

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES  
DA MINA DE TAPIRA-MG**



**NUGEO**

**AUTOR: RENATO CAPUCHO REIS**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

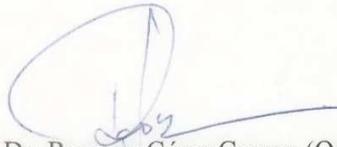
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - OUTUBRO DE 2010**

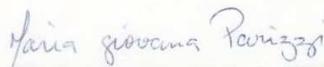
## ***ESTUDO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA MINA DE TAPIRA/ MG***

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**, área de concentração em *Geotecnia aplicada à Mineração*.

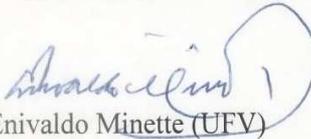
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 25 de outubro de 2010, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador /UFOP)



Profa. Dra. Maria Giovana Parizzi (UFOP)



Prof. Dr. Enivaldo Minette (UFV)

**R375e**      **Reis, Renato Capucho.**

Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira - MG [manuscrito] /  
Renato Capucho Reis. – 2010.

xix, 95f.: il., color.; grafs.; tabs.; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotecnia aplicada à mineração.

1. Geotecnia - Teses. 2. Taludes (mecânica do solo) - Estabilidade - Teses.  
3. Minas e mineração - Tapira (MG) - Teses. I. Universidade Federal de Ouro  
Preto. II. Título.

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

Considero feliz aquele que quando se fala de êxito busca a resposta em seu trabalho.

(Ralph Waldo Emerson)

## DEDICATÓRIA

À esposa Cinara que com amor, carinho e dedicação, sempre se mostrou presente apoiando-me de maneira incansável na busca deste ideal.

À minha família, em especial minha mãe, a quem serei eternamente grato.

## AGRADECIMENTOS

À empresa Fertilizantes Fosfatados S/A- Fosfértil que me ofereceu a oportunidade em participar do Mestrado Profissionalizante do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Ao orientador o professor Romero César Gomes pela excelente orientação, motivando-me no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do mestrado profissional do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas de Ouro Preto que me apoiaram em discussões geotécnicas.

Aos Engenheiros Luis Antônio Pinto Almeida, Nadim Abdanur Jr. e Daniel Santos Jr. que sempre me incentivaram para a realização trabalhos de geotecnia na empresa.

Aos profissionais Paulo César Abrão e Silvio Oliveira que através das incontestáveis experiências profissionais, auxiliaram-me no estudo de caso dessa dissertação.

Aos amigos da Fosfertil que sempre me apoiaram nessa etapa de minha vida profissional.

Aos meus colegas do mestrado pela amizade e ótimo ambiente em sala de aula.

## RESUMO

A engenharia geotécnica tem desempenhado, em escala crescente, um papel de enorme relevância em empreendimentos civis e minerais, particularmente em termos de projetos de taludes. Com efeito, a importância crescente que a estabilidade de taludes em solos, rochas frescas e rochas muito alteradas tem atualmente deve-se às dimensões cada vez mais significativas que são impostas às escavações mineiras em lavra a céu aberto e aos grandes cortes exigidos em ferrovias e rodovias de grande tráfego. É comum ter-se em rodovias cortes com mais de uma centena e meia de metros; em lavras a céu aberto, os taludes chegam a atingir mais de 300 metros de altura. No contexto da mineração, o ângulo do talude final representa a otimização do binômio envolvendo a economia e a segurança das escavações de lavra. Assim, o estudo da estabilidade dos taludes de uma cava de mineração a céu aberto implica a determinação da geometria de escavação com acesso direto ao bem mineral de interesse e com a maior segurança possível. Esta geometria contempla a determinação dos ângulos dos taludes individuais, ângulos gerais da cava, alturas de bancadas e dimensões das bermas. A proposta desse trabalho consiste na avaliação determinística da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, constituídos por materiais friáveis (camadas de argilas, titânio e fosfato friável), com base em uma ampla campanha de investigação geotécnica dos materiais dos taludes, que compreendeu a coleta de amostras representativas dos mesmos e a execução de ensaios de laboratório para a caracterização dos solos locais e a determinação dos correspondentes parâmetros de resistência. Os resultados obtidos foram consistentes tanto com os dados das investigações prévias como com as observações de campo e confirmaram a adequação da metodologia de trabalho adotada nesta pesquisa.

## ABSTRACT

Geotechnical engineering has, in increasing scale, played a very important role in civil and mineral enterprises, especially in terms of slope projects. Therefore, the increasing importance that the stability of slopes in soils, fresh and weathered rock currently has, are due to more and more significant dimensions imposed on both open-pit mining excavations and cuts, which are required in either railways or roads with heavy traffic. Roads usually have sections with more than one hundred and fifty meters; when it comes to open-pit mining, the slopes reach over than 300 meters high. Taking into account the mining context, the angle of the final slope represents the optimization of both economy and safety of mining excavations. Consequently, the study of the slope stability in an open-pit mining involves the determination of the excavation geometry with direct access to the mineral of interest and with the highest security possible. This geometry is composed of the determination of the individual slope angles, general mine angles and benches heights and sizes. The aim of this work consists in deterministic evaluation of the slopes stability in Tapira mine where there are friable materials (layers of clay, titanium and friable phosphate). This work is based on an extensive geotechnical investigation of the slope materials which included the collection of representative samples of those materials as well as the execution of laboratory trials for the characterization of local soils and the determination of corresponding strength parameters. The results were consistent with both data from previous investigations and the field observations. They confirmed the adequacy of working methodology adopted in this research.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Rupturas de taludes de mineração: Innocentini (2003); Huallanca (2004).
- Figura 2.1 – Superfície de ruptura não circular ao longo de contato litológico complexo (Innocentini, 2003).
- Figura 2.2 – Influência do número de famílias de descontinuidades no modo de ruptura (modificado - Hoek & Bray, 1981).
- Figura 2.3 – Ruptura por escorregamento plano (modificado - Hoek & Bray, 1981).
- Figura 2.4 – Ruptura por escorregamento em cunha (modificado - Hoek & Bray, 1981).
- Figura 2.5 – Instrumentação geotécnica para taludes de mineração a céu aberto (Hualanca, 2004, modificado).
- Figura 2.6 – Esquema geral de um medidor de NA (Fonseca, 2003, modificado).
- Figura 2.7 – Esquema geral de um piezômetro de tubo aberto (Fonseca, 2003).
- Figura 3.1 – Mapa de Localização do Complexo Tapira.
- Figura 3.2 – Vista geral do Complexo Tapira.
- Figura 3.3 – Mapa Geológico do Sinforma de Araxá (Seer, 1999).
- Figura 3.3 – Coluna tectonoestratigráfica do Sinforma de Araxá (Seer, 1999).
- Figura 3.4 – Litologias típicas regionais: (a) ritmitos do Grupo Canastra; (b) calcifilitos do Grupo Ibiá (Seer, 1999).
- Figura 3.5 – Litologias típicas regionais: (c) pegmatito intrusivo em xisto muito deformado do Grupo Araxá (Seer, 1999).
- Figura 3.6 – Chaminé ultramáfico-carbonatítica de Tapira (Ferrari, 2000).
- Figura 3.7 – Localização da Mina de Tapira na chaminé ultramáfico-carbonatítica.
- Figura 3.8 – Corpos de minério de fosfato e estéreis da Mina de Tapira.
- Figura 3.9 – Mina do Complexo de Mineração de Tapira.
- Figura 3.10 – Seção esquemática dos horizontes geotécnicos da Mina de Tapira.
- Figura 3.11 – Identificação dos horizontes geotécnicos da Frente 2 da Mina de Tapira.
- Figura 3.12 – Pilha de disposição de estéreis T4 da Mina de Tapira.
- Figura 3.13 – *Stacker* e pilhas de homogeneização do minério bruto.

Figura 3.14 – Fluxograma do processo da produção do concentrado fosfático convencional.

Figura 3.15 – Fluxograma do processo da produção do concentrado fosfático ultrafino.

Figura 4.1 – Horizontes ou zonas de mineralização na área da Mina de Tapira.

Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos solos locais (Primeiro Estudo).

Figura 4.3 – Envoltórias de resistência obtidas (Primeiro Estudo).

Figura 4.4 – Frente de lavra 1 da Mina de Tapira em 1995.

Figura 4.5 – Frente de lavra 3 da Mina de Tapira em 1995.

Figura 4.6 – Mapa topográfico da Mina de Tapira em 1995 (Segundo Estudo).

Figura 4.7 – Locação da área de ruptura da Frente 2 da Mina de Tapira em 1999 (Terceiro Estudo).

Figura 4.8 – Curvas granulométricas dos materiais da Mina de Tapira (Terceiro Estudo).

Figura 4.9 – Locação da trinca surgida na Frente 1 da Mina de Tapira (Quarto Estudo).

Figura 5.1 – Mapa topográfico com indicação das frentes e seções estudadas.

Figura 5.2 – Execução de poço de inspeção (PI - 101) na Mina de Tapira.

Figura 5.3 – Coleta de amostra indeformada no Poço PI -101.

Figura 5.4 – Coleta de amostra deformada no Poço PI -101.

Figura 5.5 – Acondicionamento e transporte final das amostras coletadas.

Figura 5.6 – Curva granulométrica da amostra indeformada do Poço PI -101.

Figura 5.7 – Limites de consistência da amostra indeformada do Poço PI -101.

Figura 5.8 – Resultados de Ensaios CIU para a amostra oriunda do poço PI-102 (1).

Figura 5.9 – Resultados de Ensaios CIU para a amostra oriunda do poço PI-102 (2).

Figura 5.10 – Planejamento atual de lavra na Mina de Tapira (2009).

Figura 5.11 – Mapa do planejamento de lavra de longo prazo (2028).

Figura 5.12 – Seção P1 – Frente 1 da lavra da Mina de Tapira.

Figura 5.13 – Análise de estabilidade da seção P1 na hipótese de NA elevado.

Figura 5.14 – Seção P6 – Frente 2 da lavra da Mina de Tapira.

Figura 5.15 – Análise de estabilidade da seção P5A na hipótese de NA normal.

Figura 5.16 – Seção D – Frente 2 da lavra da Mina de Tapira.

Figura 5.17 – Análise de estabilidade da seção D na hipótese de NA elevado.

Figura 5.18 – Análise de estabilidade da seção G na hipótese de NA elevado.

Figura 5.19 – Seção de referência da Região da Bigorna.

Figura 5.20 – Análise de estabilidade na região da Bigorna.

Figura 5.21 – Indicador de nível de água instalado nos taludes da Mina de Tapira.

Figura 5.22 – Registros típicos do processo de monitoramento dos INA's.

Figura 5.23 – Marco Superficial instalado nos taludes da Mina de Tapira.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Tipos de movimentos de massa e processos correlatos (Gomes, 2003).
- Tabela 2.2 – Métodos Convencionais de análise da estabilidade de taludes.
- Tabela 2.3 – Correlações equações x incógnitas para o método de Bishop Simplificado.
- Tabela 3.1 – Dados das pilhas de estéril e titânio da Mina de Tapira.
- Tabela 4.1 – Identificação dos blocos indeformados coletados (Primeiro Estudo).
- Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios adicionais de laboratório (Primeiro Estudo).
- Tabela 4.3 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Primeiro Estudo).
- Tabela 4.4 – Correlações entre seções geológicas (Segundo Estudo).
- Tabela 4.5 – Parâmetros geotécnicos adotados (Segundo Estudo).
- Tabela 4.6 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Segundo Estudo).
- Tabela 4.7 – Poços de inspeção das investigações geotécnicas do Terceiro Estudo.
- Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de laboratório (Terceiro Estudo).
- Tabela 4.9 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Terceiro Estudo).
- Tabela 4.10 – Poços de inspeção das investigações geotécnicas do Quarto Estudo.
- Tabela 4.11 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Quarto Estudo).
- Tabela 5.1 – Localização dos poços de inspeção nos taludes da Mina de Tapira.
- Tabela 5.2 – Planilha quantitativa dos ensaios realizados em laboratório.
- Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de laboratório de todas as amostras coletadas nos taludes da Mina de Tapira.
- Tabela 5.4 – Geometria de escavação realizada.
- Tabela 5.5 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções P1, P2 e P3.
- Tabela 5.6 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções P1, P2, P3).
- Tabela 5.7 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções P1, P2, P3).
- Tabela 5.8 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções P4, P5A e P6.

Tabela 5.9 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções P4, P5A, P6).  
Tabela 5.10 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções P4, P5A, P6).  
Tabela 5.11 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções D, E e F.  
Tabela 5.12 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções D, E, F).  
Tabela 5.13 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções D, E, F).  
Tabela 5.14 – Parâmetros dos materiais dos taludes das (seções C, G, H, I).  
Tabela 5.15 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções C, G, H, I).  
Tabela 5.16 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções C, G, H, I).  
Tabela 5.17 – Resultados das análises para os taludes globais da região da Bigorna.  
Tabela 6.1 – Geometria recomendada para as seções P1 a P6.  
Tabela 6.2 – Geometria recomendada para as seções D, E, F.  
Tabela 6.3 – Geometria recomendada para as seções C, G, H, I.  
Tabela 6.4 – Geometria recomendada para a região da Bigorna.

## LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACOES

PGTM – Projeto geotécnico de taludes de Mineração

$Z_w$  – Profundidade da água na fenda de tração

$Z$  – Profundidade da fenda de tração

$\psi_c$  – Mergulho da cunha formada pelo plano de deslizamento

$\psi$  – Mergulho da face do talude

$H$  – Altura total do talude

$f_0$ – Fator empírico utilizado para considerar as forças cisalhantes interlamares

$\lambda$ –  um fator da função que deve satisfazer o equilíbrio de forças e momentos

$K_c$ – Fator de aceleração crítica que indica a estabilidade de um talude

FS– Fator de segurança

$c$ – Parâmetro de resistência (valores de coesão)

$\phi$ – Parâmetro de resistência (valores de ângulo de atrito)

$\beta$ – ndice de confiabilidade

$P_r$  – Probabilidade de ruptura do talude investigado

NA– Nível de gua

INA's– Indicadores de nível de gua

PVC– Policloreto de vinila

N– Nitrogênio

P– Fósforo

CMT – Complexo de Mineração de Tapira

UPM– Unidade de patos de Minas

$P_2O_5$  – xido de fósforo

NW – Noroeste

NS – Norte sul

EW– Leste oeste

$Al_2O_3$  – xido de alumínio

pH – Potencial hidrogeniônico

$TiO_2$  – xido de titânio

CaO – xido de cálcio

E1– Depósito de estéril 1  
T1– Depósito de titânio 1  
T2– Depósito de titânio 2  
T4– Depósito de titânio 4  
E2/T5– Depósito de estéril 2 e Depósito de titânio 5  
E3/T3– Depósito de estéril 3 e depósito de titânio 3  
CPTU– Ensaio cone penetrométrico  
CD – ensaio triaxial drenado (tipo CD)  
NBR– Norma Brasileira  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
 $\tau$  – Tensão cisalhante  
 $\sigma$  – Tensão total  
w – umidade  
 $\gamma_s$  – Peso específico das partículas sólidas  
LL – Limite de liquidez  
LP– Limite de plasticidade  
IP– Índice de plasticidade  
PI– Poço de investigação  
MS – Marco superficial  
AA– Argila amarela  
TI– Titânio  
FF– Fósforo disponível  
AA<sub>c</sub> – Argila amarela Caulinizada  
CIU– Ensaio de compressão triaxial com medidas de poropressões, em corpos de prova dos solos moldados na umidade natural ou com corpos de prova saturados  
UU– Ensaio triaxial não adensado e não drenado  
 $\gamma_{nat}$  – Peso específico do solo na condição natural  
 $\sigma$  – tensão total  
 $\sigma_1$  – Tensão principal maior  
 $\sigma_3$  – Tensão principal menor  
u– Poropressão

## LISTA DE ANEXOS

### **Anexo I – Resultados dos Ensaios Triaxiais**

- Figura I.1 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-103 (1).  
Figura I.2 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-103 (2).  
Figura I.3 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-104 (1).  
Figura I.4 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-104 (2).  
Figura I.5 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-105 (1).  
Figura I.6 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-105 (2).  
Figura I.7 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-106 (1).  
Figura I.8 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-106 (2).  
Figura I.9 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-108 (1).  
Figura I.10 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-108 (2).  
Figura I.11 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-109 (1).  
Figura I.12 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-109 (2).  
Figura I.13 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-111 (1).  
Figura I.14 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-111 (2).  
Figura I.15 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-113 (1).  
Figura I.16 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-113 (2).  
Figura I.17 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-114 (1).  
Figura I.18 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-114 (2).  
Figura I.19 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-115 (1).  
Figura I.20 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-115 (2).  
Figura I.21 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-116 (1).  
Figura I.22 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-116 (2).  
Figura I.23 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-117 (1).  
Figura I.24 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-117 (2).  
Figura I.25 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-118 (1).  
Figura I.26 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-118 (2).

Figura I.27– Resultados de Ensaaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-120 (1).  
Figura I.28– Resultados de Ensaaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-120 (2)  
Figura I.29– Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-121(1).  
Figura I.30 – Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-121(2).  
Figura I.31– Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-122(1).  
Figura I.32 – Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-122(2).  
Figura I.33– Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-123(1).  
Figura I.34 – Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-123(2).  
Figura I.35– Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-125(1).  
Figura I.36 – Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-125(2).  
Figura I.37– Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-128(1).  
Figura I.38 – Resultados dos Ensaaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-128(2).

## **Anexo II – Análises de estabilidade**

Figura II.1 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção C** na hipótese de NA normal.  
Figura II.2 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção C** na hipótese de NA normal.  
Figura II.3 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção D** na hipótese de NA normal.  
Figura II.4 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção D** na hipótese de NA normal.  
Figura II.5 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção D** na hipótese de NA elevado.  
Figura II.6 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção E** na hipótese de NA normal.  
Figura II.7 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção E** na hipótese de NA normal.  
Figura II.8 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção E** na hipótese de NA elevado.

Figura II.9 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção F** na hipótese de NA normal.

Figura II.10 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção F** na hipótese de NA normal.

Figura II.11 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção F** na hipótese de NA elevado.

Figura II.12 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção G** na hipótese de NA normal.

Figura II.13 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção G** na hipótese de NA normal.

Figura II.14 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção H** na hipótese de NA normal.

Figura II.15 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção H** na hipótese de NA normal.

Figura II.16 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção H** na hipótese de NA elevado.

Figura II.17 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção I** na hipótese de NA normal.

Figura II.18 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção I** na hipótese de NA normal.

Figura II.19 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA normal.

Figura II.20 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA elevado.

Figura II.21 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA elevado.

# ÍNDICE

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

|   |   |
|---|---|
| 1.1- CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA ..... | 1 |
| 1.2- OBJETIVOS .....                          | 4 |
| 1.3- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....           | 4 |

## **CAPÍTULO 2 – BASES E MÉTODOS DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE MINERAÇÃO**

|  |    |
|--|----|
| 2.1- INTRODUÇÃO.....                                     | 6  |
| 2.2- MOVIMENTOS DE MASSA.....                            | 7  |
| 2.3- MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES ..... | 11 |
| 2.4- MONITORAMENTO DE TALUDES DE MINERAÇÃO .....         | 18 |

## **CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO: COMPLEXO E MINA DE TAPIRA**

|   |    |
|---|----|
| 3.1- INTRODUÇÃO.....  | 22 |
| 3.2- GEOLOGIA REGIONAL .....                                | 24 |
| 3.3- GEOLOGIA LOCAL .....                                   | 28 |
| 3.4- MINA DE TAPIRA.....                                    | 30 |
| 3.4.1- DECAPEAMENTO E LAVRA .....                           | 33 |
| 3.4.2- CONCENTRAÇÃO E TRANSPORTE DO MINÉRIO FOSFÁTICO ..... | 36 |

## **CAPÍTULO 4 – ANÁLISES PRELIMINARES DA ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA DE TAPIRA**

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.1- INTRODUÇÃO.....       | 39 |
| 4.2- PRIMEIRO ESTUDO ..... | 42 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 4.3- SEGUNDO ESTUDO .....   | 47 |
| 4.4 – TERCEIRO ESTUDO ..... | 50 |
| 4.5 – QUARTO ESTUDO.....    | 54 |

## **CAPÍTULO 5 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE DOS TALUDES DA MINA DE TAPIRA: SÍNTESE ATUAL**

|   |    |
|---|----|
| 5.1 – INTRODUÇÃO.....   | 56 |
| 5.2– COLETA DE AMOSTRAS .....   | 58 |
| 5.3– PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA EM LABORATÓRIO ..            | 61 |
| 5.4– MODELO GEOMECÂNICO DOS TALUDES DA MINA E PREMISSAS DE LAVRA..... | 69 |
| 5.5– ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....                                    | 72 |

## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

|   |    |
|---|----|
| 6.1 – CONCLUSÕES .....                      | 89 |
| 6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 92 |

|                    |          |
|--------------------|----------|
| <b>ANEXOS.....</b> | <b>I</b> |
|--------------------|----------|

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Em empreendimentos de mineração, as atividades de lavra assumem uma relevância especial, uma vez que se impõe a exploração do bem mineral em diferentes frentes de avanço e em limites cada vez mais extremos. Os desafios tornam-se cada vez mais ousados, principalmente em cavas em que o minério mergulha a grandes profundidades, exigindo-se a adoção de metodologias de escavação que possibilitem, de forma segura e acima de tudo econômica, a lavra da substância de interesse. Assim, do ponto de vista geotécnico, a estabilidade de taludes constitui ferramenta essencial na definição final das geometrias da cava.

O tema tende a ser ainda mais amplo no contexto das minerações, por envolver análises da estabilidade dos taludes de pilhas de estéril, de taludes de barragens para contenção de rejeitos e até mesmo de taludes de vias ou acessos rodoviários. Em todos os casos, a boa prática técnica implica a utilização de metodologias adequadas e consistentes. No domínio da cava, entretanto, estes estudos têm repercussão direta em termos da segurança operacional, uma vez que o eventual colapso de um talude pode ocasionar perdas humanas e comprometimentos/dificuldades operacionais das etapas primárias de lavra (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) e auxiliares da lavra.

Neste contexto, o estudo da estabilidade dos taludes de uma cava de mineração implica a determinação da geometria de escavação com acesso direto ao bem mineral de interesse e com a maior segurança possível. Esta geometria contempla a determinação dos ângulos dos taludes individuais, ângulos gerais da cava, alturas de bancadas e dimensões das bermas.

Segundo Silva (2006), um projeto geotécnico de taludes consiste em levantamentos preliminares de dados pré-existentes, mapeamento geológico de superfície, execução de prospecção de subsolo, descrição geológico- geotécnica dos testemunhos de sondagem, realização dos ensaios geotécnicos, determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, determinação da hidrologia local, classificação geomecânica dos maciços rochosos e/ou setorização da cava por comportamentos geotécnicos distintos de materiais friáveis, elaboração de mapas e seções representativas, análises de estabilidade de taludes e definição das geometrias finais de escavação.

A consistência e representatividade dos estudos de estabilidade de taludes de uma cava de mina estão diretamente relacionadas à metodologia de trabalho adotada. A geometria de escavação será bem definida pelas análises de estabilidade, desde que as mesmas sejam subsidiadas de forma consistente por resultados de uma ampla investigação geotécnica em laboratório e em campo. Estas análises podem contemplar abordagens determinísticas, probabilísticas ou até mesmo uma combinação entre elas. Entretanto, é importante enfatizar que uma boa análise é condicionada primariamente pela clara compreensão do problema analisado (Cruz, 1973) e pela contextualização dos diversos mecanismos de instabilização que podem ser mobilizados num dado maciço de solo e/ou rocha (Soares, 1996).

Por outro lado, uma abordagem de taludes em mineração é francamente distinta de estudos em taludes de obras urbanas ou de barragens, por exemplo. Com efeito, além do caráter provisório dos taludes de mineração, cuja vida útil, de modo geral, é muito menor que a dos taludes de uma obra civil convencional, as análises compreendem a elaboração de projetos com taludes bastante íngremes, sob pena de se tornar anti-econômico o empreendimento mineral.

Sob tal perspectiva, torna-se essencial a elaboração de projetos cuidadosos e amparados em forte campanha experimental para obtenção dos parâmetros geotécnicos dos solos e/ou rochas dos taludes, induzindo a escolha de seções de referência representativas de todas as frentes de lavra e inclusão das condições hidrogeológicas mais pertinentes ao domínio da cava estudada.

As análises de estabilidade de taludes podem comportar metodologias determinísticas e/ou probabilísticas (Teixeira e Virgili, 1994; Soares, 1996; Fiori e Carmignani, 2001; Innocentini, 2003; Castro, 2004), em função da maior ou menor variabilidade e complexidade litológica local, incluindo-se ou não análises de riscos. As análises de risco devem incorporar os processos de lavra e a possibilidade de rupturas localizadas do maciço, considerando a viabilidade econômica do projeto, o nível de responsabilidade associado a cada talude específico de lavra e a variabilidade espacial dos parâmetros geológico-geotécnicos locais.

As análises de estabilidade em taludes de mineração envolvem, portanto, uma ampla e abrangente investigação geotécnica das litologias locais, a clara definição prévia dos mecanismos de ruptura potencialmente susceptíveis de ocorrer e os riscos e efeitos resultantes de uma eventual ruptura. A falta ou inadequação destas premissas pode induzir graves acidentes, com conseqüências extremamente danosas à continuidade e operacionalidade da lavra (Figura 1.1).



Figura 1.1 – Rupturas de taludes de mineração: Innocentini (2003); Huallanca (2004)

Assim, justifica-se e se contextualiza o presente tema de pesquisa, voltado às análises da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, da propriedade da Fosfertil S.A. e empresa à qual está vinculado o autor deste trabalho. Embora não se trate de trabalho inédito no âmbito da mina estudada, os estudos anteriores não foram itemizados no contexto de um projeto geotécnico global como aquele estabelecido nesta dissertação, integrando-se as análises com base em investigação geotécnica ampla e no domínio geral da cava.

## **1.2 OBJETIVOS**

A proposta desse trabalho consiste na avaliação determinística da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, constituídos por materiais friáveis (camadas de argilas, titânio e fosfato friável), com base em uma ampla campanha de investigação geotécnica dos materiais dos taludes, que compreendeu a coleta de amostras representativas dos mesmos e a execução de ensaios de laboratório para a caracterização dos solos locais e a determinação dos correspondentes parâmetros de resistência.

As análises visam propiciar um conhecimento atual e abrangente do comportamento geotécnico dos taludes associados às diferentes frentes de lavra, garantindo a adoção de geometrias finais que garantam as premissas fundamentais de economia e de segurança. A primeira justifica-se pela potencial redução da relação estéril/minério da mina e a segunda implica na garantia operacional das áreas lavradas e também de frentes de lavra futuras, como é o caso da área chamada “Bigorna”, região que deverá entrar em processo de lavra nos próximos anos.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Essa dissertação é dividida em seis capítulos. No Capítulo 1, que constitui a Introdução, são apresentadas a contextualização e a importância da pesquisa, os objetivos previstos e a própria estrutura da dissertação. A revisão bibliográfica do tema ‘Estabilidade de taludes em mineração’ é contemplada no Capítulo 2. Inicialmente, são abordados os princípios e os fundamentos gerais das análises da estabilidade de taludes, discutidos os métodos clássicos destas análises e exposta a metodologia geral destas análises ao caso de taludes de cavas de mineração.

No Capítulo 3, é apresentado o estudo de caso que é o objeto deste trabalho, relativo aos taludes da Mina de Tapira. Faz-se inicialmente uma breve descrição do empreendimento abordando-se as características principais do mesmo em termos de sua geologia regional e local, processo de lavra, exploração da mina e processo de beneficiamento industrial.

No Capítulo 4, são sistematizados os trabalhos anteriores desenvolvidos na Mina de Tapira, abordando-se as premissas de cada estudo, o programa de investigação de campo e de ensaios de laboratório realizados e a consolidação dos dados obtidos, síntese que subsidiou o plano de trabalho dos novos estudos implementados na mina para a avaliação da estabilidade dos taludes locais.

No Capítulo 5, apresenta-se o estudo de caso ‘Análise de Estabilidade de Taludes da Mina de Tapira’, que contemplou a determinação da estabilidade de taludes das frentes de lavra por meio de uma metodologia definida e sistematizada, abrangendo a definição prévia de um amplo programa de investigação de campo, coleta de amostras deformadas e indeformadas e realização de ensaios de laboratório. Os dados inferidos a partir destes estudos foram correlacionados com os resultados dos estudos anteriores e subsidiaram a realização das análises de estabilidade, bem como a proposição de um programa de monitoramento, por meio da instalação de indicadores de nível de água e de marcos superficiais ao longo dos taludes da mina.

As principais conclusões do trabalho, as recomendações das geometrias finais para todas as frentes de lavra da mina de Tapira, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros, são sistematizadas no Capítulo 6, que constitui o capítulo final desta dissertação.

---

## BASES E MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES DE MINERAÇÃO

### 2.1 – INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica tem desempenhado, em escala crescente, um papel de enorme relevância em empreendimentos civis e minerais, particularmente em termos de projetos de taludes. Com efeito, a importância crescente que a estabilidade de taludes em solos, rochas frescas e rochas muito alteradas tem atualmente deve-se às dimensões cada vez mais significativas que são impostas às escavações mineiras em lavra a céu aberto e aos grandes cortes exigidos em ferrovias e rodovias de grande tráfego. É comum ter-se em rodovias cortes com mais de uma centena e meia de metros; em lavras a céu aberto, os taludes chegam a atingir mais de 300 metros de altura.

No contexto da mineração, o ângulo do talude final representa a otimização do binômio envolvendo a economia e a segurança das escavações de lavra. Além disso, dado o caráter provisório dos taludes de mineração, o fator de segurança mínimo aceitável para taludes, para um período curto de tempo, é de 1,3. Para taludes permanentes, tais como aqueles de vias de transporte, um fator de segurança de 1,5 é mais indicado.

A estabilidade dos taludes depende do conhecimento dos parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) e para conhecer esses parâmetros, deve ser realizada uma adequada investigação geológico-geotécnica local. O produto final deste trabalho resulta em um mapa de ângulos, que condicionam as geometrias finais para os taludes e que são definidos a partir de uma prévia setorização da cava.

Este modelo de projeto de taludes em minas a céu aberto constitui o chamado PGTM – Projeto Geotécnico de Taludes de Mineração cuja sistemática deve abranger o seguinte conjunto de atividades (Castro, 2004):

- Levantamentos preliminares e análise de dados pré - existentes;
- Mapeamento geológico-geotécnico de superfície;
- Execução de sondagens geotécnicas;
- Descrição geológico-geotécnica dos testemunhos de sondagem;
- Realização de ensaios geotécnicos;
- Determinação dos parâmetros de resistência dos materiais;
- Determinação das condições hidrogeológicas locais;
- Classificação geomecânica (no caso de maciços rochosos);
- Elaboração de mapas e seções representativas;
- Definição dos potenciais mecanismos de ruptura dos taludes;
- Análises da estabilidade dos taludes;
- Definição das geometrias finais dos taludes da mina (mapa de ângulos).

Em síntese, este modelo utiliza sistematicamente conceitos, parâmetros e resultados de estudos geológicos, geotécnicos, geomecânicos e hidrogeológicos da área de interesse, inseridos em um contexto global e integrado.

## **2.2 – MOVIMENTOS DE MASSA**

Os movimentos de massa estão, geralmente, associados ao processo de intemperismo, ocorrem nas encostas e taludes e podem evoluir de maneira muito lenta até a eventos catastróficos. Tais eventos dependem de fatores predisponentes e de causas externas ou internas ao maciço. Neste contexto, a geometria, as interferências climáticas, ações antrópicas e posição do NA são condicionantes para a estabilidade ou não de um dado talude. Numa dada condição, a presença da água é determinante nos mecanismos de instabilização de um talude, por induzir a saturação dos maciços, promover aumentos das poropressões, resultar na eliminação de tensões capilares e da cimentação e impor forças de percolação na direção do fluxo.

Os movimentos de massa podem ser classificados por diversos critérios, que incluem, por exemplo, os atributos e as feições geológicas, os atributos geomorfológicos, a geometria dos deslizamentos, os tipos de movimentos, as influências relativas de fatores climáticos, umidades, velocidades de movimento, etc. (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Guidicini e Nieble, 1993; Augusto Filho, 1994).

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos principais tipos e sub-tipos de movimentos de massa, incluindo processos correlatos (como erosões, por exemplo) que, não constituindo propriamente tais mecanismos, contribuem decisivamente para que os mesmos sejam desencadeados (Gomes, 2003).

Tabela 2.1 – Tipos de movimentos de massa e processos correlatos (Gomes, 2003)

| Processos                      | Feições Relevantes  | Tipos Principais  |
|--------------------------------|---|---|
| Rastejos                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades muito baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>• Movimentos contínuos ou intermitentes (sazonais)</li> <li>• Geometria e volume indefinidos</li> <li>• Múltiplas superfícies internas de movimentação</li> <li>• Diferentes elementos de indicação superficial do processo</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rastejos em rochas</li> <li>• Rastejos em solos</li> <li>• Rastejos de tálus</li> <li>• Solifluxão (geleiras)</li> </ul>                         |
| Escorregamentos                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades médias a elevadas de movimentação</li> <li>• Superfícies de movimentação bem definidas</li> <li>• Deformações cisalhantes do material</li> <li>• Geometria e volumes variáveis</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Translacional</li> <li>• Rotacional</li> <li>• Translacional - Rotacional</li> <li>• Em Cunha</li> </ul>   |
| Quedas e Tombamentos           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentos de queda livre, rolamento ou basculamento</li> <li>• Velocidades elevadas de movimentação</li> <li>• Tipicamente associados a blocos e/ou lascas rochosas</li> <li>• Condicionados essencialmente pelas descontinuidades presentes</li> <li>• Geometria variável e volumes limitados</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quedas de Blocos</li> <li>• Queda de Lascas</li> <li>• Tombamentos</li> </ul>  |
| Corridas de Massa              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades rápidas a extremamente rápidas de movimentação</li> <li>• Grandes volumes de materiais</li> <li>• Movimentos de grande extensão, mesmo em áreas planas</li> <li>• Associados a materiais com diferentes condições de umidade / saturação</li> <li>• Comportamento de líquido viscoso em materiais saturados</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corridas de Detritos Secos</li> <li>• Corridas de Detritos Saturados</li> <li>• Corridas de Lama</li> </ul>                                      |
| Processos Mistos               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjugação de mecanismos relativos a dois ou mais dos processos anteriores</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos Compostos</li> </ul>   |
| Erosões e Processos Associados | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Processos diretamente associados aos processos de movimentos gravitacionais de massa</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosão Laminar</li> <li>• Erosão em Ravinas</li> <li>• Boçorocas</li> <li>• Assoreamentos</li> <li>• Subsídências</li> <li>• Colapsos</li> </ul> |

Em taludes de solos das cavas de mineração, os mecanismos de ruptura ocorrem tipicamente por meio de escorregamentos rotacionais, translacionais ou por processos mistos, que podem ser ou não retrogressivos.

A geometria da superfície de ruptura é condicionada pela compartimentação do maciço e pela presença ou não de feições estruturais relevantes. Em geral, a estratificação do maciço e a presença de interfaces litológicas e/ou descontinuidades tendem a impor superfícies mais complexas (Figura 2.1) e distintas da superfície tipicamente circular, inerente a materiais de elevada homogeneidade física e estrutural.



Figura 2.1 – Superfície de ruptura não circular ao longo de contato litológico complexo (Innocentini, 2003)

Os mecanismos de ruptura de taludes em rocha são bem mais complexos do que aqueles observados em taludes em solos e isto porque boa parte das rupturas em rochas é condicionada pelas descontinuidades presentes (Figura 2.2).

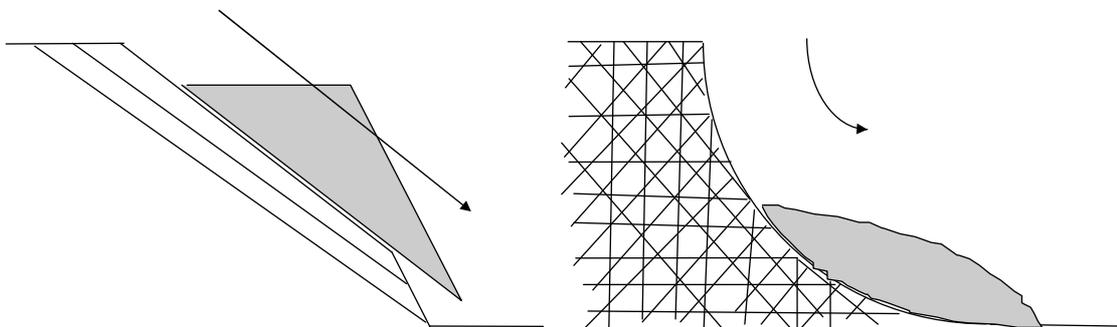


Figura 2.2 – Influência do número de famílias de descontinuidades no modo de ruptura (modificado - Hoek & Bray, 1981).

Somente algumas rupturas em rochas brandas ou em maciços rochosos muito fraturados ocorrem de forma aproximadamente circular como ocorre em rupturas em solo. Em função do posicionamento das discontinuidades em relação à face do talude (Figuras 2.3 e 2.4), os mecanismos de ruptura de taludes em rochas podem ser:

- Ruptura plana (bloco simples);
- Ruptura de blocos múltiplos;
- Ruptura de cunha;
- Ruptura circular;
- Ruptura de pé;
- Ruptura por flambagem;
- Tombamento de blocos.

