-Limite

Segundo SMITH (1981) o termo ruptura pode ser definido como o colapso de uma estrutura que ocorre para determinado limite de trabalhabilidade ou como a ruptura final dessa estrutura.

Sob o prisma probabilístico, entende-se como probabilidade aceitável de ruptura de uma estrutura,  $P_{ft}$ , um valor ou valores predeterminados, que envolvem aspectos estruturais, regionais e sociais e implicam em risco

aceitável para uma situação definida. A tarefa de se determinar esse conjunto de valores lógicos é o principal interesse de comissões que buscam o desenvolvimento de novos códigos e novas normas que incluam aspectos probabilísticos em suas análises, como a ABNT e os *Eurocódigos*, comentados no tópico seguinte. Um guia de valores para  $P_{ft}$  foi proposto por COLE (1980), podendo ser entendido como o grau de prejuízo que pode ser assumido como aceitável (Quadro 2).

Esses valores normatizados servirão de comparação e referência para os valores de probabilidade real de determinada estrutura, chamado  $P_f$ , calculados a partir do método probabilístico que melhor se ajusta ao problema em estudo.

Notou-se que, para um projeto ideal, a probabilidade real de ruptura  $P_f$  não precisa ser menor que a probabilidade aceitável  $P_{ft}$ . Mediante o uso da *Estatística* e da *Teoria da Probabilidade*, é possível projetar uma estrutura na qual sua probabilidade de ruptura  $P_f$  seja igual à aceitável  $P_{ft}$  e, depois, determinar os parâmetros geotécnicos necessários no projeto.

#### **2.2.1.1. Segurança das estruturas segundo o Eurocódigo**

NEVES (1994) resumiu os progressos feitos nos últimos anos, especialmente na Europa, no que concerne ao emprego dos coeficientes de segurança parciais em Geotecnia. Citou que, dentre os principais trabalhos em desenvolvimento para estudar novas formas de dimensionamentos, estão os Eurocódigos (EC), criados pelo Comitê Europeu de Normatização e que são um conjunto de normas que buscam unificar alguns procedimentos básicos para diferentes estruturas e materiais. O EC7 foi aprovado em 1993 e corresponde às estruturas geotécnicas. Define os estados-limite que se devem verificar, dependendo da estrutura geotécnica em questão, assim como os coeficientes de segurança parciais relativos aos materiais geotécnicos.

O coeficiente de segurança parcial ( $\gamma_i$ ) pode ser entendido como um valor numérico calculado para cada parâmetro (coesão, ângulo de atrito, peso específico etc.) e é igual à razão entre o valor definido para o cálculo do dimensionamento, ou valor de projeto ( $x_i^*$ ), e a média encontrada para esse

Quadro 2 - Valores para  $Pft$

$Pft$ (Total)	Grau de Prejuízo	$Pft$ (Projeto)
$> 10^{-1}$	Inconveniente	$> 10^{-2}$
$10^{-1}$ a $10^{-3}$	Pequenos reparos necessários	$10^{-2}$ a $10^{-4}$
$10^{-3}$ a $10^{-5}$	Grandes reparos necessários	$10^{-4}$ a $10^{-6}$
$< 10^{-5}$	Grandes prejuízos e, ou, desastres	$< 10^{-6}$

Fonte: COLE (1980).

mesmo parâmetro ( $m_{x_i}$ ). Assim:

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{m_{x_i}} \quad (1)$$

Valores a serem preconizados pelo EC7 para os coeficientes de segurança parciais foram relatados por NEVES (1994), fazendo-se, também, uma diferenciação com relação ao tipo de estrutura analisada. Tratando-se de estruturas essencialmente geotécnicas e, assim, para análise de estabilidade de taludes, o caso crítico a ser analisado será o que está resumido no Quadro 3, em que os valores apresentados se referem aos coeficientes de minoração a serem aplicados aos parâmetros de resistência do solo.

Para diferentes países existem versões diferentes de Eurocódigos que dependem da prática corrente neles adotadas. Assim, a determinação do nível de segurança pretendido para as estruturas geotécnicas é da competência de cada país, mas o principal objetivo desse documento é a quantificação dos coeficientes de segurança parciais. Espera-se que, ao final da inclusão de todas as modificações recomendadas pela prática, o EC7 venha a ser uma Norma Européia (EN). Fica, assim, evidente que a publicação dessa norma acarretará grandes alterações na elaboração dos projetos de estruturas geotécnicas vigentes na maioria dos países europeus. No Brasil, espera-se

Quadro 3 - Valores para quantificação dos coeficientes de segurança parciais para cálculo de estruturas geotécnicas

Propriedades do Terreno			
Ângulo de atrito interno efetivo $tg \phi'$	Coesão efetiva $c'$	Resistência ao corte não drenado $c_u$	Resistência à compressão uniaxial $q_u$
1,25	1,60	1,40	1,40

Fonte: NEVES (1994).

que igual interesse dos profissionais nessa área contribua para o desenvolvimento de projetos mais arrojados e seguros. Assim, para obter os coeficientes de segurança parciais com uma probabilidade de ruptura admissível, com base na *Teoria Probabilística*, pode-se recorrer a três níveis diferentes de análise para o cálculo de uma estrutura, citados por NEVES (1994):

- **Nível I** - caracteriza o sistema dos Eurocódigos e envolvem as definições dos valores característicos das principais propriedades do maciço que condicionam a sua estabilidade e os respectivos coeficientes parciais de segurança, previamente tabelados. A probabilidade de ruptura  $P_f$  não aparece de forma explícita, uma vez que, quando os coeficientes de segurança parciais são respeitados, a estrutura permanece em segurança. Em síntese, nessas normas, a análise consiste em uma calibração mediante a comparação dos resultados da aplicação da prática habitual com os resultados obtidos pelos valores dos coeficientes de segurança parciais preconizados pelo EC7. Essa calibração é obtida pela comparação direta dos resultados.
- **Nível II** - é também conhecido como Método do Índice de Confiabilidade, por utilizar a *Teoria da Confiabilidade* como ferramenta de suporte. Nele, a probabilidade de ruptura  $P_f$  é dada em função de um índice ( $\beta$ ), chamado de *Índice de Confiabilidade*. Esse método pode ser empregado de duas formas:

diretamente como método de projeto ou, de forma mais usual, para a quantificação dos coeficientes parciais de segurança usados nos métodos do Nível I. Consiste em uma análise da confiabilidade do sistema, por meio da verificação da segurança em determinado ponto (ou pontos) da superfície de ruptura - superfície essa definida por uma função de estado-limite ( $Z$ ), assumida para o projeto em questão. Para a obtenção do  $Z$  limite, recorre-se ao *Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado*. Dessa forma, determinam-se quais os parâmetros necessários para se ter uma probabilidade aceitável de ruptura. Em termos gerais, é preciso destacar que, quando se utiliza o Nível II, assume-se a iminência de ruptura tal como um equilíbrio-limite, mas são utilizados conceitos probabilísticos para descrever a variabilidade dos parâmetros básicos do maciço em foco.

- **Nível III** - é usado na análise de estruturas especiais em que o nível de confiabilidade é decisivo ou quando é imprescindível otimizar o projeto. É essencialmente matemático.

O prosseguimento do presente trabalho recaiu em análises correspondentes às do *Nível II*, como será mostrado no tópico subsequente, com o emprego da *Teoria da Confiabilidade*.

### 2.2.2. Teoria da Confiabilidade

A *Teoria da Confiabilidade* aplica-se no caso de haver apenas uma variável básica envolvida no problema a ser analisado. Para elucidar seus conceitos, considera-se a seguinte situação: sejam dois conjuntos de variáveis aleatórias, um de resistência de uma estrutura particular,  $R$ , e outro composto por um sistema de solicitações,  $S$ , ao qual a estrutura será submetida. A ruptura irá ocorrer quando o valor da solicitação exceder o valor da resistência.

Quando são conhecidas as funções densidade de probabilidade ( $f_{dp}$ ) de  $R$  e  $S$  e definido  $Z$  como uma função que possa ser expressa como a resistência,  $R$ , menos a solicitação,  $S$ , tem-se:  $Z = (R-S)$  (ver Figura 1). A partir dessa expressão, pode-se assegurar que a ruptura irá ocorrer quando  $S > R$  ou quando  $Z < 0$ . A ruptura será iminente quando  $S = R$  ou  $Z = 0$ .

Em virtude do exposto, define-se a probabilidade de ruptura  $P_f$  como

$$P_f = P(R = S) = P(Z = 0) \quad (2)$$

representando  $Z$  a função de estado-limite correspondente ao modo de ruptura.

Na Figura 1, tem-se que a distância da média de  $Z$ ,  $m_z$ , ao ponto  $Z = 0$ , expressa em termos do desvio-padrão de  $Z$ ,  $\sigma_z$ , é igual a  $\beta\sigma_z$ , em que  $\beta$  é o Índice de Confiabilidade do sistema.

Assim:

$$m_z = \sigma_z = \beta\sigma_z \quad (3)$$

Mas o parâmetro  $\beta$  é igual a

$$\beta = m_z = m_R - m_S \quad (4)$$

sendo  $m_R$  e  $m_S$  as médias da resistência e da solicitação, respectivamente:

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (5)$$

ou:

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sigma_z} \quad (6)$$

e

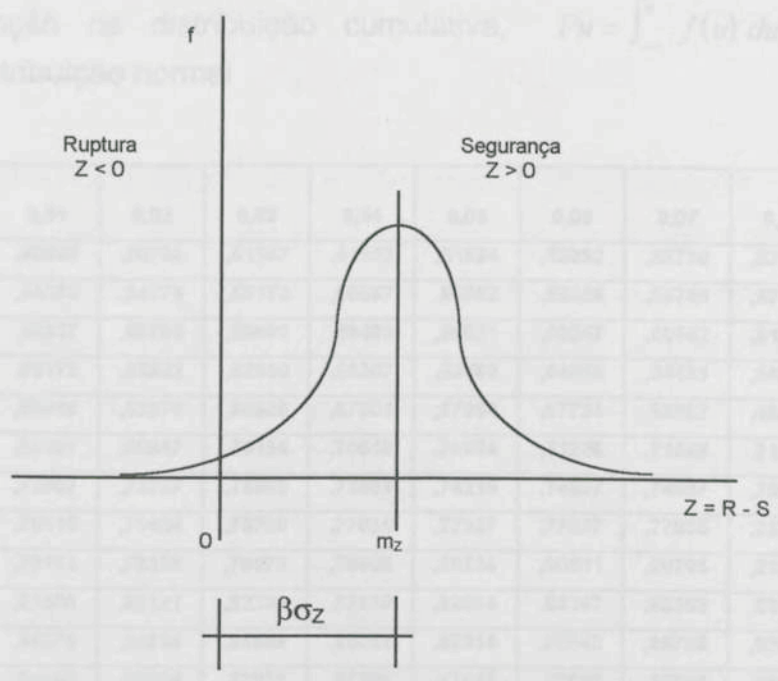
$$FS = \frac{m_R}{m_S} \quad (7)$$

Nos métodos probabilísticos, o valor da probabilidade de ruptura  $P_f$  pode ser obtido a partir da expressão

$$P_f = F(\beta) \quad (8)$$

O segundo membro da Equação 8 pode ser entendido como a probabilidade acumulada de determinada estrutura atingir o estado-limite durante um período de referência e é obtido diretamente por meio de tabelas de valores acumulados da distribuição normal (ver Quadro 4). Para que isso

0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1	0.0398	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2	0.0794	0.0016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.3	0.1179	0.0044	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.4	0.1543	0.0094	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.5	0.1881	0.0175	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.6	0.2199	0.0287	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.7	0.2490	0.0439	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.8	0.2750	0.0637	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.9	0.2983	0.0888	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0	0.3190	0.1170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.1	0.3365	0.1486	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.2	0.3508	0.1841	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.3	0.3616	0.2239	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.4	0.3689	0.2673	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.5	0.3730	0.3143	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.6	0.3750	0.3643	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.7	0.3750	0.4177	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.8	0.3745	0.4745	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.9	0.3734	0.5339	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0	0.3719	0.5959	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.1	0.3700	0.6606	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.2	0.3679	0.7279	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.3	0.3655	0.7979	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.4	0.3629	0.8706	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.5	0.3601	0.9459	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.6	0.3571	1.0239	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.7	0.3539	1.1046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.8	0.3505	1.1880	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.9	0.3470	1.2741	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0	0.3435	1.3629	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.1	0.3400	1.4544	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.2	0.3364	1.5487	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.3	0.3328	1.6458	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.4	0.3292	1.7457	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.5	0.3256	1.8484	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.6	0.3220	1.9538	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.7	0.3184	2.0619	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.8	0.3148	2.1727	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.9	0.3112	2.2862	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.0	0.3076	2.4024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.1	0.3040	2.5213	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.2	0.3004	2.6429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.3	0.2968	2.7672	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.4	0.2932	2.8942	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.5	0.2896	3.0239	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.6	0.2860	3.1563	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.7	0.2824	3.2914	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.8	0.2788	3.4292	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.9	0.2752	3.5697	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.0	0.2716	3.7129	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Fonte: NEVES (1994).

Figura 1 - Função de Estado-Limite (Z) e Índice de Confiabilidade (β).

ocorra, as variáveis envolvidas devem ser representadas por curvas de distribuição normal.

Observa-se que é aconselhável e prático proceder ao cálculo de  $\beta$ , em termos de variáveis reduzidas ou normalizadas. Resumindo, a conversão em variáveis reduzidas permite a utilização de tabelas de valores relativos à distribuição normal, que é a distribuição mais comum, inclusive no tratamento dos parâmetros geotécnicos, o que foi constatado por vários autores.

PRIEST e BROWN (1983) apresentaram um histograma de resultados de ensaios de compressão uniaxial, realizados em amostras de arenitos de Mantinenda, confirmando a forma de distribuição normal referida acima.

Percebe-se que o coeficiente de segurança global,  $FS$ , na Equação 7 é uma expressão puramente determinística, diferente da Equação 6, em que a inclusão de  $\sigma_z$  gera medidas das incertezas de  $R$  e  $S$ . Logo, conclui-se que  $\beta$  conduz a uma melhor quantificação da segurança do sistema em estudo.