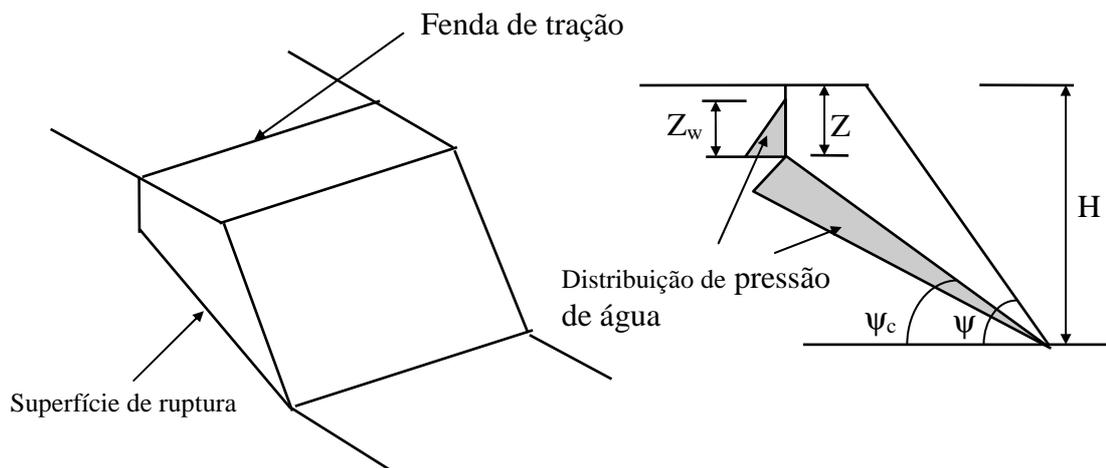


Figura 2.3 – Ruptura por escorregamento plano (modificado - Hoek & Bray, 1981)

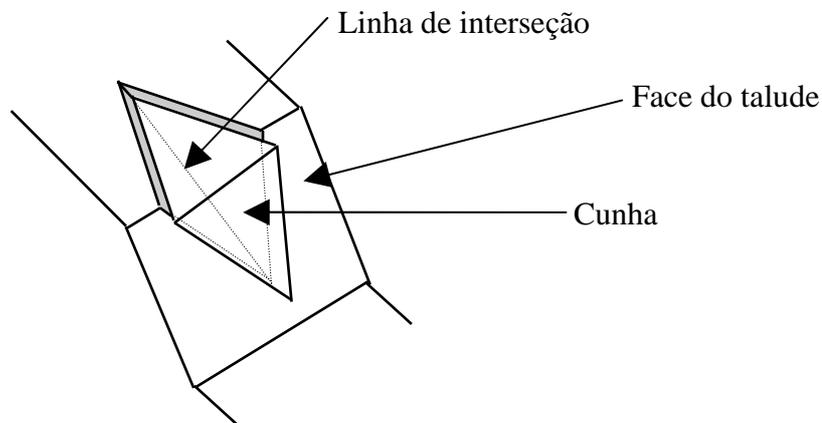


Figura 2.4 – Ruptura por escorregamento em cunha (modificado - Hoek & Bray, 1981)

### **2.3 – MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES**

Segundo Abrão e Oliveira (1998), a estabilidade de taludes em mineração é mais complexa em relação a taludes de obras civis basicamente devido à própria dinâmica de escavação, ao porte dos mesmos, às condições peculiares da exploração que admitem menores fatores de segurança, possibilidade de rupturas localizadas, convivência com situações causadas por desmontes com uso de explosivos, rebaixamentos de nível de água e variações de geometria com os avanços do processo de lavra.

Os primeiros métodos de análise de estabilidade desenvolvidos, considerados como convencionais, buscavam prever a possibilidade de rupturas pelo estudo das forças que atuam ao longo de uma dada superfície potencial de ruptura, considerando estáveis taludes onde a relação entre os esforços resistentes e atuantes é maior que um. Contudo, a evolução tecnológica da indústria de mineração fez surgir a necessidade de se estudar o comportamento de taludes com alturas cada vez maiores, onde a análise específica do risco de ruptura não é suficiente para garantir a segurança dos mesmos, pois, neste caso, as deformações sofridas pelo maciço podem gerar problemas tanto quanto a ruptura propriamente dita.

Deste modo, foram desenvolvidos métodos onde a análise da estabilidade é feita com base em princípios tensão- deformação através de métodos numéricos. São considerados os modelos constitutivos dos materiais que compõem o maciço e o estado de tensões atuante no talude, permitindo, assim, prever o comportamento do mesmo, não apenas quanto a prováveis rupturas, mas também quanto a deformações excessivas.

Por outro lado, os métodos do equilíbrio limite, considerados como convencionais, assumem na análise de estabilidade de taludes a ruptura de uma massa de solo ou rocha, dividida em lamelas ou blocos, ao longo de uma superfície potencial de ruptura. O fator de segurança é assumido como sendo constante ao longo desta superfície, sendo determinado a partir de equações que satisfaçam o equilíbrio estático de forças em duas direções ortogonais e/ou de momentos.

De uma maneira geral, estes métodos podem ser divididos em dois grandes grupos, dependendo se as premissas adotadas nos métodos satisfazem ou não todos os requisitos de equilíbrio global e também para cada fatia individualmente (Tabela 2.2), que são os seguintes:

- Não rigorosos: métodos que não satisfazem integralmente as premissas de equilíbrio estático global ou para as fatias individuais;
- Rigorosos: métodos que satisfazem integralmente estas condições de equilíbrio e, assim, teoricamente fornecem resultados mais confiáveis.

Tabela 2.2 – Métodos Convencionais de análise da estabilidade de taludes

| Método de análise     | Equilíbrio de forças |            | Equilíbrio de momentos | Referências                                      |
|-----------------------|----------------------|------------|------------------------|--|
|                       | Direção 1            | Direção 2* |                        |  |
| Fellenius             | Sim                  | Não        | Sim                    | Fellenius (1936)                                 |
| Bishop Simplificado   | Sim                  | Não        | Sim                    | Bishop (1955)                                    |
| Janbu Simplificado    | Sim                  | Sim        | Não                    | Janbu (1954, 1973)                               |
| Janbu Generalizado ** | Sim                  | Sim        | Sim                    | Janbu (1973)                                     |
| Spencer               | Sim                  | Sim        | Sim                    | Spencer (1967, 1973)                             |
| Morgenstern – Price   | Sim                  | Sim        | Sim                    | Morgenstern e Price (1965)                       |
| GLE***                | Sim                  | Sim        | Sim                    | Fredlund e Krahn (1977)<br>Fredlund et al (1981) |
| Sarma                 | Sim                  | Sim        | Sim                    | Sarma (1973, 1979)                               |

\* Qualquer uma de duas direções ortogonais (por ex.: vertical e horizontal) pode ser utilizada no somatório das forças

\*\* Equilíbrio de momentos utilizado no cálculo das forças cisalhantes entre fatias

\*\*\* Método Geral de Equilíbrio Limite

Como estes elementos de estática, juntamente com o critério de ruptura adotado, não são suficientes para tornar a análise determinada, com um número maior de incógnitas que de equações para a solução do problema, foram desenvolvidas diferentes hipóteses na tentativa de resolver a indeterminação existente, dando origem a vários métodos, dentre os quais podem ser citados os seguintes:

- Método de Fellenius - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas e não considera forças interlamelares;
- Método de Bishop Simplificado - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas, considera a resultante das forças interlamelares horizontal e as forças cisalhantes entre lamelas como nulas;
- Método de Janbu Simplificado - considera uma superfície de ruptura qualquer, a resultante das forças interlamelares é horizontal e um fator empírico ( $f_0$ ) é utilizado para considerar as forças cisalhantes interlamelares;
- Método de Janbu Generalizado - considera uma superfície de ruptura qualquer e a resultante das forças interlamelares é determinada por uma linha de empuxo assumida;
- Método de Spencer - considera uma superfície de ruptura circular, (introduziu-se posteriormente a condição de ruptura por uma superfície qualquer) e a resultante das forças interlamelares tem inclinação constante através da massa deslizante;
- Método de Morgenstern-Price - considera uma superfície de ruptura qualquer, a direção da resultante das forças interlamelares é determinada pelo uso de uma função arbitrada, onde  $\lambda$  é um fator da função que deve satisfazer o equilíbrio de forças e momentos, sendo as lamelas de espessura finita;
- Método GLE - considera uma superfície de ruptura qualquer, a direção da resultante das forças entre lamelas é definida com uma função arbitrada, onde  $\lambda$  é um fator da função que deve satisfazer o equilíbrio de forças e momentos, com as lamelas tendo espessura infinitesimal;

- Método de Sarma - considera a massa deslizante dividida em lamelas e que a resistência interna entre lamela é mobilizada. Um fator de aceleração crítica ( $K_c$ ) pode ser utilizado para indicar a estabilidade do talude, sendo definido como a carga horizontal, fração do peso total livre que, aplicada no corpo livre, resulta em um estado de tensão na superfície de escorregamento em equilíbrio com a resistência ao cisalhamento disponível. A técnica para obter a condição crítica consiste em variar a inclinação de um bloco, mantendo-se constante as inclinações dos outros blocos, até se obter o valor mínimo de  $K_c$ . O processo é repetido para todos os blocos. Essa técnica não garante a unicidade da solução, mas apresenta uma solução satisfatória, que fornece um conjunto crítico de inclinações de lamelas. Este método foi adaptado para análise de blocos múltiplos em taludes rochosos, na qual a obtenção de  $K_c$  não é prioritária e a inclinação das lamelas é definida pela geometria das descontinuidades, sendo o único capaz de analisar rupturas de múltiplos blocos em taludes em rocha.

Para as análises desenvolvidas neste trabalho, adotou-se o método de Bishop Simplificado por ser o mesmo generalizadamente aplicado na prática da Engenharia Geotécnica. A Tabela 2.3 apresenta a síntese do método em termos das equações disponíveis e incógnitas a serem determinadas (Wright, 1969).

Tabela 2.3 – Correlações equações x incógnitas para o método de Bishop Simplificado

---

|       |   |
|-------|---|
| -     | Equações:   |
| 1     | - Equação geral de equilíbrio de momentos                     |
| n     | - Equações de equilíbrio de forças para as fatias individuais |
| ----- |   |
| n + 1 | - Total de equações   |
| -     | Incógnitas:   |
| 1     | - Fator de segurança (FS)                                     |
| n     | - Forças normais atuantes na base de cada fatia               |
| ----- |   |
| n + 1 | - Total de incógnitas   |

---

Segundo Morgenstern (1965), os métodos do equilíbrio limite expostos anteriormente, apesar de considerarem hipóteses simplificadoras diferentes, possuem no seu desenvolvimento os seguintes princípios em comum:

(i) é postulado um mecanismo de deslizamento, sem maiores restrições cinemáticas desde que os mecanismos sejam possíveis. Na configuração simples, é assumida que a ruptura no talude ocorre ao longo de superfícies planas ou circulares. Quando as condições não são uniformes, consideram-se formas mais complexas, sendo as análises desenvolvidas para manipular superfícies de formas arbitrárias;

(ii) a resistência ao cisalhamento necessária para equilibrar o mecanismo de ruptura assumido é calculada pelas leis da estática. Os conceitos físicos usados são tais que a massa potencial de deslizamento está em um estado de equilíbrio limite e o critério de ruptura de solo ou rocha é satisfeito em qualquer ponto ao longo da superfície proposta. Os vários métodos diferem quanto ao grau com que as condições de equilíbrio são satisfeitas, sendo que alguns métodos violam as condições de equilíbrio estático. Este é um fator importante quando é avaliado o rigor de algum dos métodos (caracterização dos métodos de análise em métodos rigorosos e métodos não rigorosos, como explicitado previamente);

(iii) a resistência ao cisalhamento calculada, requerida para o equilíbrio, é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível;

(iv) o mecanismo correspondente ao menor valor de FS (fator de segurança) é obtido por um processo iterativo. Por exemplo, sendo a superfície de deslizamento circular, faz-se uma busca para o círculo crítico de deslizamento. Quando a posição da superfície de deslizamento é governada por uma região de fraqueza dominante, não são necessárias outras tentativas.

A escolha do método de estabilidade de taludes a ser empregado depende do tipo de maciço que compõe o talude em estudo, sendo esta escolha influenciada principalmente pelos seguintes aspectos:

- Tipo de superfície de ruptura - são adotadas tradicionalmente em solos superfícies de ruptura circular, o que dificilmente ocorre em rochas, exceto em maciços rochosos muito fraturados. Em rochas as superfícies de ruptura são dominadas pelas descontinuidades, podendo ser planares, bi-planares, em múltiplos planos ou compostas;
- Inclinação das lamelas - em solos são adotadas lamelas verticais, o que dificilmente ocorre em rochas, exceto em maciços rochosos muito fraturados. Em rochas a inclinação das lamelas é determinada pela geometria dos blocos, ou seja, pelas descontinuidades;
- Critérios de resistência - em solos é normalmente empregado o critério de Mohr-Coulomb (parâmetros de resistência  $c$  e  $\phi$ ). Em rochas, os critérios adotados dependem das características das descontinuidades, podendo ser empregados os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb, Barton e Bandis ou Hoek e Brown.

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia de computadores e programação, softwares específicos foram implementados para análises da estabilidade de taludes, facilitando sobremaneira as operações de cálculo e estimativa do chamado fator de segurança (FS) do talude investigado. No presente estudo, utilizou-se o software pelo Programa Slide 5.0 da *Rocscience*, para proceder as análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira.

A estabilidade de um talude não está relacionada somente com o equilíbrio de forças atuantes no mesmo. Dois taludes que apresentem um mesmo fator de segurança (FS) não estão, necessariamente, sujeitos às mesmas condições de estabilidade. As incertezas relativas às propriedades dos maciços, condições ambientais, geometria dos taludes e hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos teóricos impõem limitações à plena adoção dos resultados obtidos a partir das análises determinísticas. As análises probabilísticas possibilitam a quantificação destas incertezas associadas ao valor de FS obtido, através do índice de confiabilidade  $\beta$ . Este índice constitui uma medida da confiabilidade do valor de FS, permitindo quantificar também a probabilidade de ruptura  $P_r$  do talude investigado (Álvares, 2003).

Os métodos probabilísticos, geralmente aplicados em Geotecnia são os denominados de Simulação de Monte Carlo, Estimativas Pontuais e o Segundo Momento de Primeira Ordem. As análises probabilísticas da estabilidade de taludes somente são possíveis quando se dispõe de um acervo adequado de informações relativas aos solos locais, por meio de campanhas de ensaios de laboratório e de campo. Por outro lado, estas análises serão tanto mais representativas e consistentes quanto maior for o número de incertezas do problema incorporadas à solução adotada. Em outras palavras, o índice de confiabilidade constitui sempre um parâmetro relativo e, assim, as análises probabilísticas, como qualquer outra ferramenta de análise, não podem prescindir do julgamento subjetivo da equipe técnica do projeto.

Uma outra técnica de abordagem do problema da estabilidade de taludes de cavas de mineração diz respeito às chamadas análises cinemáticas, adotadas para a avaliação de mecanismos de rupturas planares, em cunha e também por tombamento, compreendendo basicamente a movimentação potencial de zonas específicas do maciço. Essa metodologia utiliza a representação espacial dos taludes e das discontinuidades através da projeção estereográfica em diagramas de projeção hemisférica de igual área. Com os dados estruturais plotados em estereogramas, torna-se possível a avaliação das condições de estabilidade dos taludes ao longo das seções mais representativas dos domínios lito-estruturais existentes. A análise é de caráter semi-quantitativo, mas fornece informações úteis na definição de áreas críticas que requerem estudos mais rigorosos (Castro, 2004).

Ainda nesse contexto, a estabilidade de taludes em mineração também pode ser avaliada por meio de retroanálises de rupturas em campo. Trata-se essencialmente de um problema de reconstituição das condições reinantes na condição da ruptura, em termos da geometria do talude e das forças atuantes, a partir de cálculos iterativos mediante a adoção de parâmetros de resistência representativos dos materiais presentes e pela imposição de um coeficiente de segurança unitário à estabilidade global do talude. Nestas condições específicas, a superfície crítica de ruptura é previamente conhecida, bem como a evolução do movimento de massa, permitindo, desta forma, uma estimativa dos condicionantes geotécnicos e hidrogeológicos nos mecanismos de ruptura.

## 2.4 – MONITORAMENTO DE TALUDES DE MINERAÇÃO

A instrumentação geotécnica de obras de engenharia constitui uma das ferramentas empregadas para a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições da segurança global do empreendimento. Ela permite fazer um processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos, a partir dos instrumentos de medida instalados em diferentes seções e zonas dos maciços investigados. Nessas análises são incluídos valores limites no programa de instrumentação de forma a facilitar a detecção imediata de possíveis anomalias. Assim, em condições adequadas, um programa de instrumentação tende a garantir acurácia, bem como fornecer parâmetros relacionados à confiabilidade das leituras, e à compatibilidade em relação às metodologias construtivas e às premissas de projeto (Fonseca, 2003).

Em taludes de mineração, estes princípios se aplicam integralmente, pela relevância de se monitorar o comportamento dos taludes em longos períodos de tempo. Por outro lado, esse acompanhamento, em muitos casos, interfere nas atividades de lavra. Nesse caso, existe um paradoxo entre os engenheiros que trabalham na operação de mina e os engenheiros geotécnicos, pois o dinamismo entre as operações mineiras nem sempre proporciona uma sinergia entre estas áreas.

Neste contexto, existem duas razões básicas para se instrumentar um talude de grande porte em mineração. A primeira é verificar sistematicamente se um dado talude apresenta um comportamento dentro dos limites previstos em projeto. A segunda razão é aferir e controlar a evolução das movimentações de uma dada região da cava sujeita a instabilizações específicas.

A partir dos dados obtidos em campo pela instrumentação, torna-se possível, mediante um adequado processamento e interpretação dessas leituras, envolvendo frequência e abrangência das mesmas, estabelecer bases consistentes para reavaliações dos critérios adotados no projeto e formular diretrizes para eventuais intervenções nos taludes potencialmente instáveis nas diferentes frentes de lavra da mina.

Hualanca (2004, modificado) apresenta um modelo básico de instrumentação geotécnica em taludes de mineração (Figura 2.5), centrado nas medidas das seguintes grandezas:

- (i) deslocamentos superficiais por meio de prismas e extensômetros de cabo;
- (ii) deslocamentos sub-superficiais por meio de inclinômetros;
- (iii) variações locais do lençol freático por meio de medidores de NA (INA's);
- (iv) medidas de poropressões no maciço por meio de piezômetros.

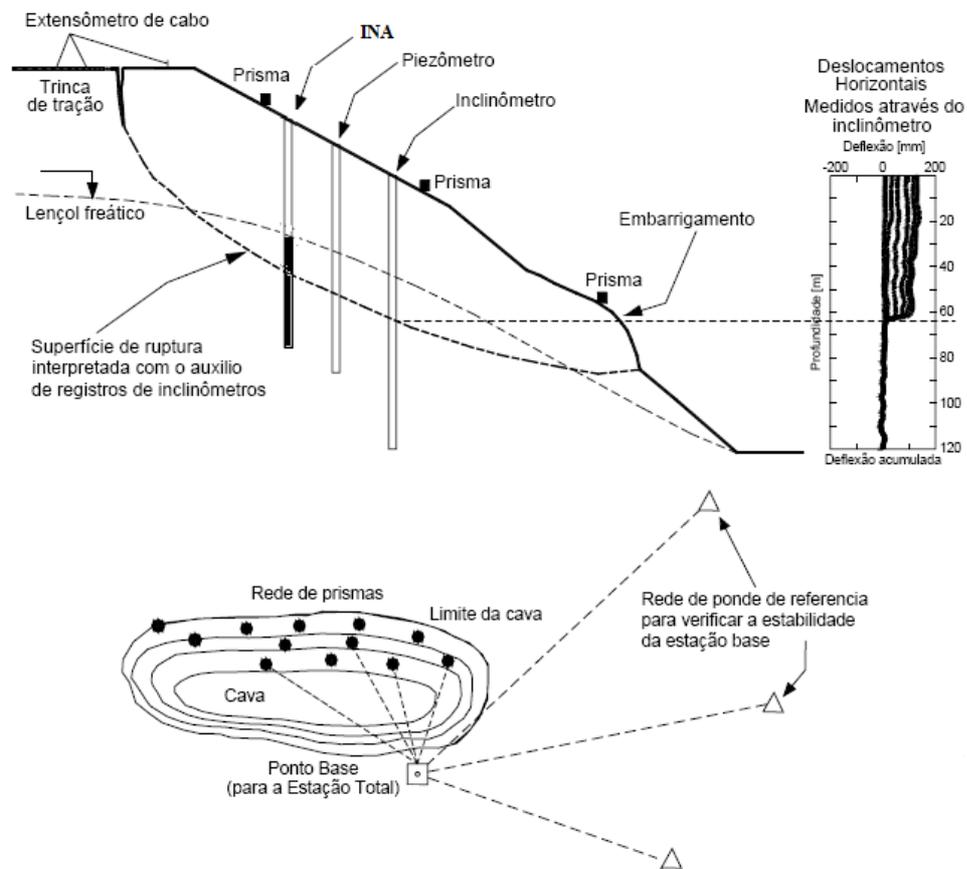


Figura 2.5 – Instrumentação geotécnica para taludes de mineração a céu aberto  
(Hualanca, 2004, modificado)

Redes de prismas (ou estações defletoras) são comumente utilizadas para se monitorar os deslocamentos superficiais do maciço, por meio de levantamentos topográficos utilizando-se estação total. As medidas são efetuadas a partir de uma estação – base, localizada próxima à face do talude e em terreno estável, não sujeito a movimentações de quaisquer naturezas.

Extensômetros de cabo, constituídos por cabos sob tensão e alinhados perpendicularmente às trincas de tração, podem ser empregados para controle e evolução destas trincas ao longo do tempo, permitindo estabelecer qualitativamente o domínio das potenciais áreas de instabilização.

Inclinômetros, por sua vez, são tubos segmentados inseridos ao longo de furos de sondagens que permitem o monitoramento dos deslocamentos horizontais do maciço ao longo da profundidade e a conseqüente localização da superfície crítica de ruptura envolvendo o talude.

A determinação da posição exata da linha freática no interior do talude constitui subsídio de grande relevância nas análises de sua estabilidade ou na interpretação dos resultados de sua piezometria. O princípio geral dos instrumentos para a medição do nível consiste basicamente em se acessar diretamente a água em profundidade (por meio da simples execução de furos de trado ou sondagem, por exemplo) e medir a cota da sua superfície por meio de um dispositivo qualquer. Na prática, o medidor é constituído comumente por um tubo de PVC perfurado (Figura 2.6) que é instalado no furo de sondagem, envolvido por material filtrante (geotêxtil) e drenante (areia). Uma camada selante é utilizada para vedar o espaço anular superior entre o tubo e o furo e uma estrutura de concreto de proteção é executada em superfície.

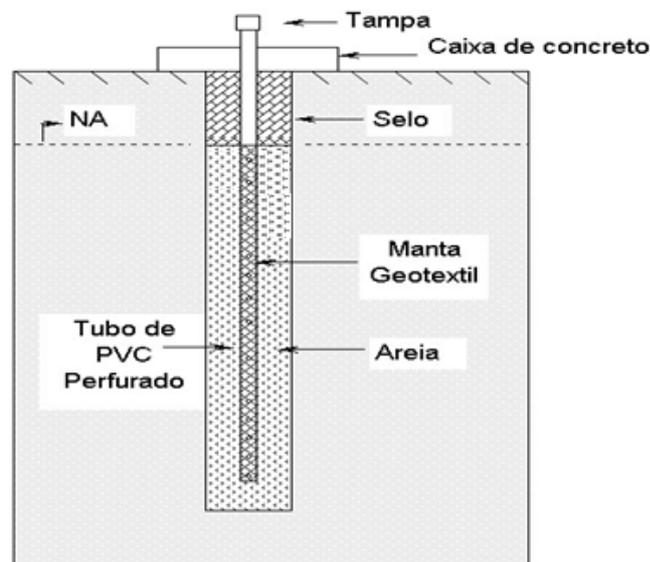


Figura 2.6 – Esquema geral de um medidor de NA (Fonseca, 2003, modificado)

A avaliação das condições de estabilidade de taludes depende, em larga escala, da magnitude e da evolução das poropressões que se desenvolvem nos maciços. Os instrumentos convencionalmente utilizados para a medida de poropressões em obras geotécnicas são os piezômetros. Estes instrumentos podem ter diferentes naturezas e princípios de funcionamento, compreendendo tanto a medição direta das poropressões (expressa, por exemplo, pela altura da coluna d' água no interior de um tubo de pequeno diâmetro, nos chamados piezômetros de tubo aberto ou de Casagrande) como a medição indireta através da correlação com medidas de outras grandezas (por exemplo, através das medidas das deformações de uma membrana elástica inserida no interior de um elemento poroso, nos chamados piezômetros de membrana).

Os piezômetros mais usuais são constituídos por tubos de PVC (Figura 2.7), em cujas extremidades inferiores se acopla uma célula (trecho perfurado de tubo envolvido com geotêxtil). A célula fica inserida em um bulbo de material drenante e confinada num trecho limitado (usualmente de 1,0 a 1,5 m) por uma camada selante (usualmente bentonita ou solo-cimento), utilizada para vedar o espaço anular entre o tubo e o furo. Em superfície, o instrumento deve ser devidamente protegido. A pressão da água na região do bulbo é convertida diretamente em uma altura d' água equivalente.

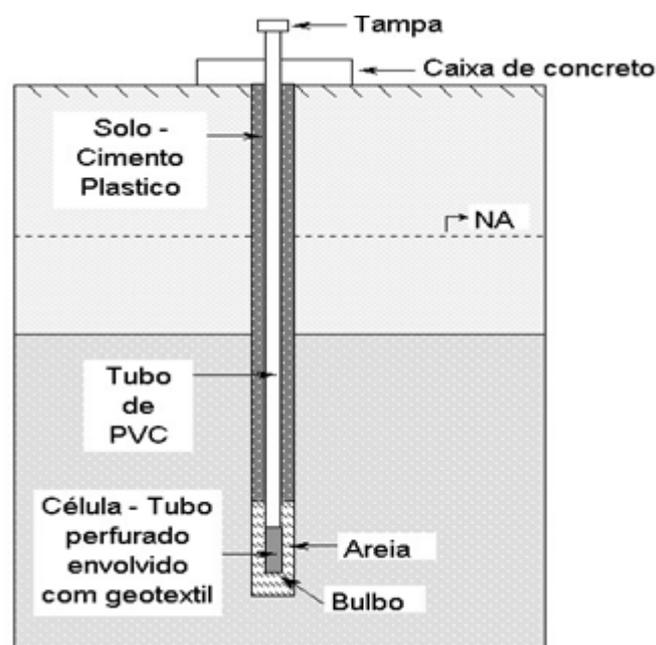


Figura 2.7 – Esquema geral de um piezômetro de tubo aberto (Fonseca, 2003).

---

## ESTUDO DE CASO: COMPLEXO E MINA DE TAPIRA

### 3.1 – INTRODUÇÃO

A Fosfertil – Fertilizantes Fosfatados S/A é uma empresa que atua nos segmentos de mineração, fertilizantes, insumos químicos e serviços de logística, produzindo matérias-primas e produtos intermediários à base de nitrogênio (N) e fósforo (P) e constituindo a maior fornecedora de matérias-primas para fertilizantes no país.

A Fosfertil alcançou a marca de 3,4 milhões de toneladas de produtos vendidos em 2009 (um aumento de 18,5% em relação ao ano anterior), num mercado em que o Brasil ainda depende de cerca de 70% da importação de nutrientes básicos (nitrogênio, fósforo e potássio) para a produção de fertilizantes. No caso dos fertilizantes à base de fósforo, o Brasil tem tecnologia e minas já identificadas que permitem expandir a produção em médio prazo. Em relação ao potássio, embora existam minas identificadas, a exploração é mais difícil, demorada e custosa. O terceiro componente básico dos fertilizantes, o nitrogênio, é produzido no país pela Fosfertil e pela Petrobras, mas é necessário ampliar essa produção, o que depende essencialmente da disponibilidade e preço do gás natural, matéria-prima para sua fabricação.

A empresa opera unidades industriais de mineração e um terminal marítimo em quatro diferentes estados brasileiros (Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Paraná). Em Minas Gerais, são duas unidades de lavra (Tapira e Patos de Minas) e duas plantas industriais, sendo a primeira destinada à concentração de rocha fosfática para produção de fertilizantes, localizada em Patos de Minas (UPM) e a segunda, para produção de superfosfatos, ácido sulfúrico e ácido fosfórico, localizada em Uberaba.

O Complexo de Tapira constitui a maior mineração de rocha fosfática em operação no Brasil. Localizado no município de Tapira, aproximadamente a 35 km a sudoeste da cidade de Araxá, por ligação rodoviária, o que corresponde a uma distância da ordem de 600 km da cidade de São Paulo e de 400 km a oeste de Belo Horizonte (Figura 3.1), o empreendimento contempla atividades de lavra a céu aberto, beneficiamento de minério (via flotação), operação de mineroduto e instalações de suporte (Figura 3.2).

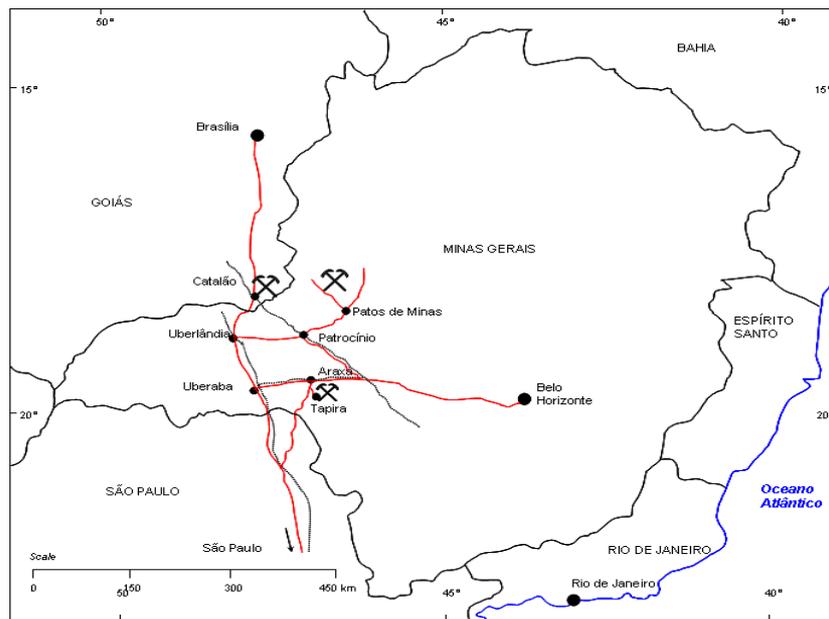


Figura 3.1 – Mapa de Localização do Complexo Tapira.



Figura 3.2 – Vista geral do Complexo Tapira.

A maioria das jazidas de fosfato do Brasil apresenta um teor de fósforo, no minério, superior a 10% de  $P_2O_5$ . Em Tapira, o teor médio de fosfato é de 7,5% e a composição mineralógica de sua assembléia é considerada como sendo das mais complexas no contexto nacional.

O minério está localizado sob duas camadas de material superpostas: a primeira de material estéril, com espessura de 30 a 40 m e a segunda, de minério de titânio, variando entre 25 a 30 m de espessura (Santos *et al.*, 2002). Esses materiais são lavrados e estocados em separado, permitindo, assim, a exploração do minério de fosfato. O minério lavrado é submetido a um conjunto de operações unitárias compreendendo as fases de fragmentação, classificação e concentração. Como produto final, obtém-se um concentrado fosfático que é bombeado, via mineroduto de 120 km de extensão, para o Complexo Industrial de Uberaba, como matéria prima para a produção de fertilizantes.

### **3.2 – GEOLOGIA REGIONAL**

A região de Araxá faz parte do setor meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, setor oriental da Província Estrutural Tocantins (Almeida *et al.*, 1977), um cinturão orogênico que se desenvolveu na borda oeste do Cráton do São Francisco durante o neoproterozóico. Sob o ponto de vista tectônico, a região de Araxá está estruturada em uma dobra sinformal regional denominada *Sinforma de Araxá*. (Figura 3.3). Esta estrutura regional tem seus flancos principais nos setores nordeste e sudoeste e sua linha de charneira apresenta direção aproximada N70W, com caimento suave para NW, truncada no seu flanco sul por um sistema de falhas transcorrentes sinistrais (denominado localmente como ‘Zona de Cisalhamento da Bocaina’).

A tectonoestratigrafia da região compreende três escamas tectônicas (Seer, 1999), separadas por zonas de cisalhamento que configuram falhas de empurrão (Figura 3.4). Na escama inferior, ocorrem as litologias do Grupo Canastra. Esta, por sua vez, cavalga o Grupo Bambuí, uma cobertura cratônica autóctone situada a leste da área estudada. A escama tectônica intermediária reúne as litologias do Grupo Ibiá. Empurrada sobre esta, ocorre a escama tectônica superior, que constitui as rochas do Grupo Araxá.

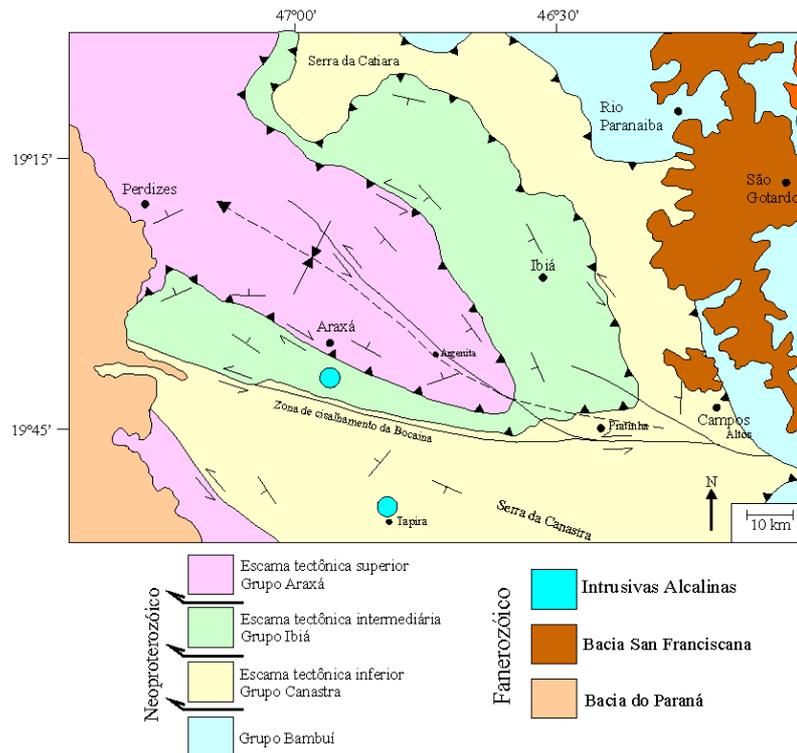


Figura 3.3 – Mapa Geológico do Sinforma de Araxá (Seer, 1999).

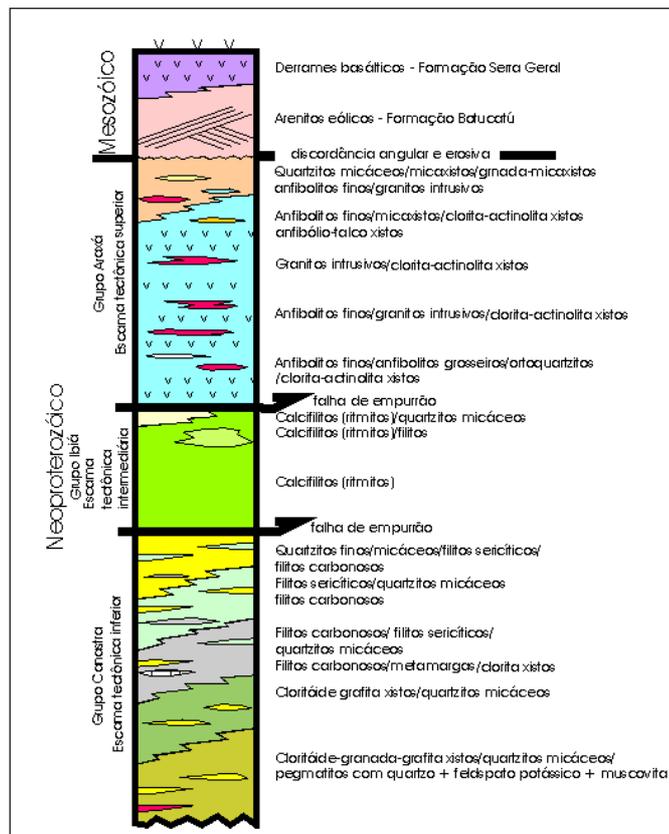


Figura 3.4 – Coluna tectonoestratigráfica do Sinforma de Araxá (Seer, 1999).

O Grupo Canastra é constituído por um conjunto de metassedimentos detríticos, em grande parte carbonosos e com contatos tectônicos com as demais unidades geológicas da região, por meio de zonas de cisalhamento. Estes metassedimentos são constituídos por ortoquartzitos, quartzitos micáceos, filitos sericíticos, filitos carbonosos, grafita xistos, cloritóide-grafita xistos, granada-grafita xistos, e subordinadamente por metamargas e cloritaxistos com foliação bem desenvolvida. Compreendem uma sucessão de camadas com direção aproximada leste-oeste que, a partir da Serra da Bocaina no sentido sul, contêm quartzitos muito finos com intercalações de filitos sericíticos e carbonosos, passando a filitos carbonosos, que gradam para grafita xistos e cloritóide-grafita xistos finos. Por fim, ocorrem granada-cloritóide-grafita xistos mais grosseiros. Todas as litologias descritas contêm horizontes de quartzitos finos e micáceos subordinados, configurando seqüências rítmicas (Figura 3.5a), tanto em escala milimétrica como decimétrica.

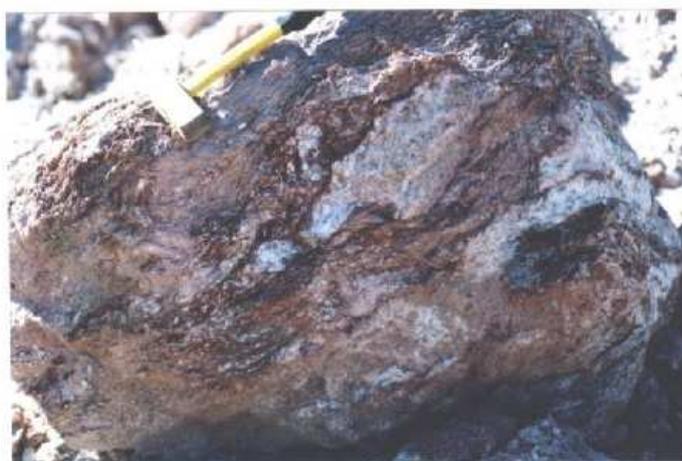


Figura 3.5 – Litologias típicas regionais: (a) ritmitos do Grupo Canastra; (b) calcifilitos do Grupo Ibiá (Seer, 1999).