Quadro 4 - Função de distribuição cumulativa,  $Fu = \int_{-\infty}^u f(u) du$ , para distribuição normal

u	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	,50000	,50399	,50798	,51197	,51595	,51994	,52392	,52790	,53188	,53586
0,1	,53983	,54380	,54776	,55172	,55567	,55962	,56356	,56749	,57142	,57535
0,2	,57926	,58317	,58706	,59095	,59483	,59871	,60257	,60642	,61026	,61409
0,3	,61791	,62172	,62552	,62930	,63307	,63683	,64058	,64431	,64803	,65173
0,4	,65542	,65910	,66276	,66640	,67003	,67364	,67724	,68082	,68439	,68793
0,5	,69146	,69497	,69847	,70194	,70540	,70884	,71226	,71566	,71904	,72240
0,6	,72575	,72907	,73237	,73565	,73891	,74215	,74537	,74857	,75175	,75490
0,7	,75804	,76115	,76424	,76730	,77035	,77337	,77637	,77935	,78230	,78524
0,8	,78814	,79103	,79389	,79673	,79955	,80234	,80511	,80785	,81057	,81327
0,9	,81594	,81859	,82121	,82381	,82639	,82894	,83147	,83398	,83646	,83891
1,0	,84134	,84375	,84614	,84849	,85083	,85314	,85543	,85769	,85993	,86214
1,1	,86433	,86650	,86864	,87076	,87286	,87493	,87698	,87900	,88100	,88298
1,2	,88493	,88686	,88877	,89065	,89251	,89435	,89617	,89796	,89973	,90147
1,3	,90320	,90490	,90658	,90824	,90988	,91149	,91309	,91466	,91621	,91774
1,4	,91924	,92073	,92220	,92364	,92507	,92647	,92785	,92922	,93056	,93189
1,5	,93319	,93448	,93574	,93699	,93822	,93943	,94062	,94179	,94295	,94408
1,6	,94520	,94630	,94738	,94845	,94950	,95053	,95154	,95254	,95352	,95449
1,7	,95543	,95637	,95728	,95818	,95907	,95994	,96080	,96164	,96246	,96327
1,8	,96407	,96485	,96562	,96638	,96712	,96784	,96856	,96926	,96995	,97062
1,9	,97128	,97193	,97257	,97320	,97381	,97441	,97500	,97558	,97615	,97670
2,0	,97725	,97778	,97831	,97882	,97932	,97982	,98030	,98077	,98124	,98169

Fonte: LEE et al. (1983).

Na prática, porém,  $R$  e  $S$  raramente serão constituídos por uma só variável básica. Em vista disso, surgiram estudos e formulações matemáticas capazes de solucionar tais questões, ou seja, capazes de associar todos os parâmetros envolvidos em uma função  $Z$ , como exposto nos itens a e b subseqüentes.

De acordo com o que foi descrito, pode-se dizer, ainda, que as metodologias partem do princípio de que  $R$  e  $S$  são tomados como funções analíticas dos parâmetros do solo pelos métodos tradicionais de cálculo. Esses parâmetros são as variáveis básicas do problema em questão. A probabilidade de ruptura é dada por  $P_f\{(R - S < 0)\}$  ou por  $P_f\{R/S < 1\}$ . Portanto, a partir das distribuições estatísticas dos parâmetros do solo se obtêm as distribuições

estatísticas de  $R$  e  $S$ , e, assim, pode-se chegar ao valor da probabilidade de ruptura.

### a) Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado

Os problemas que apresentam mais de duas variáveis básicas requerem que se recorra ao Método do Nível II. Esse método abrange conceitos de média e variância. Como, por definição, a variância de uma variável aleatória é o seu segundo momento central, este método é conhecido como *Método do Segundo Momento de Valor Médio de Primeira Ordem*. O método introduz valores médios das variáveis na expressão de  $Z$ , de modo a se criar uma superfície de ruptura linear.

O *Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado*, apresentado por CORNELL (1969) e ROSENBLUETH e ESTEVA (1972), tinha, nas formulações iniciais, o inconveniente de a posição da aproximação da superfície de estado-limite poder variar de acordo com a forma de expressar  $Z$ . Por exemplo, as expressões  $Z = 2x^2 + 2xy$  e  $Z = 2x(x + y)$  levariam a valores diferentes de  $\beta$  (SMITH, 1986).

HASOFER e LIND (1974) demonstraram que  $\beta$  é constante quando o ponto escolhido para aproximação linear estiver na superfície de estado-limite. Esse ponto de probabilidade de ruptura máxima localiza-se em algum lugar na superfície e é representado por  $x^*$ , chamado de ponto de dimensionamento ou ponto de projeto:  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, x_n^*)$ , sendo  $x_i^*$  o valor da variável  $X_i$  no ponto de dimensionamento. Pelo exposto, essa variante do método original é considerada um melhoramento do *Método do Segundo Momento de Valor Médio de Primeira Ordem* e admite que as variáveis sejam normalmente distribuídas.

A aproximação linear das superfícies de ruptura por uma linha reta é usualmente obtida pelas médias de expansão de Taylor, ou seja:

$$Z = g(x^*) + (x - x^*)g' + \frac{(x - x^*)^2}{2} g''(x^*) + \dots \quad (9)$$

e, como mencionado anteriormente,  $x_i^*$  é o valor da variável  $X_i$  no ponto de dimensionamento e  $g'(x^*)$  a derivada primeira de  $g(X)$  para  $X_i = x_i^*$ .

NEVES (1994) descreveu o processo matemático para a aproximação linear da seguinte forma:

- Desprezando os termos superiores ao de primeira ordem, tem-se a aproximação de primeira ordem:

$$Z = g(x^*) + (x - x^*)g' \quad (10)$$

No caso de Z ser função de algumas variáveis:

$$Z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)g'(x_i^*) \quad (11)$$

e como o primeiro termo do segundo membro é nulo:

$$Z = \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)g'(x_i^*) \quad (12)$$

então, de modo análogo:

$$m_z = g(m_1^*, m_2^*, \dots, m_n) + \sum_{i=1}^n (m_i - x_i^*)g'(x_i^*) = \sum_{i=1}^n (m_i - x_i^*)g'(x_i^*) \quad (13)$$

- Desvio-padrão, que é a raiz quadrada positiva da variância:

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n [g'(x_i^*)\sigma_i]^2} \quad (14)$$

- Coeficiente de sensibilidade,  $\alpha_i$ , que quantifica a contribuição relativa de qualquer variável  $X_i$  para o valor de Z:

$$\alpha_i = \frac{g'(x_i^*)\sigma_i}{\sigma_z} \quad (15)$$

- Combinando as Equações 14 e 15, tem-se:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \alpha_i g'(x_i^*)\sigma_i \quad (16)$$

b) Método • Da Equação 5 original de  $\beta$ , tem-se:

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} \Rightarrow \beta = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - x_i^*) g'(x_i^*)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i g'(x_i^*) \sigma_i} \quad (17)$$

em que

$$\sum_{i=1}^n g'(x_i^*) [(m_i - x_i^*) - \alpha_i \beta \sigma_i] = 0 \quad (18)$$

O valor de  $x_i^*$  que satisfaz a equação anterior será

$$x_i^* = m_i - \alpha_i \beta \sigma_i \quad (19)$$

em que

$x_i^*$  = valor de dimensionamento de  $X_i$  (seu valor no ponto  $\underline{x}^*$ );

$m_i$  = valor médio da variável  $X_i$ ;

$\sigma_i$  = desvio da variável  $X_i$ ;

$\alpha_i$  = coeficiente de sensibilidade da variável  $X_i$ ; e

$\beta$  = índice de confiabilidade (fator de segurança) do sistema.

SMITH (1981) apresentou um resumo para a resolução do método em foco, bem como alguns exemplos que demonstram a sua viabilidade para os casos analisados.

Determinados todos os valores de  $x_i^*$ , obtêm-se o ponto de dimensionamento  $x^*$  e, conseqüentemente, os coeficientes de segurança parciais e o conhecimento da probabilidade de ruptura. Para efetuar a determinação de  $\beta$  por esse processo, adotou-se uma técnica iterativa, sendo, por essa razão, aconselhável desenvolver um programa computacional específico para essa rotina.

## b) Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição Normal

A partir da forma da distribuição dos parâmetros, pode-se determinar a probabilidade de ruptura de uma estrutura de maneira mais simples, sem obter os parâmetros parciais de segurança. Esse procedimento foi descrito com detalhes por LEE et al. (1983). Destaca-se que este método não é o adotado pelo EC7.

De posse dos valores médios para os parâmetros de resistência e de solicitação, obtém-se um *Fator Central de Segurança* ( $\bar{F}$ ), definido como

$$\bar{F} = \frac{\bar{S}}{\bar{R}} \quad (20)$$

A diferença entre as variáveis  $S$  e  $R$  dá a *margem de segurança* da estrutura. A ruptura irá ocorrer se essa *margem de segurança* for menor que zero. Assim, uma medida conveniente para a probabilidade de ruptura  $P_f$  será a área sobreposta mostrada na Figura 2.

Essa área também pode ser calculada por meio da expressão

$$P_f = P[S < R] \quad (21)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} G_R(S) g_S d(S) \quad (22)$$

em que

- $G_R$  = função de distribuição cumulativa da resistência  $R$ ; e
- $g_S$  = função de distribuição de probabilidade da solicitação  $S$ .

No Quadro 5 (LEE et al., 1983), resume-se a equação anterior (Equação 22) para três diferentes formas de funções de distribuição.

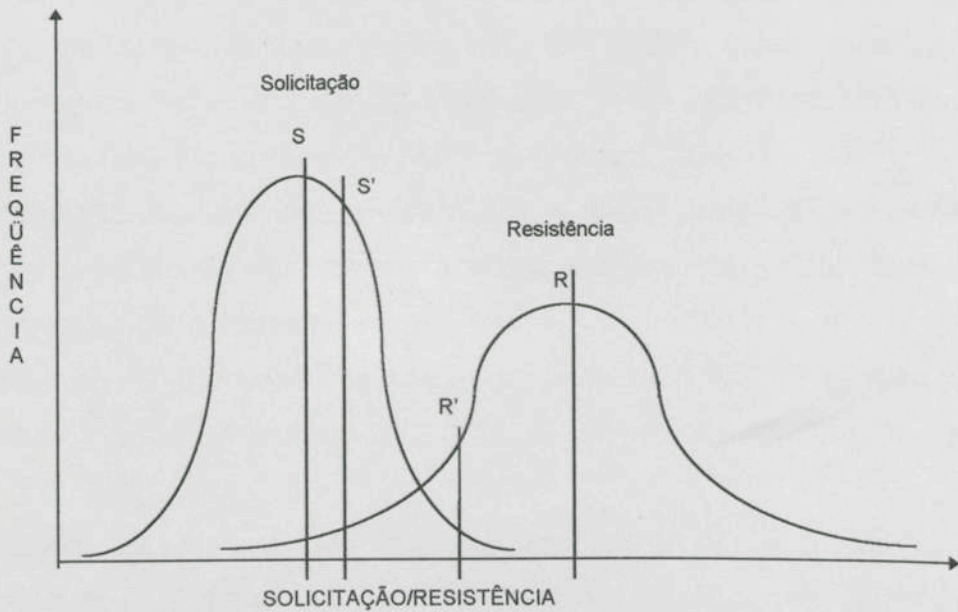
Mediante as definições de *Fator Central de Segurança* ( $\bar{F}$ ), *Coefficiente de Variação*, *Variância* e *Desvio-Padrão* e considerando variáveis normais, tem-se a seguinte equação, apresentada no Quadro 5, para o cálculo da probabilidade de ruptura  $P_f$ :

$$P_f = 1 - F\left(\frac{\bar{F} - 1}{\bar{F} \cdot CV_R}\right) \quad (23)$$

Quadro 5 - Probabilidade de ruptura

Forma de Distribuição de R e S	$P_f$
Uniforme	$\frac{1}{2} \frac{S_{Max} - 2R_{Min} + S_{Min}}{R_{Max} - R_{Min}}$
Normal*	$P_f = 1 - F \left( \frac{\bar{F} - 1}{\bar{F} \cdot CV_R} \right)$
Log-Normal**	$1 - F \left( \frac{\ln \left[ \left( \frac{\bar{R}}{\bar{S}} \right) \sqrt{\frac{1 + CV_S^2}{1 + CV_R^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + CV_S^2)(1 + CV_R^2)}} \right)$

Fonte: LEE et al. (1983).



Fonte: LEE et al. (1983).

Figura 2 - Modelo de distribuição resistência/solicitação.

A metodologia anteriormente apresentada fornece a probabilidade de ruptura para determinada estrutura de forma global, sem considerar os efeitos de variação, como, no caso de variáveis geotécnicas, da pressão neutra, da geometria e da densidade, bem como desconsidera a variabilidade dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , ou seja, adota-se o valor de  $FS$  calculado da forma determinística.

Há que se registrar, com relação aos métodos apresentados, a necessidade de um aprofundado estudo na escolha de um que seja mais apropriado ao problema em questão. Algumas dificuldades são encontradas para se prosseguirem as análises quando este item não é observado. Existem casos em que as formulações matemáticas desenvolvidas para análises de estabilidade não permitem que a função estado-limite ( $Z$ ) seja tratada como indicam os modelos probabilísticos. Para o presente trabalho, tal fato foi verificado para o *Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado*, tendo-se que recorrer, por motivos que serão ainda aqui discutidos, ao segundo método apresentado, ou seja, ao *Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição Normal*, para se calcular a probabilidade de ruptura desejada.

### 3. DESCRIÇÃO DA ÁREA ANALISADA

#### 3.1. Área de estudo

A Mina de Águas Claras (MAC) faz parte de um grupo de minas pertencentes a Minerações Brasileiras Reunidas S/A (MBR), que se localizam nas proximidades de Belo Horizonte. A MAC situa-se no Município de Nova Lima, separado de Belo Horizonte pela Serra do Curral (Figura 3).

A exploração da MAC começou em 1973, e ao longo dos anos a MBR, com apoio de consultorias, foi desenvolvendo análises de estabilidade e estudos para fixação dos taludes da cava.

O corpo de minério possui extensão em torno de 1.650 m, espessura média de 250 m e teor total de ferro de 67,8%. O "pit" atual está em torno de 400 m.

O estudo ora apresentado limita-se apenas a um dos domínios geológico-estruturais da MAC, o *Domínio 1*, onde se encontra o talude conhecido como *Morro do Patrimônio*, em parte localizado dentro do Parque das Mangabeiras, tombado como área de preservação ambiental pelo Município de Belo Horizonte, sendo este o alvo principal do presente trabalho;

o referido morro está representado pela Seção 1 das Figuras 4 e 5.

As referências básicas para o desenvolvimento deste trabalho foram, principalmente, informações fornecidas pela MBR, por meio de relatórios, seções geológico-geotécnicas e fotos, além de visitas de campo.

Como já mencionado, busca-se neste tópico da presente pesquisa dar a caracterização geral da área da cava da MAC, a fim de se procederem às retroanálises deterministas e probabilísticas do talude Morro do Patrimônio. Por meio desses estudos, procura-se questionar o uso de métodos tradicionais de cálculo para análise de estabilidade do talude, suas modificações e dificuldades, bem como avaliar para maiores discussões os estudos inovadores que procuram reduzir ao máximo as incertezas inerentes a todo esse processo.