O Grupo Ibiá compreende um conjunto de metassedimentos detríticos metamorfisados, que se distribui a sudoeste, sul, sudeste, leste, nordeste e norte da cidade de Araxá. Seus contatos, tanto com o Grupo Canastra como com o Grupo Araxá, são tectônicos e caracterizados por zonas de cisalhamento. Seus litotipos principais são calcifilitos (Figura 3.5b), quartzo-filitos, filitos e quartzitos micáceos. Os calcifilitos e os quartzo-filitos apresentam maior distribuição espacial e diferenciam-se apenas pela presença de carbonatos nos primeiros.

As litologias que compreendem o Grupo Araxá distribuem-se na zona mais interna da Sinforma de Araxá e no setor sudoeste da área mapeada, ao longo do Rio Araguari. Esta unidade está representada por um conjunto metaígneo máfico/ultramáfico – metassedimentar, intrudido por corpos de granitóides ricos em pegmatitos. Os metassedimentos se distribuem numa faixa sudeste-noroeste ao longo do contato sul, e ao longo do contato norte do Grupo Araxá com o Grupo Ibiá compõem, portanto, a base da escama tectônica do Grupo Araxá. Suas litologias compreendem micaxistos, quartzo-mica xistos, quartzitos, quartzitos micáceos, quartzitos granatíferos, granada mica xistos, granada mica xistos feldspáticos, mica xistos feldspáticos e cloritóide-granada mica xistos.

As rochas metamáficas encontram-se no topo da seqüência e predominam amplamente sobre as metassedimentares, consistindo de por clorita xistos, clorita-anfibólio xistos e anfibolitos, com raras intercalações de ortoquartzitos brancos e metassedimentos pelíticos. Tanto os metassedimentos como as metamáficas acham-se intrudidas por granitóides e pegmatitos (Figura 3.6). Os granitóides podem ser de dois tipos: granitos com biotita e biotita-muscovita granitos. Os pegmatitos são abundantes nesta escama, sendo constituídos por feldspato potássico, mica branca e quartzo em cristais milimétricos a centimétricos. A escama tectônica superior é fortemente afetada por efeitos de deformação, sendo cortada por inúmeras zonas de cisalhamento.



(c)

Figura 3.6 – Litologias típicas regionais: (c) pegmatito intrusivo em xisto muito deformado do Grupo Araxá (Seer, 1999).

### 3.3 – GEOLOGIA LOCAL

O Complexo alcalino de Tapira insere-se na Província dos Complexos Carbonatíticos do Alto Paranaíba, que também compreende as ocorrências de Catalão I e Catalão II em Goiás e Serra Negra, Salitre I e Salitre II em Minas Gerais. O complexo de Tapira constitui uma chaminé ultramáfica-carbonatítica relacionada ao evento magmático que afetou a plataforma brasileira, do final do período jurássico ao terciário inferior e que se iniciou com os derrames basálticos da bacia do Paraná (Cruz *et al.*, 1973). O corpo intrusivo tem forma elíptica, com dimensões aproximadas de 6,5 x 5,5 km, nos eixos NS e EW, respectivamente (Figura 3.7), encaixado em quartzitos do Grupo Canastra.

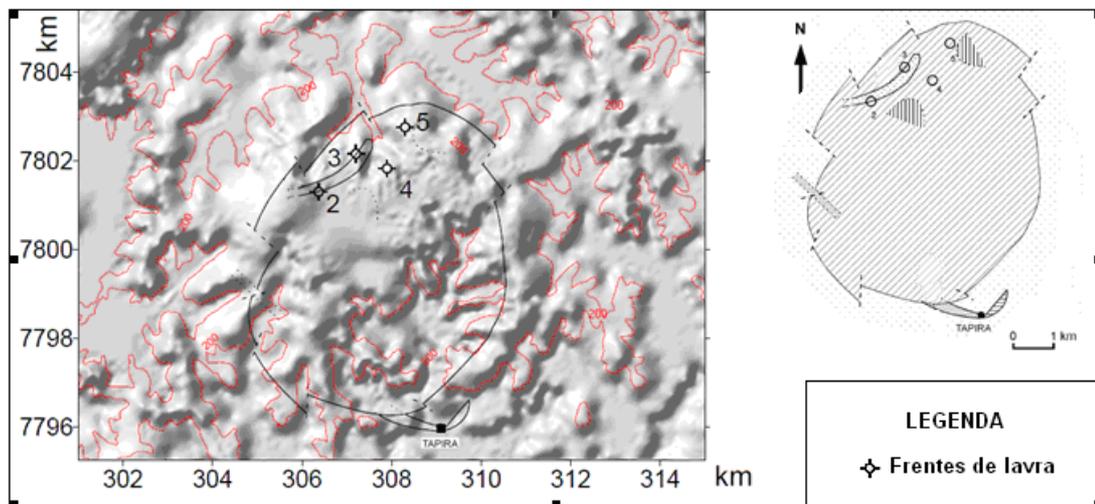


Figura 3.7 – Chaminé ultramáfica-carbonatítica de Tapira (Ferrari, 2000, modificado).

O complexo é o resultado da amalgamação de, pelo menos, cinco episódios de intrusões carbonatíticas (Brod, 1999), dominadas por rochas ultrabásicas (80%), em grande parte representadas por piroxenitos/bebedoritos, dunitos/foscoritos e peridotitos, rochas intermediárias entre os piroxenitos e os dunitos. Na porção centro oeste da chaminé, tem-se também a presença de glimeritos, que são rochas ultramáficas compostas quase inteiramente por micas e que são caracterizadas pela predominância da flogopita. As rochas ultrabásicas apresentam piroxênio ou olivina como minerais principais e magnetita, apatita, perovskita, melanita, biotita, flogopita, calcita, pirita e ilmenita como minerais acessórios.

Traquitos e lamprófiros ocorrem sob forma de diques; os traquitos são rochas porfíricas com fenocristais de ortoclásio imersas numa matriz de biotita, aegirina e melanita. Os lamprófiros possuem granulação e composição mineralógica variada em uma matriz feldspática, em geral com palhetas de mica e estrutura fluidal.

As rochas ultrabásicas são cortadas por bolsões de silexitos e corpos de carbonatito. Os silexitos ocorrem nos níveis de fosfato e, em geral, abaixo do minério de titânio e sob o nível freático; aparecem também em zonas de falhas, penetrando-as e substituindo as rochas presentes. Geralmente são constituídos por calcedônia, quartzo e goethita. Por outro lado, os carbonatitos são sovíticos, com mais de 90% de calcita, em forma de veios ou massas contínuas e ocorrem nas porções centrais do complexo, correspondendo ao protominério de nióbio.

Raros afloramentos (quase sempre envolvendo rochas em avançado estágio de decomposição) ocorrem ao longo da área de cerca de 35 km<sup>2</sup> da chaminé, devido à presença local de uma espessa cobertura ou manto laterítico (com profundidade média de 30 m), essencialmente argiloso, que mascara completamente o substrato.

Os minérios de fosfato, titânio e nióbio foram concentrados nesta região por meio de processos supergênicos, que deram origem ao espesso manto laterítico que cobre a chaminé. Nestes processos, os mecanismos de subtração predominam e, por meio deles, dá-se a lixiviação dos elementos de maior mobilidade, tendo como resultado uma acumulação residual de minerais não lixiviados.

O depósito de titânio de Tapira constitui uma camada situada acima do nível freático, acompanhando grosseiramente a topografia atual. O mineral-minério é o anatásio, formado a partir de outros minerais de titânio (perovskita, ilmenita, titanomagnetita) pré-existentes na rocha fresca. O anatásio forma camadas situadas logo abaixo do solo laterítico argiloso, portanto, entre a zona de percolação das águas meteóricas e a zona de circulação ativa, acima do nível freático; este nível corresponde ao de concentração de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas bauxitas, caracterizando-se uma similaridade de comportamentos do titânio e do alumínio durante a atuação de processos supergênicos.

O minério de fosfato ocorre sob a forma de uma camada ou nível sobre a rocha matriz, acompanhando também grosso modo a topografia atual; encontra-se sempre sotoposto ao titânio, sendo o contato entre ambos geralmente caracterizados por uma faixa de mistura entre ambos (Zona de Transição Titânio/Fosfato). A apatita ocorre como mineral primário na rocha matriz, formando níveis de enriquecimento disseminados ou concordantes com a rocha encaixante (porcentagens entre 5% a 10% em volume). A apatita é fracamente solúvel sob condições ácidas e oxidantes; sendo assim, acima do nível freático, ocorre a dissolução da apatita e a hidrólise ácida dos silicatos. A partir do lençol freático e abaixo deste, tende a ocorrer a concentração da apatita, facilitada com a neutralização do pH das águas freáticas, o que inibe seu processo de dissolução.

### 3.4 – MINA DE TAPIRA

A Mina de Tapira está localizada na borda noroeste da chaminé carbonatítica, ocupando uma área de 78.403.000 m<sup>2</sup> (Figura 3.8), agregando diferentes corpos de minério de fosfato e estéreis (Figura 3.9).

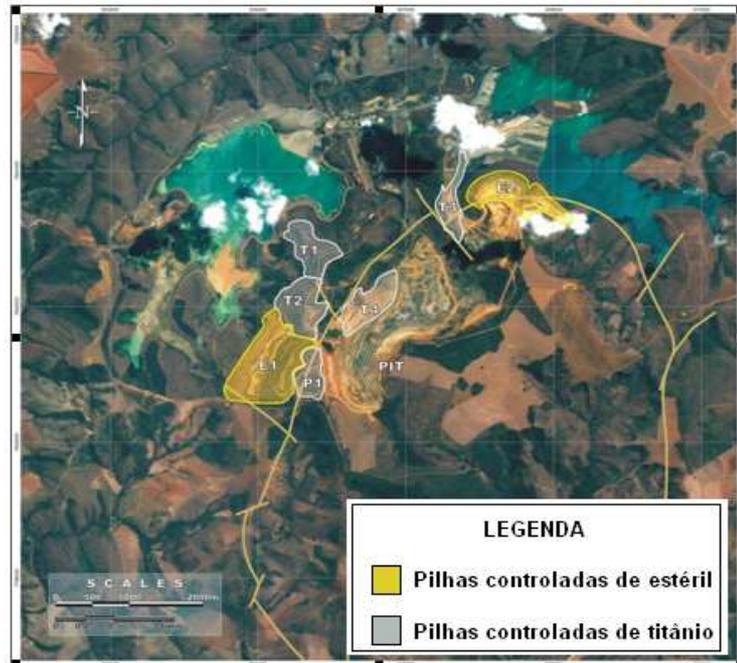


Figura 3.8 – Localização da Mina de Tapira na chaminé ultramáfica-carbonatítica

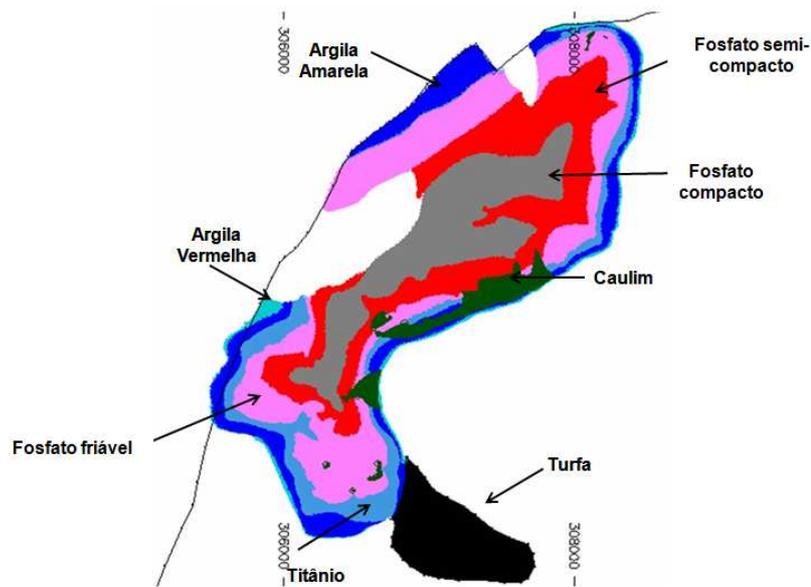


Figura 3.9 – Corpos de minério de fosfato e estéreis da Mina de Tapira

Nos estudos realizados para a pesquisa mineral na área, em função das características mineralógicas, químicas e petrográficas estabelecidas para o manto de intemperismo, foram definidos cinco horizontes ou zonas de mineralização: zona estéril, zona de mineralização em titânio, zona de mineralização em fosfato/titânio, zona de mineralização em fosfato e zona de mineralização em nióbio (Santos *et al.*, 2002).

- zona de estéril – engloba todo material com teores abaixo de 5% de  $P_2O_5$  solúvel e menor de 10% de  $TiO_2$ . Esse material possui características físicas e texturais bastante especiais: solo amarelo-avermelhado, argiloso, contendo fragmentos de rocha silicificada, nódulos milimétricos de limonita e raríssimas palhetas de vermiculita;
- zona de mineralização em titânio – compreende todo material com teores abaixo de 5% de  $P_2O_5$  solúvel e maior ou igual a 10% de  $TiO_2$ . Normalmente, ocorre imediatamente abaixo da zona de estéril, entre as cotas 1.300 m e 1.275 m. A principal distinção entre esta zona e a anterior encontra-se na diminuição dos componentes argilosos e no aumento do teor de  $TiO_2$ , superior a 10% (a maior parte dele estando relacionado a ocorrências de anatásio e/ou leucoxênio e, eventualmente, perovskita);

- zona de mineralização em fosfato com titânio – ocorre, em geral, logo abaixo da zona de mineralização em titânio, numa transição para a zona de mineralização em fosfato, principalmente entre as cotas 1.275m e 1.250 m, onde se localiza o lençol freático. Os níveis de  $TiO_2$  são semelhantes aos da zona anterior, com um aumento na ocorrência de perovskita, embora o anatásio seja o mineral de titânio mais freqüente. O fosfato é predominantemente apatítico, o que acarreta uma elevação nos teores de  $P_2O_5$ , com diminuição de limonita e com a mica sendo o silicato mais comum;
- zona de mineralização em fosfato – o processo de intemperismo ocorrido nesta zona é menor que aqueles mobilizados nas zonas superiores, caracterizando uma passagem das zonas de anatásio para uma zona de mineralização essencialmente de apatita. Na zona de mineralização em fosfato, o teor de  $TiO_2$  está abaixo de 10% e maior que 5% de  $P_2O_5$  solúvel. Esta zona ocorre geralmente em cotas inferiores a 1.250m até a rocha sã em profundidade, ocorrendo também uma queda nos teores de  $TiO_2$ , passando a existir predominância de perovskita e outros minerais de titânio sobre o anatásio; a magnetita é o mineral de ferro mais comum e os silicatos incluem piroxênios, granadas e micas, sendo a mais freqüente a flogopita. Há uma tendência de ocorrer teores mais altos de  $P_2O_5$  nos níveis mais elevados. O teor de CaO tende a acompanhar o de  $P_2O_5$ , estando relacionado também aos percentuais presentes de perovskita e calcita, que aumentam em profundidade. Acima da rocha sã, numa faixa de aproximadamente 30 m de espessura, ocorre uma zona de rochas duras, formadas por piroxenito alterado e silexito, que exigem uso de explosivos na etapa de lavra;
- zona de mineralização em nióbio – ocupa a parte mais central do corpo intrusivo e não apresenta qualquer expressão topográfica. A zona intemperizada é muito profunda, com mais de 200m em alguns pontos, envolvendo uma associação de nióbio e terras-raras com algum titânio e apatita. O titânio ocorre nas partes mais próximas à superfície e a apatita aparece abaixo da zona de nióbio, com teores geralmente baixos.

### 3.4.1 – DECAPEAMENTO E LAVRA

Atualmente em Tapira, a lavra da mina é totalmente mecanizada e desenvolvida a céu aberto, em cava única, pelo método de taludamento em bancadas em meia encosta com 13m de altura (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Mina do Complexo de Mineração de Tapira

O minério de fosfato está sotoposto a duas camadas: a primeira de estéril, com uma espessura média de 35m e a outra de minério de titânio (anatásio), com cerca de 30m de espessura (Figura 3.11). Estes horizontes estão identificados nos taludes da Frente 3 da cava (Figura 3.12).

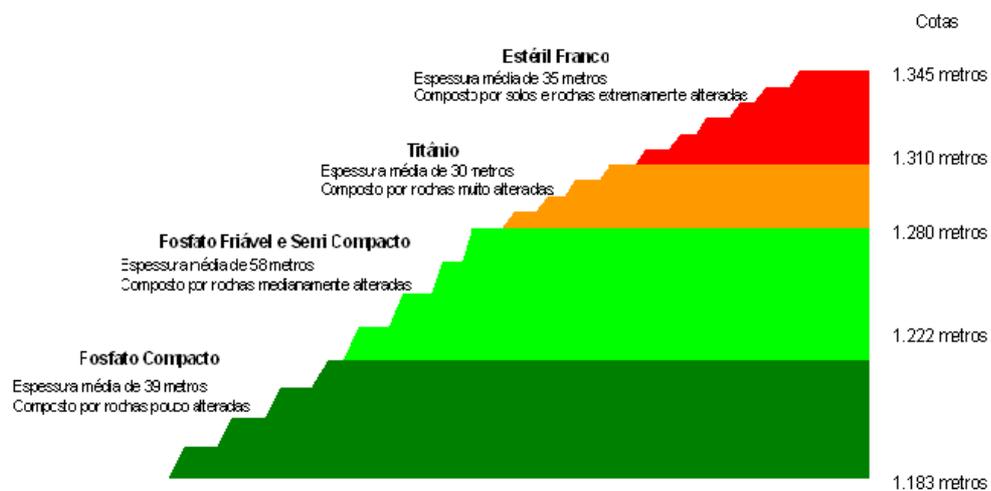


Figura 3.11 – Seção esquemática dos horizontes geotécnicos da Mina de Tapira



Figura 3.12 – Identificação dos horizontes geotécnicos da Frente 3 da Mina de Tapira

Os solos argilosos do topo da cava (argila vermelha, incluindo horizontes de solo, canga e laterita, e argila amarela, solo residual maciço associada à presença de oxi-hidróxidos de ferro) ocorrem localmente e compõem os estéreis da mina. O titânio constitui um horizonte rico em anatásio e magnetita, apresentando constituição argilo-arenosa, coloração marrom clara e estrutura heterogênea. Em geral, o N.A (início da zona saturada) está na base deste pacote. Ocorrências localizadas de caulim também são observadas, tratando-se de um material argiloso, branco a róseo, extremamente friável e incompetente, produto da alteração dos sienitos e traquitos.

O fosfato compacto é representado pelas unidades de rocha dura, incluindo rocha alterada compacta, material silicificado e a rocha sã, com ou sem fraturamentos. O fosfato friável, por sua vez, corresponde ao principal minério explorado em Tapira, não exigindo geralmente uso de explosivos. O fosfato semi-compacto engloba as litologias com características transicionais entre o material friável (de fácil escavação) e o material mais compacto (que exige técnicas de desmonte com uso de explosivos).

Todas as operações unitárias da lavra, ou seja, a perfuração, desmonte, carregamento e o transporte são terceirizados. O decapeamento é realizado com a retirada do estéril e do titânio, facilmente desagregáveis e cujo desmonte é realizado apenas mecanicamente, sendo os materiais depositados em pilhas separadas (Tabela 3.1 e Figura 3.13).

Tabela 3.1 – Dados das pilhas de estéril e titânio da Mina de Tapira\*

|                            | E1         | E2/T5     | E3/T3     | T1        | T2         | T4          |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| Área atual da base (m²).   | 1,178,486  | 650,650   | 463,386   | 332,570   | 404,930    | 588,455     |
| Altura atual (m).          | 166        | 90        | 26        | 65        | 80         | 60          |
| Cota da base (m).          | 1,230      | 1,218     | 1,222     | 1,226     | 1,310      | 1,224       |
| Cota do topo atual (m)     | 1,396      | 1,308.50  | 1,260     | 1,288     | 1,390      | 1,284       |
| Altura máxima prevista (m) | 196        | 90        | 56        | 85        | 140        | 200         |
| Volume máximo previsto (t) | 60,000,000 | 1,000,000 | 9,000,000 | 3,000,000 | 10,000,000 | 140,000,000 |
| Área máxima prevista (m²). | 1,178,486  | 650,650   | 614,238   | 332,570   | 404,930    | 941,424     |
| Vida útil (em anos).       | 4.5        | 0.1       | 0.7       | 0.2       | 0.8        | 15          |
| Berma                      | 15         | 15        | 15        | 15        | 15         | 15          |
| Ângulo da face             | 33°        | 33°       | 33°       | 33°       | 33°        | 33°         |

\* ver locação das pilhas na Figura 3.8



Figura 3.13 – Pilha de disposição de estéreis T4 da Mina de Tapira

Todo o minério lavrado é transportado em caminhões até a unidade de britagem primária, na qual se dá a redução granulométrica do minério para até 5” de diâmetro, que alimenta uma britagem secundária. O minério é, então, empilhado através de um *stacker* de duas lanças (Figura 3.14), permitindo a formação de duas pilhas de homogeneização paralelas, cada uma com extensão de 700m e capacidade de estocagem de 240.000 toneladas de minério. A movimentação de mina em 2009 foi de aproximadamente 37.138.819 t, sendo 16.138.819 t de produção de minério e cerca de 21.000.000 t de geração de estéril e titânio (Fosfertil, 2009).



Figura 3.14 – *Stacker* e pilhas de homogeneização do minério bruto

### 3.4.2 – CONCENTRAÇÃO E TRANSPORTE DO MINÉRIO FOSFÁTICO

O processo de beneficiamento inicia-se com a retomada da pilha de homogeneização, direcionando-se o minério até a usina de concentração para ser submetido aos processos de rebritagem, moagem, classificação, separação magnética, deslamagem e flotação, ao longo de dois circuitos de tratamento, nos quais são gerados dois produtos distintos: o concentrado fosfático convencional (produção de 1.932.358 t em 2009) e o concentrado fosfático ultrafino (produção de 156.331 t em 2009), para um consumo de água da ordem de 13.000 m<sup>3</sup>/hora, sendo 85% reciclada (Fosfertil, 2009).

- ‘Circuito granulado/friável’ (Figura 3.15): por transporte de correia, o minério é direcionado a moagem de barras, passando por uma fase de separação magnética de baixa intensidade, classificação e moagem de bolas, objetivando a adequação granulométrica do material para as fases de deslamagem, condicionamento e flotação (várias fases). O produto dos circuitos granulado e friável, denominado ‘concentrado fosfático convencional’, é direcionado a uma etapa de remoagem em moinho de bolas e espessamento, para adequação granulométrica e concentração de sólidos para transporte, via mineroduto de 120,7km de extensão, e para atendimento às especificações de alimentação da unidade de produção de ácido fosfórico localizada no Complexo Industrial de Uberaba (CIU).

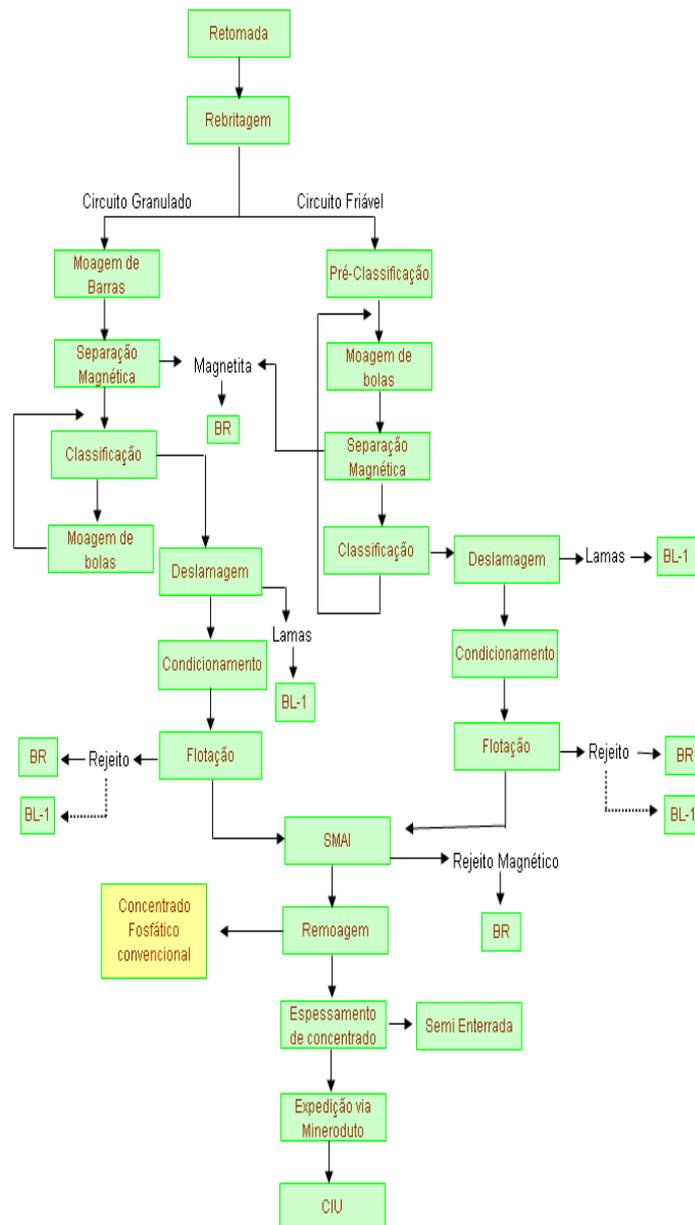


Figura 3.15 – Fluxograma do processo da produção do concentrado fosfático convencional

- ‘Circuito ultrafinos’ (Figura 3.16): o material proveniente de algumas etapas de deslamagens é direcionado a uma peneira *cush cush*, sendo submetido a três etapas de microdeslamagem, condicionado e bombeado para a flotação de ultrafinos. O produto é, então, bombeado para o espessamento de ultrafinos, filtrado e estocado nos pátios de estoque de concentrado fosfático ultrafino. O concentrado fosfático ultrafino é expedido por meio de transporte rodoviário até o Complexo Industrial de Uberaba.

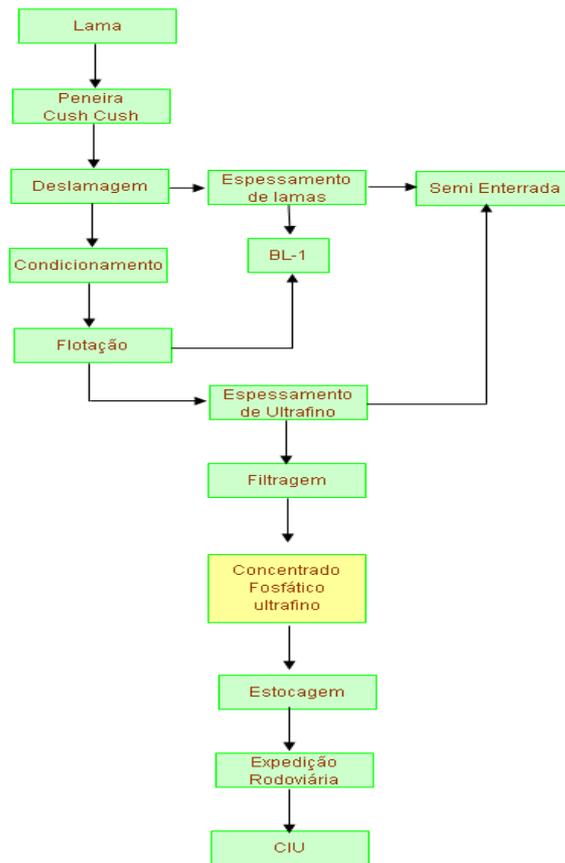


Figura 3.16 – Fluxograma do processo da produção do concentrado fosfático ultrafino.

Os produtos da usina constituem-se, em média, por 15% de rejeito magnético, 20% de lamas, 14% de concentrado fosfático e 51% de rejeitos de flotação. Em todas as etapas de flotação, são utilizados reagentes que funcionam como depressores (amido gelatinizado com soda cáustica) e outros como coletores (misturas de reagentes sintéticos – sulfosuccinatos e sulfosuccinatos e ácidos graxos saponificados com soda cáustica). O regulador de pH do processo é a própria soda cáustica.

---

## ANÁLISES PRELIMINARES DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA MINA DE TAPIRA

### 4.1 – INTRODUÇÃO

Conforme mostrado previamente, a geologia regional tem um grande impacto na conformação da cava da Mina de Tapira. Com efeito, os minérios de fosfato, titânio e nióbio foram concentrados nesta região por meio de processos supergênicos, que deram origem a um espesso manto laterítico, que cobre a chaminé ultramáfico-carbonatítica de Tapira. Localmente, foram identificados cinco diferentes horizontes ou zonas de mineralização, descritos no capítulo anterior.

O minério de fosfato ocorre geralmente em cotas inferiores a 1.280m, sob a forma de uma camada ou nível sobre a rocha matriz, acompanhando grosso modo a topografia atual, estando recoberto por camadas de estéril (solos argilosos avermelhados ou amarelados), com uma espessura média de 35m e de minério de titânio, com cerca de 30m de espessura, em cuja base encontra-se comumente o NA local. O contato entre estas unidades é geralmente caracterizado por uma faixa de mistura ou transição fosfato / titânio. Por outro lado, o fosfato apresenta-se desde friável a muito compacto, estendendo-se até a rocha sã em profundidade.

Estas unidades apresentam variações locais significativas em termos de distribuição, espessuras, graus de intemperismo e composições mineralógicas, caracterizando, assim, uma elevada complexidade litoestratigráfica no domínio da cava (Figura 4.1), com repercussão direta sobre as premissas de lavra e sobre os estudos de estabilidade dos taludes da mina.

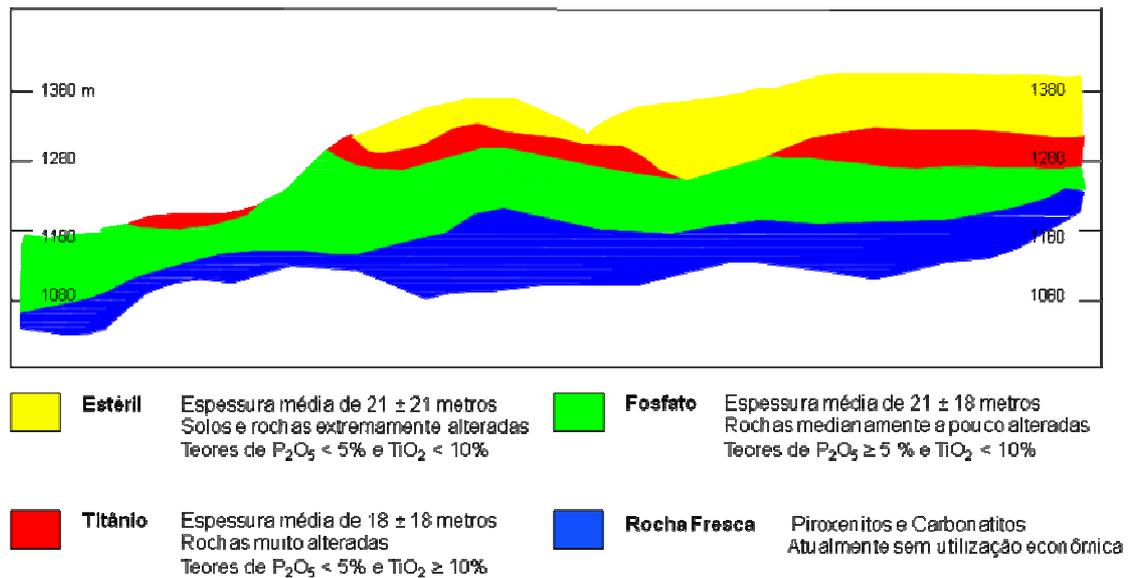


Figura 4.1 – Horizontes ou zonas de mineralização na área da Mina de Tapira

No contexto dos projetos geotécnicos de taludes de mineração, abordados e discutidos no Capítulo 2 desta dissertação, as análises da estabilidade dos taludes são precedidas por um amplo trabalho de investigação geotécnica da área, envolvendo ensaios de laboratório e de campo, determinação dos parâmetros geotécnicos de interesse e a definição dos potenciais mecanismos de ruptura dos taludes.

Um programa experimental convencional em solos compreende usualmente ensaios de caracterização física do material (granulometria e plasticidade), ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais, efetuados a partir de amostras coletadas em poços de inspeção. No caso de rochas, um programa típico envolve a realização de ensaios triaxiais e ensaios de compressão diametral (ou ensaio brasileiro), executados a partir de amostras obtidas em sondagens rotativas. Os ensaios de resistência previstos devem levar em consideração eventuais efeitos de anisotropia nestes materiais. Os ensaios de campo compreendem, em geral, a execução de sondagens e a abertura de poços e trincheiras. Em condições específicas, estas campanhas experimentais podem envolver a execução de ensaios especiais, tais como os ensaios pressiométricos, ensaios dilatométricos, ensaios cone penetrométricos (CPTU) e/ou ensaios geofísicos.

A identificação dos mecanismos potenciais de ruptura é um pré-requisito fundamental para as análises da estabilidade de taludes. De uma maneira geral, os mecanismos de ruptura compreendem processos por ruptura planar e rupturas por deslizamento circular ou plano-circular, condicionadas pelo próprio maciço e/ou por suas descontinuidades mais relevantes. Além desses, em função da natureza, geometria e distribuição das descontinuidades presentes, outros processos que podem ser relevantes em maciços rochosos são as rupturas por flambagem e/ou por tombamento de blocos.

Em taludes caracterizados por elevados estados de alteração das litologias presentes e/ou intenso fraturamento dos maciços rochosos, prevalecem mecanismos de ruptura condicionados por uma superfície tipicamente circular. Este mecanismo é caracterizado por ocorrer ao longo do maciço rochoso, não sendo controlado estruturalmente e os parâmetros de resistência mobilizados são os do próprio maciço. No caso da Mina de Tapira, os materiais que ocorrem nos níveis superiores são classificáveis como solos, passíveis de escavação por equipamentos de médio porte. Há materiais mais resistentes, nos níveis inferiores, como o fosfato semi-compacto, e, principalmente, o fosfato compacto, que exigem técnicas de desmonte por uso de explosivos.

Os taludes da mina apresentam solos relativamente homogêneos, sem estruturas especiais ou determinantes para mobilizar mecanismos de ruptura específicos. Estes condicionantes tendem a ocorrer em caráter estritamente localizado, passíveis de afetar apenas o potencial colapso de bancadas individuais. Assim, os mecanismos de ruptura fisicamente consistentes são aqueles típicos de materiais friáveis, de acordo com a disposição espacial dos mesmos para as diferentes seções da cava.

No presente capítulo, são apresentadas e revistas as campanhas experimentais e as análises de estabilidade realizadas previamente no âmbito da cava da Mina de Tapira, no sentido de integrar o conhecimento gerado e propiciar uma base de informações e correlações para os trabalhos similares que constituíram o escopo desta dissertação. Estes estudos, quatro no total, são aqui referidos como ‘preliminares’, uma vez que abordaram situações específicas dos taludes da mina e foram implementados com abordagens, premissas e cenários muito distintos entre si.

## 4.2 – PRIMEIRO ESTUDO

O primeiro programa de investigação do sítio da Mina de Tapira foi realizado em 1978 e contemplou levantamentos geológico-geotécnicos e hidrológicos da área. O modelo geológico local indicou basicamente a presença de piroxenitos e ocorrências secundárias de outras litologias, tais como lamprófiros, carbonatitos, silexitos, sienitos, traquitos e dunitos. As observações feitas mostraram que as rochas locais encontravam-se bastante alteradas até em grandes profundidades, apresentando perfis típicos de alteração, envolvendo solo superficial e piroxenitos muito ou extremamente alterados, de natureza arenosa a silto-argilosa.

Na oportunidade, designou-se por solo à camada superficial de material silto-argiloso, com espessura média de 5 m, para a qual não foram detectados vestígios da rocha subjacente. A faixa de piroxenito muito a extremamente alterado apresentou características arenosas a silto-argilosas, com grande presença de micas. O piroxenito medialmente alterado estava quase sempre associado ao processo de silicificação. Foram observados também veios de lamprófiros em toda a área estudada e com distribuição caótica. Outra observação relevante deste estudo inicial é que os testemunhos de sondagens não indicaram a presença de fraturas nem no material mais decomposto nem no material de maior competência.

Por outro lado, o levantamento hidrológico revelou que o nível freático praticamente acompanhava a topografia local, situando-se a uma profundidade de aproximadamente 50m nas partes de maior elevação topográfica, que tendia a se reduzir nas regiões mais próximas às encostas. O aquífero foi caracterizado como sendo livre ou freático, sem potenciais interferências ou compartimentações do mesmo ao longo de grandes feições estruturais. Entretanto, o trabalho ressaltava a possibilidade de ocorrência de certos condicionamentos desta natureza, embora de caráter localizado e em pequena escala, devido à presença e à distribuição dos veios de lamprófiro. Nos estudos, não foram constatadas alterações significativas da posição do lençol freático local, causadas pela pluviometria, mas apenas pequenas oscilações do nível de água devido a efeitos de recarga provenientes de chuvas regionais.

No levantamento geotécnico da área, foram retirados blocos indeformados das diferentes frentes de lavra e áreas de empréstimo (Tabela 4.1) para posterior preparação de corpos de prova para a execução de ensaios de laboratório, que contemplaram ensaios de caracterização completa, ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais drenados (tipo CD).