### 3.2. Histórico do Deslizamento do Morro do Patrimônio

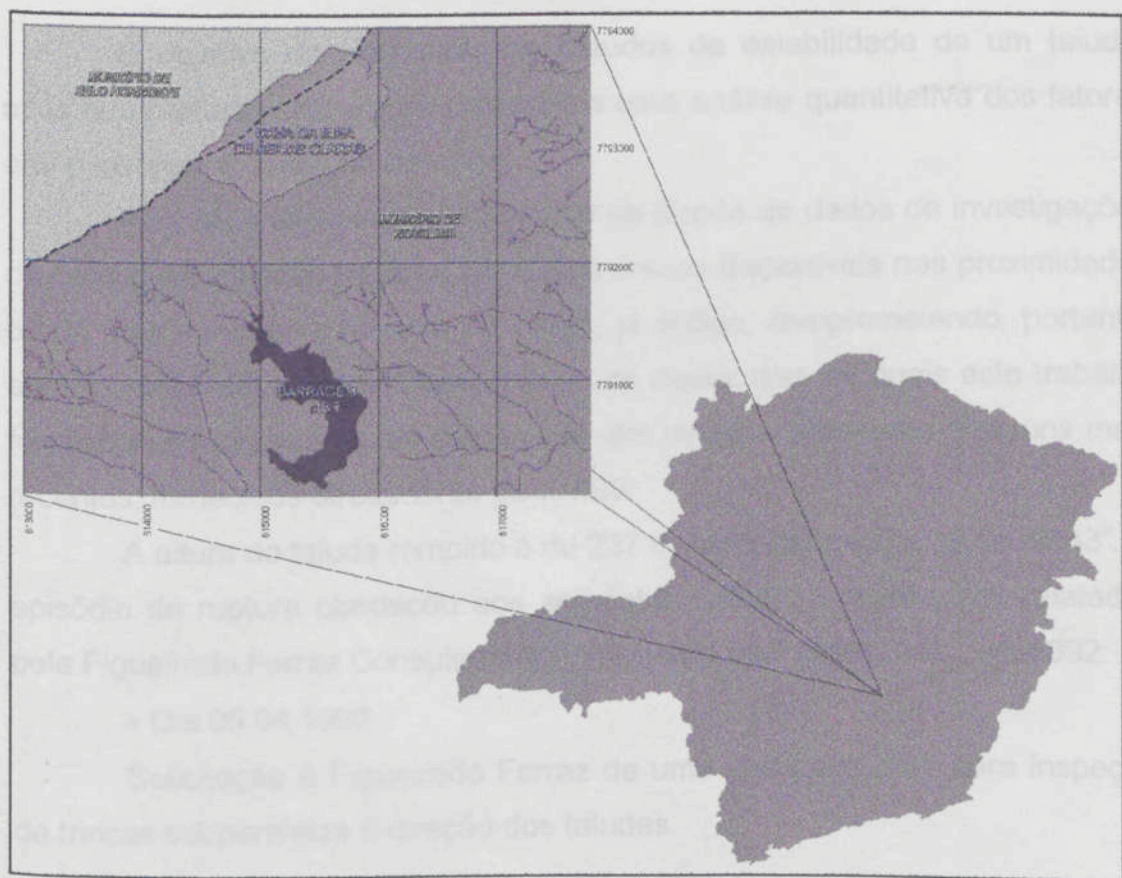


Figura 3 - Localização da área analisada.

o referido morro está representado pela *Seção 1* das Figuras 4 e 5 .

As referências básicas para o desenvolvimento deste trabalho foram, principalmente, informações fornecidas pela MBR, por meio de relatórios, seções geológico-geotécnicas e fotos, além de visitas de campo.

Como já referenciado, busca-se neste tópico da presente pesquisa dar a caracterização geral da área da cava da MAC, a fim de se procederem às retroanálises determinística e probabilística do talude *Morro do Patrimônio*. Por meio destes estudos, procura-se questionar o uso de métodos tradicionais de cálculo para análises de estabilidade de taludes, suas modificações e dificuldades, bem como trazer para maiores discussões os estudos inovadores que procuram explicitar ao máximo as incertezas inerentes a todo esse processo.

### **3.2. Histórico do deslizamento do *Morro do Patrimônio***

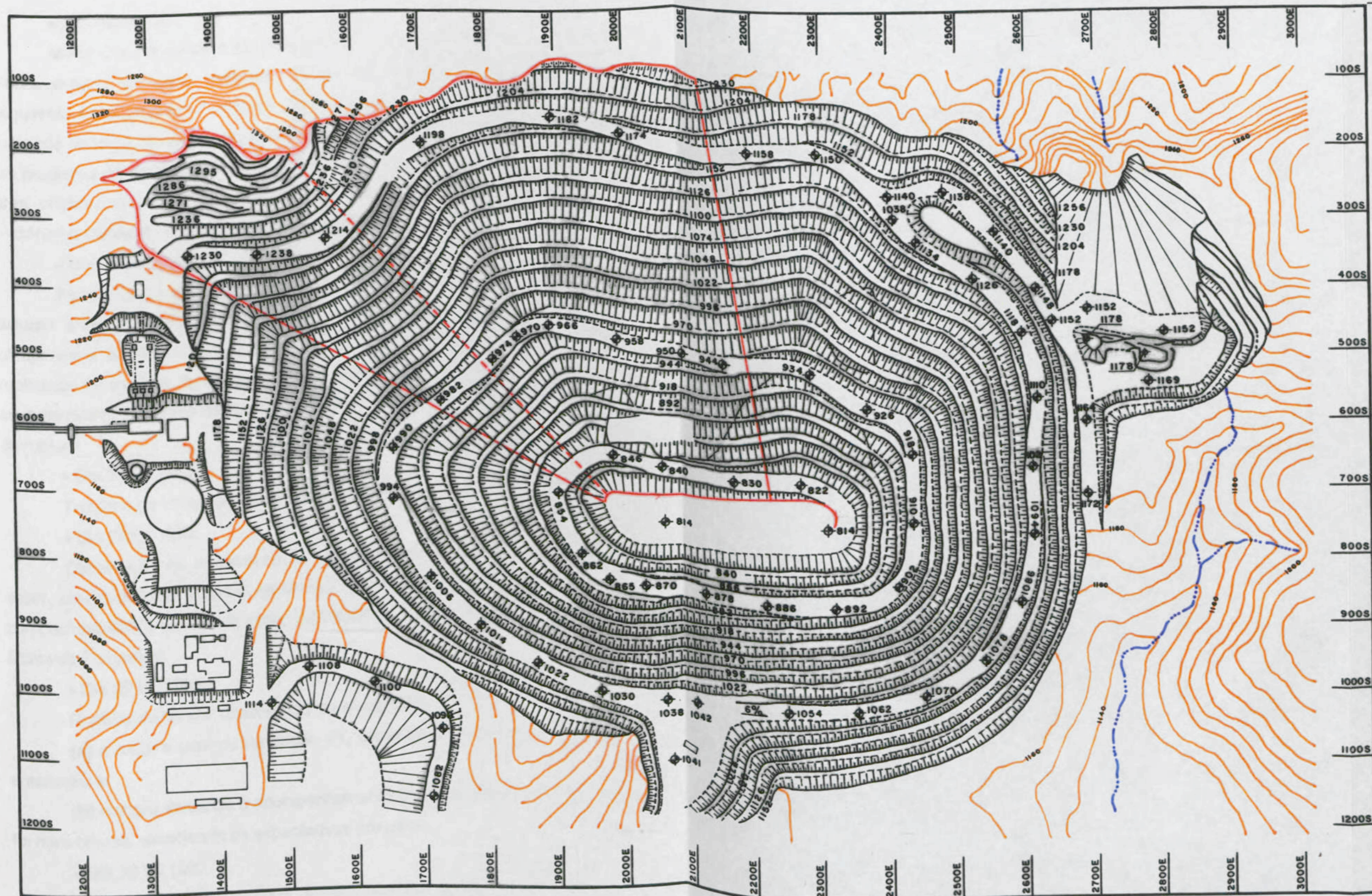
O objetivo da realização de estudos de estabilidade de um talude, após sua ruptura, está em se proceder a uma análise quantitativa dos fatores que o levaram à condição de ruína.

Para as análises realizadas, não se dispôs de dados de investigações de campo atualizados na área, sendo os únicos disponíveis nas proximidades os de uma sondagem rotativa PZ-01/81, já antiga, comprometendo, portanto, análises mais detalhadas. Dessa forma, os dados com os quais este trabalho foi elaborado foram aqueles disponíveis em estudos anteriores e alguns mais recentes, fornecidos diretamente pela MBR.


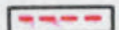




A altura do talude rompido é de 237 m, com inclinação média de 43°. O episódio de ruptura obedeceu aos seguintes eventos cronológicos relatados pela Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda., em 1992:

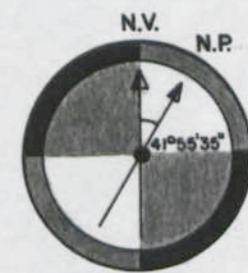
- Dia 09.04.1992

Solicitação à Figueiredo Ferraz de uma visita ao local, para inspeção de trincas subparalelas à direção dos taludes.



**LEGENDA:**

-  LIMITE DO DOMÍNIO I
-  SEÇÃO I ANALISADA
-  COTA EM METRO
-  CORTE
-  CURVA DE NÍVEL
-  NASCENTE



N.V. - NORTE VERDADEIRO  
 N.P. - NORTE DO PROJETO

- Dia 10.04.1992

Visita dos consultores ao local, os quais observaram a existência de trincas antigas e outras recentes. Esses profissionais recomendaram os seguintes procedimentos: controle topográfico da área, paralisação dos trabalhos de lavra na região, análise de tensão-deformação da área afetada e um programa de investigação local, pois, como mencionado anteriormente, a área contava com apenas um furo de sondagem rotativa e um único piezômetro instalado, que se encontrava danificado.

- Dia 11.04.1992 a 27.04.1992

Planejamento dos trabalhos, execução e análise dos resultados dos estudos preliminares, concluindo-se que a zona potencialmente instável não ultrapassaria a 20 m de espessura, o *FS* estaria entre 1,05 e 1,20 e a realização de estudos mais detalhados a respeito da distribuição dos litotipos se mostrava como sendo os atributos que mais contribuíam para o mecanismo de ruptura.

- Dia 27.04.1992

Trabalho de investigação estrutural detalhada.

- Dia 28.04.1992

Observação de incremento de milímetros dos deslocamentos, dando, assim, continuação às análises de tensão-deformação e à delimitação de uma zona de segurança para realização dos trabalhos de lavra abaixo da região do *Morro do Patrimônio*.

- Dia 29.04.1992

Ruptura do talude, observando-se o seguinte:

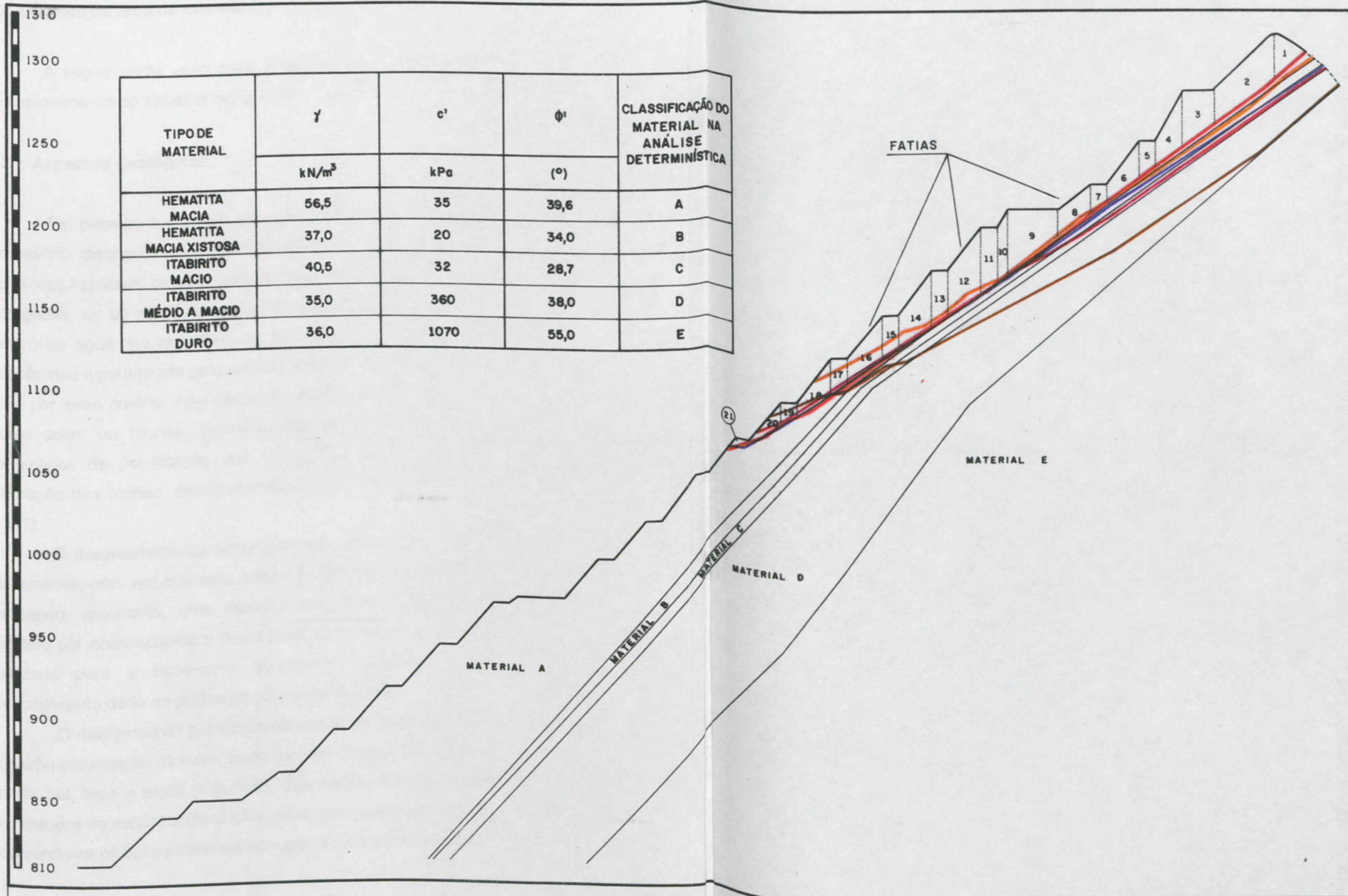
**(a)** a ruptura ocorreu na seção S1, como concluído mediante estudos anteriores; e

**(b)** embora existindo o acompanhamento dos deslocamentos, a ruptura foi mais brusca, excedendo as expectativas previstas.



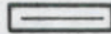
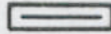
- Dia 30.04.1992

Contratação de trabalhos especializados, a fim de se tomarem providências a respeito da segurança do talude remanescente e procederem a novos estudos de estabilidade, ajustes na geometria dos taludes e análises pertinentes à cota de exaustão, dentre outros tópicos de interesse.






TIPO DE MATERIAL	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL NA ANÁLISE DETERMINÍSTICA
	$\text{kN/m}^3$	$\text{kPa}$	( $^\circ$ )	
HEMATITA MACIA	56,5	35	39,6	A
HEMATITA MACIA XISTOSA	37,0	20	34,0	B
ITABIRITO MACIO	40,5	32	28,7	C
ITABIRITO MÉDIO A MACIO	35,0	360	38,0	D
ITABIRITO DURO	36,0	1070	55,0	E



**LEGENDA:**

-  SUPERFÍCIE DE RUPTURA
-  LIMITE ENTRE FATIAS
-  CONTATO ENTRE CAMADAS
-  PERFIL

**SUPERFÍCIES CRÍTICAS ENCONTRADAS:**

-  FS = 1,120
-  FS = 1,121
-  FS = 1,191
-  FS = 1,258
-  FS = 1,632

### 3.3. Análises da área de interesse

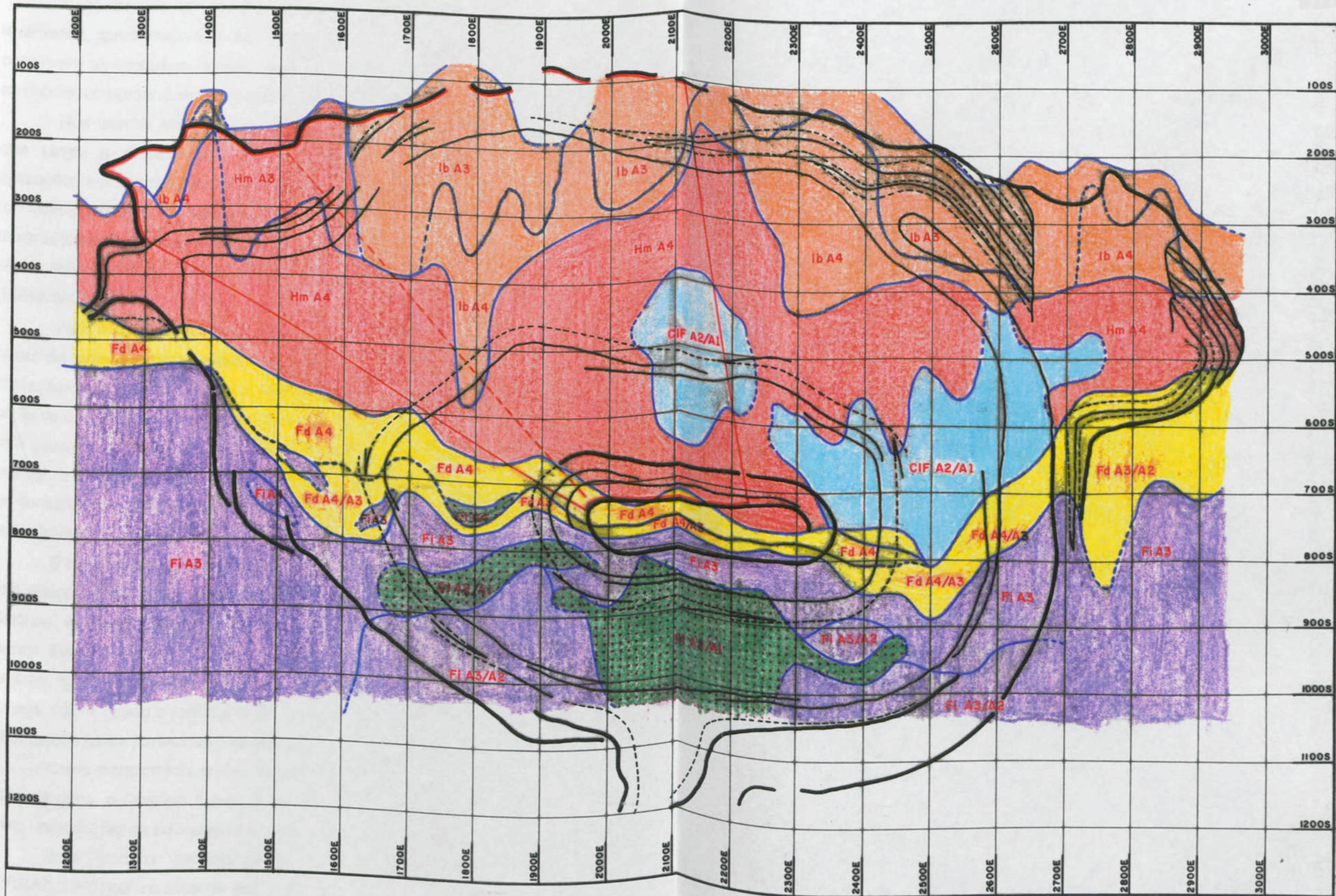
A seguir serão enfocados aspectos considerados relevantes para o desenvolvimento do trabalho em questão.

#### 3.3.1. Aspectos geológicos










Em primeiro lugar, em função dos diferentes aspectos envolvidos, é necessário distinguir uma fronteira entre solos e rochas. De acordo com definições habituais, os solos são terrenos constituídos por partículas soltas ou agregadas, de tal modo que possam ser separadas facilmente por agitação dentro da água. Ao contrário, as rochas são definidas como terrenos cuja coesão não é perturbada pela presença de água em excesso. Existem terrenos que, por esse critério, não se pode definir, ao certo, se serão classificados como solos ou rochas, exemplificando-se esse fato por intermédio dos fenômenos de petrificação das formações constituídas por solos e pela alteração das rochas, transformando-as nos solos ditos residuais (ROCHA, 1981).

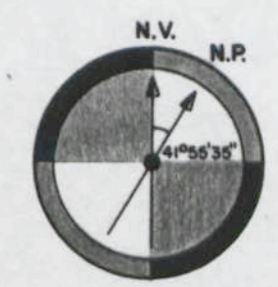
O desenvolvimento deste trabalho conduziu, inevitavelmente, a essas discussões, uma vez que toda a área é vista sob o prisma de maciço rochoso contendo, entretanto, uma camada superficial extremamente alterada, no contato por onde ocorreu o deslizamento. Portanto, o trabalho seguiu a linha utilizada para o tratamento de maciço rochoso, acompanhando-se o procedimento dado ao problema pela própria MBR.

O mapeamento geológico-estrutural da MAC foi desenvolvido a partir de uma setorização da cava, onde esta foi dividida em quatro compartimentos: norte, sul, leste e oeste (Figura 6). Sua análise forneceu subsídios tanto para os estudos de estabilidade já efetuados como para este, que ora se apresenta, definindo-se os tipos prováveis de ruptura para cada compartimento.



**LEGENDA:**

-  LIMITE DO DOMÍNIO I
  -  SEÇÃO I ANALISADA
  -  LIMITE DAS ESCAVAÇÕES
  -  Ib = ITABIRITO
  -  Hm = HEMATITA
  -  CIF = MINÉRIO SÃO
  -  Fd = FILITO DOLOMÍTICO
  -  Fi = FILITO
  -  Qt = QUARTZO-FILITO OU QUARTZO-XISTO
- A4, A3, A2, A1: CLASSES GEOMECÂNICAS



N.V. - NORTE VERDADEIRO  
 N.P. - NORTE DO PROJETO

Considera-se que o *Morro do Patrimônio*, em razão dos dados levantados, apresenta um modelo geoestrutural em que a *foliação* e as *juntas* constituem as feições estruturais mais relevantes. As outras estruturas, como as *dobras*, compreendem feições de caráter localizado e restrito.

Nos últimos anos, diversos autores têm apresentado proposições no que tange à classificação de maciços. Tais classificações encontram aplicações em vários tipos de projetos de engenharia, como túneis, taludes, fundações e minas. Um exemplo de sistema de classificação particularmente muito utilizado nas minas dos Estados Unidos, da Índia e da Austrália é o *Rock Mass Rating (RMR)*, desenvolvido por Bieniawski, entre 1972 e 1973 (BIENIAWSKI, 1989).

Para classificação do maciço e também identificação de possíveis níveis de alteração dos parâmetros geotécnicos, foram associados graus de alteração/coerência aos litotipos identificados na MAC. Esses litotipos, em razão da sua textura fina, tiveram seus graus de alteração/coerência avaliados com base na resistência à pressão dos dedos, no impacto do martelo de geólogo e no risco por canivete etc., sendo, também, associados aos termos de consistência empregados pela MBR. No Quadro 6, resumem-se os graus utilizados para fins de análises.

É também de grande interesse no início deste subitem que se registre, com relação aos litotipos presentes na área, que se usou uma classificação histórica, denominada *Ranna Corporation*, adaptada pela MBR, em que os termos *friáveis*, *macios* e *soft* são considerados equivalentes. Registra-se, também, que o termo *mole* não se aplica quando este faz referência a minério, ou seja, não é usado o termo *minério mole* e sim *minério macio*. Todas essas informações foram fornecidas pela equipe de Geologia da MBR.

Como mencionado, o alvo do presente trabalho encontra-se na região norte da mina, o *Domínio I*, mas, para que haja maior entendimento do sítio como um todo, faz-se aqui uma breve descrição da área de interesse da cava.

Dois litotipos predominantes são apresentados (FIGUEIREDO FERRAZ, 1992) para o setor do *Morro do Patrimônio*:

Quadro 6 - Graus de alteração/coerência

Grau	Descrição
A4	Saprólito ou rocha extremamente alterada (mole)
A3	Rocha alterada (dura)
A2	Rocha medianamente alterada (dura)
A1	Rocha sã a pouco alterada

Fonte: FIGUEIREDO FERRAZ (1992) (modificado).

- Hematita; e
- Itabirito silicoso e carbonático.

Esses litotipos distribuem-se segundo um padrão geral amendoado e compreendem corpos desmembrados e alongados na direção da lineação de estiramento. Os litotipos apresentavam variações de consistência, que vão do estado macio ao duro.

Segundo COSTA e PIMENTA (1994), a MAC possui um depósito de ferro constituído por lentes encaixadas em itabiritos enriquecidos com ferro da Formação Cauê, e esse enriquecimento, possivelmente, tenha sido resultado de processos supergênicos (água descendente). Tal enriquecimento foi favorecido pelo preparo tectônico do pacote de itabiritos, causado por zonas de cisalhamento paralelas à foliação,  $S_n$ , e, portanto, as lentes enriquecidas tendem a paralelizar  $S_n$  e são alongadas segundo a lineação mineral,  $L_n$ .

Deduz-se que os corpos de hematita dura presentes se formaram durante o evento, por recristalização, em zonas de charneiras (menor curvatura) de dobras e sigmóides (forma particular das dobras, com formato aproximado de S) e, por isso, são corpos lineares orientados segundo  $L_n$ .

VIEL (1985), com base em levantamento de campo, observações e coleta de dados a respeito de rupturas acontecidas, apresentou um resumo das características e dos tipos de eventos possíveis de ocorrer no "pit" da MAC (Figura 6 e Quadro 7).

- *Itabirito Dolomítico*

São assim denominadas as rochas carbonatadas, compostas por bandas de dolomita/calcita intercaladas com banda de hematita, que, por enriquecimento supergênico, dá origem ao minério de ferro atualmente explorado na mina. A denominação HCIF é utilizada para se referir ao minério são.

- *Itabirito Dolomítico Silicoso*

Este diferencia-se do caso anterior, pelo fato de apresentar um gradual enriquecimento em quartzo e menor teor de ferro, cálcio e magnésio. Aproximadamente 80% dos taludes finais do "pit" norte, nas cotas superiores a 1.048 m, foram implantados nesse material. Por essa razão, algumas características geomecânicas importantes são citadas, a seguir:

- Formação de lâminas de materiais de talco, subparalelas à xistosidade/acamamento, que possuem baixo ângulo de atrito, formando planos preferenciais de ruptura.

- Quando esse material foi submetido aos esforços tectônicos durante os eventos deformativos, surgiram os *Slickensides*, que são superfícies lisas e estriadas; e os espelhos de falha, que também são superfícies potenciais de ruptura.

- O material oferece menor resistência mecânica ao cisalhamento e à erosão, em razão do fato de que lentes de hematita, presentes em algumas porções do corpo de minério, não apresentam as microcimentações características dos itabiritos.

- *Filito Dolomítico*

É um material de transição entre a deposição mecânica e a química, apresentando baixa resistência à erosão. Quando muito alterado é constituído por lentes de material argiloso e lentes de areia.

Quadro 7 - Características e tipos de eventos possíveis de ocorrer no "pit" da mina

Tipo de Material	Condicionante Principal	Tipo de Ruptura Possível	Ângulo p/ Talude Estável	Tipo de Ruptura Ocorrida	Observações
Itabirito dolomítico	Xistosidade Fratura	Planar	44°	Planar	Baixa resistência à erosão
Itabirito dolomítico silicoso	Xistosidade "Slickensides"	Planar Cunha	45°	Planar	Baixa resistência à erosão
Itabirito dolomítico silicoso	Xistosidade "Slickensides"	Planar	45°	Planar	-
Itabirito dolomítico silicoso	Planar "Slickensides"	Planar	45/70°	Planar	Lâminas de minerais de talco
HCIF Filito dolomítico/sericítico	Xistosidade	Circular "Toppling"	64°	"Toppling"	Baixa resistência à erosão
Filito sericítico Quartzo-filito	Xistosidade Clivagem Fratura	Circular "Toppling" Queda de blocos	66°	"Toppling " Queda de blocos	-

Fonte: VIEL (1985) (modificado).

• *Quartzo-Filito ou Quartzo-Xisto*

São os quartzitos muito impuros, micáceos, cujos minerais de mica, dispostos em placas, dão origem à sua xistosidade. A individualização das lentes de quartzo (areia) e de mica é bem visível, sendo estes os planos principais de menor resistência da rocha. A xistosidade se mantém subparalela à dos filitos sericíticos.

### 3.3.2. Aspectos hidrogeológicos

Todas as análises constantes nesse trabalho foram executadas, desconsiderando-se as pressões de água atuantes no talude, uma vez que o lençol freático, que se encontrava em torno da cota 1.165 m, no contato itabirito/minério, foi estabilizado em relação às escavações da lavra, em 1981. Regularmente, existem 16 poços de bombeamento de água, funcionando 24 horas/dia para manter as condições acima descritas.

As bancadas recebem tratamento superficial com materiais argilosos compactados, minimizando-se, assim, a aparição de empuxos hidrostáticos em eventuais fendas de tração.

### 3.4. Estudos previamente realizados

Vários trabalhos foram desenvolvidos para a MBR, no decorrer da exploração da MAC, sendo possíveis um acompanhamento e a comparação dos resultados de estudos realizados desde o seu início, em 1973. Apresentam-se, a seguir, alguns estudos realizados em épocas diferentes da vida útil da mina.

#### 3.4.1. Ensaios de laboratório

##### a) Campanha de Ensaios de 1980

Programada pela Victor de Mello & Associados e sintetizada no Relatório MBR-090180 (MELLO, 1980). Consta da execução de um programa mínimo de ensaios laboratoriais de amostras indeformadas, restrito às caracterizações física e mecânica da hematita e do itabirito macios (A4).

Tinha por objetivo atender ao cronograma de exploração da face norte e a investigação dos materiais que apresentavam condições desfavoráveis à estabilidade dos taludes, em consequência dos seus planos preferenciais de xistosidade.

O programa contava com os seguintes ensaios especiais:

- ensaios de cisalhamento direto lento; e

- ensaios triaxiais e compressão simples.

Os resultados obtidos permitiram considerar que houve:

- variações acentuadas nos índices de vazios das amostras;
- heterogeneidades típicas de solos residuais;
- necessidade de campanha de investigação por sondagens;
- comportamento elasto-plástico comprovado pelas curvas de tensão-deformação; e que
- o plano de ruptura sofre influência da posição da foliação, pois as suas irregularidades permitem uma migração deste plano, de modo a voltar a romper pela foliação; e
- os resultados obtidos foram considerados desfavoráveis e aquém do esperado, com relação ao observado "in situ".

#### b) Campanha de Ensaios de 1991

Era programada pela Figueiredo Ferraz (FIGUEIREDO FERRAZ, 1992) e tinha como premissas básicas avaliar preliminarmente as condições de estabilidade da mina, para fixar os ângulos dos taludes da cava; fornecer alguns índices para quantificação de parâmetros geotécnicos de materiais não ensaiados anteriormente e verificar tópicos da campanha anterior com respeito à hematita e ao itabirito macios (A4).