Tabela 4.1 – Identificação dos blocos indeformados coletados (Primeiro Estudo)

| Número do bloco | Localização          | Classificação táctil visual |
|-----------------|----------------------|-----------------------------|
| 909             | Frente de lavra E 19 | Piroxenito arenoso          |
| 910             | Frente de lavra E15  | Piroxenito com lamprófiro   |
| 911             | Frente de lavra N 27 | Piroxenito Silto-argiloso   |
| 912             | Frente de lavra N 27 | Piroxenito Silto-argiloso   |
| 913             | Frente de lavra X 31 | Piroxenito com lamprófiro   |
| 914             | Frente de lavra X 31 | Piroxenito silto argiloso   |
| 915             | Frente de lavra Y 40 | Piroxenito com lamprófiro   |
| 916             | Frente de lavra Y 40 | Piroxenito com lamprófiro   |
| 917             | Poço X 42            | Piroxenito arenoso          |
| 918             | Área de empréstimo   | Solo superficial            |
| 919             | Área de empréstimo   | Solo superficial            |
| 920             | Área de empréstimo   | Solo superficial            |

Os blocos 918, 919 e 920 constituíram amostras do solo superficial. Nos ensaios de laboratório, as análises granulométricas indicaram que a fração argilosa variava entre 27 a 62%, caracterizando solos bem graduados para os blocos 918 e 919 e uma areia fina siltosa para o material correspondente ao bloco 920 (Figura 4.2). A classificação granulométrica destes solos é apresentada com base equivalente à da norma brasileira atual NBR 6502 (ABNT, 1995), ou seja, com partículas de areia com dimensões médias superiores a 0,06 mm e menores ou iguais a 2,0mm, partículas de silte com dimensões medidas superiores a 0,002 mm e menores ou iguais a 0,06mm e partículas de argila com dimensões inferiores a 0,002mm.

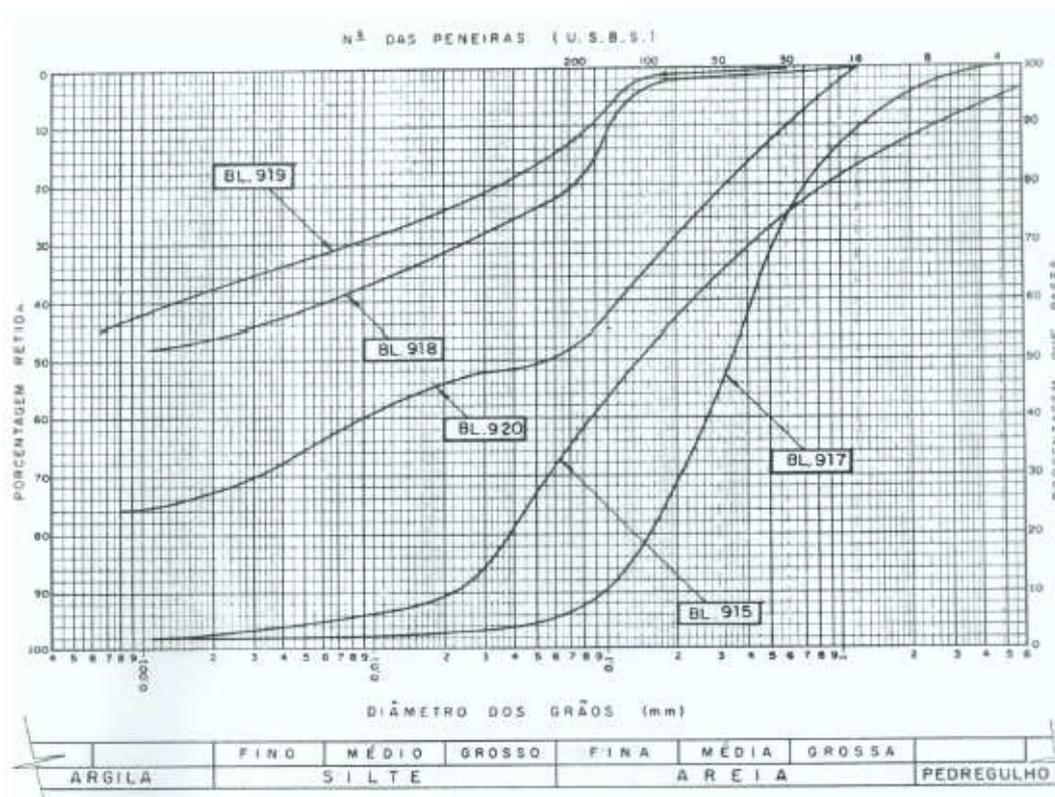


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos solos locais (Primeiro Estudo)

Ainda no âmbito dos ensaios de caracterização, os limites de liquidez apresentaram um valor médio de 70% (blocos 918 e 919) e os limites de plasticidade dos solos variaram entre 29,6% e 33,2%. O peso específico dos solos foi da ordem de 3,05 t/m<sup>3</sup> e o teor de umidade médio dos três blocos foi de 27,6%.

A série de ensaios triaxiais executados permitiu inferir o traçado de duas envoltórias de resistência, de equações  $\tau = 1,07 + \sigma' \text{tg } 28^\circ$  e  $\tau = 0,4 + \sigma' \text{tg } 28^\circ$  (em kg/cm<sup>2</sup>), mantendo-se as unidades dos ensaios realizados à época (Figura 4.3). Maiores valores de resistência foram obtidos para o bloco 920, com resistências similares para os solos coletados nos blocos 918 e 919. Nas análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, realizadas na seqüência destes trabalhos experimentais, foram adotados os parâmetros de resistência correspondentes à envoltória inferior pré-estabelecida. Para a complementação dos dados de entrada das análises, foram executados ensaios adicionais em amostras relativas aos demais blocos; os resultados destes ensaios estão sistematizados na Tabela 4.2.

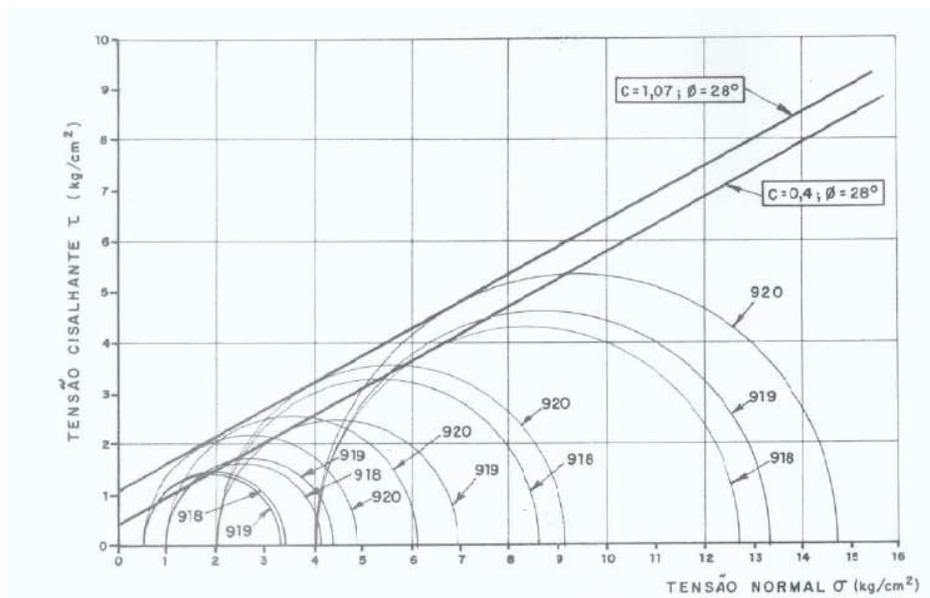


Figura 4.3 – Envoltórias de resistência obtidas (Primeiro Estudo)

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios adicionais de laboratório (Primeiro Estudo)

| Material                  | Bloco | w (%) | $\gamma_{nat}$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_s$ (tf/m <sup>3</sup> ) | Limites (%) |    |    | Resistência             |             |
|---------------------------|-------|-------|------------------------------------|---------------------------------|-------------|----|----|-------------------------|-------------|
|                           |       |       |                                    |                                 | LL          | LP | IP | c' (tf/m <sup>2</sup> ) | $\phi'$ (°) |
| Piroxenito silto-argiloso | 911   | 32,6  | 1,64                               | 3,15                            | 76          | 39 | 37 | 4,1                     | 18          |
|                           | 912   |       |                                    | 2,91                            | 66          | 38 | 28 |                         |             |
|                           | 914   |       |                                    | 3,20                            | 37          | 21 | 16 |                         |             |
| Piroxenito com lamprófiro | 910   | 32,5  | 1,77                               | 3,22                            | 59          | 35 | 24 | 0                       | 22          |
|                           | 911   |       |                                    | 3,03                            | 37          | 27 | 10 |                         |             |
|                           | 913   |       |                                    | 3,25                            | 45          | 23 | 22 |                         |             |
| Piroxenito arenoso        | 909   | 17,8  | 2,36                               | 3,09                            | 30          | 11 | 19 | 3,8                     | 29          |
|                           | 917   |       |                                    | 3,41                            |             |    |    |                         |             |

Com base nos resultados dos ensaios de laboratório, foram realizadas as análises de estabilidade dos taludes da mina, considerando as condições de ‘talude de trabalho’ e ‘talude final’, aplicando-se o método de Bishop Modificado e também os ábacos de Hoek e Bray (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Primeiro Estudo)

| Taludes individuais | Tipo de Material                     | Altura do talude (m) | Ângulos de corte |             |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------|-------------|
|                     |                                      |                      | Talude saturado  | Talude Seco |
| Taludes individuais | Solo superficial                     | 13                   | -                | 58°         |
|                     | Piroxenito silto-argiloso            | 13                   | 58°              | 63°         |
|                     | Piroxenito Arenoso                   | 13                   | 49°              | 58°         |
| Taludes médios      | Solo superficial; piroxenito arenoso | 55                   | -                | 36°         |
|                     | Piroxenito Silto-Argiloso            | 70                   | 17°              | 22°         |
|                     | Piroxenito Arenoso                   | 70                   | 21°              | 30°         |

Este primeiro estudo teve por objetivo a determinação da geometria de escavação dos taludes da mina considerando um planejamento de lavra de 4 anos e um planejamento de lavra final para 20 anos. O trabalho demonstrou que os ângulos de corte de 32 °, inicialmente previstos no plano de lavra para o *pit* final, não eram compatíveis com as envoltórias de resistência obtidas, sendo redefinido um talude médio para toda a área da mina de 25°.

Para as condições de planejamento previstas para curto prazo (4 anos), a altura dos taludes individuais foi estabelecida como devendo ser de 13m, com talude individual de 70° e um ângulo médio de talude geral entre 11° a 14°, com larguras de bermas iguais a 22m. Por outro lado, para um planejamento a longo prazo, considerando um horizonte de 20 anos, a geometria de escavação foi definida em termos de alturas de talude individual de 13m, ângulo de talude individual de 45°, ângulo médio do talude geral 32° e largura das bermas igual a 10m.

Outra recomendação do trabalho foi de que, no decorrer da lavra, caso fosse constatado que os taludes individuais pudessem ser deixados com o próprio ângulo de corte propiciado pela ação direta da escavadeira, esta geometria deveria ser adotada (ângulos de 70°), com largura das bermas da ordem de 22m.

### 4.3 – SEGUNDO ESTUDO

Os estudos relativos à estabilidade dos taludes da Mina de Tapira somente foram retomados em 1995, amparados exclusivamente na observação direta das frentes de lavra à época (Figuras 4.4 e 4.5) e em reanálises dos parâmetros obtidos no estudo anterior, sem qualquer investigação geotécnica adicional.



Figura 4.4 – Frente de lavra 1 da Mina de Tapira em 1995.



Figura 4.5 – Frente de lavra 3 da Mina de Tapira em 1995.

Neste sentido, procedeu-se previamente a uma correlação entre as seções geológicas estabelecidas no trabalho anterior com os horizontes das frentes de lavra da mina à época (Tabela 4.4), sendo realizado posteriormente um levantamento topográfico da cava, que contemplou cinco seções, designadas como perfis A, B, C, D e E (Figura 4.6), que foram escolhidas para a realização das análises de estabilidade relativas ao segundo estudo.

Tabela 4.4 – Correlações entre seções geológicas (Segundo Estudo)

| Primeiro Estudo (1978)         | Segundo Estudo (1995)          |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Solo superficial               | Argila vermelha e amarela      |
| Piroxenito arenoso             | Titânio e fosfato friável      |
| Piroxenito silto-argiloso      | Piroxenito silto-argiloso      |
| Rocha semi-compacta a compacta | Rocha semi-compacta a compacta |

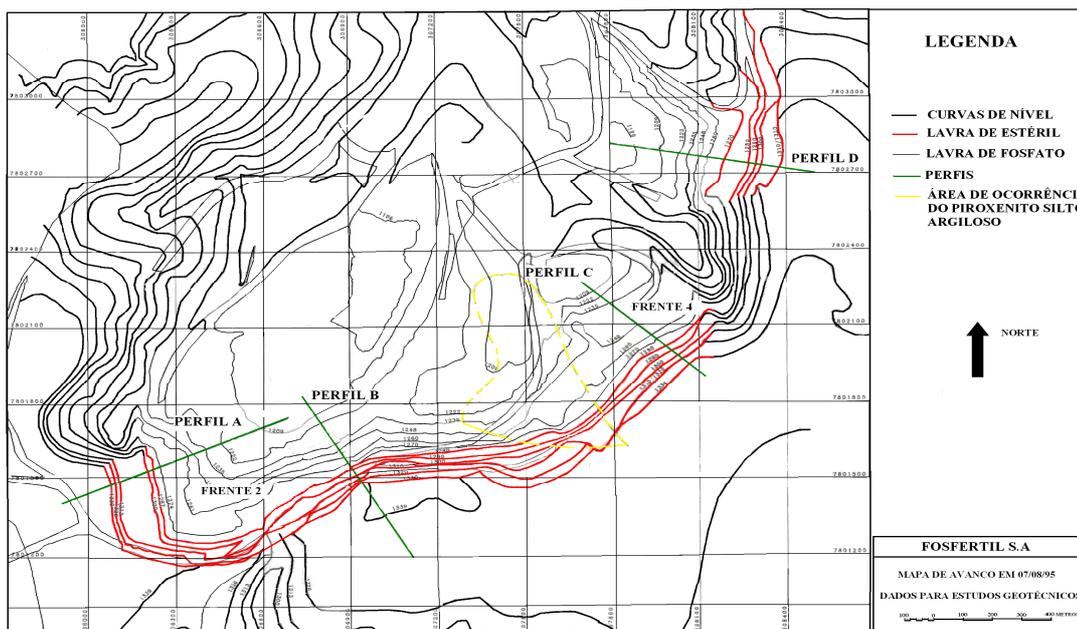


Figura 4.6 – Mapa topográfico da Mina de Tapira em 1995 (Segundo Estudo)

Nas observações de campo, além da identificação dos diversos tipos de materiais presentes nas cinco frentes de lavra disponíveis à época, constatou-se a presença de um horizonte caulínico, de natureza silto-argilosa, nas frentes de lavra 2 e 4, embora com

extensão limitada e caráter local. Este material foi classificado como piroxenito-argiloso, caracterizado por uma resistência menor que os demais litologias e susceptível a instabilidades localizadas.

Com base nas correlações anteriores, procedeu-se a uma reavaliação das envoltórias de resistência para as análises de estabilidade dos taludes, com base nos materiais expostos nas frentes de lavra da cava em 1995, mantendo-se inalterados os demais parâmetros obtidos no primeiro trabalho, sem quaisquer investigações geotécnicas adicionais (Tabela 4.5). Nestas retroanálises, foram considerados pares de valores de coesão ( $c'$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi'$ ) dos materiais expostos, próximos aos valores determinados previamente em laboratório, mediante a variação da posição do nível de água com base nas observações de campo.

Tabela 4.5 – Parâmetros geotécnicos adotados (Segundo Estudo)

| Material                  | Bloco | w (%) | $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_s$ (tf/m <sup>3</sup> ) | Limites (%) |    |    | Resistência               |             |
|---------------------------|-------|-------|------------------------------|---------------------------------|-------------|----|----|---------------------------|-------------|
|                           |       |       |                              |                                 | LL          | LP | IP | $c'$ (tf/m <sup>2</sup> ) | $\phi'$ (°) |
| Solo superficial          | 918   | 27,6  | 1,72                         | 2,93                            | 78          | 45 | 33 | 4                         | 18          |
|                           | 919   |       |                              | 2,84                            | 77          | 47 | 30 |                           |             |
|                           | 920   |       |                              | 3,39                            | 56          | 26 | 30 |                           |             |
| Piroxenito silto-argiloso | 911   | 32,6  | 1,64                         | 3,15                            | 76          | 37 | 39 | 0                         | 22          |
|                           | 912   |       |                              | 2,91                            | 66          | 28 | 38 |                           |             |
|                           | 914   |       |                              | 3,20                            | 37          | 16 | 21 |                           |             |
| Piroxenito arenoso        | 909   | 17,8  | 2,36                         | 3,09                            | 30          | 11 | 19 | 3,8                       | 29          |
|                           | 917   |       |                              | 3,41                            | NP          | NP | NP |                           |             |

As análises de estabilidade foram executadas, adotando-se o método de Bishop Modificado e os parâmetros de resistência reavaliados do estudo anterior, sendo, então, definidos os novos ângulos de corte para os taludes de mina, considerando as seções correspondentes aos perfis A, B, C, D e E das frentes de lavra à época (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Segundo Estudo)

| Frente                    | Ângulo de talude (°) | Altura dos bancos (m) | Fator de segurança |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 1 – Perfil A              | 30                   | 10                    | 1,16               |
| 2 – Perfil B              | 35                   | 8                     | 1,20               |
| 3 – Perfil C              | 26                   | 13                    | 1,21               |
| 4 – Perfil D              | 26                   | 13                    | 1,15               |
| 5 – Perfil E              | 30                   | 10                    | 1,20               |
| Piroxenito silto-argiloso | 18,5                 | 19                    | 1,15               |

Neste trabalho, não foram avaliadas infiltrações de água nos taludes, não tendo sido feita nenhuma recomendação em termos da instalação de algum tipo de instrumentação geotécnica, para fins de monitoramento dos taludes, ressaltando-se apenas a necessidade de vistorias periódicas da área pela equipe técnica de operação da mina.

#### 4.4 – TERCEIRO ESTUDO

O terceiro trabalho foi realizado em 1999, motivado por uma ruptura ocorrida nos taludes da cava em agosto de 1998, numa região da Frente 2 (Figura 4.7). A ruptura ocorreu devido à conjugação de dois fatores principais: a presença de material caulínico na área, inserido na matriz de fosfato friável e a posição mais elevada do nível d' água local, não se descartando ainda uma potencial influência de materiais expansivos presentes nos taludes.

Este mecanismo de ruptura foi, então, tipificado no âmbito da cava, associado à presença de argilas expansivas nos piroxenitos-argilosos, de ocorrência e extensão limitadas nos taludes. Com o avanço das frentes de escavação, tais ocorrências tenderam a ser cada vez mais restritas, a ponto de não serem mais incorporadas nas análises atuais da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira.

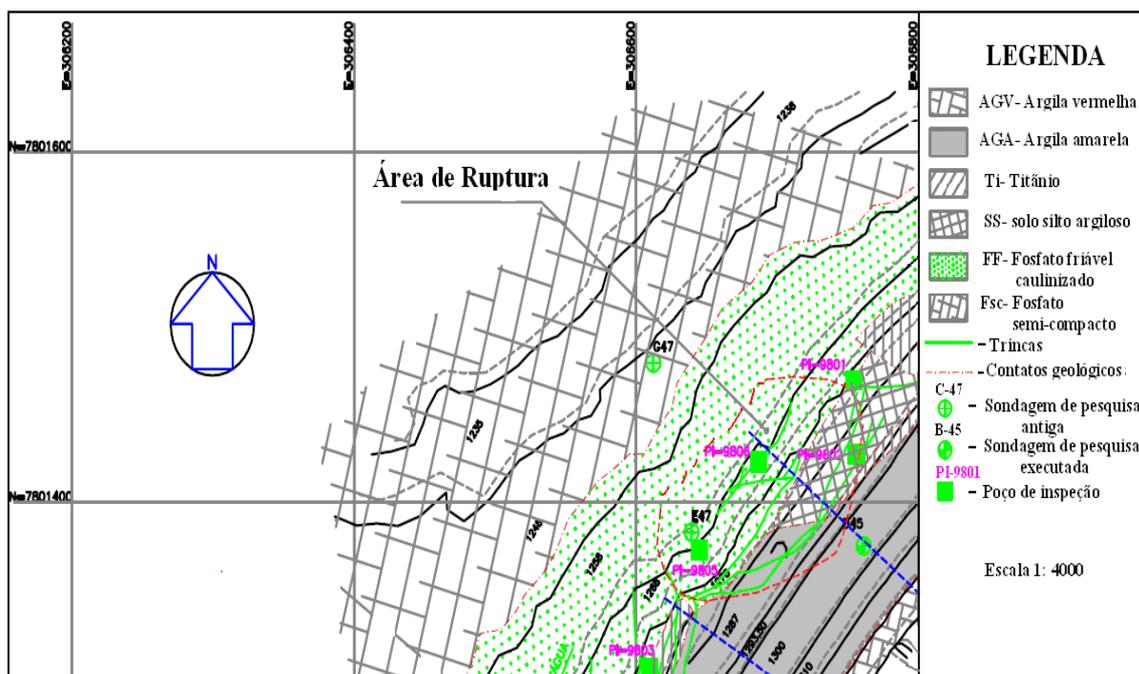


Figura 4.7 – Localização da área de ruptura da Frente 2 da Mina de Tapira em 1999 (Terceiro Estudo)

Na época, entretanto, esta ruptura foi motivo de grande preocupação e motivou novos estudos da estabilidade dos taludes da mina, que contemplaram inspeções diretas e mapeamento dos taludes, execução de sondagens rotativas, instalação de medidores de nível de água e descrição detalhada de testemunhos de sondagens, incluindo-se ainda a realização de novos ensaios de laboratório.

Após um mapeamento geológico-geotécnico preliminar, foram executados sete furos de sondagem rotativa, com amostragem em locais de interesse, visando definir a localização do corpo mineralizado, além de definir melhor o comportamento espacial do horizonte caulínico. Por outro lado, foram descritas detalhadamente as amostras de diversos furos de pesquisa, executados na região estável. A partir dessas descrições, foram estabelecidos sete perfis geológico-geotécnicos na área de interesse. Para a área sujeita aos processos de instabilização, foram programados seis poços de inspeção (Tabela 4.7), em locais escolhidos a partir das observações obtidas pelo mapeamento. Estes poços permitiram a coleta de amostras indeformadas, que subsidiaram, então, a realização de novos ensaios de laboratório.

Tabela 4.7 – Poços de inspeção das investigações geotécnicas do Terceiro Estudo

| Poço    | Coordenadas   |             | Cota<br>(m) |
|---------|---------------|-------------|-------------|
|         | N             | E           |             |
| PI-9801 | 7.801.469,531 | 306.754,148 | 1.277,728   |
| PI-9802 | 7.801.427,434 | 306.754,497 | 1.287,031   |
| PI-9803 | 7.801.305,023 | 306.609,645 | 1.278,803   |
| PI-9804 | 7.801.181,796 | 306.550,168 | 1.278,914   |
| PI-9805 | 7.801.372,343 | 306.644,960 | 1.270,287   |
| PI-9806 | 7.801.422,827 | 306.686,851 | 1.270,145   |

Os ensaios compreenderam a caracterização completa dos materiais amostrados, que incluíram análises granulométricas (Figura 4.8) e determinação das faixas de valores de limites de consistência e de densidade dos grãos e ensaios triaxiais drenados, para a determinação dos parâmetros de resistência, cujos valores foram consolidados e estão sistematizados na Tabela 4.8.

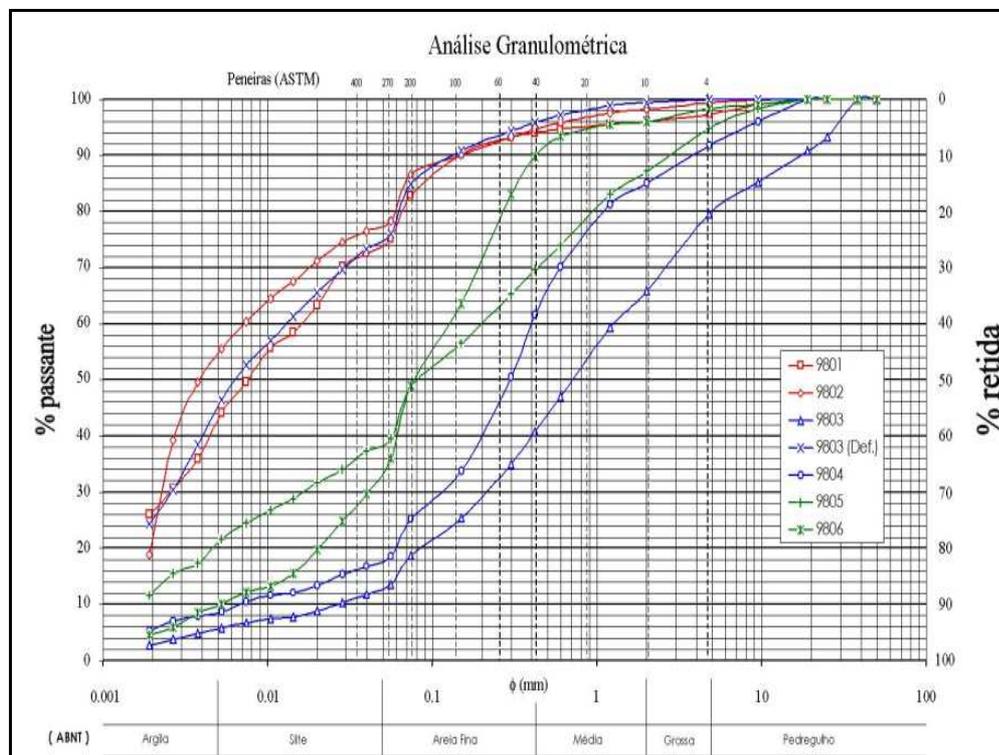


Figura 4.8 – Curvas granulométricas dos materiais da Mina de Tapira (Terceiro Estudo)

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de laboratório (Terceiro Estudo)

| Poço    | Material                      | w<br>(%) | $\gamma$<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_s$<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Limites (%) |      | Resistência |                |
|---------|-------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|-------------|------|-------------|----------------|
|         |                               |          |                                  |                                    | LL          | IP   | c'<br>(kPa) | $\phi'$<br>(°) |
| PI-9801 | Solo argilo siltoso           | 30,5     | 18,3                             | 14,0                               | 36,0        | 14,5 | 150         | 22,5           |
| PI-9802 | Solo argilo siltoso           | 30,5     | 18,3                             | 14,0                               | 47,0        | 16,5 | 78          | 28,5           |
| PI-9803 | Fosfato com muita vermiculita | 20,0     | 22,6                             | 36,5                               | 23,3        | 11,4 | 0           | 30             |
| PI-9804 | Fosfato com muita vermiculita | 22,6     | 27,1                             | 38,6                               | 26,7        | 12,4 | 0           | 37             |
| PI-9805 | Fosfato com muita vermiculita | 37,3     | 17,8                             | 32,5                               | 32,4        | 9,8  | 25          | 28             |
| PI-9806 | Fosfato com pouca vermiculita | 29,1     | 22,0                             | 10,4                               | 28,1        | 16,8 | 0           | 25             |
| PI-9803 | Amostra deformada             | -        | 28,2                             | -                                  | 60,2        | 30,5 | -           | -              |

As análises de estabilidade foram, então, refeitas, aplicando-se uma vez mais o método de Bishop Modificado, levando-se em conta as condições do NA local observadas durante o mapeamento de campo e adotando-se os novos parâmetros de resistência obtidos.

Com base nas reanálises aplicadas neste terceiro estudo, foram redefinidos os ângulos de corte para os taludes de mina, considerando as seções correspondentes às diferentes frentes de lavras e perfis geotécnicos estabelecidos nestes estudos (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Terceiro Estudo)

| Taludes     | Tipo de rocha                | Altura (m) | Ângulo de corte (°) |
|-------------|------------------------------|------------|---------------------|
| Individuais | Solo superficial             | 40         | 34                  |
| Individuais | Titânio                      | 13         | 24                  |
| Individuais | Fosfato friável              | 39         | 23                  |
| Individuais | Fosfato semi-compacto        | 52         | 22                  |
| Médio       | Solo superficial             | 50         | 40                  |
| Médio       | Titânio                      | 20         | 24                  |
| Médio       | Material friável caulinizado | 20         | 22                  |
| Médio       | Fosfato friável caulinizado  | 20         | 22                  |
| Médio       | Fosfato semi-compacto        | 60         | 22                  |

#### 4.5 – QUARTO ESTUDO

O quarto estudo relativo às análises da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira foi motivado em função da mobilização de uma trinca que ocorreu em 2005 nos limites dos taludes operacionais (Figura 4.9), na região da cava denominada de Mirante.

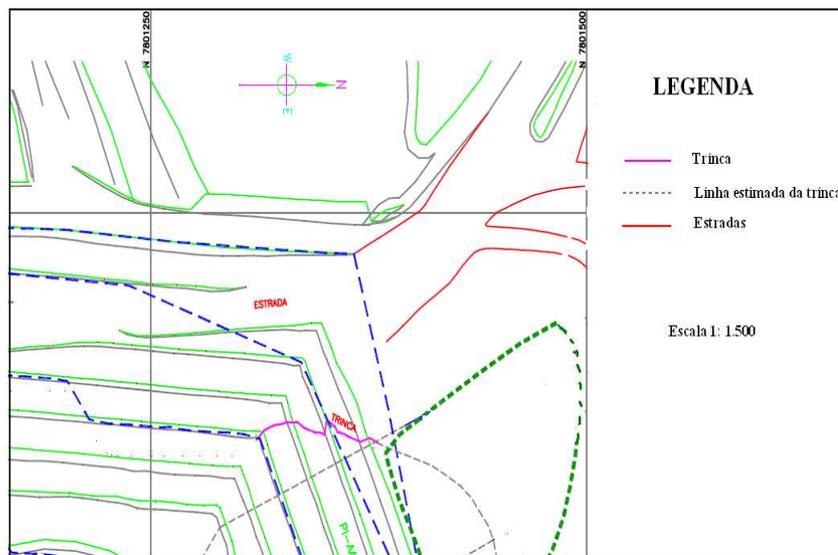


Figura 4.9 – Localização da trinca surgida na Frente 1 da Mina de Tapira (Quarto Estudo)

Similarmente aos estudos precedentes, procedeu-se a uma investigação geotécnica nesta área, por meio da execução de nove poços de inspeção (Tabela 4.10), visando à coleta de amostras indeformadas dos diversos horizontes presentes (argila amarela da zona do estéril, titânio e fosfato friável), cujos resultados subsidiaram a execução de novas análises de estabilidade para os taludes desta frente de lavra (Tabela 4.11).

Tabela 4.10 – Poços de inspeção das investigações geotécnicas do Quarto Estudo

| Coordenadas dos poços de inspeção |                 |            |           |
|-----------------------------------|-----------------|------------|-----------|
| Poços                             | Litologia       | N          | E         |
| PI-AA-01                          | Argila Amarela  | 7801373,75 | 305926,48 |
| PI-TI-02                          | Titânio         | 7801341,48 | 305942,13 |
| PI-FF-03                          | Fosfato Friável | 7801310,66 | 305964,59 |
| PI-FF-04                          | Fosfato Friável | 7801273,00 | 305982,00 |
| PI-FF-05                          | Fosfato Friável | 7801220,00 | 305953,00 |
| PI-AA-06                          | Argila Amarela  | 7800968,00 | 305783,00 |
| PI-TI-07                          | Titânio         | 7800855,00 | 305881,00 |
| PI-FF-08                          | Fosfato Friável | 7800911,00 | 305918,00 |
| PI-FF-09                          | Fosfato Friável | 7801106,00 | 305891,00 |

Tabela 4.11 – Resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira (Quarto Estudo)

| Taludes     | Tipo de rocha                    | Altura (m) | Ângulo de corte (°) |
|-------------|----------------------------------|------------|---------------------|
| Individuais | Argilas secas                    | 10         | 59                  |
| Individuais | Titânio seco                     | 10         | 59                  |
| Individuais | Titânio e Fosfato Saturados      | 10         | 45                  |
| Individuais | Fosfato semi-compacto            | 13         | 59                  |
| Médio       | Argila e titânio seco            | 50         | 34                  |
| Médio       | Titânio e fosfato saturado       | 40         | 22                  |
| Médio       | Fosfato semi-compacto e compacto | 70         | 30                  |

---

## ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES DA MINA DE TAPIRA: SÍNTESE ATUAL

### 5.1 – INTRODUÇÃO

Após a revisão e consolidação dos estudos preliminares relativos à estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, formalizados nos quatro estudos apresentados no capítulo anterior, estabeleceu-se uma base de referência para a implementação de um programa de análises mais definitivo, destinado a analisar o problema com foco integral sobre todo o domínio da cava.

Com este objetivo, a empresa mobilizou um estudo específico e elaborado com base em uma ampla campanha de investigação geotécnica. Esta campanha de investigação incluiu tanto ensaios de laboratório como ensaios de campo, bem como a instalação de instrumentos para monitoramento dos taludes. O monitoramento dos taludes da Mina de Tapira contemplou a instalação de indicadores de nível de água (INA) e de marcos superficiais (MS).

Com base no mapeamento geológico – geotécnico da mina, foram definidas sete frentes de lavra (designadas por Frente 00 até Frente 06) e quatorze seções para as análises de estabilidade (P1 a P6; C até I; seção da região da Bigorna). As seções P1 a P6, A e B estão localizadas nas Frentes 1 e 2, nas quais os taludes estão próximos ao *pit* final da cava. As seções C a F estão localizadas nas Frentes 2 e 3, em taludes operacionais, em regiões onde se tem uma grande presença de material caulinzado, que contribuem muito para a instabilização destes taludes. As demais seções, G, H e I, estão localizadas nas Frentes 4 e 5, respectivamente (Figura 5.1).

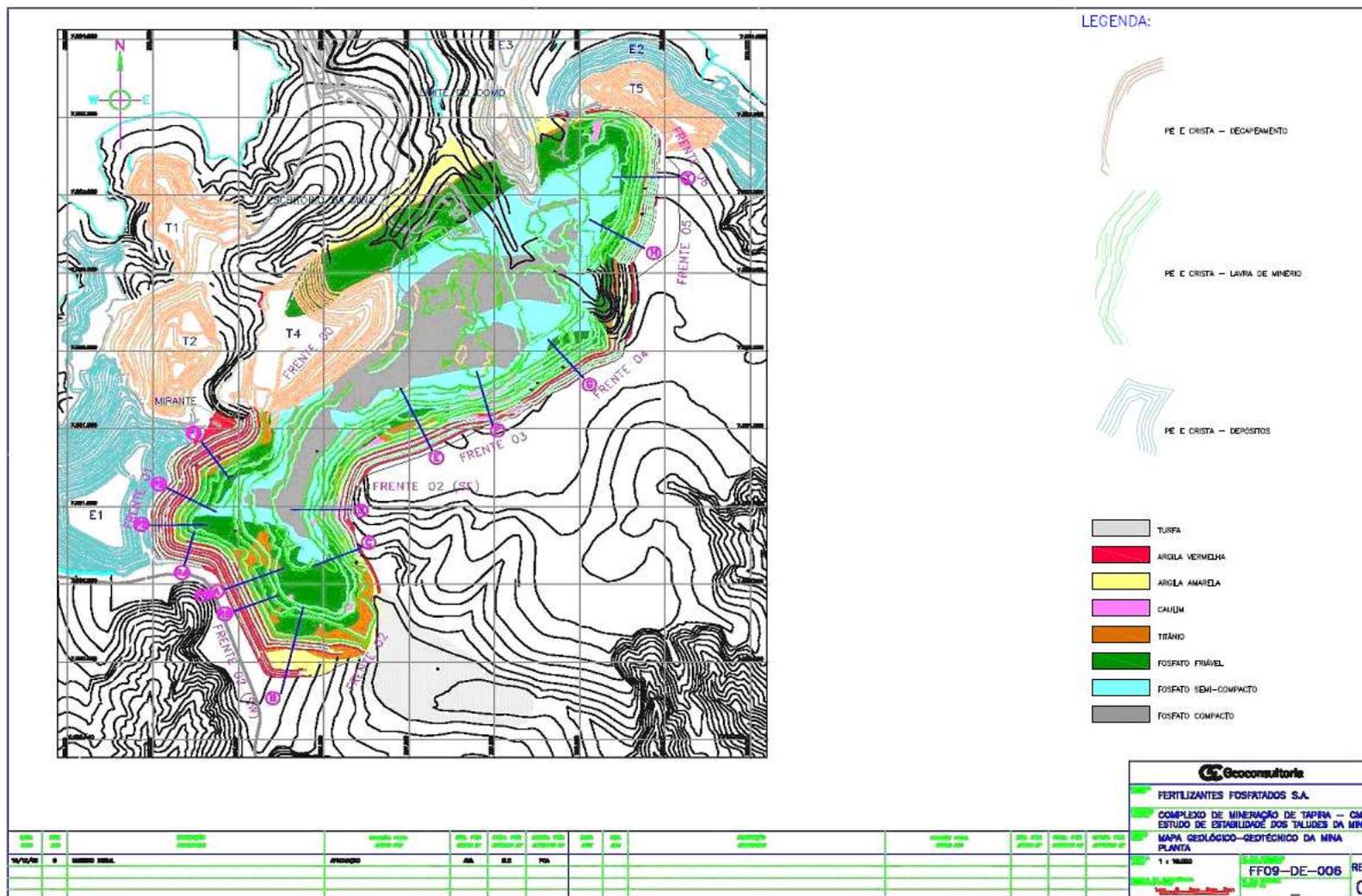


Figura 5.1 – Mapa topográfico com indicação das frentes e seções estudadas

## 5.2 – COLETA DE AMOSTRAS

Para cada frente de lavra, foram escavados um poço ao longo da camada de argila amarela, um poço na camada de titânio e dois poços na camada de fosfato friável, num total de 28 poços de inspeção. O horizonte de argila vermelha não foi investigado por ser pouco representativo no domínio da cava (ver Figura 3.11). As especificações técnicas utilizadas para a abertura de poços obedeceram a norma NBR-9604 (ABNT, 1986). A Tabela 5.1 apresenta as coordenadas e as cotas das bermas relativas aos poços de inspeção (Figura 5.2) executados nos taludes da Mina de Tapira.