A campanha tinha a seguinte programação, relacionada a cada tipo litológico:

- Itabirito Silicoso e Dolomítico (A2)
  - caracterização física: massa específica, absorção e porosidade; e
  - compressão uniaxial, com medida de módulo e coeficiente de Poisson.
- Hematita e Itabirito (A4)
  - caracterização física: índice de vazios, densidade dos grãos, umidade e saturação; e
  - cisalhamento direto lento, com blocos indeformados.

Os ensaios realizados na hematita e no itabirito (A4) foram executados posicionados com a foliação oblíqua em relação ao plano de cisalhamento, de modo a constatar a sua influência nas características de resistência.

### c) Comparação entre as Duas Campanhas

As amostras foram ensaiadas com CP's de dimensões diferentes nas duas campanhas, sendo a de 1980 de 10 x 10 x 2 cm e 6 x 6 x 2 cm e a de 1991 de 24 x 24 x 10 cm. Apesar disso, pôde-se concluir que:

- os parâmetros de resistência obtidos foram compatíveis nas duas campanhas;
- conforme cogitado na primeira campanha, a posição do plano de foliação não influenciou significativamente na variação dos parâmetros de resistência; e
- embora a campanha de 1991 tenha apresentado menor variação no índice de vazios das amostras com relação à campanha de 1980, pode-se admitir que os parâmetros de resistência foram satisfatoriamente conhecidos.

### 3.4.2. Relatórios realizados

A maioria das análises de estabilidade desenvolvidas por consultorias para a MBR apresenta caráter determinístico, ressaltando-se que apenas um dos relatórios analisados teve uma abordagem probabilística.

Neste subitem, abordar-se-ão dois desses estudos, visando a um maior esclarecimento quanto aos objetivos esperados em cada análise, a saber: o elaborado com o caráter probabilístico e o determinístico, sendo este último desenvolvido depois do episódio da MAC, o qual serviu de fonte de pesquisa para o trabalho aqui apresentado.

#### • Relatório MBR-MAC-261181

"Análise de Risco na Lavra da Cava da MAC - Relatório de Progresso n.1/81", elaborado por Victor F. B. de Mello & Associados S/C Ltda. (MELLO, 1981).

O principal objetivo deste relatório era sugerir a otimização de um plano de lavra para avaliar as conseqüências de possíveis rupturas, por meio da especificação das suas probabilidades. Todas as rupturas estudadas eram superficiais e previstas para acontecer a curto prazo.

Os resultados obtidos da análise realizada aplicavam-se não só à região dos taludes finais da cava, mas, também, às condições intermediárias, observando a necessidade de se manterem as mesmas características geológicas estruturais em ambas as situações. Por intermédio de pequenos escorregamentos observados, registrou-se a predominância da influência dos planos de foliação nos mecanismos de ruptura, confirmados também em ensaios laboratoriais, isolando cunhas ou superfícies de ruptura subparalelas à foliação.

O relatório restringiu os estudos às inclinações dos taludes e seguiu a proposta do plano de lavra, na época em implantação na mina, procurando-se obter uma primeira avaliação do *Risco Nominal* de operação da MAC.

Também, não se considerou a ação de pressões de água nas análises de estabilidade das superfícies potencialmente instáveis, hipótese compatível com as profundidades de lavra em relação ao lençol freático.

A análise probabilística tinha como principal objetivo avaliar a geometria ótima da mina, bem como considerar as possíveis conseqüências de cada decisão quanto a esta geometria. Trazia, também, esclarecimentos acerca dos limites de volumes rompidos que caracterizariam a ruína (i. e., prejuízos significativos ao sistema operacional da mina). Em princípio, foi posto que apenas o aspecto econômico pudesse exprimir as conseqüências de eventuais rupturas, embora se reconhecendo a necessidade de expor essas mesmas conseqüências no futuro, em termos de operacionalidade da mina.

O modelo apresentado buscava otimizar a geometria dos taludes, como mencionado, segundo o critério de minimização do custo esperado, ou seja:

$$\text{custo inicial} + \text{custo da ruína} \times \text{probabilidade da ruína},$$

sendo primordial a distinção entre um escorregamento na época e outro esperado em 10 anos e, também, era necessário ter em mente um processo dinâmico de otimização, ou seja, com o avanço da exploração, aumentavam-se a observação do comportamento e a coleta de dados adicionais, permitindo que incertezas fossem paulatinamente reduzidas.

A metodologia de cálculo contou com investigações geológico-geotécnicas, que permitiram diagnosticar quais as cunhas eram

cinematicamente viáveis para as geometrias existentes, considerando-se que a probabilidade de ruptura de cada superfície era representada pela probabilidade de a tangente do ângulo de atrito do material ( $tg \phi'$ ) ser menor ou igual à tangente do ângulo de mergulho da foliação ( $tg \beta'_w$ ).

De posse dos dados necessários e a partir de metodologias e formulações consagradas, calculou-se a probabilidade de escorregamento de cada superfície, associando a cada uma delas o volume de material escorregado.

Maiores informações à respeito do método de cálculo não foram fornecidas, sabendo-se, entretanto, que foram feitas análises, a fim de determinar a correspondência entre conceitos determinísticos ( $FS$ ) e conceitos probabilísticos ( $P_f$ ).

Como recomendação final, ficou a sugestão de que, ao se considerar rupturas mais profundas, as análises de estabilidade necessitariam da introdução de conceitos adicionais, ou seja, considerações a respeito da envoltória de resistência dos materiais, condições hidrogeológicas, geológicas etc.

- Relatório Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda.

“Reavaliação de Ângulos, Análise Tensão-Deformação e de Risco para os Taludes da Mina de Águas Claras” (FIGUEIREDO FERRAZ, 1992).

Relatório emitido logo após a ruptura do *Morro do Patrimônio*, objetivando apresentar um histórico do caso; fazer uma análise dos prováveis fatores que influenciaram a ruptura; avaliar as condições de estabilidade do talude remanescente; considerar as possíveis decisões de projeto decorrentes do avanço da lavra até as cotas previstas, na cava ótima de exaustão, aproximadamente cota 820 m; e apresentar recomendações com respeito a investigações complementares, medidas corretivas, ajustes da geometria do talude e limites máximos da cota final de exaustão.

Foi realizada uma retroanálise do escorregamento para o cálculo da coesão e do ângulo de atrito, obtendo-se os valores de 40 kPa e  $35,5^\circ$ , respectivamente. Tais valores estão próximos dos valores residuais obtidos no ensaio de cisalhamento direto de amostra de hematita macia (A4). Segundo

este relatório, tal fato indica a possibilidade de a hematita macia (A4) ter sido previamente deformada além da sua resistência de pico, de tal maneira que sua resistência foi reduzida para valores próximos dos residuais, fato esse possivelmente causado pelo processo de alívio de tensões e de expansão lateral resultantes da escavação da mina.

Os cálculos efetuados para análises de estabilidade do maciço rochoso foram realizados com uma extensão do método de Bishop simplificado, que tornou o procedimento aplicável para geometrias não rotacionais. Foi feita também uma comparação dos resultados com cálculos manuais e soluções, mediante o emprego do método de Sarma, chegando-se a valores muito próximos. Foi considerado, com base nos resultados das análises preliminares sintetizados em 23.04.1992, que o *FS* estava entre 1,1 e 1,2, na condição de resistência residual e na camada de hematita macia (A4), fator esse compatível com taludes de mineração, com a ressalva de que esses índices são praticados quando as conseqüências de ruptura são mínimas.

Foi considerada, como recomendação imediata após a ruptura, a urgência de se efetuar uma limpeza das áreas remanescentes, julgando a instabilidade dos materiais na superfície rompida, a construção de uma trincheira para amortecimento de quedas de blocos e a estabilização de porções localizadas no itabirito médio (A2), com ancoragens e chumbadores com cabos.

Para retomada dos trabalhos, recomendou-se a adoção de uma geometria condizente com os critérios analisados e compatível com níveis de segurança de interesse para a situação de talude final, análises de tensão-deformação e programação de uma campanha de monitoramento para acompanhar o avanço da lavra definitiva.

Como mencionado anteriormente, o citado relatório serviu de referência para várias informações, sendo mencionado outras vezes.

### **3.5. Tratamento dos parâmetros**

Dentro da engenharia, é inquestionável a importância que a representatividade dos parâmetros possui, em especial na Geotecnia. Quando

a análise do problema contempla questões de deslizamentos em maciços, então este aspecto torna-se crucial. Para o estudo que se apresenta, foram coletados resultados de ensaios realizados ao longo da vida útil da MAC, todos constantes em relatórios fornecidos pela MBR e citados ao longo do texto.

NEVES (1994) ressaltou a diferença na obtenção dos parâmetros básicos dentro da Engenharia Geotécnica com relação à Engenharia Estrutural, em que se torna relativamente fácil a obtenção de um número satisfatório de medições dos parâmetros. Na primeira, quando muito, dispõe-se de uma amostra estatística, ou seja, os resultados de um conjunto de amostras tomadas como representativas do material, a partir de meia dúzia de amostras geotécnicas colhidas. Quando isso ocorre, o valor médio da população,  $m_x$ , tem que ser estimado a partir do valor médio de uma só amostra estatística,  $m_s$ , processo esse conhecido como estimação pontual.

Muito tem sido discutido a respeito da escolha dos valores característicos de projeto a partir dos resultados de um reduzido número de ensaios. OLSSON et al. (1989) recomendaram que esses valores fossem as próprias médias, embora todas as considerações feitas a este respeito tendem a uma longa discussão até atingir um denominador comum.

No presente trabalho, as amostras de hematita e de itabirito macios (A4) foram selecionadas, segundo FIGUEIREDO FERRAZ (1992), mediante um critério geológico de representatividade nos taludes da cava. A dimensão dos CP's de 24 x 24 x 10 cm, conforme citado anteriormente, foi considerada satisfatória para representar as heterogeneidades pertinentes à foliação, como ondulações, alternâncias e interdigitações de bandas de diferentes consistências, com características de resistências e de propriedades físicas variáveis.

O procedimento para determinação dos parâmetros a serem adotados neste trabalho, a despeito do que foi exposto, será o recomendado por OLSSON et al. (1989), o que, segundo estes autores, é o que esteve mais de acordo com a prática tradicional, sendo também esta a conduta seguida nos trabalhos anteriormente realizados.

### 3.5.1. Resumo dos dados analisados

Nos Quadros 8 a 11, encontra-se o resumo dos relatórios estudados.

Quadro 8 - Resumo dos parâmetros de hematita obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR)

Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Rápido com Medida de Pressão Neutra					
Amostra N°	Tipo de Material	Classificação Granulométrica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
6	Hematita macia	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,0016 mm	55,8	37,2	36
6	Hematita macia	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,0016 mm	55,8	19,1	36
9	Hematita macia	Silte arenoso c/ pedreg. D <sub>10</sub> = 0,007 mm	57,7	43,0	38
10	Hematita macia	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,008 mm	56,5	41,0	42
10	Hematita macia	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,008 mm	56,5	2,6	46

Quadro 9 - Média dos parâmetros do Quadro 8

Material Ensaiado	$\gamma$	$c'$	$\phi'$
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	(°)
Hematita macia	56,50	35,00	39,6

Observa-se que os valores encontrados estão de acordo com a condição do material ensaiado, ou seja, parâmetros condizentes com minério. A última amostra ensaiada, entretanto, apresentou dispersão alta com relação à coesão, sendo, por esse motivo, desprezada no cálculo da respectiva média.

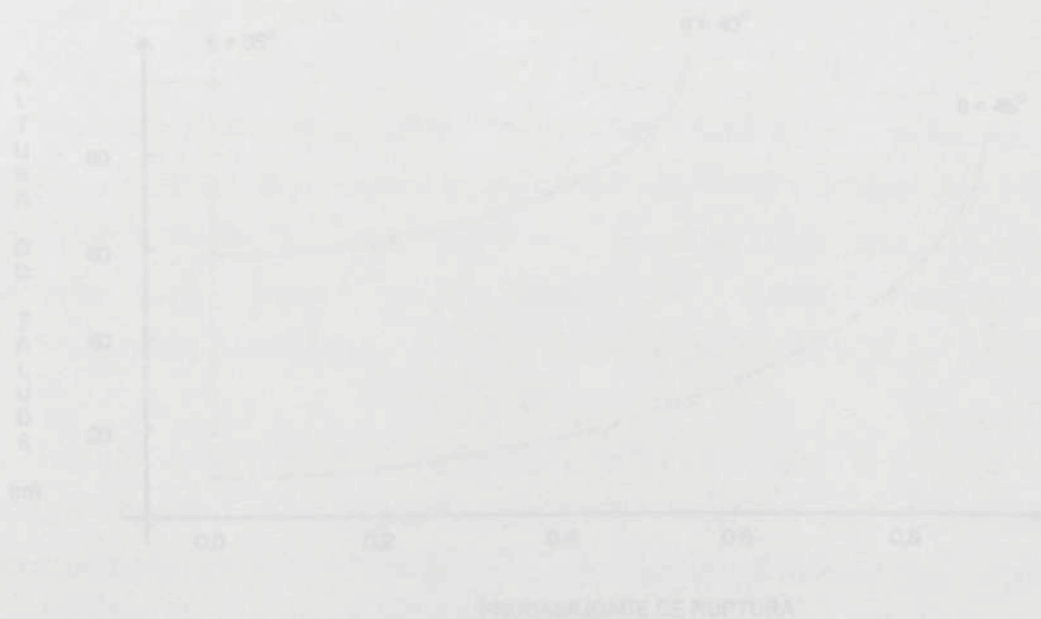
Quadro 10 - Resumo dos parâmetros de itabirito obtidos em testes de laboratório (fornecidos pela MBR)

Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Rápido com Medida de Pressão Neutra					
Amostra N°	Tipo de Material	Classificação Granulométrica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
3	Itabirito macio	Silte pouco arenoso D <sub>10</sub> = 0,0034 mm	40,4	12,9	32
4	Itabirito macio	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,018 mm	43,5	40,0	26
4	Itabirito macio	Silte arenoso c/ pedreg. D <sub>10</sub> = 0,018 mm	43,5	30,0	30
4	Itabirito macio	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,018 mm	43,5	20,0	35
7	Itabirito macio	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,095 mm	37,6	34,6	26
7	Itabirito macio	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,095 mm	37,6	43,0	25
7	Itabirito macio	Silte arenoso D <sub>10</sub> = 0,095 mm	37,6	41,0	27

Quadro 11 - Média dos parâmetros do Quadro 10

Material Ensaiado	$\gamma$	c'	$\phi'$
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	(°)
Itabirito macio	40,50	32,00	28,7

Apesar de diferenças quanto à granulometria do material, os valores encontrados também estão dentro dos limites esperados. Todas as amostras ensaiadas foram consideradas no cálculo das médias.



#### 4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Fonte: TEIXEIRA JR. e VIRGILI (1984)

Figura 7 - Exemplo de apresentação de resultado, para um talude de 60 m de altura, de uma análise probabilística.

##### 4.1. Aspectos gerais

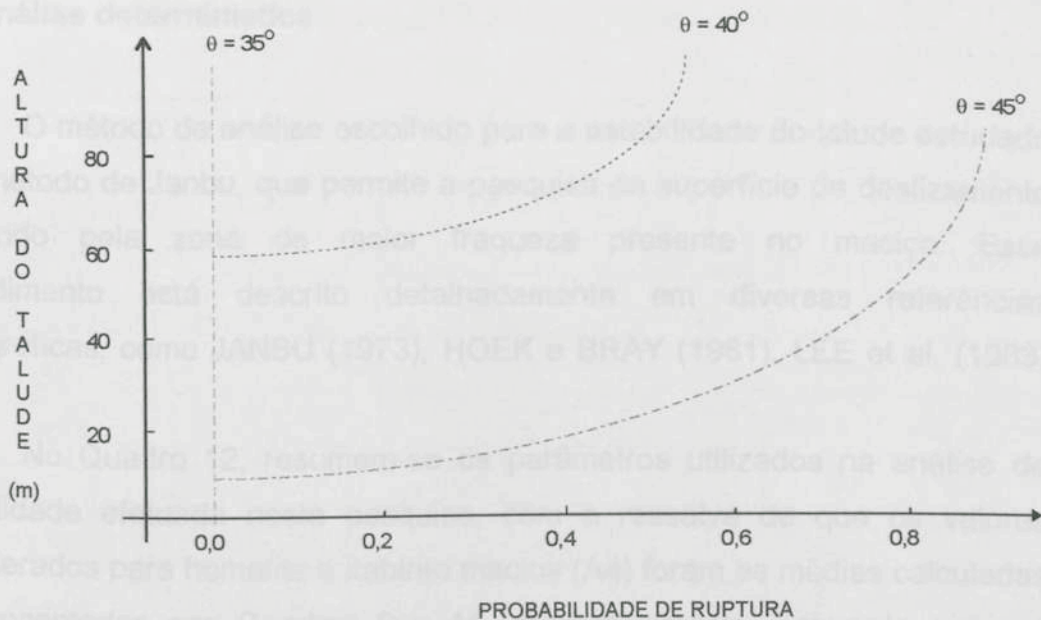
Várias análises foram realizadas neste trabalho, buscando-se um melhor conhecimento do comportamento do maciço quando solicitado, com relação à sua estabilidade. Para tanto, foram feitas análises de pesquisa da superfície de ruptura crítica e análises de sensibilidade dos parâmetros.

Para as análises realizadas, foram considerados como parâmetros básicos a coesão e o ângulo de atrito.

Em razão da grande variabilidade dos parâmetros envolvidos em maciços rochosos, análises probabilísticas podem ser realizadas, dependendo dos parâmetros que são considerados de prioridade. TEIXEIRA JR. e VIRGILI (1984) apresentaram alguns resultados obtidos a partir de análises probabilísticas (Figuras 7 e 8).

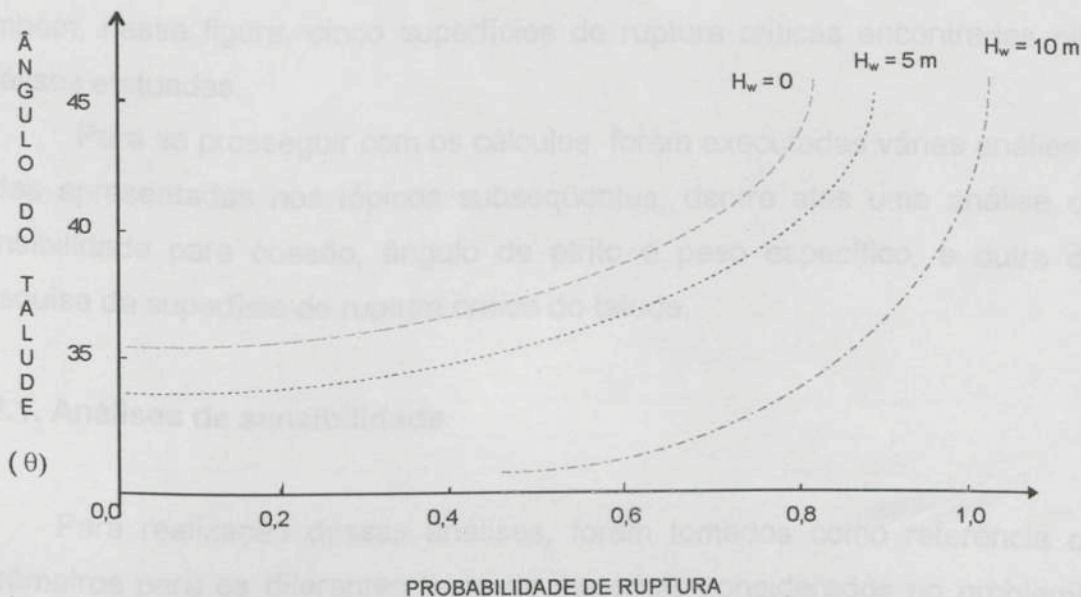
Fonte: TEIXEIRA JR. e VIRGILI (1984) (modificado).

Figura 8 - Exemplo de apresentação de resultado, para um talude de 60 m de altura, de uma análise probabilística para diferentes situações de nível d'água.



Fonte: TEIXEIRA JR. e VIRGILI (1984).

Figura 7 - Exemplo de apresentação de resultado, para um talude seco, de uma análise probabilística.



Fonte: TEIXEIRA JR. e VIRGILI (1984) (modificado).

Figura 8 - Exemplo de apresentação de resultado, para um talude de 60 m de altura, de uma análise probabilística para diferentes situações de nível d'água.

## 4.2. Análise determinística

O método de análise escolhido para a estabilidade do talude estudado foi o método de Janbu, que permite a pesquisa da superfície de deslizamento passando pela zona de maior fraqueza presente no maciço. Esse procedimento está descrito detalhadamente em diversas referências bibliográficas, como JANBU (1973), HOEK e BRAY (1981), LEE et al. (1983) etc.

No Quadro 12, resumem-se os parâmetros utilizados na análise de estabilidade efetuada nesta pesquisa, com a ressalva de que os valores considerados para hematita e itabirito macios (A4) foram as médias calculadas e representadas nos Quadros 9 e 11, respectivamente, enquanto para os demais litotipos os parâmetros foram fornecidos diretamente pela MBR.

Assim como em trabalhos realizados anteriormente, foram consideradas análises estáticas, não incorporando efeitos das vibrações dos fogos de desmonte.

A seção analisada do talude do *Morro do Patrimônio* está apresentada na Figura 5. O *Fator de Segurança* encontrado foi de 1,120. Representam-se também, nessa figura, cinco superfícies de ruptura críticas encontradas nas análises efetuadas.

Para se prosseguir com os cálculos, foram executadas várias análises, todas apresentadas nos tópicos subseqüentes, dentre elas uma análise de sensibilidade para coesão, ângulo de atrito e peso específico, e outra de pesquisa da superfície de ruptura crítica do talude.

### 4.2.1. Análises de sensibilidade

Para realização dessas análises, foram tomados como referência os parâmetros para os diferentes tipos de materiais considerados no problema, representados na Figura 5 e resumidos no Quadro 12, processando-se os cálculos várias vezes, mediante a variação desses parâmetros.

Quadro 12 - Parâmetros utilizados para o cálculo determinístico do FS

Tipo de Material	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	Classificação do Material na Análise Determinística
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	(°)	
Hematita macia	56,5	35	39,6	A
Hematita macia xistosa	37,0	20	34,0	B
Itabirito macio	40,5	32	28,7	C
Itabirito médio a macio	35,0	360	38,0	D
Itabirito duro	36,0	1070	55,0	E

#### a) Sensibilidade da coesão

Para essa análise de sensibilidade, supôs-se que o valor da coesão ( $c'$ ) do material A tenha sofrido uma variação de 35,00 kPa a 0 kPa, mantendo todos os outros parâmetros constantes. No Quadro 13, apresenta-se a variação do Fator de Segurança (FS) com relação à coesão ( $c'$ ).

Quadro 13 - Análise de sensibilidade para o parâmetro  $c'$

FS	$c'$ (kPa)
1,120	35,00
1,115	30,00
1,110	25,00
1,106	20,00
1,101	15,00
1,096	10,00
1,094	0,70
1,092	0,50
1,090	0,30
1,089	0,20
1,088	0,10
1,088	0,05
1,087	0,00

b) 5m Conclui-se, a partir da análise do Quadro 13, que a parcela de resistência atribuída à coesão é muito pequena, variando o valor do  $FS$  em aproximadamente 3%, o que pode ser comparado com a diferença atribuída ao uso de métodos de estabilidade diferentes. Tal verificação será o suporte para uma hipótese de cálculo considerada na análise probabilística, apresentada no subitem 4.3.

Na Figura 9, encontra-se o gráfico referente à análise realizada.

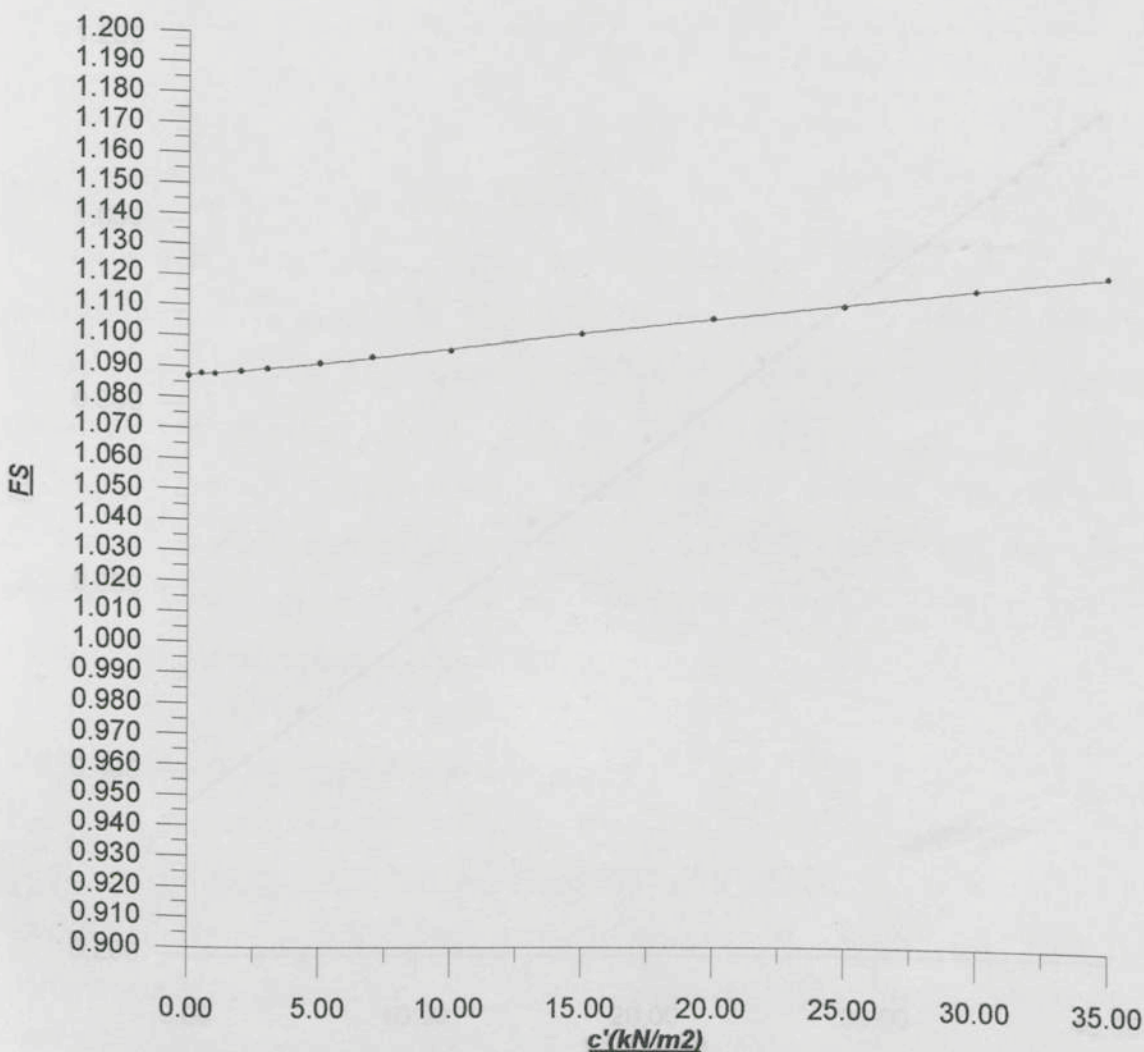


Figura 9 - Relação entre Fator de Segurança ( $FS$ ) e Coesão Efetiva ( $c'$ ).

### b) Sensibilidade do ângulo de atrito ( $\phi'$ )

Identicamente à análise de  $c'$  para o material A, simulou-se uma variação do ângulo ( $\phi'$ ) de  $39,6^\circ$  a  $0^\circ$ , mantendo todos os outros parâmetros constantes.

A partir da análise do Quadro 14, conclui-se que a parcela de resistência atribuída ao ângulo de atrito é considerável, chegando a uma variação no valor do FS de aproximadamente 70%.

A representação gráfica para essa análise é mostrada na Figura 10.

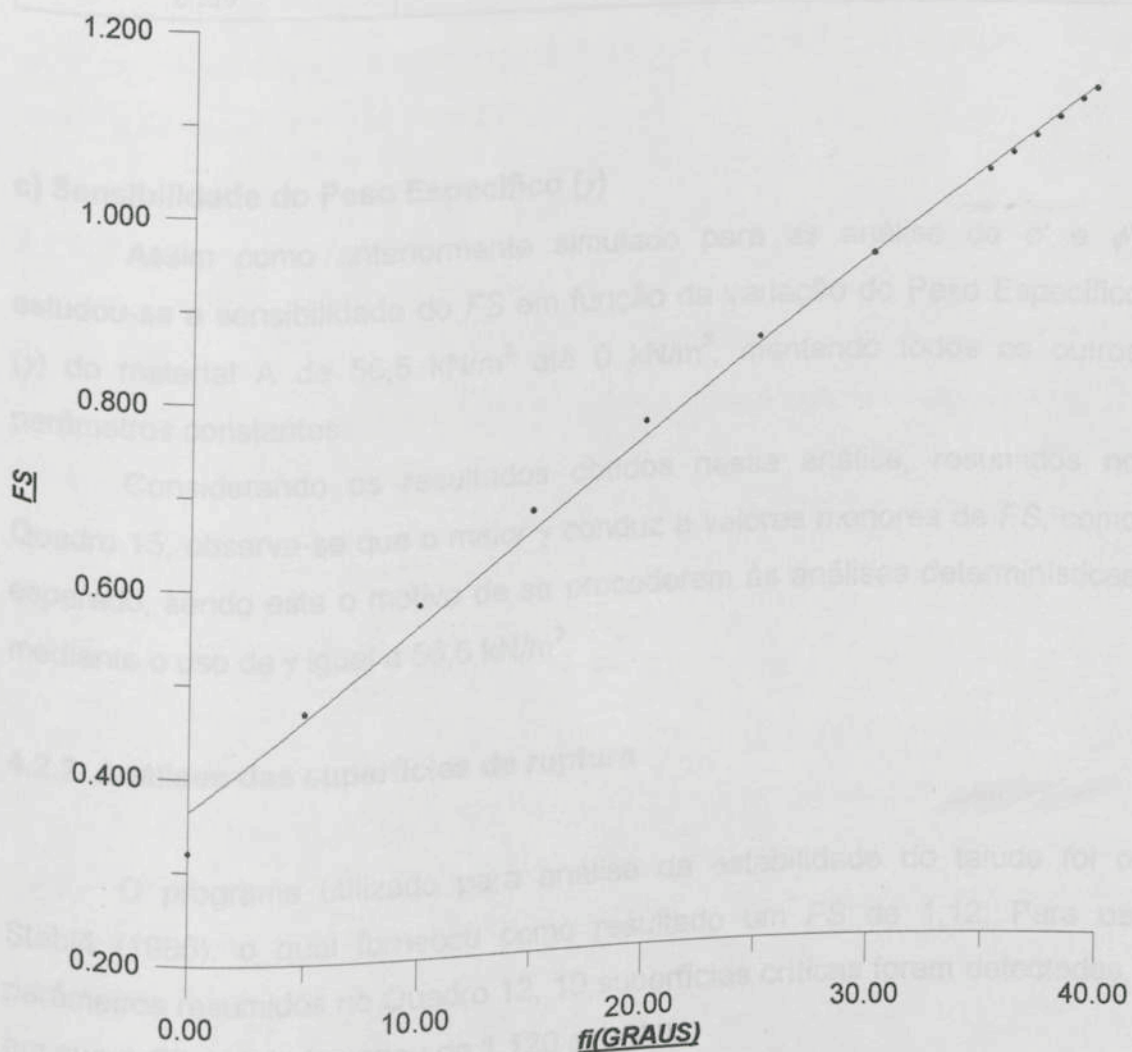


Figura 10 - Relação entre Fator de Segurança (FS) e Ângulo de Atrito ( $\phi'$ ).