Tabela 5.1 – Localização dos poços de inspeção nos taludes da Mina de Tapira

| Poço        | Coordenadas  |            | Cota da berma (m) |
|-------------|--------------|------------|-------------------|
|             | N            | E          |                   |
| P-101 (AA)  | 7.800.484,21 | 305.960,15 | 1.310,31          |
| P-102 (AA)  | 7.799.961,07 | 306.287,40 | 1.296,34          |
| P-103 (Ti)  | 7.800.011,37 | 306.299,38 | 1.277,24          |
| P-104 (Ti)  | 7.800.535,84 | 306.004,16 | 1.280,30          |
| P-105 (FF)  | 7.800.598,14 | 306.049,17 | 1.261,18          |
| P-106 (FF)  | 7.800.174,97 | 306.390,46 | 1.259,55          |
| P-107 (Ti)  | 7.800.699,57 | 306.649,41 | 1.265,34          |
| P-108 (FF)  | 7.800.673,80 | 306.621,13 | 1.247,30          |
| P-109 (Ti)  | 7.800.986,04 | 306.489,81 | 1.258,61          |
| P-110A (FF) | 7.800.665,20 | 306.580,08 | 1.232,76          |
| P-111 (FF)  | 7.800.885,48 | 306.514,94 | 1.257,49          |
| P-112A      | 7.800.907,77 | 306.577,69 | 1.276,94          |
| P-113 (AAc) | 7.800.968,13 | 306.572,55 | 1.277,10          |
| P-114 (AAc) | 7.801.441,32 | 307.022,91 | 1.274,91          |
| P-115 (Ti)  | 7.801.508,35 | 307.098,88 | 1.266,35          |
| P-116 (FF)  | 7.801.450,52 | 306.954,78 | 1.268,21          |
| P-117 (AAc) | 7.801.592,85 | 307.500,44 | 1.285,55          |
| P-118 (Ti)  | 7.801.658,74 | 307.509,76 | 1.264,37          |
| P-119 (Ti)  | 7.801.897,07 | 307.938,95 | 1.275,33          |
| P-120 (AA)  | 7.801.858,51 | 307.983,52 | 1.308,74          |
| P-121 (FF)  | 7.801.932,31 | 307.774,56 | 1.230,24          |
| P-122 (FF)  | 7.801.651,98 | 307.221,90 | 1.244,97          |
| P-123 (AA)  | 7.803.093,45 | 308.407,66 | 1.280,39          |
| P-124 (AA)  | 7.802.737,13 | 308.354,38 | 1.300,15          |
| P-125 (Ti)  | 7.802.727,61 | 308.311,48 | 1.280,47          |
| P-126 (Ti)  | 7.803.134,08 | 308.402,46 | 1.272,75          |
| P-127 (FF)  | 7.803.156,13 | 308.341,63 | 1.249,90          |
| P-128 (FF)  | 7.802.777,56 | 308.237,76 | 1.251,60          |

(AA): argila amarela ; (TI): Titânio ; (FF):Fosfato Friável ; (AAc): Argila Amarela caulinizada.

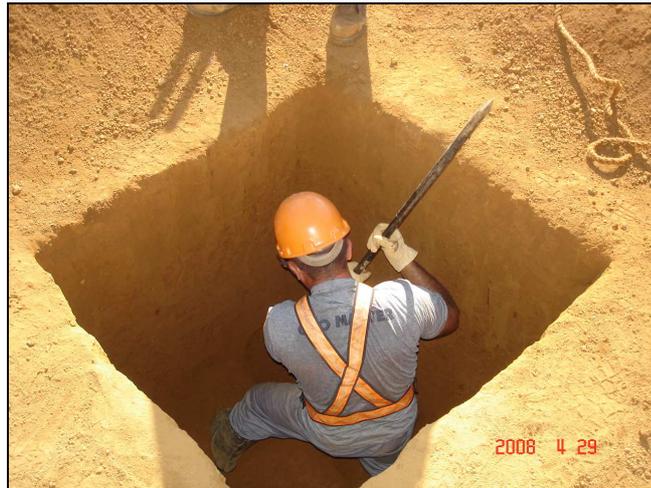


Figura 5.2 – Execução de poço de inspeção (PI - 101) na Mina de Tapira

Nestes poços de inspeção (Figura 5.2), foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos respectivos materiais, locados preferencialmente em seções topográficas nos horizontes de materiais mais friáveis, distribuídos ao longo da mina. As amostras indeformadas foram talhadas do fundo ou da parede da escavação, na forma cúbica com 30cm de aresta (Figura 5.3) e com as devidas orientações (Souza *et al.*, 1998); as amostras deformadas foram armazenadas em embalagens plásticas (Figura 5.4), com aproximadamente 20 kg de material, resultantes da talhagem final dos blocos. O processo de amostragem resultou em 56 blocos de amostras indeformadas, sendo duas por poço, sendo 18 amostras retiradas da argila amarela, 18 da camada de titânio e 20 ao longo da camada de fosfato friável.



Figura 5.3 – Coleta de amostra indeformada no Poço PI -101

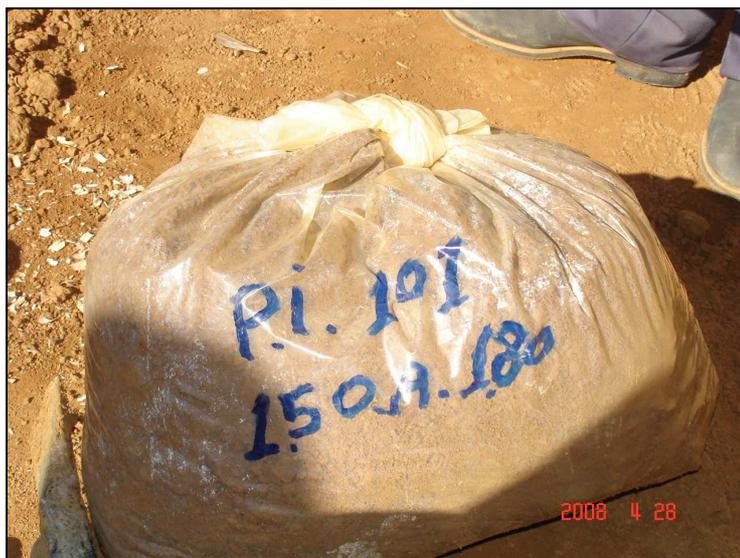


Figura 5.4 – Coleta de amostra deformada no Poço PI -101

Após coletadas no campo, as amostras foram devidamente identificadas e transportadas temporariamente para o galpão da geologia da Fosfertil, onde foram acondicionadas e protegidas.

Tendo sido coletadas amostras sempre em duplicidade para cada poço de inspeção, uma delas foi mantida em estoque neste local, como medida preventiva para eventuais problemas de comprometimento da outra amostra similar que foi, então, encaminhada a um laboratório especializado de solos (Figura 5.5), para a execução da série de ensaios previamente programados.



Figura 5.5 – Acondicionamento e transporte final das amostras coletadas

### 5.3 – PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA EM LABORATÓRIO

Em laboratório, as 28 amostras coletadas foram inicialmente preparadas (NBR 6457) e, então, submetidas à caracterização completa, compreendendo ensaios de granulometria conjunta por peneiramento e sedimentação (NBR 7181), limites de consistência LL (NBR 6459) e LP (NBR 7180), massa específica dos grãos (NBR 6508) e teor de umidade natural (NBR 6459). A análise granulométrica dos solos foi feita com base na norma NBR 5544 (ABNT, 1996).

As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram os resultados obtidos, em termos da determinação da curva granulométrica e dos resultados dos limites de consistência para o caso da amostra coletada no poço de investigação P-101.

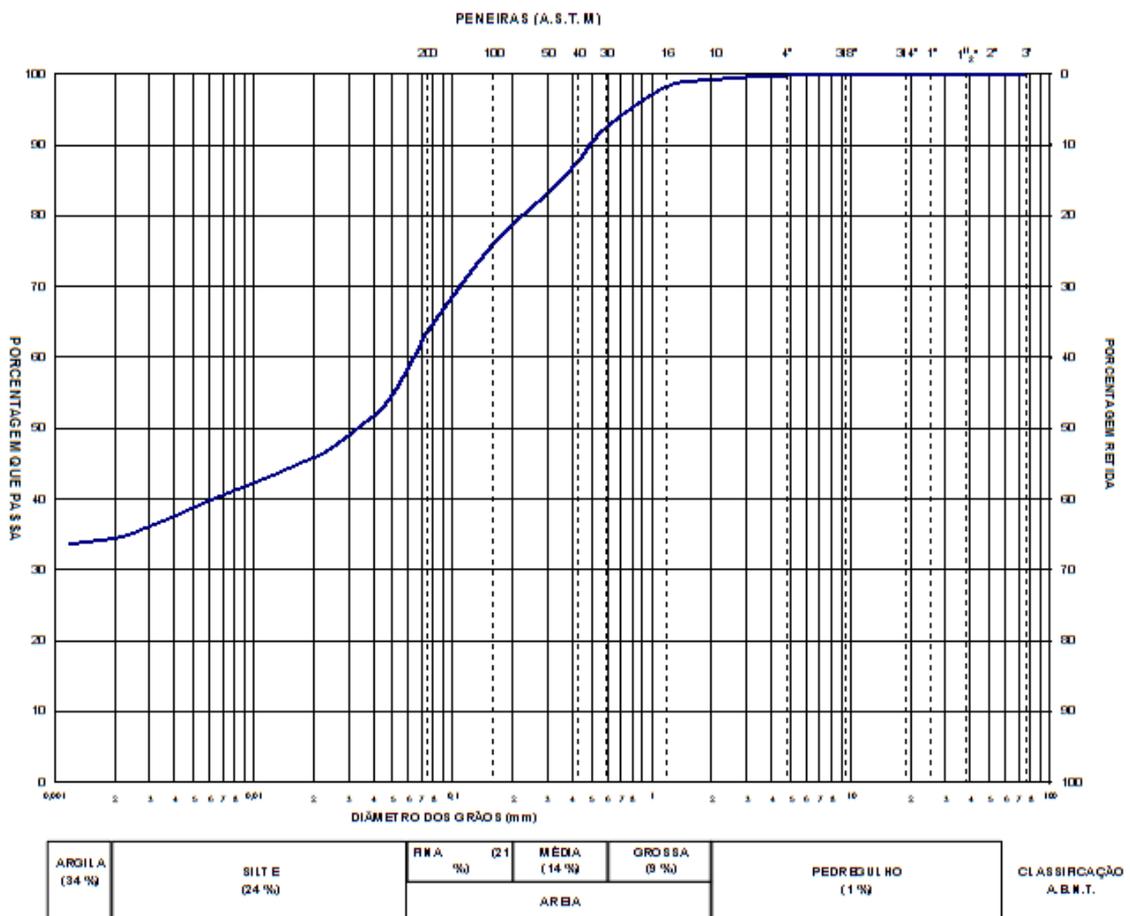


Figura 5.6 – Curva granulométrica da amostra indeformada do Poço PI -101

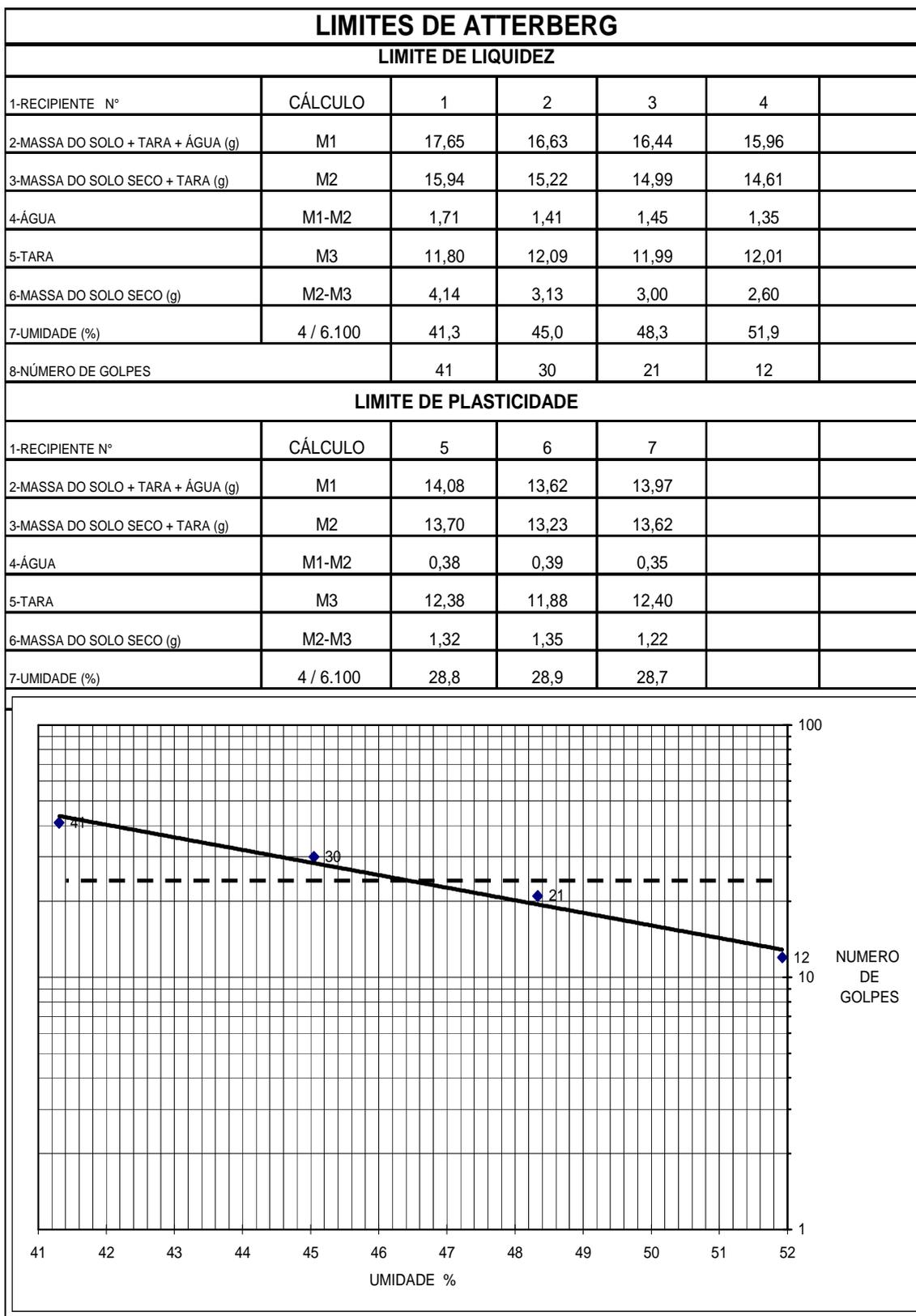


Figura 5.7 – Limites de consistência da amostra indeformada do Poço PI -101

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, foram selecionadas amostras para a execução dos ensaios de resistência. Foram executados ensaios de compressão triaxial tipo CIU com medidas de poropressões, em corpos de prova dos solos moldados na umidade natural ou com corpos de prova saturados, em função das condições de cada material. As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os resultados dos ensaios triaxiais CIU realizados para a amostra coletada no poço de investigação P-102.

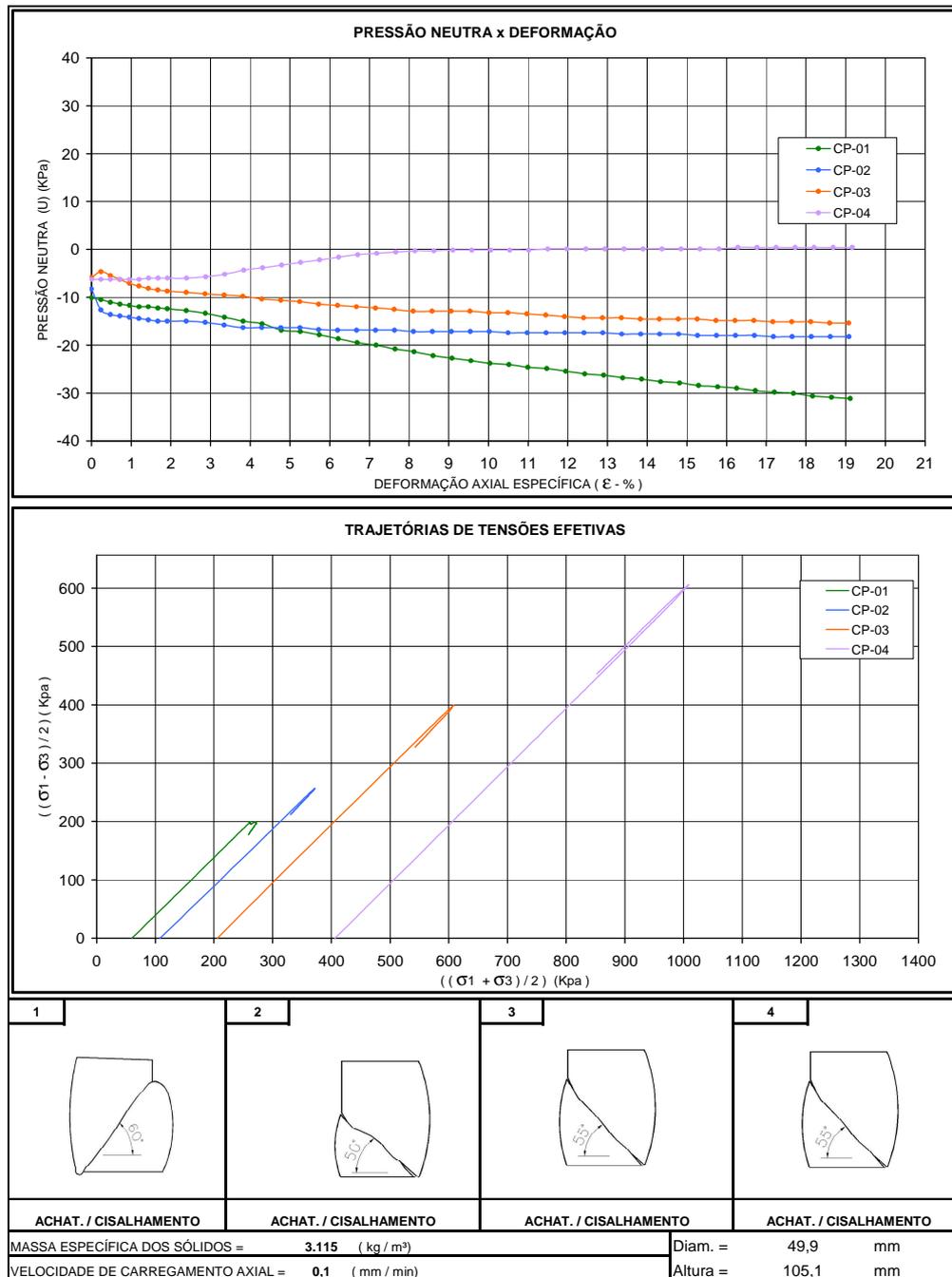


Figura 5.8 – Resultados de Ensaios CIU para a amostra oriunda do poço PI-102 (1)

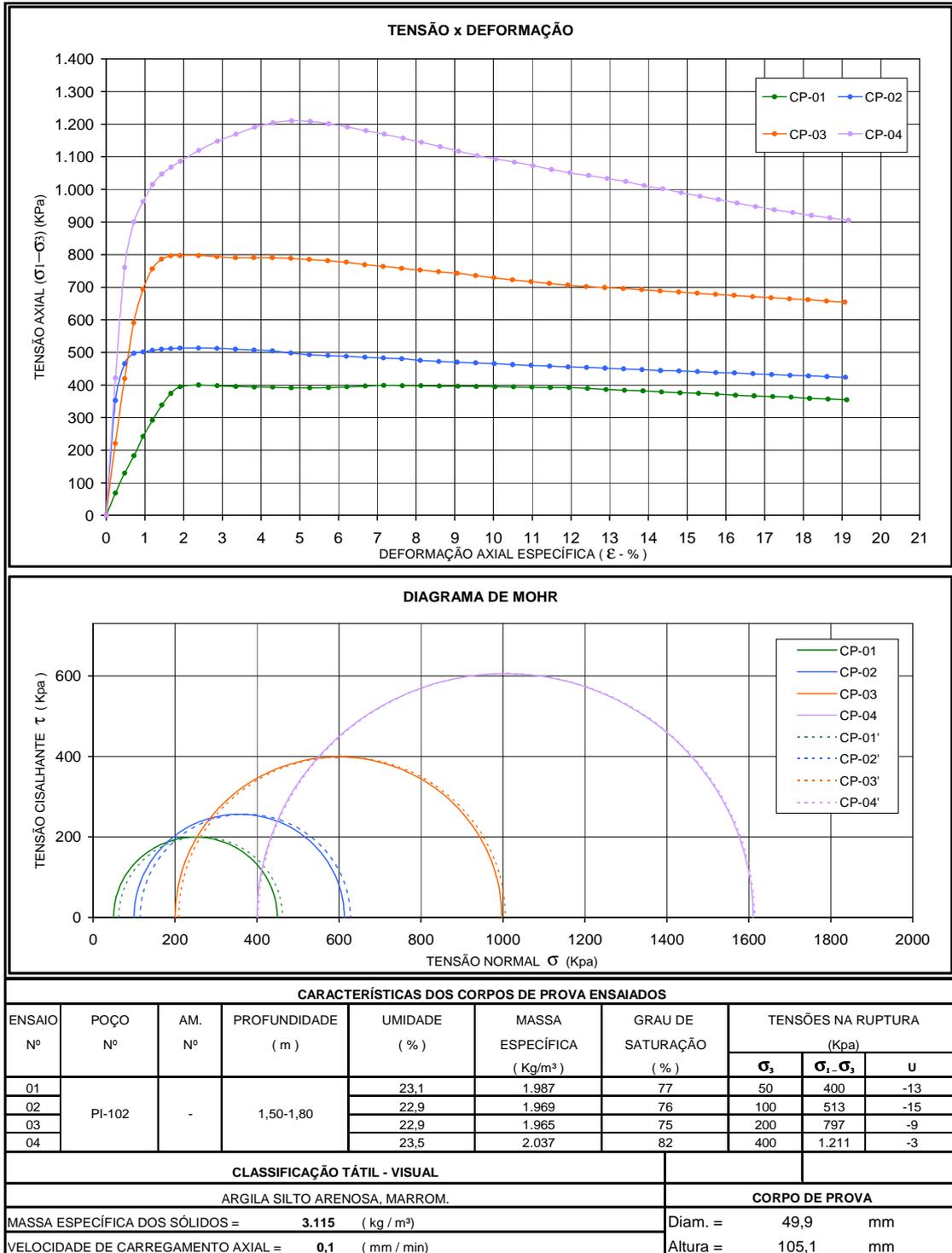


Figura 5.9 – Resultados de Ensaios CIU para a amostra oriunda do poço PI-102 (2)

Para argila amarela foram realizados ensaios de resistência com o material sempre na umidade natural, enquanto as amostras de titânio e do fosfato friável foram ensaiadas também com saturação dos corpos de prova.

Os ensaios foram executados obedecendo às normas práticas dos laboratórios, sendo moldados corpos de prova com 51 mm de diâmetro para os ensaios triaxiais e utilizando-se pedras porosas com elevadas pressões de borbulhamento para os ensaios triaxiais em amostras não saturadas. Nos ensaios triaxiais, foram adotadas tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa. Complementarmente, foi feito um ensaio triaxial tipo UU. Os quantitativos dos ensaios de laboratório realizados estão indicados na Tabela 5.2. Outros resultados dos ensaios triaxiais são apresentados no Anexo I

Tabela 5.2 – Planilha quantitativa dos ensaios realizados em laboratório

| Ensaio de laboratório   | unidades | ensaios |
|---|----------|---------|
| Limites de consistência   | ensaio   | 30      |
| Granulometria completa  | ensaio   | 30      |
| Massa específica dos solos  | ensaio   | 30      |
| Teor de umidade natural   | ensaio   | 1       |
| Densidade natural   | ensaio   | 1       |
| Ensaio de compressão triaxial tipo UU                                       | cp       | 1       |
| Ensaio de compressão triaxial tipo CIU (corpos de prova saturados)          | cp       | 64      |
| Ensaio de compressão triaxial tipo CIU (corpos de prova na umidade natural) | cp       | 60      |

A Tabela 5.3 sistematiza todos os resultados dos ensaios realizados ( $\gamma_s$  constitui o peso específico das partículas sólidas e  $\gamma_{nat}$  representa o peso específico do solo na sua condição natural), incluindo-se os correspondentes parâmetros de resistência (28 ensaios de caracterização completa e 20 ensaios resistência de compressão triaxial).

Para a argila amarela, foram realizados apenas ensaios triaxiais CIU com amostras na umidade natural, pois as argilas mostraram-se secas nos taludes onde foram retiradas. Para o caso do titânio e para o fosfato friável, foram realizados os mesmos ensaios de resistência, mas com amostras moldadas na condição de umidade natural e saturadas, uma vez que parte do titânio encontrou-se saturado no campo e o fosfato apresenta-se sempre saturado nos períodos chuvosos.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de laboratório de todas as amostras coletadas nos taludes da Mina de Tapira

| Seção | Poço                 | Litologia | $\gamma_s$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | Limites (%) |      |      | Granulometria (%) |     |     |     |     |     | $\gamma_{nat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | w<br>(%) | S<br>(%) | CIU <sub>nat</sub> |             | CIU <sub>sat</sub> |             |
|-------|----------------------|-----------|------------------------------------|-------------|------|------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|----------|----------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|       |                      |           |                                    | LL          | LP   | IP   | Arg               | Sil | Afi | Ame | Agr | Ped |  |          |          | c' (kPa)           | $\phi'$ (°) | c' (kPa)           | $\phi'$ (°) |
| A     | P – 101              | AA        | 29,81                              | 46,3        | 28,8 | 17,5 | 34                | 24  | 21  | 14  | 6   | 1   |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 104              | Ti        | 38,51                              | 32,3        | 21,8 | 10,5 | 16                | 29  | 17  | 15  | 14  | 9   | 21,65                                  | 22,3     | 73       | 50                 | 35          | 40                 | 35          |
|       | P – 105              | FF        | 31,57                              | 48,2        | 27,8 | 20,4 | 7                 | 38  | 21  | 21  | 10  | 3   | 21,61                                  | 23,8     | 93       | 30                 | 21          | 10                 | 37,5        |
| B     | P – 102              | AA        | 31,15                              | 47,7        | 30,6 | 17,1 | 34                | 22  | 20  | 16  | 7   | 1   | 19,89                                  | 23,1     | 77       | 70                 | 33          |                    |             |
|       | P – 103              | Ti        | 35,65                              | 46,8        | 28,9 | 17,9 | 10                | 40  | 16  | 11  | 8   | 15  | 17,83                                  | 28,8     | 65       | 50                 | 29,5        | 20                 | 33          |
|       | P – 106              | FF        | 32,02                              | 42          | 23,7 | 18,3 | 8                 | 28  | 25  | 23  | 6   | 10  | 20,90                                  | 18,1     | 72       |                    |             | 45                 | 31,5        |
| C     | P – 107              | Ti        | 36,51                              | 50          | 24,8 | 25,2 | 8                 | 20  | 13  | 15  | 19  | 25  |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 108              | FF        | 32,85                              | 53,6        | 27,8 | 25,8 | 6                 | 23  | 18  | 29  | 22  | 2   | 22,51                                  | 20,8     | 90       | 140                | 24          | 105                | 30          |
|       | P – 110 <sup>a</sup> | FF        | 32,88                              | 43,0        | 23,2 | 19,8 | 4                 | 21  | 20  | 20  | 11  | 24  |  |          |          |                    |             |                    |             |
| D     | P – 109              | Ti        | 37,03                              | 30,1        | 20,4 | 9,7  | 17                | 27  | 24  | 20  | 7   | 5   | 24,67                                  | 18,5     | 87       | 240                | 40          | 120                | 40          |
|       | P – 111              | FF        | 32,88                              | 53,1        | 30,4 | 22,7 | 12                | 38  | 21  | 18  | 7   | 4   | 20,94                                  | 27,9     | 92       |                    |             | 10                 | 27          |
|       | P – 112 <sup>a</sup> | AAc       | 37,02                              | 61,4        | 31,9 | 29,5 | 3                 | 35  | 14  | 13  | 18  | 17  |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 113              | AAc       | 36,01                              | 60,4        | 28   | 32,4 | 9                 | 29  | 13  | 17  | 18  | 14  | 17,95                                  | 39,2     | 79       | 45                 | 16,5        |                    |             |

| E     | P – 114 | AAc       | 34,15                              | 70,7        | 29,4 | 41,3 | 14                | 30  | 16  | 16  | 9   | 15  | 21,58                                  | 23,5     | 84       | 40                 | 23          |                    |             |
|-------|---------|-----------|------------------------------------|-------------|------|------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|----------|----------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|       | P – 115 | Ti        | 39,05                              | 63,4        | 32   | 31,4 | 10                | 28  | 14  | 16  | 14  | 18  | 22,34                                  | 23,7     | 80       |                    |             | 20                 | 30          |
|       | P – 116 | FF        | 30,90                              | 45,3        | 25,5 | 19,8 | 3                 | 20  | 15  | 28  | 13  | 21  | 21,38                                  | 18,5     | 79       | 100                | 15          | 20                 | 31,5        |
| F     | P – 117 | AAc       | 36,45                              | 49,1        | 29   | 20,1 | 5                 | 34  | 20  | 11  | 11  | 19  | 22,04                                  | 14,0     | 58       | 190                | 34          |                    |             |
|       | P – 118 | Ti        | 40,50                              | 40,8        | 30,4 | 10,4 | 14                | 38  | 21  | 9   | 4   | 14  | 19,48                                  | 37,2     | 81       | 70                 | 27          | 50                 | 33          |
|       | P – 122 | FF        | 31,99                              | 47,7        | 28,6 | 19,1 | 8                 | 22  | 15  | 22  | 16  | 17  | 22,65                                  | 18,6     | 88       |                    |             | 45                 | 32,5        |
| G     | P – 119 | Ti        | 37,62                              | 60,1        | 34,6 | 25,5 | 7                 | 26  | 8   | 9   | 14  | 36  |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 120 | AA        | 29,44                              | 48,8        | 34,7 | 14,1 | 38                | 23  | 16  | 12  | 8   | 3   | 18,37                                  | 24,5     | 73       | 50                 | 32          |                    |             |
|       | P – 121 | FF        | 32,28                              | 46,7        | 31,8 | 14,9 | 11                | 36  | 19  | 15  | 7   | 12  | 20,30                                  | 22,9     | 78       |                    |             | 20                 | 37          |
| H     | P – 124 | AA        | 30,24                              | 45,0        | 30,7 | 14,3 | 37                | 21  | 17  | 15  | 9   | 1   |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 125 | Ti        | 34,98                              | 61,5        | 35,7 | 25,8 | 15                | 56  | 14  | 9   | 2   | 4   | 17,98                                  | 45,9     | 88       | 70                 | 27          | 40                 | 35,7        |
|       | P – 128 | FF        | 32,42                              | 59,2        | 35,7 | 23,5 | 12                | 38  | 23  | 22  | 4   | 1   | 19,44                                  | 33,6     | 89       |                    |             | 75                 | 30          |
| I     | P – 123 | AA        | 33,85                              | 66,1        | 38,4 | 27,7 | 17                | 52  | 16  | 12  | 2   | 1   | 18,61                                  | 43,1     | 91       | 110                | 31          |                    |             |
|       | P – 126 | Ti        | 34,68                              | 66,2        | 38,7 | 27,5 | 21                | 44  | 20  | 12  | 2   | 1   |  |          |          |                    |             |                    |             |
|       | P – 127 | FF        | 31,75                              | 45,8        | 28,5 | 17,3 | 5                 | 43  | 26  | 17  | 4   | 5   |  |          |          |                    |             |                    |             |
| Seção | Poço    | Litologia | $\gamma_s$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | Limites (%) |      |      | Granulometria (%) |     |     |     |     |     | $\gamma_{nat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | w<br>(%) | S<br>(%) | CIU <sub>nat</sub> |             | CIU <sub>sat</sub> |             |
|       |         |           |                                    | LL          | LP   | IP   | Arg               | Sil | Afi | Ame | Agr | Ped |  |          |          | c' (kPa)           | $\phi'$ (°) | c' (kPa)           | $\phi'$ (°) |

Para o horizonte contemplando a argila amarela, foram ensaiadas 9 amostras ao longo dos taludes, nas diversas frentes de lavra. As amostras foram separadas em argila amarela (AA) e argila amarela caulinizada (AAc), esta última ocorrendo na região das seções D a F. A argila amarela (AA - 5 amostras) mostrou-se ser de granulometria mais fina, com predomínio da fração argila, variando predominantemente entre 34 e 38 %. A fração areia fina areia média e silte ocorrem, aproximadamente, na mesma proporção. Nesse caso, ocorrem poucos pedregulhos, em torno de 1%. Os limites de liquidez variam predominantemente entre 45,0 e 48,8 %, com IP entre 14,1 e 17,5 %.

O peso específico úmido das amostras de argila amarela na condição natural variou entre 18,4 kN/m<sup>3</sup> e 19,9 kN/m<sup>3</sup>, enquanto o peso específico das partículas sólidas variou entre 29,4 kN/m<sup>3</sup> e 33,9 kN/m<sup>3</sup>; os teores de umidade das amostras encontravam-se entre 23,1 e 24,5 %, correspondentes a graus de saturação entre 73,0 e 77,0 %. A argila amarela caulinizada, designada por AAc (4 amostras), por sua vez, apresentou algumas diferenças importantes. A fração de argila tende a ser bem reduzida (em média menor que 10 %), predominando as frações de areia e silte. Em todas as amostras ocorrem pedregulhos, no mínimo com 14 %. Os limites de liquidez foram elevados (valor médio de 61 %), com um IP de 30 % em média. O peso específico natural variou entre 18,0 a 21,6 kN/m<sup>3</sup> e o dos grãos ficou entre 33,9 e 37,0 kN/m<sup>3</sup>. A umidade natural das amostras foi muito variável, assim como o grau de saturação, mas sempre com valores superiores a 79%.

O titânio Ti (9 amostras) mostrou dados bastante consistentes, apesar de algumas amostras estarem com impregnações de material caulinzado (poço P-109). O titânio apresentou predomínio da fração de areia, com quantidades consideráveis de silte e um menor teor de argila (quase sempre menor que 16%); muitas amostras apresentaram quantidades consideráveis de pedregulhos. Os limites de liquidez quase sempre foram elevados, acima de 60 %, mas há um grupo de amostras com valores em torno de 50 %. O valor de IP foi aproximadamente de 25 %. O peso específico natural variou entre 17,8 e 24,5 kN/m<sup>3</sup>, com valor médio de 20,0 kN/m<sup>3</sup>. O peso específico dos grãos foi elevado, variando entre 34,7 e 40,5 kN/m<sup>3</sup>. A umidade natural quase sempre ficou entre 22,3 e 37,2 %, maiores localmente. O grau de saturação variou entre 65 e 88 %.

O fosfato friável FF (10 amostras) constituiu o material mais ensaiado. Apresentou resultados bastante consistentes, apesar de se apresentar visualmente nos taludes como o material mais heterogêneo, ocorrendo inclusive impregnações caulinizadas. O fosfato friável apresentou predomínio da fração de areia, bem distribuída em areia fina e média. Houve um aumento da fração silte em relação às amostras da Frente 1, com valores médios de 25 %, e com consideráveis quantidades de pedregulhos. Os limites de liquidez variaram entre 42,0 e 59,2 %, com IP variando de 14,9 a 25,8 %. O peso específico natural variou em estreita faixa, com valor médio de 21,3 kN/m<sup>3</sup>. A umidade variou entre 18,1 e 27,9 %, havendo apenas uma amostra com umidade maior (33,6 %). A saturação média ficou próxima a 90 %.

#### **5.4 – MODELO GEOMECÂNICO DOS TALUDES DA MINA E PREMISSAS DE LAVRA**

Os materiais que ocorrem na mina, nos níveis superiores, são classificados como solos, sendo passíveis de escavação com equipamentos de médio porte. Há materiais mais resistentes, nos níveis inferiores, que exigem técnicas de desmonte com uso de explosivos, tais como o fosfato semi-compacto e compacto.

A mina apresenta solos relativamente homogêneos, sem estruturas deletérias que possam condicionar a estabilidade dos taludes. Localmente, observam-se materiais bem estruturados, que mostram nítido condicionamento na estabilidade dos taludes, restrito apenas aos bancos individuais. Nos materiais mais endurecidos, observa-se com maior frequência a presença de estruturas condicionando a estabilidade dos taludes, mas também restritas ao domínio dos bancos individuais.

Em 1995 foram mapeadas algumas instabilidades, devido à formação de algumas cunhas, todas apresentando mergulhos superiores a 48°, mas potencialmente restritas ao domínio dos taludes dos bancos individuais e não aos taludes globais. Assim, o modelo a ser aplicado nas análises de estabilidade corresponde àquele aplicável a materiais tipicamente friáveis, com disposição espacial de acordo com o mapeamento geológico-geotécnico previamente estabelecido na área da cava.

Os taludes da Mina de Tapira são contíguos desde a Frente 1 até a Frente 6 e a lavra avança até o fosfato semi-compacto e compacto, quando se realiza uma retomada dos taludes, nos níveis superiores. A Figura 5.10 apresenta o mapa do planejamento atual de lavra (2009).