Quadro 14 - Análise de sensibilidade para o parâmetro  $\phi'$

FS	$\phi'$ (°)
	39,6
1,120	39,0
1,108	38,0
1,088	37,0
1,068	36,0
1,049	35,0
1,030	30,0
0,938	25,0
0,850	20,0
0,763	15,0
0,673	10,0
0,578	5,00
0,467	0,00
0,320	

### c) Sensibilidade do Peso Específico ( $\gamma$ )

Assim como anteriormente simulado para as análises de  $c'$  e  $\phi'$ , estudou-se a sensibilidade do FS em função da variação do Peso Específico ( $\gamma$ ) do material A de  $56,5 \text{ kN/m}^3$  até  $0 \text{ kN/m}^3$ , mantendo todos os outros parâmetros constantes.

Considerando os resultados obtidos nessa análise, resumidos no Quadro 15, observa-se que o maior  $\gamma$  conduz a valores menores de FS, como esperado, sendo este o motivo de se procederem às análises determinísticas mediante o uso de  $\gamma$  igual a  $56,6 \text{ kN/m}^3$ .

### 4.2.2. Análises das superfícies de ruptura

O programa utilizado para análise da estabilidade do talude foi o Stabl4 (1985), o qual forneceu como resultado um FS de 1,12. Para os parâmetros resumidos no Quadro 12, 10 superfícies críticas foram detectadas, em que o FS do talude variou de 1,120 a 1,632.

Quadro 15 - Análise de sensibilidade para o parâmetro  $\gamma$

FS	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1,120	56,50
1,121	55,00
1,125	50,00
1,130	45,00
1,135	40,00
1,141	35,00
1,150	30,00
1,163	25,00

Analisando também as cinco superfícies plotadas na Figura 5, verifica-se a verossimilidade dos cálculos, visto que a ruptura ocorrida passou muito próxima da seção considerada crítica.

#### 4.2.3. Análise das parcelas de resistência

No Quadro 16, apresenta-se uma planilha de cálculo desenvolvida, com base no método determinístico de Janbu, para a obtenção do valor de  $\bar{R}$ , necessário na análise probabilística (Equação 43). Cálculos semelhantes foram apresentados por LEE et al. (1983), para o método de Fellenius (1927).

#### 4.3. Análise probabilística

A análise probabilística executada para o *Morro do Patrimônio* seguiu o que foi descrito no subitem 2.2, em que foram apresentados dois métodos diferentes para o cálculo de  $P_f$ . Nos tópicos subseqüentes serão apresentados os cálculos efetuados, destacando-se também, em cada etapa, as dificuldades encontradas para sua realização.

Quadro 16 - Planilha para o cálculo do FS pelo método de Janbu

Faixa	$c' (t/m^2)$	$\phi' (^\circ)$	$\gamma (t/m^3)$	$\alpha (^\circ)$	B)	$\tan \alpha$	$\Delta x$	Z (m)	$P(t/m^2)$	$\tan \psi'$	$B_0$	$A_0'$	$n_x$	$A_0$	$\Delta E_0$	$E_0$	$dE_0/dx$	$\alpha_{out} (^\circ)$	$\tan \alpha_{out}$	Ht	T1	$\Delta T1$	t1	B1	A'1
1,00	3,50	39,60	5,65	44,00	0	0,97	18	20,00	113,00	0,83	1984,21	1745,67	0,90	1946,01	201,52	0,00	-	-	-	0,00	0,00	-97,26	-5,40	1870,28	1685,21
2,00	3,50	39,60	5,65	40,00	0	0,84	35	26,00	146,90	0,83	4314,23	4375,92	0,96	4554,05	189,18	201,52	7,37	36,00	0,73	6,67	-97,26	-163,32	-4,67	4177,19	4240,81
3,00	3,50	39,60	5,65	38,00	0	0,78	19	32,00	180,80	0,83	2683,87	2908,34	0,99	2939,18	21,57	390,70	3,90	37,00	0,75	8,67	-260,59	-126,87	-6,68	2584,75	2803,39
4,00	3,50	39,60	5,65	34,00	0	0,67	16	26,00	146,90	0,83	1585,36	2000,42	1,04	1924,45	-157,80	412,27	-3,89	40,00	0,84	10,67	-387,46	111,37	6,96	1680,49	2082,56
5,00	3,50	39,60	5,65	36,00	0	0,73	10	24,00	135,90	0,83	985,19	1167,18	1,02	1145,31	-52,23	254,48	-8,08	39,00	0,81	8,67	-276,08	87,18	8,72	1048,53	1239,97
6,00	3,50	39,60	5,65	39,00	0	0,81	19	20,00	113,00	0,83	1738,61	1842,65	0,98	1888,96	27,59	202,25	-0,85	42,00	0,90	8,00	-188,90	36,91	1,94	1768,50	1873,19
7,00	3,50	39,60	5,65	43,00	0	0,93	10	20,00	113,00	0,83	1053,74	969,82	0,91	1061,32	92,40	229,84	4,14	38,00	0,78	6,67	-151,99	-32,25	-3,22	1023,67	943,14
8,00	3,50	39,60	5,65	36,00	0	0,73	19	21,00	118,65	0,83	1637,88	1931,46	1,02	1901,51	-84,50	322,25	0,27	30,00	0,58	6,67	-184,23	70,14	3,69	1688,84	1989,49
9,00	2,00	34,00	3,70	35,00	0	0,70	29	32,00	118,40	0,67	2404,23	2373,99	0,96	2467,70	168,99	237,74	1,76	28,00	0,53	7,00	-114,09	-81,31	-2,80	2347,30	2319,14
10,00	2,00	34,00	3,70	36,00	0	0,73	6	37,00	136,90	0,67	596,78	566,04	0,95	596,43	56,53	406,74	6,44	33,00	0,65	10,67	-195,40	43,73	7,29	628,55	595,54
11,00	2,00	34,00	3,70	38,00	0	0,78	10	38,00	140,60	0,67	1098,49	968,36	0,92	1050,90	146,58	483,27	12,69	34,00	0,67	12,67	-151,68	-171,28	-17,13	964,67	852,83
12,00	2,00	34,00	3,70	38,00	0	0,78	20	34,00	125,80	0,67	1965,71	1737,06	0,92	1885,13	258,17	609,85	13,49	39,00	0,81	12,67	-322,95	-176,49	-8,82	1827,82	1618,02
13,00	2,00	34,00	3,70	39,00	0	0,81	10	34,00	125,80	0,67	1018,71	868,53	0,91	957,71	151,21	868,02	13,65	37,00	0,75	11,33	-499,44	-260,44	-26,04	807,81	692,86
14,00	3,50	39,60	5,65	34,00	0	0,67	20	27,00	152,55	0,83	2057,93	2594,01	1,04	2495,49	-202,49	1019,23	-1,71	36,00	0,73	11,33	-759,88	85,05	4,25	2115,29	2664,36
15,00	3,50	39,60	5,65	38,00	0	0,78	10	27,00	152,55	0,83	1191,85	1297,00	0,99	1310,75	4,57	816,75	-6,60	37,00	0,75	9,00	-674,84	-104,86	-10,49	1109,93	1210,26
16,00	3,50	39,60	5,65	31,00	0	0,60	20	22,00	124,30	0,83	1493,74	2126,60	1,07	1987,28	-306,33	821,32	-10,06	40,00	0,84	9,00	-779,70	392,00	19,60	1729,28	2450,89
17,00	3,50	39,60	5,65	35,00	0	0,70	10	20,00	113,00	0,83	791,23	969,82	1,03	943,46	-63,35	514,99	-12,32	30,00	0,58	7,33	-387,69	-89,66	-8,97	728,45	895,64
18,00	3,50	39,60	5,65	37,00	0	0,75	20	15,00	84,75	0,83	1277,27	1472,23	1,00	1467,92	-52,36	451,64	-3,86	45,00	1,00	6,67	-477,35	200,27	10,01	1428,18	1637,90
19,00	3,50	39,60	5,65	19,00	0	0,34	10	11,00	62,15	0,83	214,00	549,15	1,13	486,90	-227,03	399,28	-9,31	30,00	0,58	5,00	-277,09	83,13	8,31	242,62	617,92
20,00	3,50	39,60	5,65	35,00	0	0,70	20	9,00	50,85	0,83	712,11	911,34	1,03	886,57	-90,94	172,25	-10,60	42,00	0,90	3,67	-193,96	131,43	6,57	804,14	1020,07
21,00	3,50	39,60	5,65	24,00	0	0,45	12	4,00	22,60	0,83	120,75	266,36	1,12	238,49	-95,28	81,31	-5,82	29,00	0,55	3,00	-62,53	62,53	5,21	148,58	318,08
										$\Sigma$	30805,91	33641,95		34135,55	-13,97	-13,97	-	-	-	0,00	0,00	0,00		30704,89	34443,26

Fo = 1,09

Fo = 1,10

Calculado

F1 = 1,12

#### 4.3.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem Avançado

Em princípio, este foi o método escolhido para o desenvolvimento do trabalho, em razão dos resultados que ele fornece. O grande impedimento encontrado foi com respeito à sua formulação matemática. O método exige que sejam separadas as variáveis aleatórias em blocos, dentro da função de estado-limite ( $Z$ ), para que se consigam as derivadas parciais, mas, para o caso em questão, chega-se a derivações implícitas. Outra questão a estudar com maior critério refere-se ao somatório das fatias. Todo o cálculo é efetuado para o equilíbrio de apenas uma fatia, e estender o resultado para toda a superfície de ruptura é um trabalho que requer tempo de estudo maior, com aprofundamentos matemáticos e o auxílio de programas específicos de computador. Por essas razões é que não se prosseguiu na utilização deste método.

A função de estado-limite citada acima, para o método determinístico escolhido, pode ser representada da seguinte maneira (HOEK e BRAY, 1981):

$$F = \frac{fo \sum [c' + (\gamma h - \gamma_w \cdot hw) \cdot \text{tg} \phi'] \cdot (1 + \text{tg}^2 \alpha) \cdot \Delta x}{\sum (\gamma h \cdot \Delta x \cdot \text{tg} \alpha) + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot w \cdot z^2} \quad (24)$$

#### 4.3.2. Método da Probabilidade de Ruptura Baseado na Distribuição Normal

Este foi o segundo método estudado para análise probabilística do talude do *Morro do Patrimônio*, tendo sido o escolhido para se chegar ao valor procurado de  $P_f$ .

Para realização dos cálculos, assumiu-se que apenas  $c'$  e  $\phi'$  são variáveis aleatórias.

A função do estado-limite escolhida para a realização dos cálculos foi a mesma citada acima, ou seja, o emprego da Equação 24:

Os cálculos obedecem ao roteiro descrito a seguir:

Quadro • Inicialmente, faz-se uma seleção das parcelas em consequência da coesão e do ângulo de atrito (Quadro 17), separando os termos conforme mostrado a seguir:

$$F = ai.c' + bi.tg\phi' \quad (25)$$

em que

$$a_i = \frac{(1 + tg^2\alpha)\Delta x}{A} \quad (26)$$

$$b_i = \frac{\gamma(1 + tg^2\alpha)\Delta x}{A} \quad (27)$$

$$A = \left(1 + \frac{tg\alpha.tg\phi'}{1,12}\right) \quad (28)$$

Logo:

$$a_i = \frac{(1 + tg^2\alpha)\Delta x}{\left(1 + \frac{tg\alpha.tg\phi'}{F}\right)} = 350,252 \quad (29)$$

$$b_i = \frac{\gamma(1 + tg^2\alpha)\Delta x}{\left(1 + \frac{tg\alpha.tg\phi'}{F}\right)} = 1821,440 \quad (30)$$

• Os parâmetros considerados para as análises foram as médias encontradas para a hematita, material A, ou seja:

$$c' = 3,50 \text{ tf/m}^2$$

$$tg\phi' = 0,827$$

$$FS = 1,120 \text{ (calculado pela da análise determinística).}$$

• Os cálculos estatísticos necessários estão listados a seguir:

- Desvio-padrão: 
$$s(x) = \sqrt{\frac{n\sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (31)$$

$$s(c') = \sqrt{\frac{4(52,787) - 196,841}{4(4-1)}} = 1,092 \quad (32)$$

$$s(tg\phi') = \sqrt{\frac{5(3,5490) - 17,391}{5(5-1)}} = 0,133 \quad (33)$$

Quadro 17 - Cálculo das parcelas relativas a  $c'$  e  $\phi'$

Fatia	$c'$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$\tan \alpha$	$\tan^2 \alpha$	$\Delta x$ (m)	$\tan \phi'$	A	ai	bi
1	3,5	39,6	5,65	44,0	0,966	0,933	18,0	0,827	1,713	20,304	114,715
2	3,5	39,6	5,65	40,0	0,839	0,704	35,0	0,827	1,620	36,822	208,042
3	3,5	39,6	5,65	38,0	0,781	0,610	19,0	0,827	1,577	19,401	109,618
4	3,5	39,6	5,65	34,0	0,675	0,455	16,0	0,827	1,498	15,538	87,790
5	3,5	39,6	5,65	36,0	0,727	0,528	10,0	0,827	1,537	9,943	56,177
6	3,5	39,6	5,65	39,0	0,810	0,656	19,0	0,827	1,598	19,685	111,220
7	3,5	39,6	5,65	43,0	0,933	0,870	10,0	0,827	1,689	11,071	62,549
8	3,5	39,6	5,65	36,0	0,727	0,528	19,0	0,827	1,537	18,891	106,736
9	2,0	34,0	3,70	35,0	0,700	0,490	29,0	0,675	1,422	30,399	112,477
10	2,0	34,0	3,70	36,0	0,727	0,528	6,0	0,675	1,438	6,377	23,595
11	2,0	34,0	3,70	38,0	0,781	0,610	10,0	0,675	1,471	10,951	40,520
12	2,0	34,0	3,70	38,0	0,781	0,610	20,0	0,675	1,471	21,903	81,039
13	2,0	34,0	3,70	39,0	0,810	0,656	10,0	0,675	1,488	11,130	41,180
14	3,5	39,6	5,65	34,0	0,675	0,455	20,0	0,827	1,498	19,423	109,738
15	3,5	39,6	5,65	38,0	0,781	0,610	10,0	0,827	1,577	10,211	57,694
16	3,5	39,6	5,65	31,0	0,601	0,361	20,0	0,827	1,444	18,853	106,521
17	3,5	39,6	5,65	35,0	0,700	0,490	10,0	0,827	1,517	9,823	55,498
18	3,5	39,6	5,65	37,0	0,754	0,568	20,0	0,827	1,557	20,144	113,816
19	3,5	39,6	5,65	19,0	0,344	0,119	10,0	0,827	1,254	8,918	50,384
20	3,5	39,6	5,65	35,0	0,700	0,490	20,0	0,827	1,517	19,645	110,996
21	3,5	39,6	5,65	24,0	0,445	0,198	12,0	0,827	1,329	10,820	61,135
										350,252	1821,440

- Variância da amostra:  $V(x) = s(x)^2$  (34)

$$Vc' = (1,092)^2 = 1,192 \quad (35)$$

$$Vtg\phi' = (0,133)^2 = 0,018 \quad (36)$$

- Coeficiente de variação:  $CV(x) = \frac{100 \cdot s(x)}{\bar{X}}$  (37)

$$CVc' = \frac{100 \cdot 1,092}{3,5} = 31,2\% \quad (38)$$

$$CVtg\phi' = \frac{100 \cdot 0,133}{0,827} = 16,082\% \quad (39)$$

- Variância da resistência, para todas as fatias:

$$V_R = a_i^2 \cdot Vc' + b_i^2 \cdot Vtg\phi' \quad (40)$$

em que

$$VK_X = K^2 \cdot V(x) \quad (41)$$

é uma propriedade da variância.

Importa observar que, com respeito à parcela relativa à coesão, esta será desprezada, sem que isso traga prejuízos significativos para o resultado, como demonstrado na análise de sensibilidade (tópico 4.2.3), ou seja:

$$\begin{aligned} V_R &= (1821,440)^2 \cdot 0,018 \\ V_R &= 59.717,586 \end{aligned} \quad (42)$$

- Coeficiente de variação  $CV_R$ :

$$CV_R = \frac{100 \cdot \sqrt{V_R}}{\bar{R}} \quad (43)$$

Ressalta-se que o valor calculado para  $\bar{R}$  refere-se às parcelas relativas a  $c'$  e  $\phi'$ , que determinam a resistência dentro do método de Janbu, e está representado no Quadro 16. Para que esse valor fosse calculado, foi necessária a elaboração de tal planilha, a fim de se acompanharem os passos desenvolvidos pelo método, discriminando manualmente o valor das parcelas mobilizadas pela resistência, ou seja:

$$CV_R = \frac{100 (244,372)}{41080,650} \quad (44)$$

$$CV_R = \frac{24437,182}{41080,650} = 0,595 = 59,5\% \quad (45)$$

Para variáveis normais (Equação 23):

$$Pf = 1 - F \left( \frac{1,12 - 1}{1,12 \cdot 0,595} \right) \quad (46)$$

$$Pf = 1 - F(0,18) \quad (47)$$

No Quadro 4 - Função de Distribuição Cumulativa, para Distribuição Normal (LEE et al., 1983), tem-se que

$$Pf = 1 - 0,57142 \quad (48)$$

$$Pf = 0,429$$

(49)

$\therefore$  probabilidade de ruptura de 42,9 %

#### 4.4. Comentários

De posse do resultado obtido na análise probabilística e de acordo com a sugestão de COLE (1980), apresentada no Quadro 2, conclui-se que o valor calculado se encontra na faixa em que é assumido um risco maior que 10%, ou seja, para casos em que a ruptura traz poucos danos ao empreendimento, admitindo um grau de prejuízo inconveniente, o que não se aplica ao caso em estudo.

Quanto à análise determinística, conclui-se que o  $FS = 1,12$  encontrado se enquadra dentro de situações de risco aceitável para taludes de mineração, valor usualmente encontrado na prática desta atividade.

Em vista disso, relatou-se que a expectativa de um deslizamento esperado era de poucos prejuízos operacionais, ou seja, não existia a possibilidade de danos em equipamentos, vias de acesso a serem interditadas e nem vidas humanas expostas de alguma forma que pudessem ser perdidas.

O que se constatou após o acidente foram a perda de equipamentos e a paralisação dos trabalhos mineiros por vários dias, acarretando prejuízos de ordem econômica para a mineradora. Tal fato reforça a justificativa levantada para o presente trabalho, quando se ressaltou a importância de serem feitos estudos complementares para análises de estabilidade de taludes. Muitas vezes, como o fato ocorrido na MAC, apenas a análise determinística não é suficiente para se garantir a segurança de determinada estrutura, sendo necessária a utilização de novos caminhos para que isso ocorra.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Como resultado do material estudado, pode-se afirmar como sendo prática cotidiana em análise de estabilidade de taludes de mineração a utilização de métodos determinísticos e seus resultados expressos em termos de fatores de segurança. Porém, tendo em vista a natureza do material estudado, sua anisotropia e heterogeneidade, torna-se de maior interesse a utilização também, de forma isolada ou conjunta, dos métodos probabilísticos.

Algumas vantagens em usar análises probabilísticas para maciços de mineração podem ser listadas, a partir dos resultados finais encontrados:

- a) dependendo da magnitude do trabalho a ser efetuado, todos os fatores determinantes podem ser incorporados nas análises, desde eventos como terremotos até níveis bem detalhados do maciço em solo e, ou, rocha;
- b) como os parâmetros são trabalhados dentro de uma margem de confiança conhecida, permite-se que outros profissionais possam acompanhar o raciocínio empregado e debater as técnicas utilizadas, com o objetivo de avançar em novos conceitos e em novas soluções (PENTZ, 1981);
- c) em projetos de mineração, as dúvidas quanto à escolha dos fatores de segurança podem ser minimizadas por meio de estudos pormenorizados de

custo-benefício, de acordo com o planejamento da mina e a sua análise de risco; e,

d) também, as mineradoras podem-se beneficiar com a estimativa dos volumes de ruptura e da área a ser afetada por essa ruptura (MCMAHON, 1975).

Considerando tudo o que foi exposto, conclui-se pelos evidentes benefícios trazidos por análises conjunta entre métodos determinísticos e probabilísticos. Para uma análise puramente determinística do caso em questão, chega-se à conclusão de que o talude não oferecia grandes riscos, levando em conta sua característica de talude de mineração. Porém, para a análise probabilística do mesmo problema, foi concluído que se tratava de um talude onde estudos mais aprofundados eram necessários.

Por intermédio dos estudos realizados pela FIGUEIREDO FERRAZ CONSULTORIA E ENGENHARIA DE PROJETO (1992), pode-se afirmar que, levando-se em conta as características do maciço estudado e em função do alívio de tensões provocado pela remoção do minério, confirmado nos resultados das análises efetuadas, a hematita macia (A4) passou por processo de plastificação e retornou ao estado elástico em decorrência da redistribuição de tensões, ou seja, esse material sofreu tensões de cisalhamento além da sua resistência de pico.

Outro fato interessante, também observado nesse relatório, foi a presença de regiões do maciço solicitadas à tração, também ocorrida em razão do alívio de tensões provocado pela escavação, que indica o potencial para a abertura de trincas, tanto na face escavada em hematita macia (A4) como na face oposta, localizada na Serra do Curral. Essas trincas propiciaram caminhos preferenciais de circulação de água no maciço, induzindo processos de intemperismo e contribuindo para queda na resistência.

Todas essas considerações levam a afirmar que a zona potencialmente instável do *Morro do Patrimônio* estaria restrita à hematita macia (A4) ou ao seu contato com o itabirito macio (A4), seção S1, e confirmada mediante as observações realizadas "in situ" após a ruptura.

A análise determinística efetuada para o presente trabalho também foi confirmada pelo deslizamento, por meio de comparações entre a cunha estimada e a ocorrida no campo.

Alerta-se para a necessidade de se continuar estudando os processos de cálculo com programas computacionais desenvolvidos especificamente para as análises probabilísticas, para que a contribuição em futuros projetos seja de fato vantajosa.

Como recomendação final, considera-se desnecessário reafirmar a importância de estudos conjuntos, determinísticos e probabilísticos, bem como de sua divulgação, a fim de que ocorra o desenvolvimento de critérios de dimensionamento, projetos e normas mais seguros e econômicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications. New York, John Wiley & Sons, 1969. 237 p.
- CHOWDHURY, R. An overview of slope analysis in practice. In: THE MELLO volume, a tribute to Prof. Victor F. B. de Mello. São Paulo: Edgar Blücher, S.A., p. 69-76.
- COLE, K. W. Factors of safety and limit state design in geotechnical engineering. Glasgow Lecture given to the Scottish Geotechnical Group, 1960. 35 p.
- CORNELL, C. A. A normative second-moment reliability theory for structural design. Ontario, Canada: Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1962. 54 p.
- COSTA, S. M. A.; PEREIRA, E. A. Geologia do segmento central da Serra do Curral e estudo geológico-geotécnico da Mina de Água Clara, Q. F. 1. MO, B. 0111. Belo Horizonte: Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 43 p.
- EINSTEIN, H. H.; BAECHER, G. B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology. Specific methods and examples - I. exploration. Rock mechanics and rock engineering, Massachusetts: Springer-Verlag, 1983. p. 39-72.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 237 p.
- CHOWDHURY, R. **An overview of slope analysis in practice**. In: THE MELLO volume: a tribute to Prof. Victor F. B. de Mello. São Paulo: Edgard Blücher, s. d., p. 69-76.
- COLE, K. W. **Factors of safety and limit state design in geotechnical engineering**. Glasgow: Lecture given to the Scottish Geotechnical Group, 1980. 35 p.
- CORNELL, C. A. **A normative second-moment reliability theory for structural design**. Ontario, Canadá: Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1969. 54 p.
- COSTA, S. M. A., PIMENTA, E. A. **Geologia do segmento central da Serra do Curral e estudo geológico-geotécnico da Mina de Águas Claras, Q. F., MG, Brasil**. Belo Horizonte: Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 43 p.
- EINSTEIN, H. H., BAECHER, G. B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology. Specific methods and examples - I. exploration. **Rock mechanics and rock engineering**, Massachusetts: Springer-Verlag, 1983. p. 39-72.

- FIGUEIREDO FERRAZ CONSULTORIA E ENGENHARIA DE PROJETO.  
**Ruptura de talude no setor do Morro do Patrimônio: recomendações preliminares para retomada da lavra.** Belo Horizonte, 1992. 28 p. (Relatório MBR T92025/S - I16 - RT-00-MI04-001).
- GENEVOIS, B. B. P. Efeito da variabilidade espacial dos parâmetros do solo na capacidade de carga de uma fundação superficial. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 45-52, set. 1991.
- HASOFER, A. M., LIND, N. C. Exact and invariant second moment code format. **J. Eng. Mech. Div., ASCE, USA**, v. 100, p. 23-34, 1974.
- HOEK, E. e BRAY, J. W. **Rock slope engineering.** London: The institution of mining and metallurgy, 1981. 358 p.
- JANBU, N. Slope stability computations. In: Hirschfeld, R. C., Poulos, S. J. **Embankment dam engineering.** New York: Wiley, 1973. pp. 47-86.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version.** Singapore: John Wiley & Sons, Massachusetts Institute of Technology, 1979. 553 p.
- LEE, I. K. ; WHITE, W., INGLES, O. G. **Geotechnical engineering.** Melbourne: Pitman Publishing Pty, 1983. 508 p.
- McMAHON, B. K. A statistical method for the design of rock slopes. In: Conference on Geomechanics, 1971, New Zealand, v. 2, 559 p. **Proceedings ...** Brisbane: The Institution of Engineers, 1971. p.314-321.
- McMAHON, B. K. Probability of failure and expected volume of failure in high rock slopes. In: 2nd Conference on Geomechanics, 1975, New Zealand. **Proceedings ...** Brisbane: The Institution of Engineers, 1975. p.308-314.
- MELLO, V. F. B. **Interpretação de ensaios laboratoriais referente à estabilidade de cortes.** Belo Horizonte, 1980. p 26 (Relatório MBR - 090180).
- MELLO, V. F. B. **Análise de risco na lava da cava da MAC: relatório de progresso n.1/81.** Belo Horizonte, 1981. p. 17 (Relatório MBR - MAC: 261181).
- NEVES, E. M. Estados limites e segurança em Geotecnia. **Revista Geotecnia**, Portugal, n. 72, 63 p. novembro/1994.
- OLSSON, L., BERGGREN, B. , BENGTTSSON, P. E. et al. Reliability based partial coefficients: a simplified approach. In: **XII ICSMFE**, 1989, Rio de Janeiro, v. 3, p. 2081-2084.

- PARRA, P. C., LASMAR, N. T. Ruptura da barragem de rejeitos da Mina de Fernandinho. In: **Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 423-433, 1987.
- PENTZ, D. L. Slope stability analysis techniques incorporating uncertainty in critical parameters. In: **International conference on stability in surface mining**, Vancouver, v. 3, p. 197-228, 1981.
- PRIEST, S. D. BROWN, E. T. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. **Institution of Mining and Metallurgy (Sect. A: Min. industry)**, London, n. 92, p. 1-12, january/1983.
- ROCHA, M. **Mecânica das rochas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Mecânica das Rochas, 1981. 386 p.
- ROSENBLUETH, E., ESTEVA, L. Reliability basis for some mexican codes. **American Concrete Institution Publication SP-31**, USA, p.67-82, 1972.
- SMITH, G. N. Probability theory in geotechnics: an introduction. **Ground Engineerng**, Edinburgo, p.29-34, oct. 1981.
- SMITH, G. N. **Probability and statistics in civil engineering**. London: Collins, 1986. 267 p.
- TEIXEIRA JR., P. B., VIRGILI, J. C. Métodos probabilísticos e métodos determinísticos em análise de estabilidade de taludes rochosos. In: **4º Congresso brasileiro de geologia de engenharia**, Belo Horizonte, v. II, p 185-195, 1984,.
- VIEL, R. S. **Mapeamento geológico estrutural da MAC/85**. Belo Horizonte, 1985. 15 p. (Relatório MBR Plot-044/85)
- VIRGILI, J. C., TEIXEIRA JR., P. B. Considerações sobre análise de estabilidade de taludes rochosos em minas a céu aberto. In: **Coletânea de trabalhos técnicos, 1º congresso brasileiro de mineração**, Brasília, v. 1, p. 99-115, 1985.
- YEGULALP, T. M., MAHTAB, M. A. A proposed model for statistical representation of mechanical properties of rock. In: **24th U.S. symposium on rock mechanics**, New York, p. 61-69, 1983.