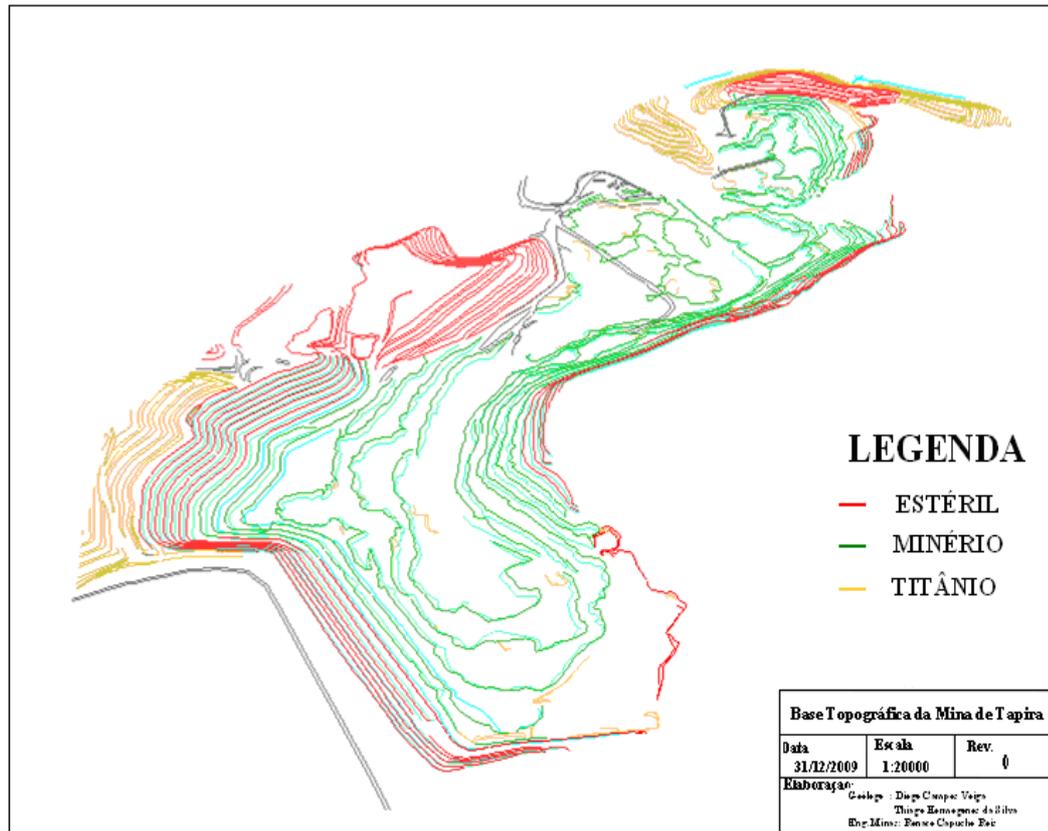


Figura 5.10 – Planejamento atual de lavra na Mina de Tapira (2009)

Atualmente, a mina é conformada em bancos com 10 m de altura nos materiais friáveis e com 13 m nos materiais mais competentes, casos do fosfato semi-compacto e compacto. O planejamento de lavra é realizado de acordo com as recomendações da geometria de escavação indicadas na Tabela 5.4. O planejamento de lavra para os próximos anos contempla avanço nas diversas frentes de lavra. Nesse caso, as alturas não irão se elevar muito, pois as cristas atuais estão praticamente nos altos topográficos. Nesse caso, os materiais apresentam disposição espacial aproximadamente horizontalizada e os taludes futuros apresentarão as mesmas espessuras de materiais que as espessuras presentes nos taludes atuais.

Tabela 5.4 – Geometria de escavação realizada

| Taludes     | Tipo de rocha                    | Altura (m) | Ângulo de corte (°) |
|-------------|----------------------------------|------------|---------------------|
| Individuais | Argilas secas                    | 10         | 59                  |
| Individuais | Titânio seco                     | 10         | 59                  |
| Individuais | Titânio e Fosfato Saturados      | 10         | 45                  |
| Individuais | Fosfato semi-compacto            | 13         | 75                  |
| Médio       | Argila e titânio seco            | 50         | 34                  |
| Médio       | Titânio e fosfato saturado       | 40         | 22                  |
| Médio       | Fosfato semi-compacto e compacto | 70         | 30                  |

As diretrizes de médio e longo prazo do planejamento de lavra prevêem um grande avanço da lavra na região da Frente 2, denominada Bigorna. Esta região entrará em cava em 2011, ao contrário das demais frentes atuais de lavra que permanecerão em flanco. Outro fato relevante que está sendo realizado é o rebaixamento do lençol freático por poços de rebaixamento. A Figura 5.11 apresenta o mapa do planejamento de lavra a longo prazo (2028).

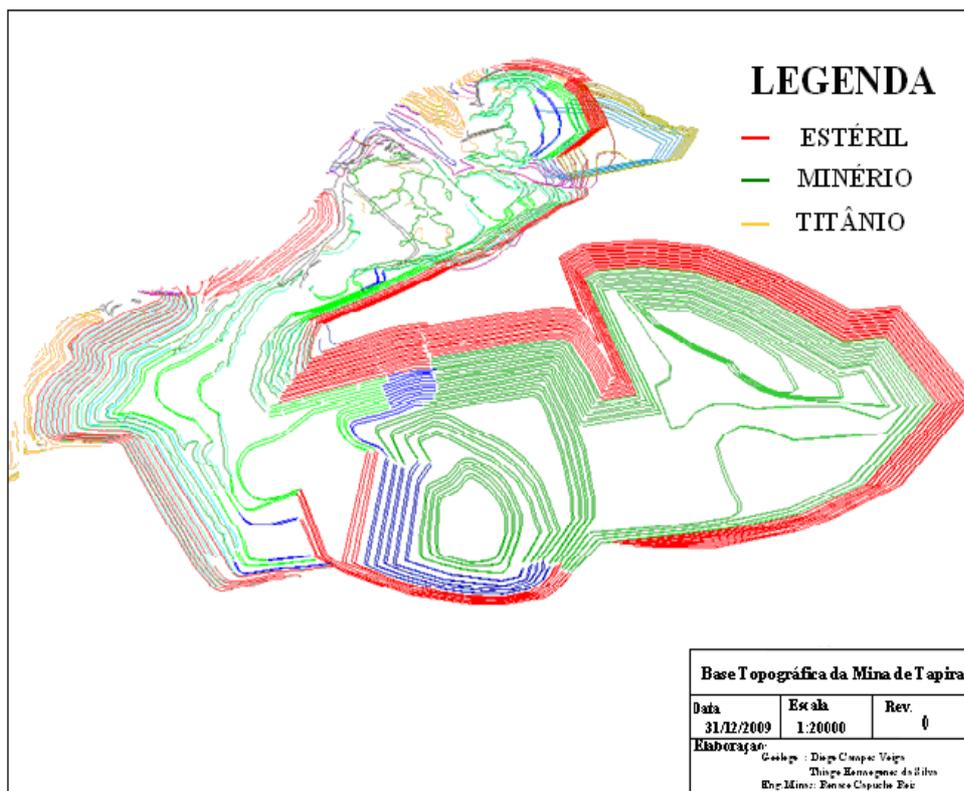


Figura 5.11 – Mapa do planejamento de lavra de longo prazo (2028)

## 5.5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira foram elaboradas aplicando-se o método de Bishop Modificado pelo Programa Slide 5.0 da *Rocscience*. As seções correspondentes às diferentes frentes de lavra são aquelas indicadas na Figura 5.1.

- Seções P1, P2, P3 – Frente 1

A Figura 5.12 apresenta a Seção P1 localizada na Frente 1. Os parâmetros de resistência, relativos aos materiais argila amarela, titânio e fosfato friável, foram interpretados e propostos a partir da consolidação de resultados dos ensaios anteriores, ao passo que os parâmetros relativos ao fosfato semi-compacto foram estimados. Procedimentos similares foram adotados também para as seções P2 e P3. A Tabela 5.5 apresenta os valores médios dos parâmetros consolidados para as seções P1, P2 e P3.

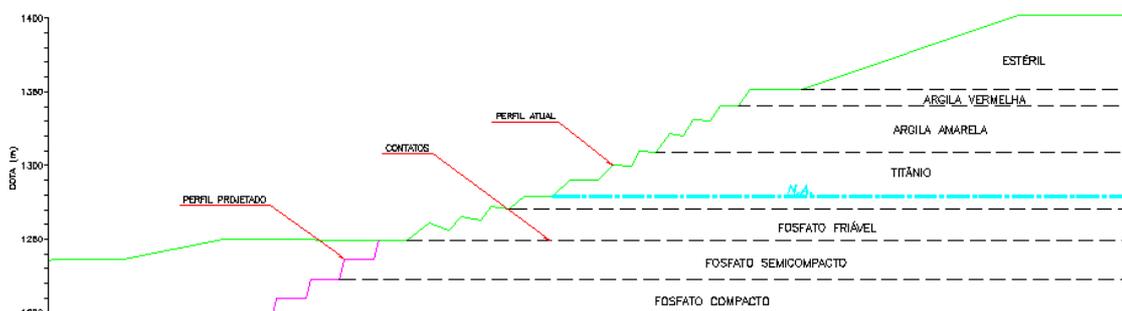


Figura 5.12 – Seção P1 – Frente 1 da lavra da Mina de Tapira

Tabela 5.5 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções P1, P2 e P3

| Material                  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ (°) |
|---------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Estéril                   | 19                            | 10         | 32          |
| Argila vermelha e amarela | 17,6                          | 50         | 29          |
| Titânio seco              | 20                            | 30         | 30          |
| Titânio saturado          | 21,1                          | 20         | 32          |
| Fosfato friável saturado  | 22                            | 15         | 32          |
| Fosfato semi-compacto     | 24                            | 100        | 35          |
| Fosfato compacto          | 24                            | 200        | 35          |

As análises de estabilidade foram realizadas, para os taludes individuais, considerando-se materiais friáveis. Nesse caso, considerou-se como limite inferior para os círculos de ruptura a cota do pé do talude, não sendo permitido o aprofundamento do círculo, sendo este critério utilizado nas demais análises para os taludes individuais. Os resultados das análises de estabilidade nas seções P1, P2 e P3, para os taludes individuais, estão indicados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções P1, P2, P3)

| Material                  | Altura (m) | Talude (V : H) | Talude (°) | FS   |
|---------------------------|------------|----------------|------------|------|
| Argila vermelha e amarela | 10         | 1 : 0,6        | 59         | 2,32 |
| Titânio seco              | 10         | 1 : 0,6        | 59         | 1,57 |
| Titânio saturado          | 10         | 1: 1           | 45         | 0,98 |
| Titânio saturado          | 10         | 1: 1,19        | 40         | 1,10 |
| Fosfato friável saturado  | 10         | 1: 1           | 45         | 0,81 |
| Fosfato friável saturado  | 10         | 1: 1,19        | 40         | 0,93 |
| Fosfato friável saturado  | 10         | 1: 1,43        | 35         | 1,07 |

Nesse contexto, observa-se que os taludes individuais praticados na mina, quando se considera as argilas e titânio seco, são estáveis. Pode-se concluir que estes poderiam ser mais íngremes, quase que verticalizados; entretanto, esta geometria imporia a necessidade de maiores larguras de berma em face aos resultados obtidos na análise do talude global. Desta forma, a alternativa de se adotar ângulos de 59° implica reduzir a necessidade de remoção de materiais. Por outro lado, analisando-se o titânio saturado, o fator de segurança obtido com 45° de inclinação é próximo da unidade, elevando-se para 1,1 para uma inclinação de 40°. Para o fosfato friável, mesmo com 40° de inclinação do talude, o fator de segurança é inferior à unidade. Para se obter um fator de segurança acima da unidade, a inclinação deverá ser da ordem de 35°.

Com base nos dados dos taludes individuais, foram elaboradas as análises de estabilidade para os taludes globais. Nesta região, os taludes já estão acabados nas argilas, titânio e fosfato friável. Foram projetados os taludes no fosfato semi-compacto e compacto, com bermas de 20 m, bancos com 13 m de altura e taludes individuais com 75° de inclinação, até a cota 1196m, conforme diretrizes do planejamento de lavra.

O estéril foi projetado com altura de 50 m, e talude médio de 1V:3H. Nesse caso, foram realizadas análises para o nível de água na condição normal na face do talude, média na cota 1280 m, considerando-se os dados das primeiras leituras dos indicadores de nível de água que foram instalados nesse estudo. Adicionalmente, também foram realizadas análises com o nível de água mais elevado, na cota 1300m, com quase toda a camada de titânio na condição saturada.

A Tabela 5.7 mostra os resultados das análises de estabilidade realizadas para os taludes globais e a Figura 5.13 apresenta a configuração das análises de estabilidade relativas à Seção P1, admitindo-se a condição de NA elevado.

Tabela 5.7 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções P1, P2, P3)

| Seção | NA      | FS - Superfície 2 bancos | FS - Superfície intermediária | FS - Superfície global |
|-------|---------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| P1    | Normal  | 1,34                     | -                             | 1,49                   |
| P1    | Elevado | -                        | 1,30                          | 1,24                   |
| P2    | Normal  | 1,12                     | 1,47                          | 1,52                   |
| P2    | Elevado | 1,09                     | 1,26                          | 1,31                   |
| P3    | Normal  | 1,39                     | -                             | 1,43                   |
| P3    | Elevado | -                        | 1,37                          | 1,37                   |

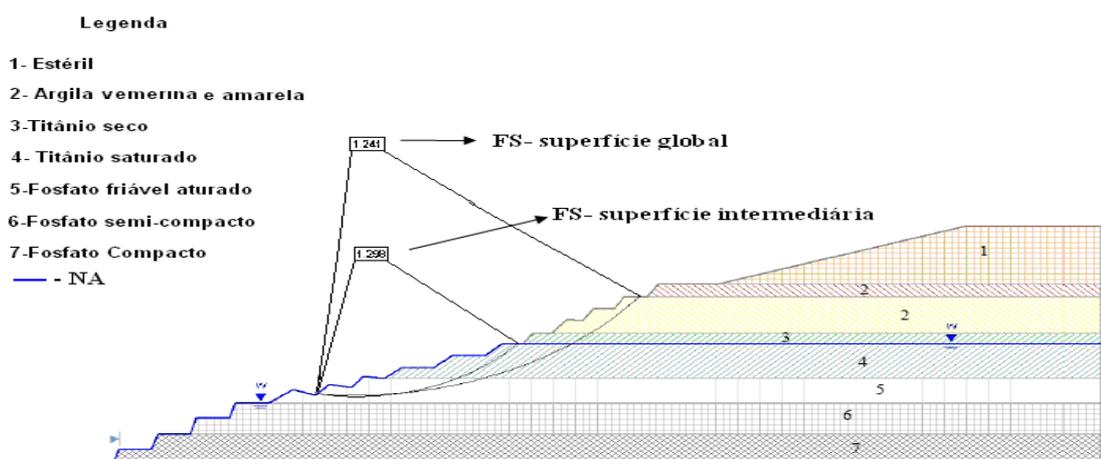


Figura 5.13 – Análise de estabilidade da seção P1 na hipótese de NA elevado

Verifica-se, nesse caso, que o fator de segurança variou entre 1,12 e 1,39 para os círculos de ruptura pequenos, enquanto que, para círculos globais, o fator de segurança variou entre 1,43 e 1,52, na hipótese de NA normal do talude. Quando se considera o nível de água elevado, o fator de segurança reduz-se ligeiramente para círculos menores (passando de 1,12 para 1,09), com reduções mais substanciais para o caso de superfícies de ruptura mais profundas.

- **Seções P4, P5A, P6 – Frente 2**

Na região sudoeste da mina de Tapira, foram analisadas as seções P4, P5A e P6, com base nas mesmas premissas adotadas para as seções anteriores, utilizando-se, entretanto, dados consolidados da nova campanha experimental de investigação geotécnica dos materiais dos taludes (Tabela 5.8). Também nestas análises os parâmetros geotécnicos do fosfato compacto e semi-compacto foram estimados. A Figura 5.14 apresenta o perfil do talude investigado na Seção P6, para a posição definida do NA no talude.

Tabela 5.8 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções P4, P5A e P6

| Material                  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ (°) |
|---------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Argila vermelha e amarela | 17,6                          | 50         | 29          |
| Titânio seco              | 20                            | 40         | 30          |
| Titânio saturado          | 21,1                          | 20         | 33          |
| Fosfato friável saturado  | 22                            | 15         | 32          |
| Fosfato semicompacto      | 24                            | 100        | 35          |
| Fosfato compacto          | 24                            | 200        | 35          |

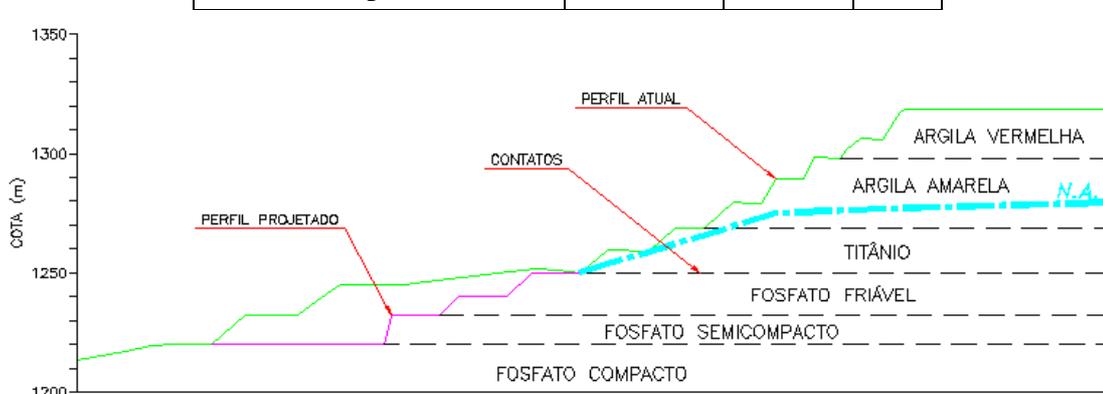


Figura 5.14 – Seção P6 – Frente 2 da lavra da Mina de Tapira

Os parâmetros de coesão do titânio seco e do ângulo de atrito do titânio saturado foram elevados, em função dos novos resultados. Com base nestes parâmetros, foram realizadas as análises de estabilidade para os taludes individuais e materiais friáveis, cujos resultados estão indicados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções P4, P5A, P6)

| Material                  | Altura<br>(m) | Talude<br>(V : H) | Talude<br>(°) | FS   |
|---------------------------|---------------|-------------------|---------------|------|
| Argila vermelha e amarela | 10            | 1 : 0,6           | 59            | 2,32 |
| Titânio seco              | 10            | 1 : 0,6           | 59            | 1,87 |
| Titânio saturado          | 10            | 1: 1              | 45            | 0,99 |
| Titânio saturado          | 10            | 1: 1,19           | 40            | 1,12 |
| Fosfato friável saturado  | 10            | 1: 1              | 45            | 0,81 |
| Fosfato friável saturado  | 10            | 1: 1,19           | 40            | 0,93 |
| Fosfato friável saturado  | 10            | 1: 1,43           | 35            | 1,07 |

Para argilas e titânio como materiais secos, os fatores de segurança obtidos são bastante elevados, mas a opção de escavação dos taludes individuais com 59° para estes materiais deve-se aos resultados das análises de estabilidade do talude global, conforme exposto previamente. Para o titânio saturado, a inclinação do talude do banco individual de 45° resultou em um fator de segurança de 0,99 e de 1,12 para 40°. Estes resultados são ligeiramente maiores que os obtidos nas análises das seções anteriores.

As análises do fosfato friável saturado repetem os mesmos resultados das análises das seções P1 a P3, pois não houve alteração nos parâmetros de resistência. Com 35° de inclinação do talude individual, atinge-se um FS acima da unidade.

Com base nos dados dos taludes individuais, foram, então, elaboradas as análises de estabilidade relativas aos taludes globais. Nesta região os taludes já estão acabados nas argilas, titânio e fosfato friável, exceto na Seção P6, onde o fosfato friável foi projetado. Os taludes no fosfato semi-compacto e compacto foram projetados com bermas de 20 m, bancos com 13 m de altura e taludes individuais com 75° de inclinação, até às cotas do fundo da lavra.

As análises foram realizadas considerando-se o nível de água na condição normal na face do talude, e dados das primeiras leituras dos instrumentos de monitoramentos instalados nessa região. Foram realizadas também análises com o nível de água mais elevado, na cota 1300m (topo da camada de titânio). Os resultados das análises para os taludes globais são apresentados na Tabela 5.11. A Figura 5.15 mostra a análise de estabilidade realizada para a seção P5A, admitindo-se o NA em sua condição normal.

Tabela 5.10 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções P4, P5A, P6)

| Seção | NA      | FS - Superfície 2 bancos | FS - Superfície intermediária | FS - Superfície global |
|-------|---------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| P4    | Normal  | 1,14                     | 1,42                          | 1,56                   |
| P4    | Elevado | 1,13                     | 1,24                          | 1,32                   |
| P5-A  | Normal  | -                        | 1,67                          | 1,71                   |
| P5-A  | Elevado | -                        | 1,33                          | 1,42                   |
| P6    | Normal  | 1,46                     | -                             | 1,37                   |
| P6    | Elevado | -                        | 1,38                          | 1,31                   |

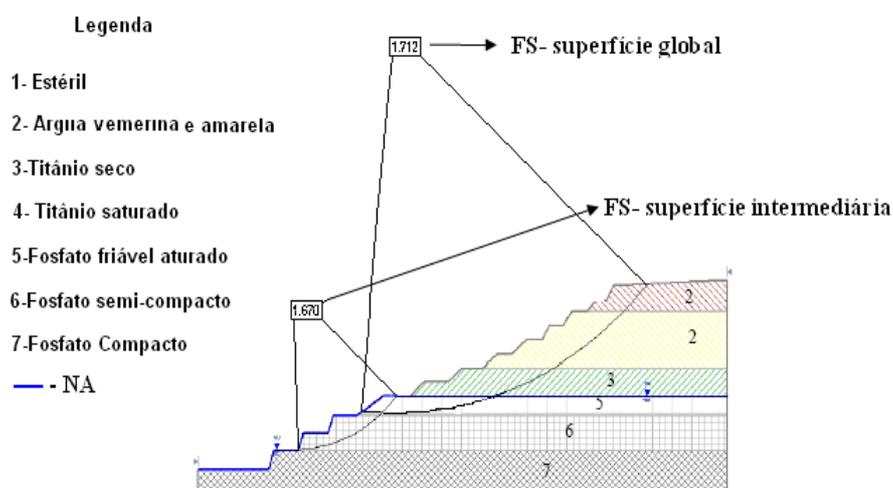


Figura 5.15 – Análise de estabilidade da seção P5A na hipótese de NA normal

Os resultados das análises mostraram um fator de segurança de 1,14 para círculos de ruptura pequenos e, aumentando para círculos mais globais, de 1,37 a 1,71. Com a elevação do NA, ocorre uma pequena redução do fator de segurança de maneira menor para os círculos menores (1,14 para 1,13), mas com reduções expressivas para os círculos globais (atingindo fator de segurança mínimo de 1,31).

- Seções D, E, F – Frentes 2 e 3

Outras análises de estabilidade foram realizadas ao longo das seções D, E e F na região das Frentes 2 e 3. Esta região apresenta alguns problemas de estabilidade dos bancos individuais e este fato foi corroborado pelos resultados dos ensaios de laboratório, que indicaram valores sistematicamente menores que aqueles obtidos para as demais seções. A Figura 5.16 apresenta o perfil geotécnico da Seção D analisada.

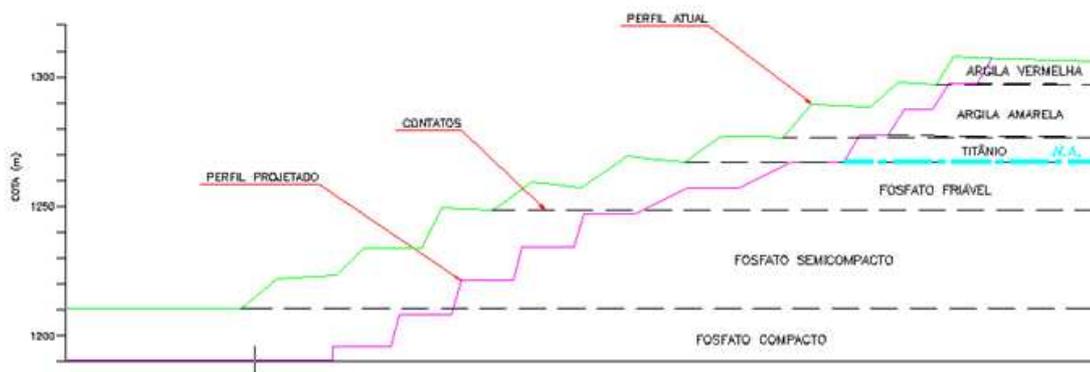


Figura 5.16 – Seção D – Frente 2 da lavra da Mina de Tapira

Analogamente, com base nas séries de ensaios realizados, os parâmetros de resistência das camadas locais de argila amarela, titânio e fosfato friável foram definidos (Tabela 5.11), sendo estimados os parâmetros do fosfato semi-compacto e compacto. Com base nestes parâmetros, foram realizadas as análises de estabilidade correspondentes para os taludes individuais, considerando materiais friáveis, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.11 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções D, E e F

| Material                        | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ (°) |
|---------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Argila vermelha e amarela       | 19                            | 40         | 23          |
| Titânio seco                    | 20                            | 70         | 27          |
| Titânio saturado                | 21,1                          | 20         | 30          |
| Fosfato friável saturado(D)     | 22                            | 10         | 27          |
| Fosfato friável saturado(E e F) | 22                            | 20         | 31,5        |
| Fosfato semi-compacto           | 24                            | 100        | 35          |
| Fosfato compacto                | 24                            | 200        | 35          |

Tabela 5.12 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções D, E, F)

| Material                         | Altura<br>(m) | Talude<br>(V : H) | Talude<br>(°) | FS   |
|----------------------------------|---------------|-------------------|---------------|------|
| Argila vermelha e amarela        | 10            | 1 : 0,6           | 59            | 1,74 |
| Titânio seco                     | 10            | 1 : 0,6           | 59            | 2,62 |
| Titânio saturado                 | 10            | 1: 1              | 45            | 0,95 |
| Titânio saturado                 | 10            | 1: 1,19           | 40            | 1,07 |
| Fosfato friável saturado(D)      | 10            | 1: 1              | 45            | 0,59 |
| Fosfato friável saturado(D)      | 10            | 1: 2              | 26,5          | 1,04 |
| Fosfato friável saturado (E e F) | 10            | 1: 1              | 45            | 0,97 |
| Fosfato friável saturado (E e F) | 10            | 1: 1,19           | 40            | 1,09 |

Novamente, as análises mostram fatores de segurança elevados para as argilas e titânio na condição seca, mesmo com parâmetros de resistência menores. O titânio saturado com 45° de inclinação para o banco individual apresenta um fator de segurança de 0,95, e para se garantir um valor do coeficiente de segurança maior que a unidade, torna-se necessário abrandá-lo para um ângulo de 40°. Para o fosfato friável saturado, a situação é pior na região da seção D, para a qual o fator de segurança foi igual a 0,59 para um ângulo de inclinação de 45° do banco individual, passando a 1,04 para um ângulo de 26°. Nas seções E e F, o fator de segurança para 45° de inclinação foi de 0,97, passando a 1,09 para 40°.

Conforme procedimento adotado nas seções anteriores, com base nos dados dos taludes individuais, foram elaboradas as análises para os taludes globais. Nesta região, os taludes são operacionais para todos os materiais, devendo ser retomados desde o alto topográfico. Nesse caso, inicialmente foram realizadas análises de estabilidade para a situação atual das seções. Em seguida, foram projetados taludes e bermas nas argilas e titânio na condição seca, com bermas com 11 m de largura, bancos com 10 m de altura e inclinação dos bancos de 59°; para o titânio e o fosfato na condição saturada, foram projetados taludes com bermas com 20 m de largura, bancos com 10 m de altura e inclinação dos bancos de 45°; finalmente, para o fosfato semi-compacto e compacto, foram consideradas bermas com 20 m de largura, bancos com 13 m de altura e inclinação dos bancos de 75°.

Em função de alguns resultados obtidos nas análises, foram realizadas outras análises com bermas com 25 m de largura no fosfato friável saturado. Os resultados de todas as análises estão sistematizados na Tabela 5.14. A Figura 5.17 apresenta os resultados da análise de estabilidade realizada para a seção D do talude da mina.

Tabela 5.13 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções D, E, F)

| Seção | Talude    | NA      | Largura de berma no FF (m) | FS - Superfície 2 bancos | FS - Superfície intermediária | FS - Superfície global |
|-------|-----------|---------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| D     | Atual     | Normal  | 20                         | 1,24                     | 1,70                          | 1,79                   |
| D     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,47                          | 1,28                   |
| D     | Projetado | Elevado | 20                         | -                        | -                             | 1,08                   |
| D     | Projetado | Elevado | 25                         | 1,17                     | -                             | 1,17                   |
| D     | Projetado | Elevado | 20                         | 1,27                     | 1,32                          | 1,37                   |
| E     | Atual     | Normal  | 20                         | -                        | 1,15                          | 1,23                   |
| E     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,28                          | 1,11                   |
| E     | Projetado | Elevado | 20                         | 1,14                     | 1,15                          | 1,07                   |
| E     | Projetado | Elevado | 25                         | -                        | 1,17                          | 1,21                   |
| F     | Atual     | Normal  | 20                         | 1,58                     | -                             | 1,66                   |
| F     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,34                          | 1,22                   |
| F     | Projetado | Elevado | 20                         | 1,05                     | 1,08                          | 1,08                   |
| F     | Projetado | Elevado | 25                         | -                        | 1,19                          | 1,21                   |

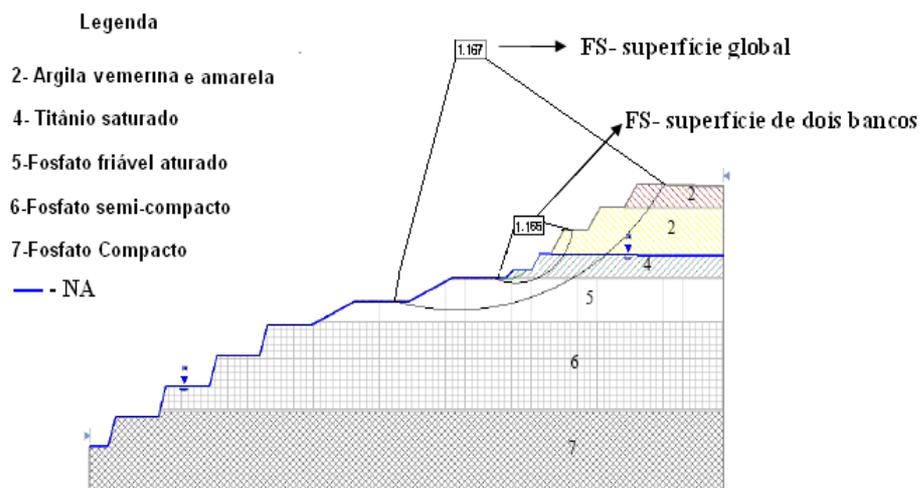


Figura 5.17 – Análise de estabilidade da seção D na hipótese de NA elevado.

As análises permitiram verificar que os fatores de segurança, para as análises dos taludes atuais das três seções, foram sempre superiores à unidade, sendo o menor de 1,15. Para a ruptura de dois bancos, FS mínimo obtido foi de 1,24.

Os fatores de segurança obtidos nas análises para a situação final mostram alguns valores muito baixos. Para a seção D, considerando o nível de água atual, o fator de segurança mínimo para o talude global foi de 1,28. Contudo, considerando a elevação do nível de água, este valor reduz-se para 1,08. Para se manter um fator de segurança um pouco maior, da ordem de 1,17, na situação de nível de água elevado, impõe-se aumentar a largura da berma do fosfato friável saturado para 25 m.

Foi realizada uma análise adicional, mantendo-se a largura da berma do fosfato friável saturado com 20 m, mas aumentando-se a largura da berma nas camadas das argilas também para 20 m, e não mais 11 m, de forma a aliviar o peso das zonas mais elevadas do talude. O fator de segurança obtido para superfície de ruptura de dois bancos foi de 1,27 e de 1,37 para o talude global. Esta condição é melhor que o simples aumento da largura da berma do fosfato para 25 m, mas implica em maior remoção de estéril. Esta mesma condição se aplica ao caso das seções E e F.

As análises de estabilidade para a seção E mostram fatores de segurança baixos para a condição atual de nível de água (1,11 para o talude global). Elevando-se o nível de água, este valor cai para 1,07. Novamente aumentando-se a largura da berma do fosfato friável para 25 m, o fator de segurança mínimo eleva-se para 1,17.

Os resultados da Seção F mostraram fatores de segurança muito parecidos aos obtidos para a Seção E. Para a situação atual de nível de água, o FS mínimo foi de 1,2, ainda aceitável. Com a elevação do nível de água, os fatores de segurança passam a ficar entre 1,05 e 1,08. Com o aumento da largura da berma do fosfato friável saturado para 25 m, estes valores elevam-se para 1,19 e 1,21. Estas análises mostraram que os materiais presentes nesta região apresentam menor resistência e maior susceptibilidade a instabilizações, o que implica alterações no perfil de escavação destas zonas específicas, particularmente se o nível de água tender a se elevar nos períodos chuvosos.

- **Seções C, G, H, I – Frentes 2, 4 e 5**

Análises de estabilidade foram também implementadas nas seções G, H e I, definidas nas Frentes 4 e 5 da cava e, em função da similaridade dos parâmetros adotados, estas abordagens foram agrupadas com a análise realizada na Seção C da Frente 2. Os resultados dos ensaios realizados para as amostras coletadas nessas seções, para a argila amarela, titânio e fosfato friável, estão apresentados na Tabela 5.14. Os parâmetros do fosfato semi-compacto e compacto foram estimados nas análises.

Tabela 5.14 – Parâmetros dos materiais dos taludes das seções C, G, H, I

| Material                  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ (°) |
|---------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Argila vermelha e amarela | 19                            | 50         | 31          |
| Titânio seco              | 20                            | 50         | 30          |
| Titânio saturado          | 21,1                          | 30         | 33          |
| Fosfato friável saturado  | 22                            | 30         | 30          |
| Fosfato semi-compacto     | 24                            | 100        | 35          |
| Fosfato compacto          | 24                            | 200        | 35          |

Com base nestes parâmetros, foram realizadas as análises de estabilidade para os taludes individuais e considerando materiais friáveis, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.15. Os fatores de segurança para os taludes individuais para as argilas e titânio seco são elevados, como obtido nas demais análises. Para o caso das camadas de titânio e fosfato saturados, os valores de FS são 1,31 e 1,25, respectivamente, para um ângulo de inclinação de 45°.

Tabela 5.15 – Resultados das análises para os taludes individuais (Seções C, G, H, I)

| Material                  | Altura (m) | Talude (V : H) | Talude (°) | FS   |
|---------------------------|------------|----------------|------------|------|
| Argila vermelha e amarela | 10         | 1 : 0,6        | 59         | 2,26 |
| Titânio seco              | 10         | 1 : 0,6        | 59         | 2,15 |
| Titânio saturado          | 10         | 1 : 1          | 45         | 1,31 |
| Titânio saturado          | 10         | 1 : 1,19       | 40         | 1,45 |
| Fosfato friável           | 10         | 1 : 1          | 45         | 1,25 |
| Fosfato friável           | 10         | 1 : 1,19       | 40         | 1,39 |

Foram realizadas análises de estabilidade para a situação atual de cada seção e, em seguida, foram projetados taludes e bermas para os taludes. Nas argilas e para a camada de titânio na condição seca, taludes com bermas com 11 m de largura, bancos com 10 m de altura e 59° de inclinação dos bancos; para o titânio e fosfato saturados, bermas com 20 m de largura, bancos com 10 m de altura e inclinação dos bancos com 45°; para o fosfato semi-compacto e compacto, bermas com 20 m de largura, bancos com 13 m de altura e inclinação dos bancos de 75°.

Em geral, as análises foram realizadas para a condição de NA normal e, em casos específicos, para NA elevado (topo da camada de titânio). Em função dos resultados obtidos nas análises das seções G e H, foram processadas reanálises com bermas com 25 e 22 m de largura, respectivamente, no fosfato friável saturado (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 – Resultados das análises para os taludes globais (Seções C, G, H, I)

| Seção | Talude    | NA      | Largura de berma no FF (m) | FS - Superfície 2 bancos | FS - Superfície intermediária | FS - Superfície global |
|-------|-----------|---------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| C     | Atual     | Normal  | 20                         | -                        | 1,32                          | 1,35                   |
| C     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,48                          | 1,41                   |
| G     | Atual     | Normal  | 20                         | -                        | 1,23                          | 1,18                   |
| G     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,22                          | 1,18                   |
| G     | Projetado | Elevado | 20                         | -                        | 1,23                          | 1,13                   |
| G     | Projetado | Elevado | 25                         | -                        | 1,37                          | 1,27                   |
| H     | Atual     | Normal  | 20                         | 1,20                     | 1,32                          | 1,31                   |
| H     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,38                          | 1,24                   |
| H     | Projetado | Elevado | 20                         | -                        | 1,21                          | 1,13                   |
| H     | Projetado | Elevado | 22                         | -                        | 1,21                          | 1,18                   |
| I     | Atual     | Normal  | 20                         | -                        | 1,51                          | 1,51                   |
| I     | Projetado | Normal  | 20                         | -                        | 1,41                          | 1,33                   |

Os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para os taludes atuais destas seções foram sempre superiores a 1 (menor valor de 1,18 para a seção G), considerando a estabilidade do talude global. Para a seção C, o menor fator de segurança foi 1,32 para superfície intermediária; para a seção H, FS mínimo foi 1,20 para superfície passando por dois bancos e, para a seção I, o fator de segurança mínimo foi 1,51.

Os fatores obtidos nas análises de estabilidade para a situação final mostraram bons resultados, com valores mais baixos para as seções G e H. Para a seção C, considerando o nível de água atual, o fator de segurança mínimo para o talude global é de 1,41. Nesta seção, o nível de água já se encontra no topo do titânio. O mesmo ocorre para a seção I, com fator de segurança mínimo de 1,33 para o talude global, com nível de água no topo do titânio.

Para a seção G, o fator de segurança mínimo obtido para o nível de água na situação atual é de 1,18, para o talude global. Com a elevação do nível de água, o fator de segurança reduziu para 1,13. Para manter um fator um pouco maior que 1,27, na situação de nível de água elevado, torna-se necessário aumentar a largura da berma do fosfato friável saturado para 25 m.

As análises de estabilidade para a seção H mostram fatores de segurança mínimos para a condição atual de nível de água de 1,24. Elevando-se o nível de água, o fator reduz-se para 1,13. Aumentando-se a largura da berma do fosfato friável para 22 m, o fator mínimo do talude global eleva-se para 1,18. Estas análises mostram que os materiais presentes nesta região apresentam fatores ainda aceitáveis para a condição atual do nível de água, mas baixos considerando uma elevação do NA nos taludes. A Figura 5.18 ilustra os resultados da análise de estabilidade para a Seção G, para NA elevado.

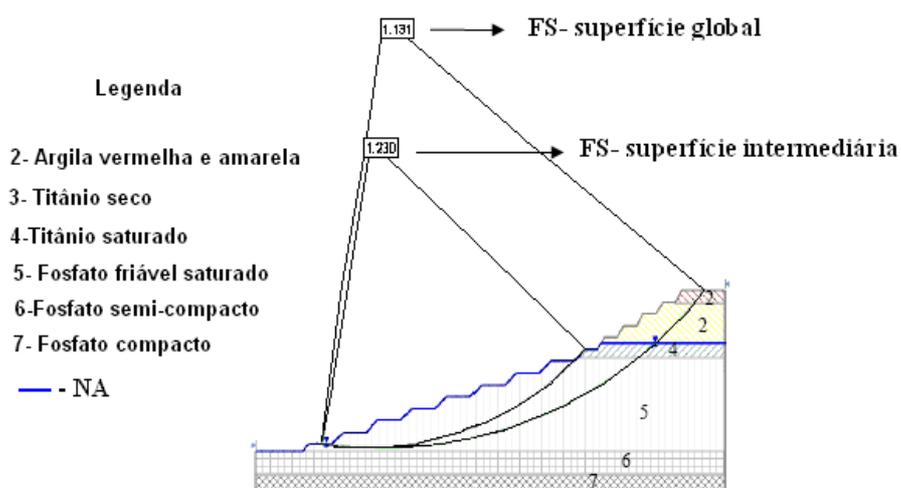


Figura 5.18 – Análise de estabilidade da seção G na hipótese de NA elevado.

- **Seção na Região da Bigorna**

Finalmente, foram analisadas as condições de estabilidade dos taludes situados na região da chamada Bigorna. Para esta região, foi elaborada uma seção mais crítica, com 235 m de altura, topo na cota 1340 m e base na cota 1105 m (Figura 5.19). Foram considerados nesta análise os mesmos parâmetros adotados para as análises da estabilidade dos taludes da Seção C da cava.

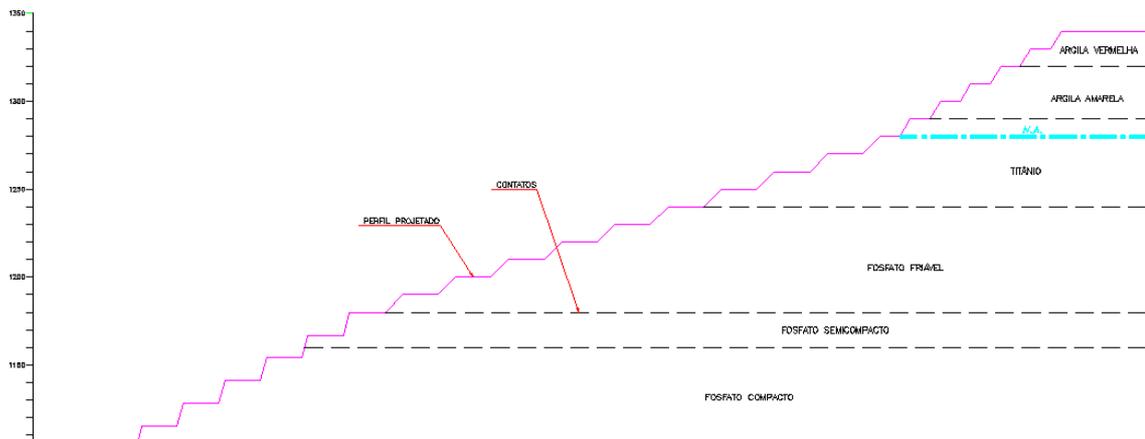


Figura 5.19 – Seção de referência da Região da Bigorna

Os dados mostram um maior avanço da lavra em fosfatos semi-compactos e compactos no fundo da cava, o que tende a favorecer as condições de estabilidade. O talude inicial projetado para a região da Bigorna foi o mesmo das demais seções, ou seja, argilas e titânio secos: bancos com 10 m de altura, bermas com 11 m de largura e inclinação dos bancos individuais com 59°; titânio e fosfato friável saturados: bancos com 10 m de altura, bermas com 20 m de largura e inclinação dos bancos individuais com 45° e fosfato semi-compacto e compacto: bancos com 13 m de altura, bermas com 20 m de largura e inclinação dos bancos individuais com 75°.

O nível de água foi considerado inicialmente na cota 1240 m, parcialmente rebaixado, (na região da seção B encontra-se na cota 1250m e, na seção C, na cota 1260m). Também foi realizada uma segunda análise, com o nível de água na cota 1280m, a 10 m do topo do titânio. Os resultados das análises de estabilidade realizadas estão indicados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Resultados das análises para os taludes globais da região da Bigorna

| Seção   | Talude    | NA        | Largura de berma no FF (m) | FS - Superfície 2 bancos | FS - Superfície intermediária | FS - Superfície global |
|---------|-----------|-----------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Bigorna | Projetado | Rebaixado | 20                         | -                        | 1,16                          | 1,34                   |
| Bigorna | Projetado | Elevado   | 20                         | -                        | 1,15                          | 1,11                   |
| Bigorna | Projetado | Elevado   | 25                         | -                        | 1,22                          | 1,18                   |

Os resultados obtidos com o nível de água na cota 1240m mostraram um fator de segurança mínimo igual a 1,16 para uma superfície intermediária e de 1,34 para uma superfície global. Considerando-se a elevação o nível de água para a cota 1280m, os fatores de segurança foram reduzidos para 1,15 e 1,11, respectivamente. Para esta condição mais crítica, de nível de água mais elevado, aumentando-se a largura das bermas do fosfato friável para 25 m, os fatores de segurança passaram a ser de 1,22 e 1,18, respectivamente. Esta situação apresenta uma superfície crítica praticamente similar à da primeira análise. Outros resultados de análises de estabilidades estão no anexo II.

A Figura 5.20 mostra os resultados de uma das análises de estabilidade realizada na região da Bigorna.

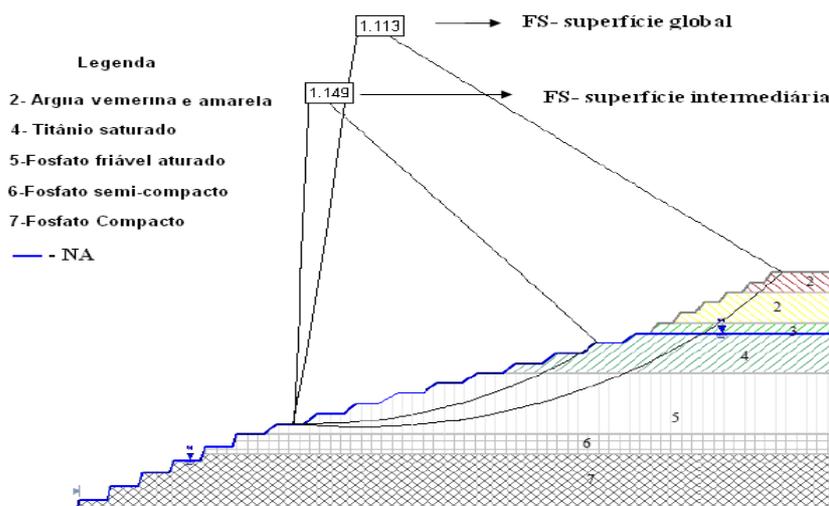


Figura 5.20 – Análise de estabilidade na região da Bigorna na hipótese de NA elevado

## 5.6 PROGRAMA DE MONITORAMENTO DOS TALUDES

Adicionalmente ao processo das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, foi implementado um programa de monitoramento e acompanhamento dos taludes da Mina de Tapira, mediante a instalação de indicadores de nível de água (INA's) e marcos superficiais (MS).

Foram instalados 6 INA's na região das Frentes 1 e 2 nas quais os taludes atuais já são definitivos, em pares em seções selecionadas (Seções P1 / P3 / P6), um em cota mais elevada e outro em cota mais baixa, para permitir a determinação do posicionamento do nível de água na região dos taludes (Figura 5.21).

Outros 4 indicadores de níveis de água foram instalados no terreno natural, no alto, atrás dos limites da escavação e em locais que não serão lavrados no curto prazo. Estes indicadores foram instalados isoladamente em quatro seções distintas (E , F, H e I), nas Frentes 3, 5 e 6. A Figura 5.22 mostra o modelo de planilha adotado para monitoramento dos registros dos INA's instalados na mina.



Figura 5.21 – Indicador de nível de água instalado nos taludes da Mina de Tapira

Foram instalados ainda 12 marcos superficiais nos taludes definitivos, sendo selecionados 5 seções para monitoramento com 3 marcos por seção (Figura 5.23), para controle e monitoramento das movimentações dos taludes da mina.

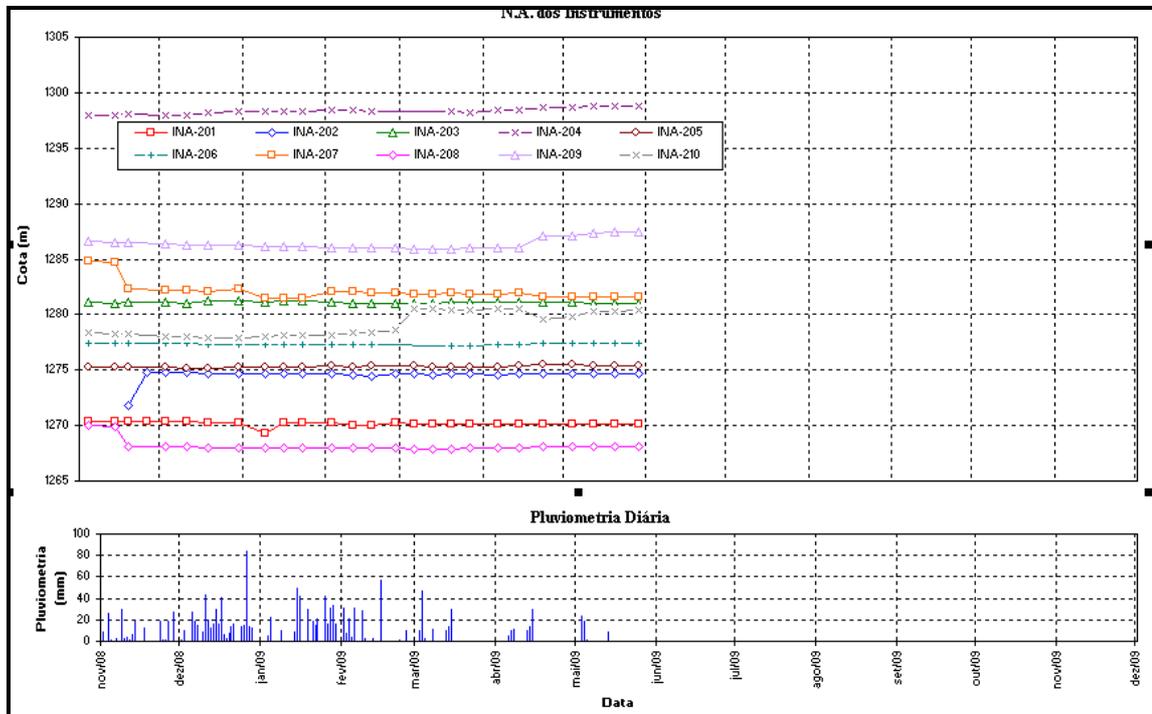


Figura 5.22 – Registros típicos do processo de monitoramento dos INA's



Figura 5.23 – Marco Superficial instalado nos taludes da Mina de Tapira.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 – CONCLUSÕES

No contexto dos empreendimentos de mineração, a engenharia geotécnica assume cada vez maior relevância nas operações de planejamento, projeto e exploração de lavra, principalmente no que se refere aos estudos de estabilidade de taludes em minas a céu aberto. Nestes estudos, a cava é subdividida em vários setores e são definidas seções de referência para as análises, de modo a se estabelecer um programa de exploração do minério condicionado pela segurança das escavações em todas as frentes de lavra da mina.

Tais estudos não podem prescindir de um levantamento geral dos condicionantes geológico-geotécnicos da área, bem como de um amplo programa de investigação de todas as litologias presentes. No caso da Mina de Tapira, esta campanha experimental foi implementada visando objetivamente viabilizar o estudo da estabilidade dos taludes atuais e projetados da mina (Capítulo 5), para as suas diferentes frentes de lavra, tendo os resultados sido correlacionados e consolidados com resultados de investigações anteriores (Capítulo 4).

Neste contexto, a obtenção de parâmetros geotécnicos representativos e específicos para as diferentes seções e frentes de lavra garantem a otimização da geometria final dos taludes da cava. O produto final deste trabalho resulta em um mapa de ângulos que, em síntese, consiste na compatibilização operacional, conciliando os aspectos de segurança, economia e viabilidade ambiental, entre as escavações das frentes de lavra e as geometrias finais propostas para os taludes.

Como resultado dos estudos realizados, foram propostas as geometrias finais (alturas dos bancos e larguras das bermas correspondentes) para os taludes da Mina de Tapira, sistematizados nas Tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, para todas as frentes de lavra, em termos das inclinações dos taludes dos bancos individuais e expressas para cada tipologia presente na área da cava.

Tabela 6.1 – Geometria recomendada para as seções P1 a P6

| Geometria                        |                     |                      |   |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Tipologia                        | Altura do banco (m) | Largura de berma (m) | Inclinação dos taludes dos bancos individuais |
| Argilas                          | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio Seco                     | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio e Fosfato saturados      | 10                  | 20                   | 40°   |
| Fosfato semi-compacto e compacto | 13                  | 20                   | 75°   |

Tabela 6.2 – Geometria recomendada para as seções D, E, F

| Geometria                        |                     |                      |   |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Tipologia                        | Altura do banco (m) | Largura de berma (m) | Inclinação dos taludes dos bancos individuais |
| Argilas                          | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio Seco                     | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio saturado                 | 10                  | 20                   | 40°   |
| Fosfato Saturados                | 10                  | 25                   | 40°   |
| Fosfato semi-compacto e compacto | 13                  | 20                   | 75°   |

Tabela 6.3 – Geometria recomendada para as seções C, G, H, I

| Geometria                        |                     |                      |   |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Tipologia                        | Altura do banco (m) | Largura de berma (m) | Inclinação dos taludes dos bancos individuais |
| Argilas                          | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio Seco                     | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio saturado                 | 10                  | 20                   | 45°   |
| Fosfatos saturados               | 10                  | 20                   | 45°   |
| Fosfato semi-compacto e compacto | 13                  | 20                   | 75°   |

Tabela 6.4 – Geometria recomendada para a região da Bigorna

| Geometria                        |                     |                      |   |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Tipologia                        | Altura do banco (m) | Largura de berma (m) | Inclinação dos taludes dos bancos individuais |
| Argilas                          | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio Seco                     | 10                  | 11                   | 59°   |
| Titânio saturado                 | 10                  | 20                   | 45°   |
| Fosfato Saturados                | 10                  | 20                   | 45°   |
| Fosfato semi-compacto e compacto | 13                  | 20                   | 75°   |

É importante ressaltar que, para as seções D, E e F, a geometria final dos taludes deverá ser modificada para a condição de saturação do fosfato, adotando-se bancos com 10 m de altura, bermas de 25 m de largura e inclinação dos taludes de 40°. Na Seção D, estes ângulos deverão ser de 26° e estas recomendações deverão ser objeto de avaliações contínuas, com o avanço das escavações nesta área.

Ainda nesse contexto, o comportamento do nível de água, deverá ser acompanhado com especial cuidado ao longo dos períodos chuvosos em caso de uma pequena ascensão do mesmo, os taludes poderão ser com bermas com 20 m de largura na zona de presença do fosfato. No caso de uma elevação considerável do NA nos taludes, impõe-se a redução do ângulo médio ao longo das camadas de argilas, de forma a manter a largura mínima das bermas do fosfato em 20 m.

Os resultados obtidos foram consistentes tanto com os dados das investigações prévias como com as observações de campo. Problemas de instabilização dos taludes no domínio de bancos individuais foram registrados na região das Frentes 2 e 3. Os resultados dos ensaios de laboratório e das análises de estabilidade demonstraram que as litologias presentes nestas áreas apresentaram valores dos parâmetros de resistência sistematicamente menores que aqueles obtidos para as demais seções. Por outro lado, o programa de monitoramento dos taludes tem fornecido informações relevantes, através de leituras dos indicadores de nível de água e marcos superficiais, para o controle das

escavações e tendem a nortear a aplicação ou eventuais reanálises dos taludes da Mina de Tapira.

## **6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A realização deste trabalho, baseado em uma abordagem integrada e setorizada da estabilidade dos taludes da Mina de Tapira, possibilitou a implantação de uma metodologia efetiva de controle de lavra, com grande repercussão na dinâmica das operações das frentes de serviço. Este modelo inclui a continuidade destes estudos, em função dos dados de monitoramento e/ou de observações de campo, compreendendo inclusive novas campanhas de investigação geotécnica das litologias locais. A continuidade de trabalhos propiciará a obtenção de um banco de dados cada vez mais abrangente e um conhecimento cada vez maior do comportamento geotécnico dos taludes da mina, subsidiando, portanto, as análises futuras.

Finalmente, com a obtenção de um banco de dados cada vez maior, torna-se possível implementar abordagens estatísticas às análises de estabilidade dos taludes estudados, considerando faixas de variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos materiais e diferentes condições hidrogeológicas do maciço.

Por outro lado, a adequação e os bons resultados da metodologia proposta propiciaram a extrapolação da mesma para outras unidades da empresa, tais como as unidades de Patos de Minas em Minas Gerais e o Complexo Mínero - Químico de Catalão, situado no estado de Goiás.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1986). Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostra deformada e indeformada. NBR 9604. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 9p.

ABNT (1996). Solo- Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. NBR 6457. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 9p.

ABNT (1984). Solo- Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3p.

ABNT (1984). Solo- Análise Granulométrica. NBR 7181. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 13p.

ABNT (1984). Determinação do Limite de Liquedez. NBR 6459. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6p.

Abrão, P. C., Oliveira, S. L.(1998). Mineração. Geologia de Engenharia. 4ªReimpressão. São Paulo: ABGE. p. 431-438.

Almeida. F.F.M., Hasul, Y. (1977). Províncias Estruturais Brasileiras. Simpósio de Geologia do Nordeste, SGNE, Campina Grande, PB, Vol 8, p 363-391.

Álvares, R.A. (2003). Análises Probabilísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco / CVRD. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 130p.

Augusto Filho, O., Virgilli, J.C. (1998). Estabilidade de taludes In: Oliveira, A.M.S.; Brito,S.N.A. Geologia de Engenharia: ABGE. São Paulo, Cap.15, p. 15-38.

Bishop, A.W.(1955). The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. Geotechnique, Vol. 5, p. 7-17.

Brod, J.A. (1999). Petrology and geochemistry of the Tapira Alkaline Complex, Minas Gerais State, Brazil. PhD Thesis, University of Durham, Inglaterra. 486p.

Castro, W.J. (2004). Síntese de estudos de estabilidade de taludes de minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero / MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 202p.

Cruz, P.T (1973). Estabilidade de Taludes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, 103p.

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. 2<sup>nd</sup> Congress of large Dams, pg 463.

Ferrari, V.C. (2000). Fosfatos Primários e Secundários nos Perfis de Intemperismo sobre os Maciços Alcalino-Carbonatíticos de Juquiá (SP), Anitápolis (SC) e Tapira (MG). Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 218p.

Fiori, A.P.; Carmignani, L. (2001). Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, Aplicações na Estabilidade de Taludes. Editora UFPr, 548p.

Fonseca, A. R. (2003). Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 158p.

Fosfertil. (2009). Relatório de Produção. Tapira, Fertilizantes Fosfatados S/A- Fosfertil, Gerência de Suprimentos, 12p.

Fredlund, G, and Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 14, pp. 429-439.

Gomes, R.C. (2003). Estabilidade de Taludes em Solos. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 122p.

Hoek, E., Bray, J. W. (1981). Rock Slope Engineering. 3 ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 358p.

Huallanca, R.E.Z. (2004). Mecanismos de Ruptura em Taludes Altos de Mineração a céu aberto. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 115p.

Hutchinson, J. N. (1988). Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology. 5th International Symposium on Landslides. A. Balkema, Lausanne: 3-35.

Innocentini, M.D.M. (2003). Modelação Geomecânica e Hidrogeológica e Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo Soco/CVRD. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 168p.

Jambu, N. (1973). Slope stability computations. Embankment-Dam Engineering Casagrande volume, R.C Hirschfeld & S.J.Poulos, John Wiley, New York, USA, pp.47-86.

Morgenstern, N.R. & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, Vol 14, pp. 79-93.

Santos, R.L.C., Sobral, L.G.S., Araújo, R.V.V. e Equipe Técnica da Fosfertil/CMT (2002). Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira / Fosfertil, XIX ENTMMME, Recife, Pernambuco, 8p.

Sarna, S.K (1973). Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, Vol 23. p 423-433.

Seer, H.J. (1999). Evolução Tectônica dos Grupos Araxá, Ibiá e Canastra na sinforma de Araxá, Minas Gerais. Brasília. Tese de Doutorado. Instituto de Geociência da Universidade de Brasília, IG-UNB. Brasília, 267 p.

Silva, M.E. (2006). Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 123 p.

Soares, P.E. (1996). Análise de Estabilidade de um Talude de Mina de Águas Claras-MBR; Uma Visão Probabilística. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 64 p.

Spencer, E. (1967). A method of Analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, Vol 17, pp 11 a 26.

Teixeira, JR. E Virgili, J. C. (1984). Métodos Probabilísticos e Métodos Determinísticos em Análise de Estabilidade de Taludes Rochosos – 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) , Volume 1, p. 185 - 195.

Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Landslides Analysis and Control*, WASHINGTON , D. C., National Academy of Sciences, pp.11-33.

Whight, S.G (1969). A study of slope stability and the undrained shear strength of clay shales. Thesis presented to the Univesity of California, at Berkley Calif, in partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

## Anexo I – Resultados de ensaios triaxiais

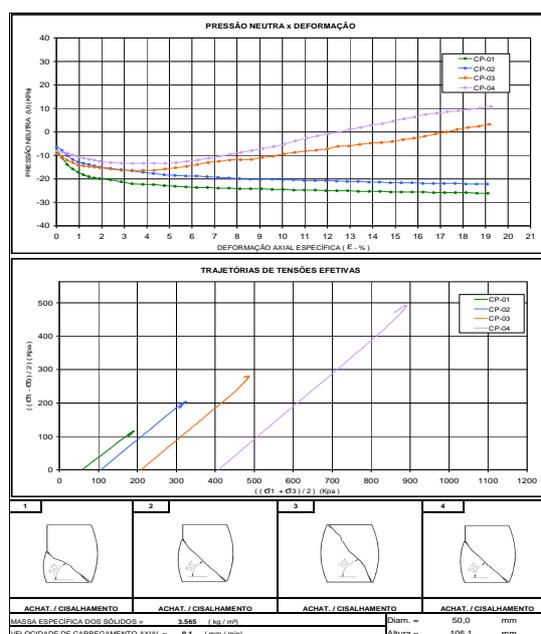


Figura I.1 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-103 (1)

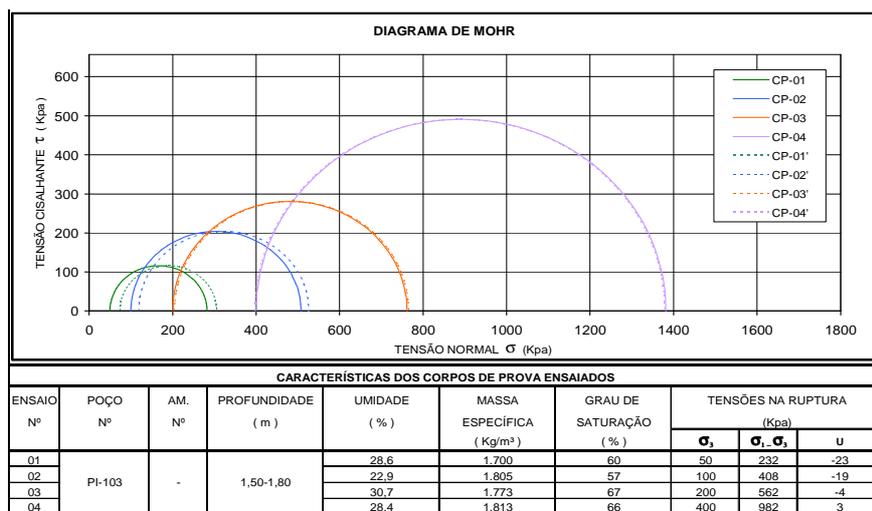


Figura I.2 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-103 (2)

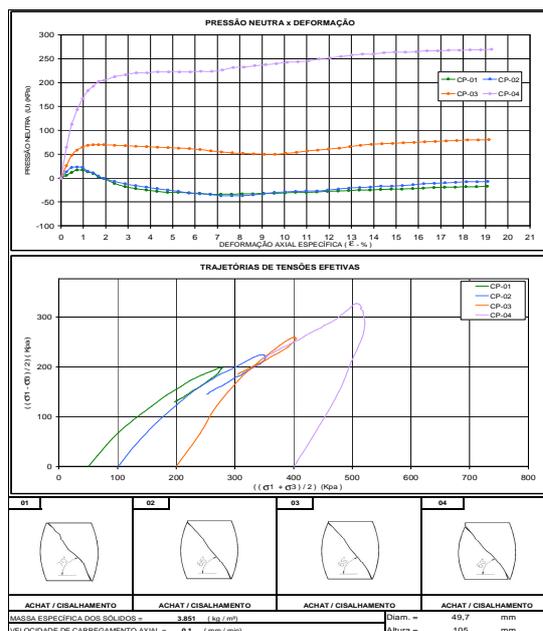


Figura I.3– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-104 (1)

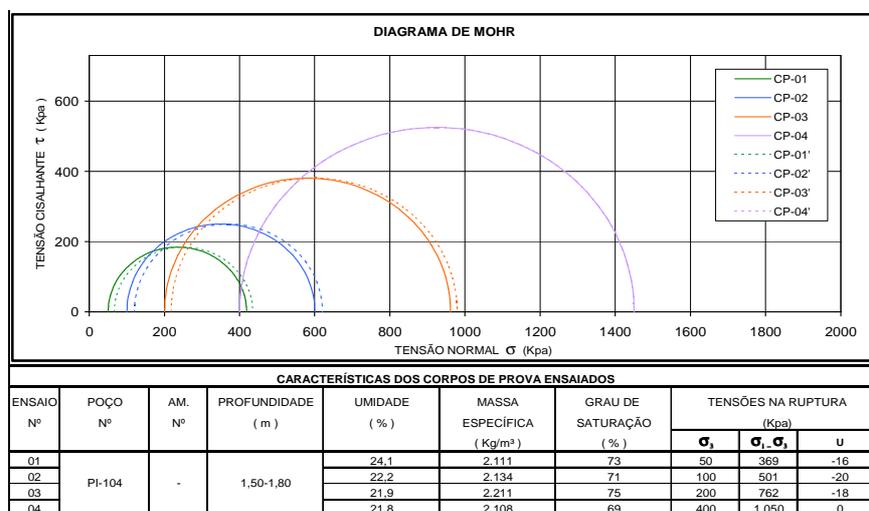


Figura I.4 – Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-104 (2)

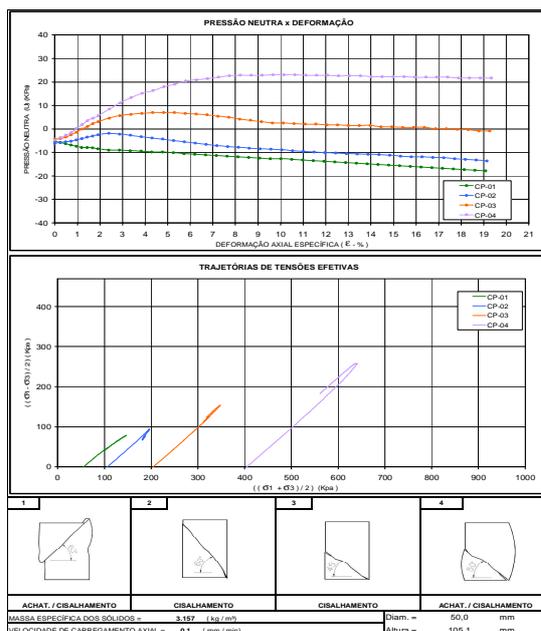


Figura I.5– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-105 (1)

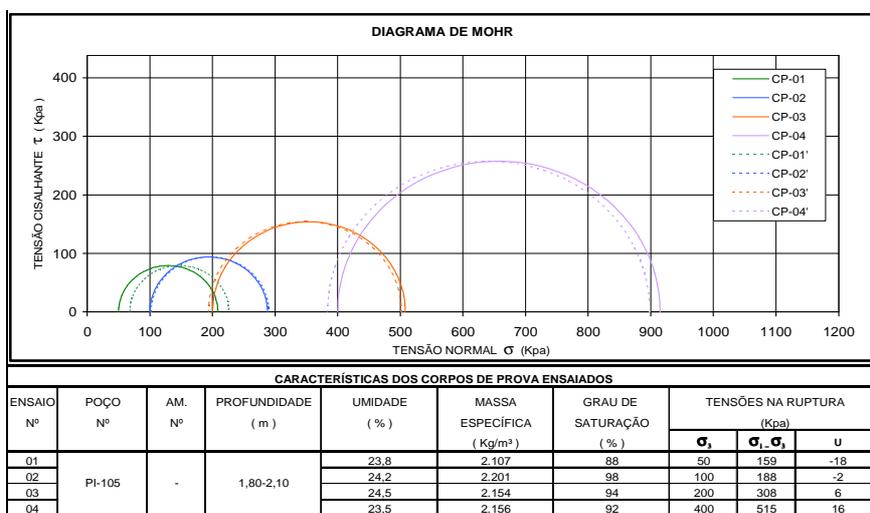


Figura I.6– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-105 (2)

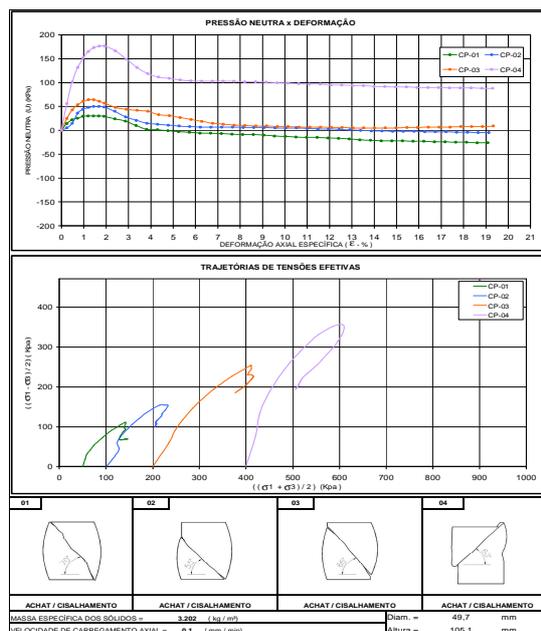


Figura I.7– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-106 (1)

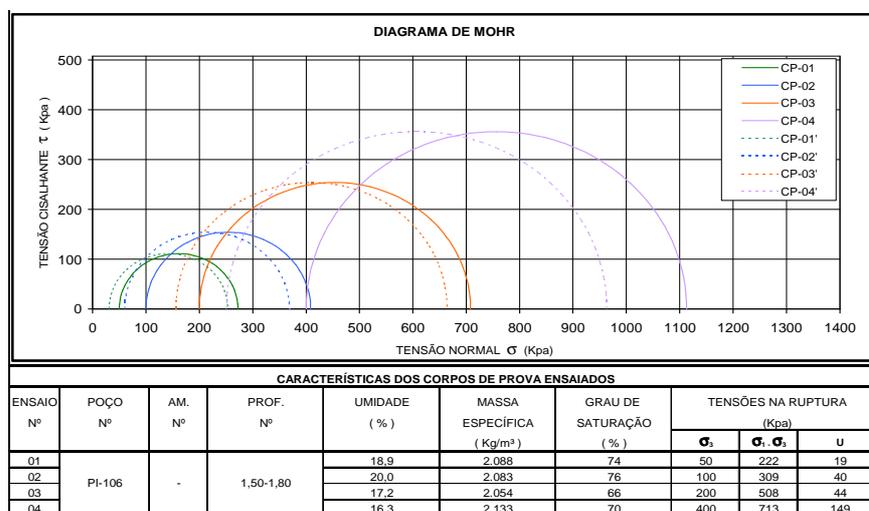


Figura I.8– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-106 (2)

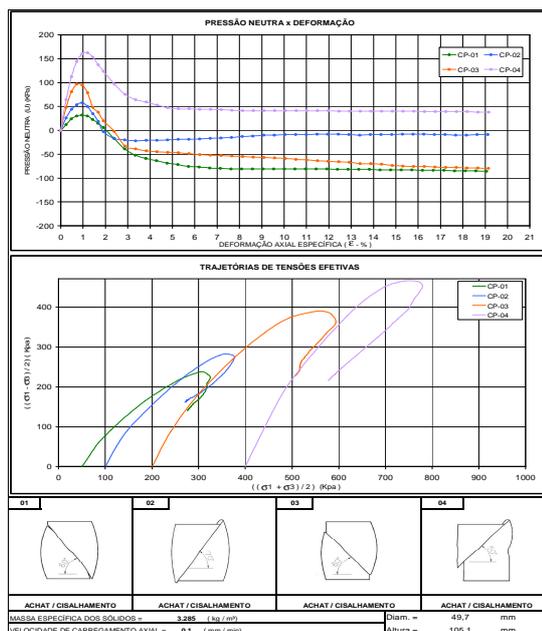


Figura I.9– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-108 (1)

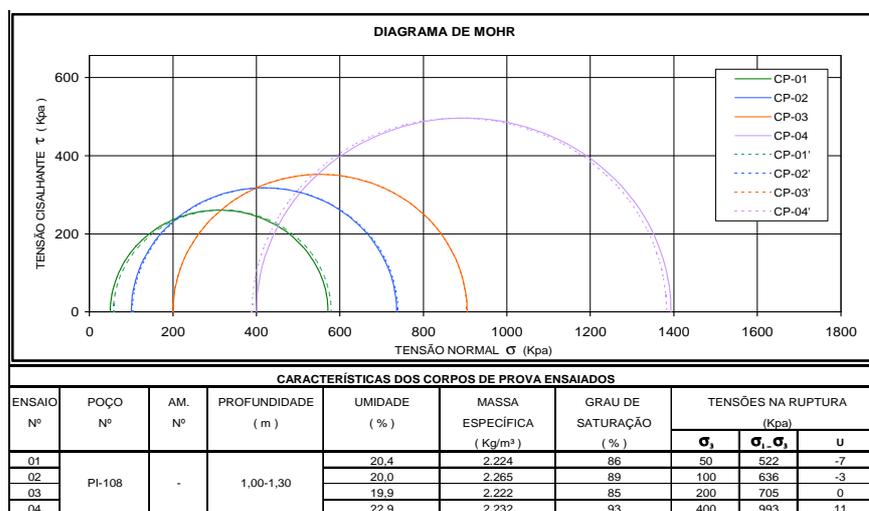


Figura I.10– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-108 (2)

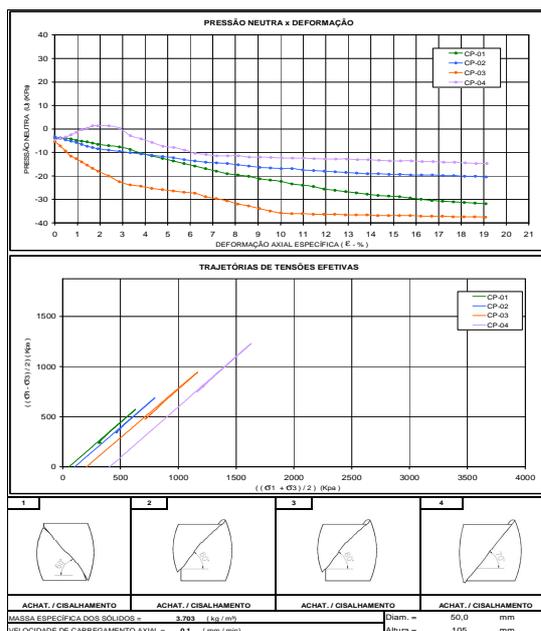


Figura I.11– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-109 (1)

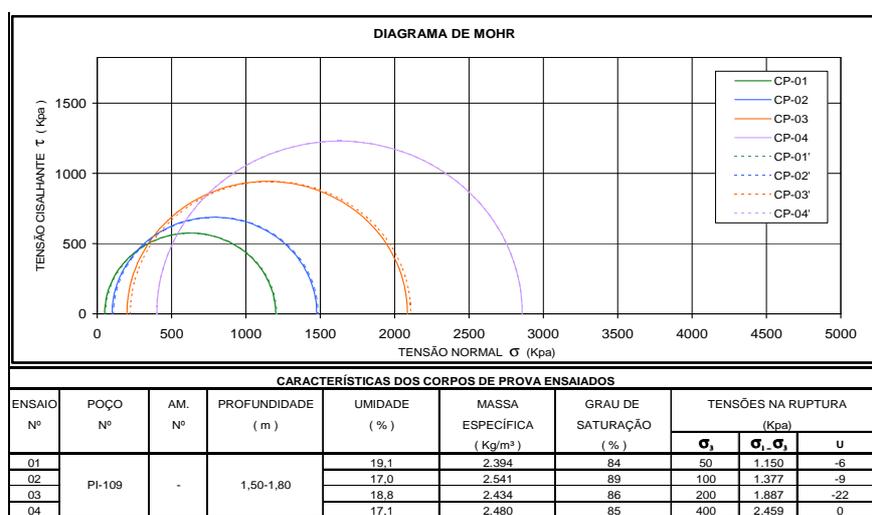


Figura I.12– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-109 (2)

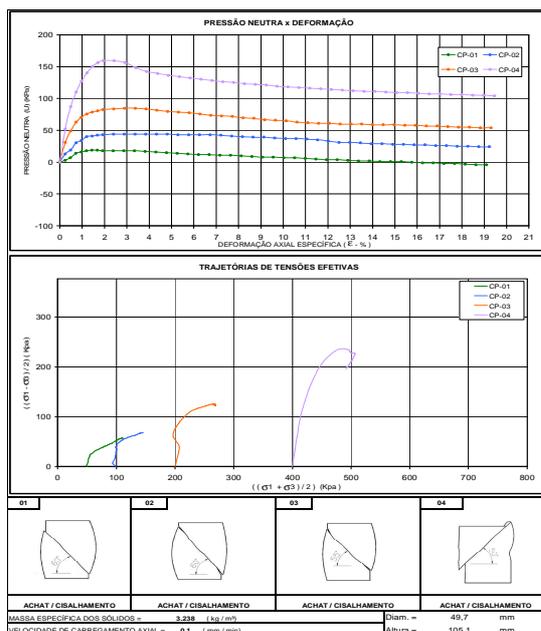


Figura I.13– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-111 (1)

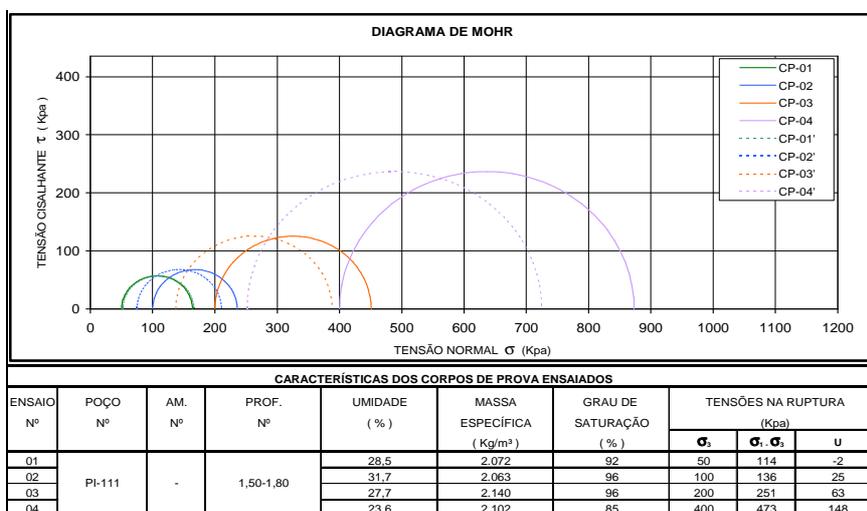


Figura I.14– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-111 (2)

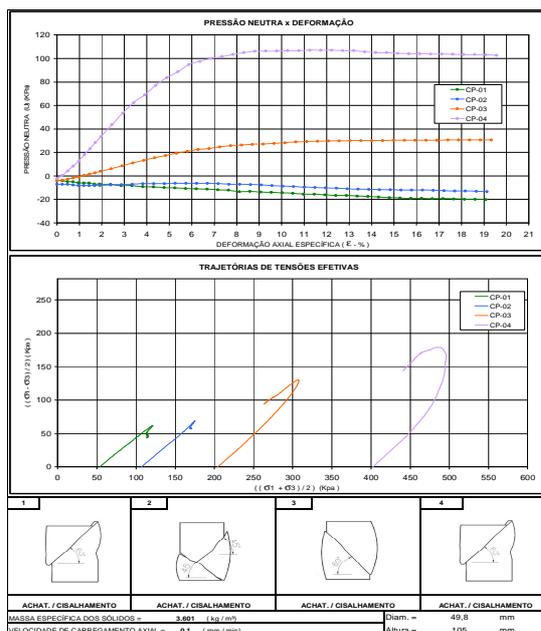


Figura I.15– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-113 (1)

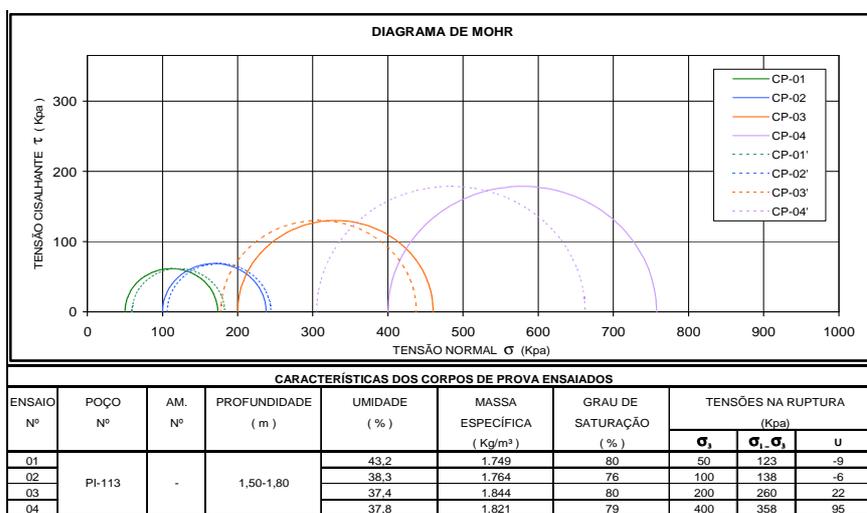


Figura I.16– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-113 (2)

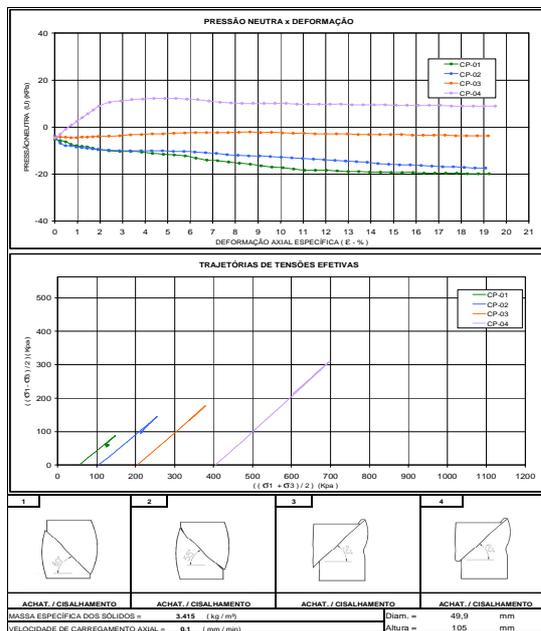


Figura I.17– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-114 (1)

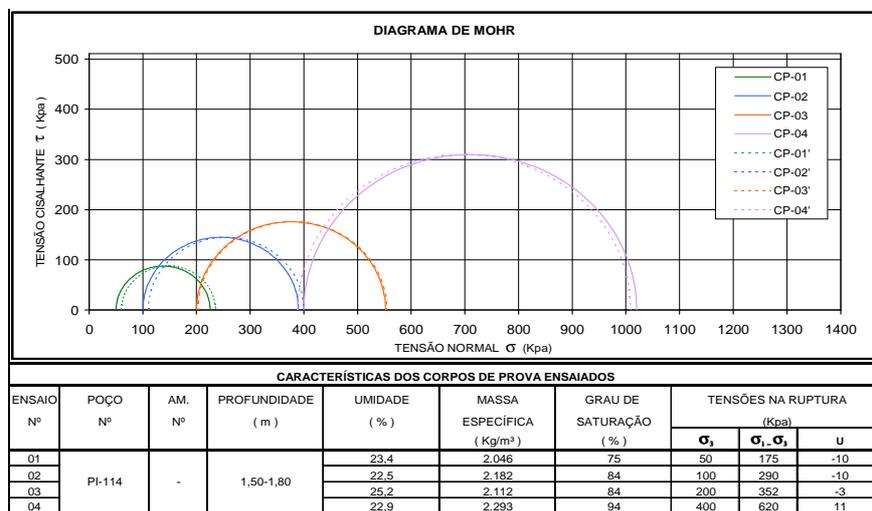


Figura I.18– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-114 (2)

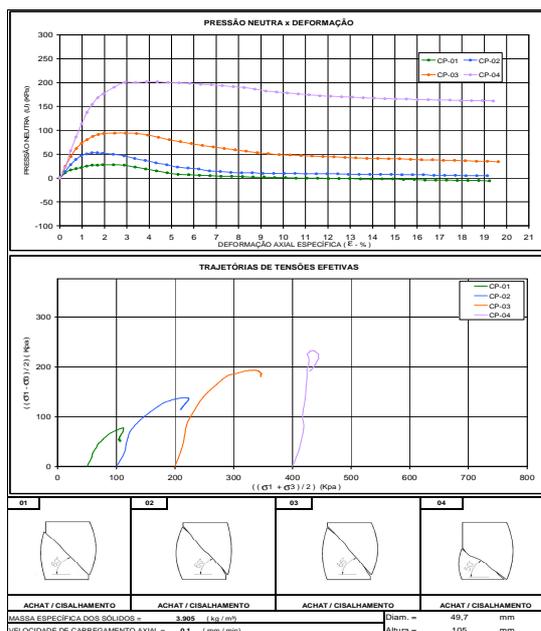


Figura I.19– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-115 (1)

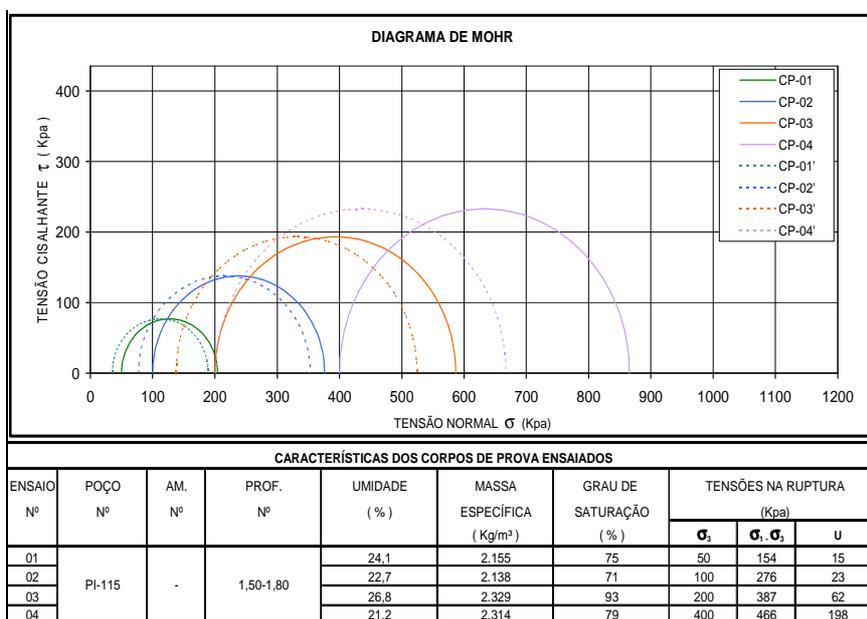


Figura I.20– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-115 (2)

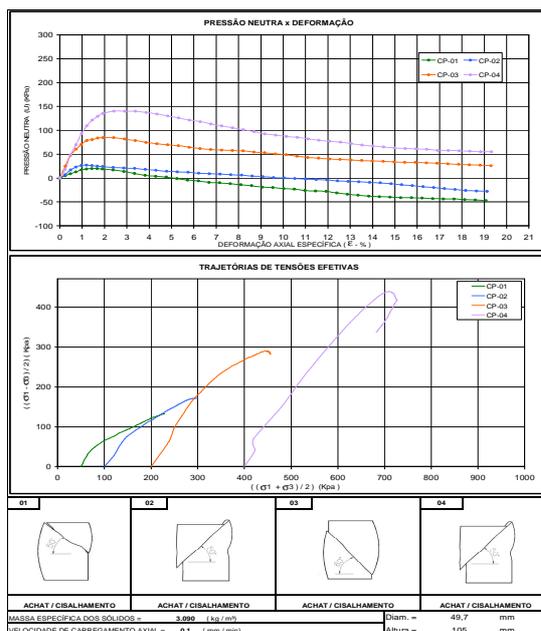


Figura I.21– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-116 (1)

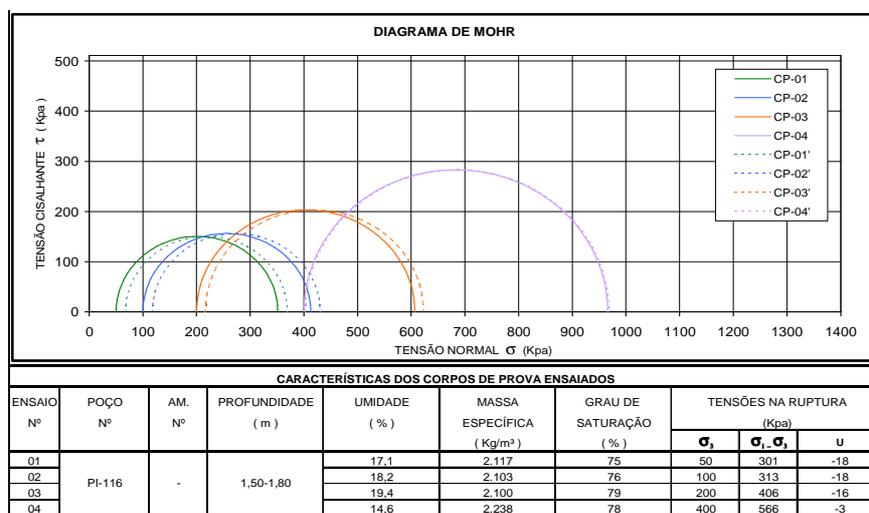


Figura I.22– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-116 (2)

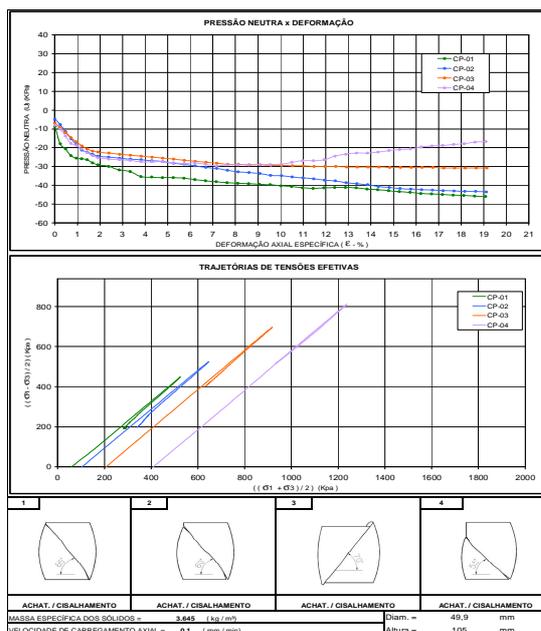


Figura I.23– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-117 (1)

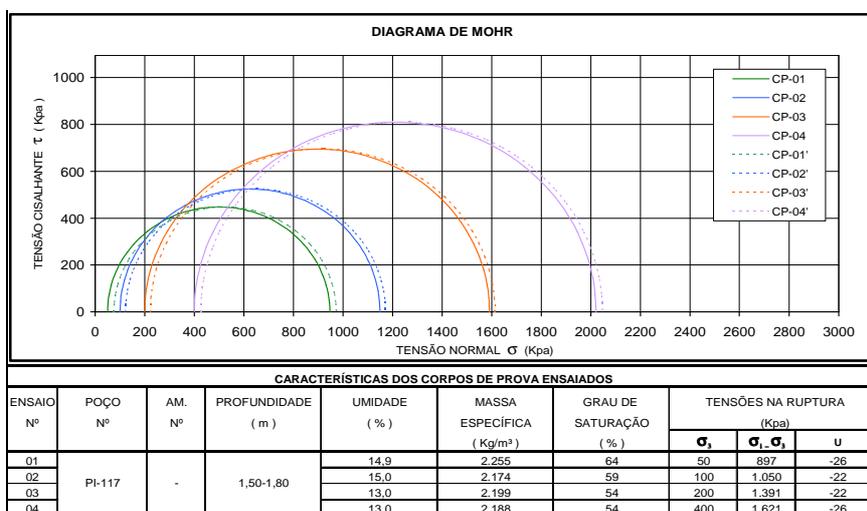


Figura I.24– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-117 (2)

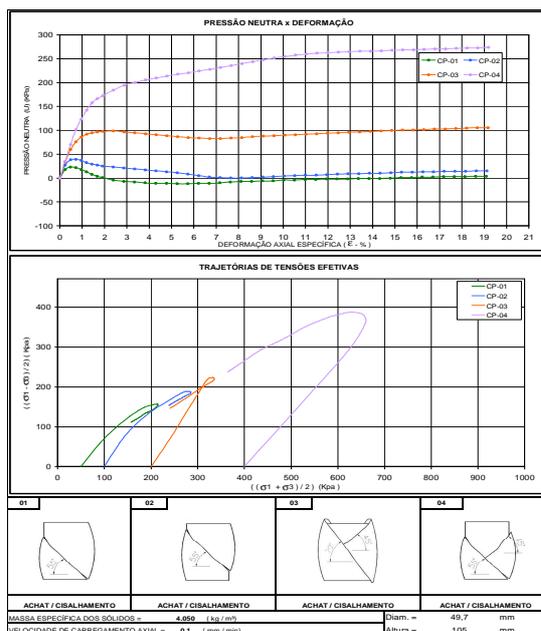


Figura I.25– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-118 (1)

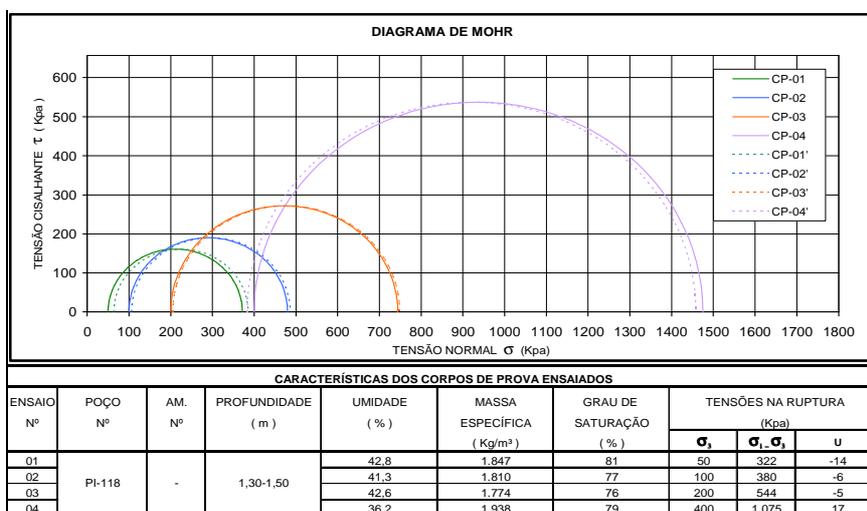


Figura I.26– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-118 (2)

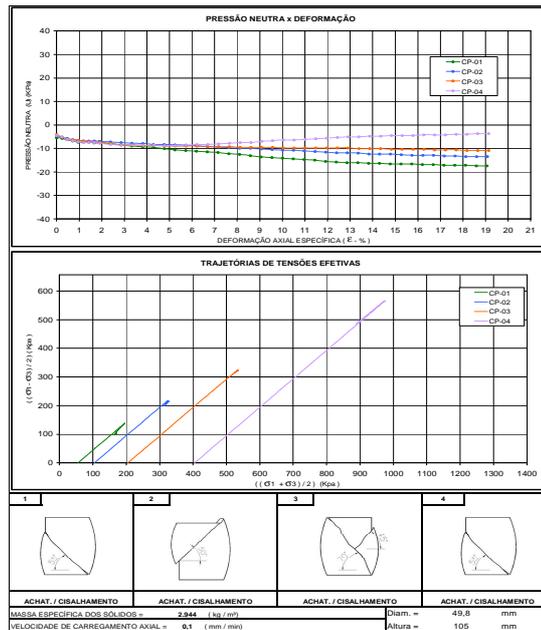


Figura I.27– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-120 (1)

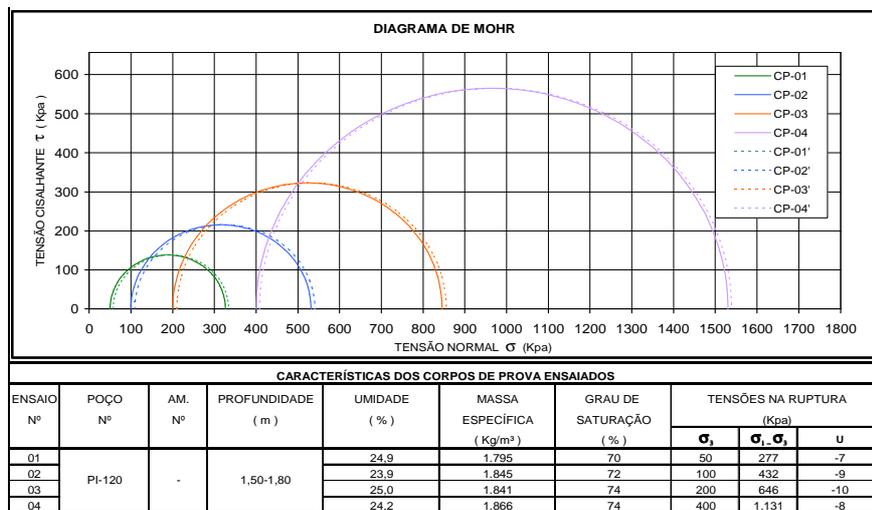


Figura I.28– Resultados de Ensaios triaxiais para a amostra oriunda do poço PI-120 (2)

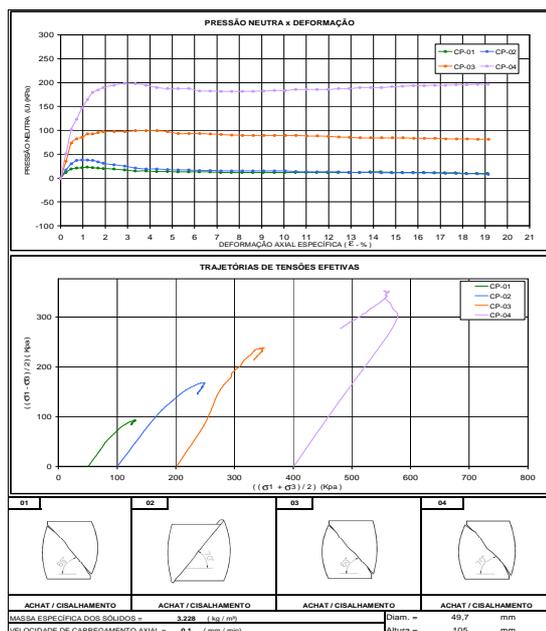


Figura I.29 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-121(1)

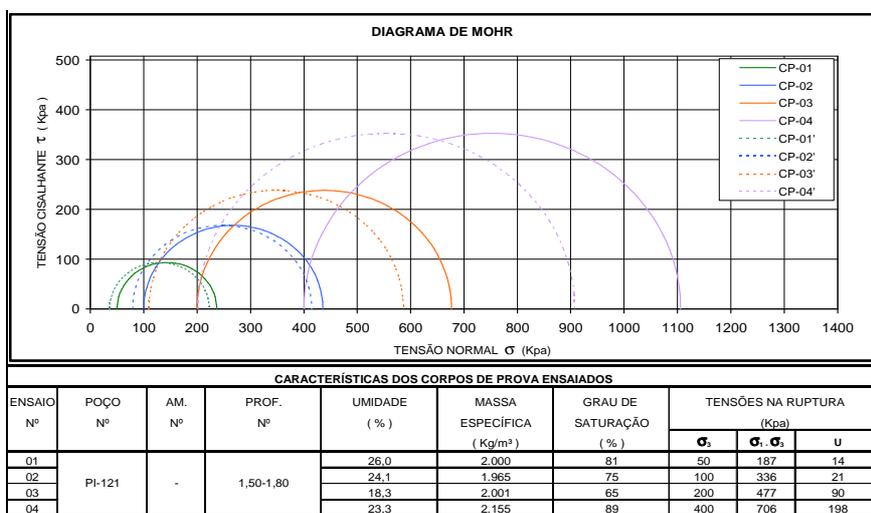


Figura I.30 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-121(2)

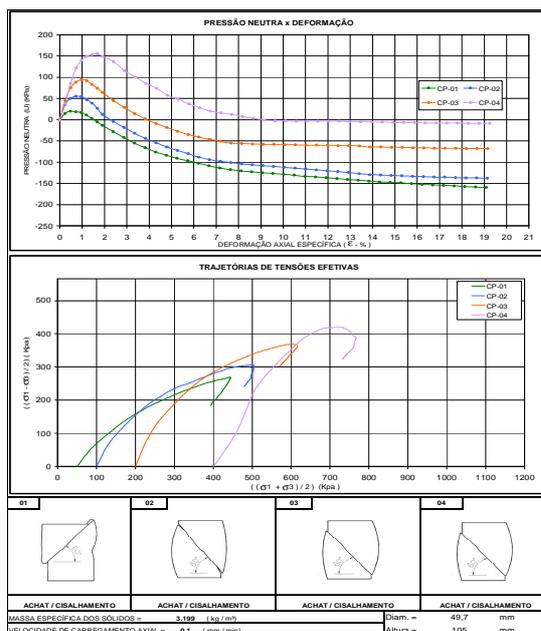


Figura I.31 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-122(1)

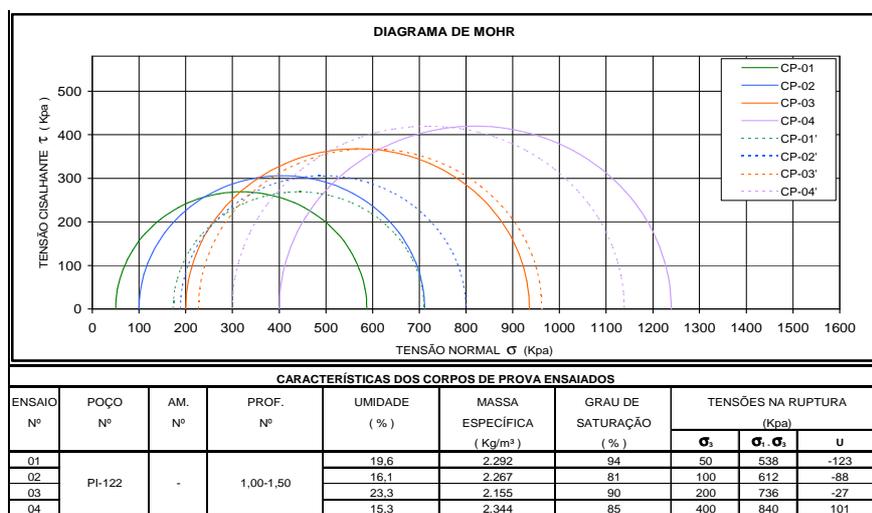


Figura I.32 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-122(2)

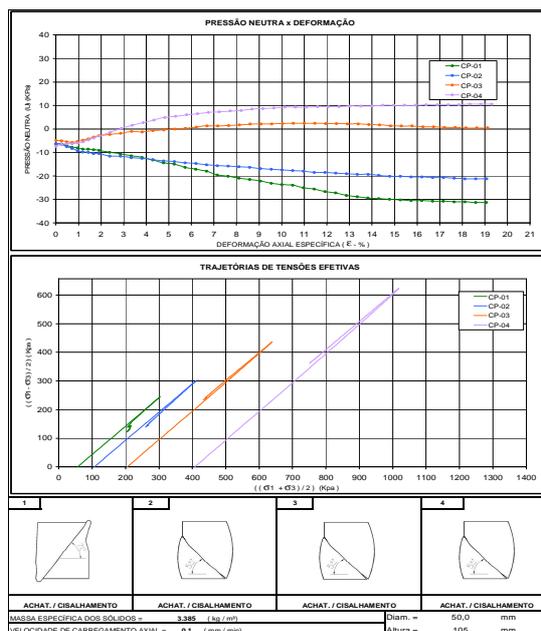


Figura I.33 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-123(1)

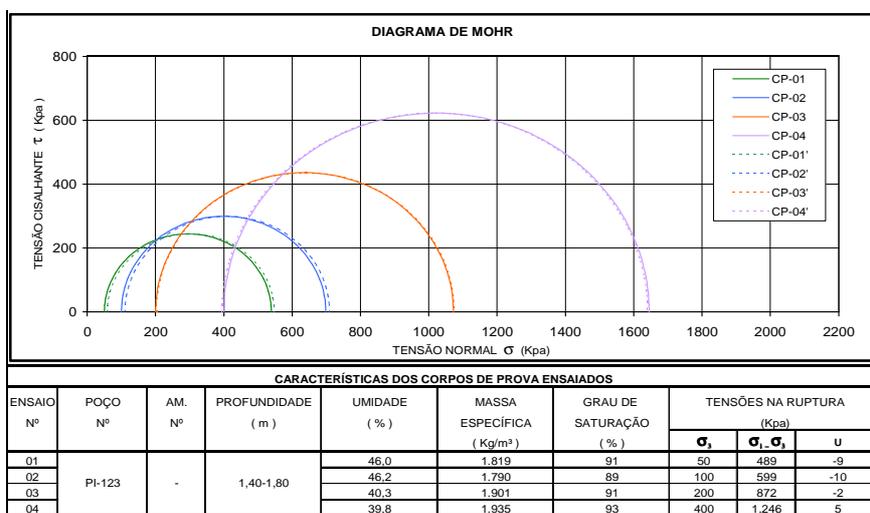


Figura I.34 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-123(2)

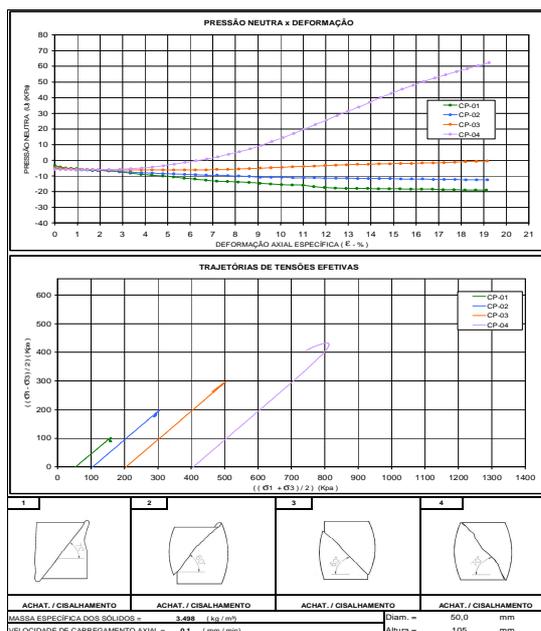


Figura I.35 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-125(1)

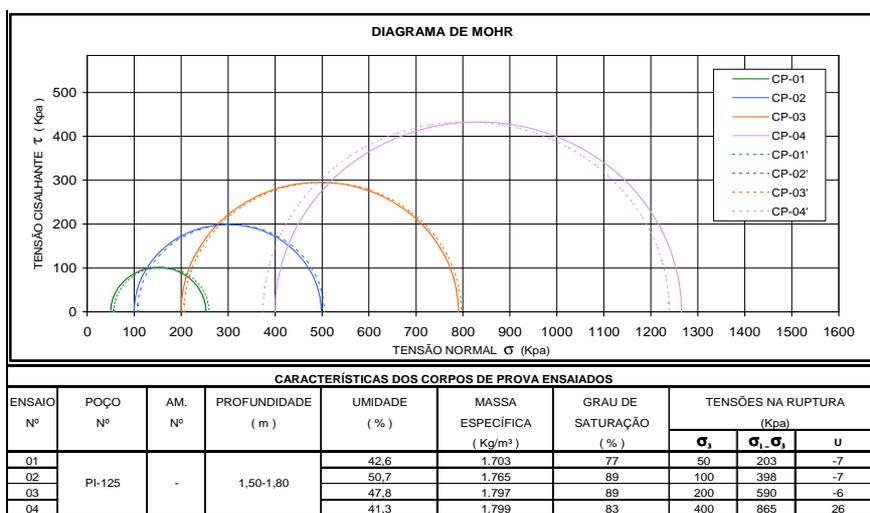


Figura I.36 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-125(2)

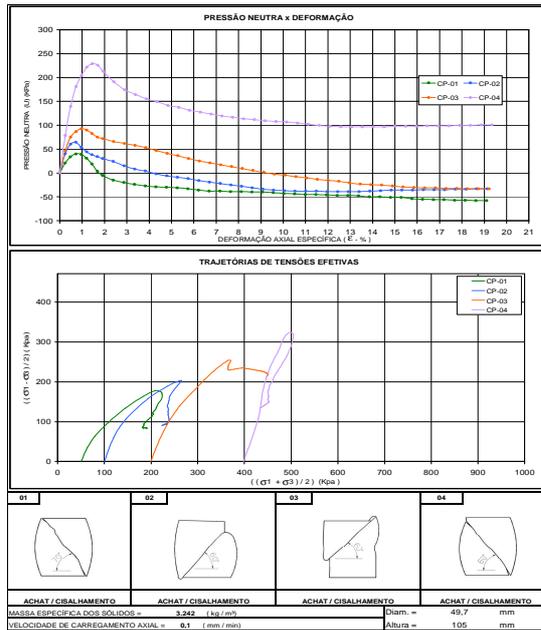


Figura I.37 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-128(1)

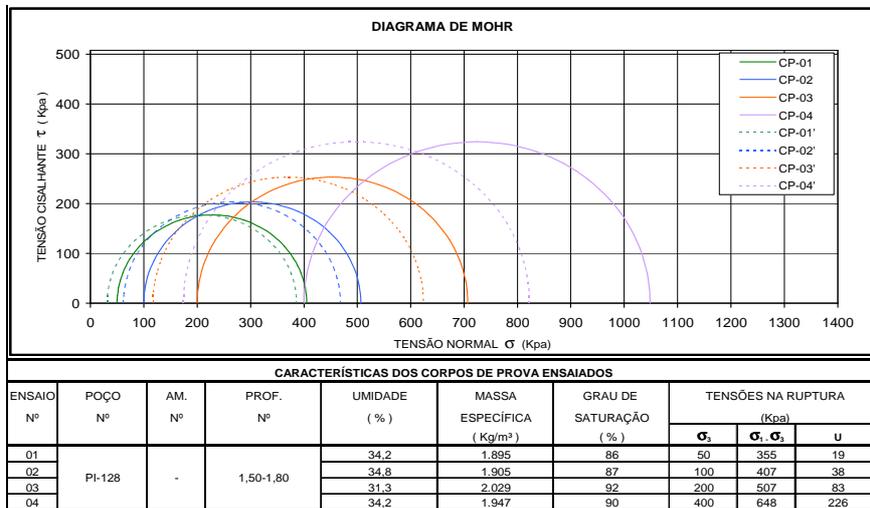


Figura I.38 – Resultados dos Ensaios triaxiais para amostra oriunda do poço PI-128(2)

Anexo II – Análises de estabilidade

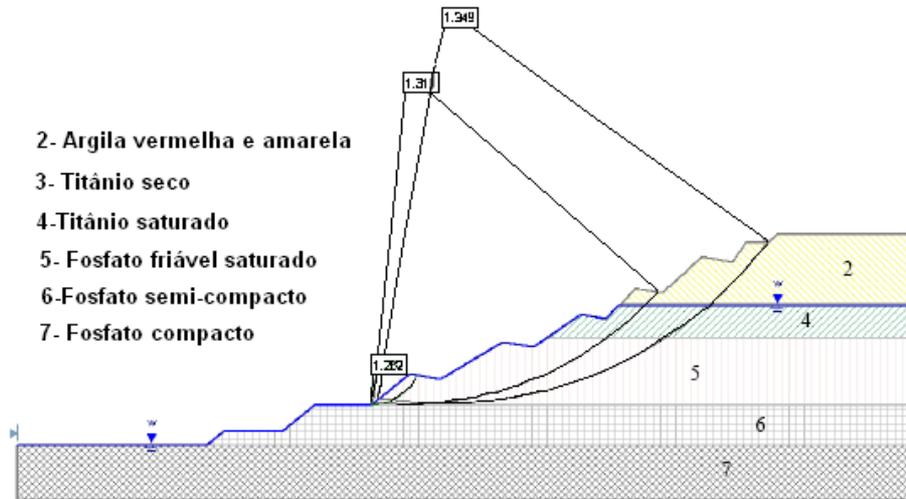


Figura II.1 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção C** na hipótese de NA normal.

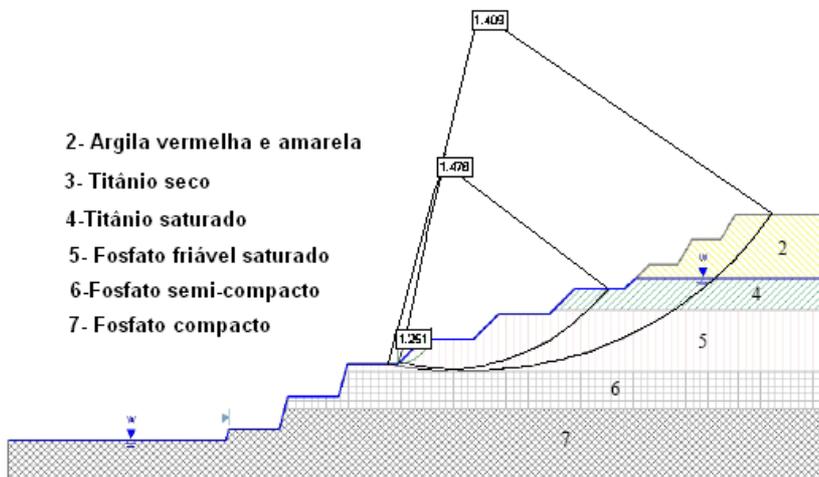


Figura II.2 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção C** na hipótese de NA normal.

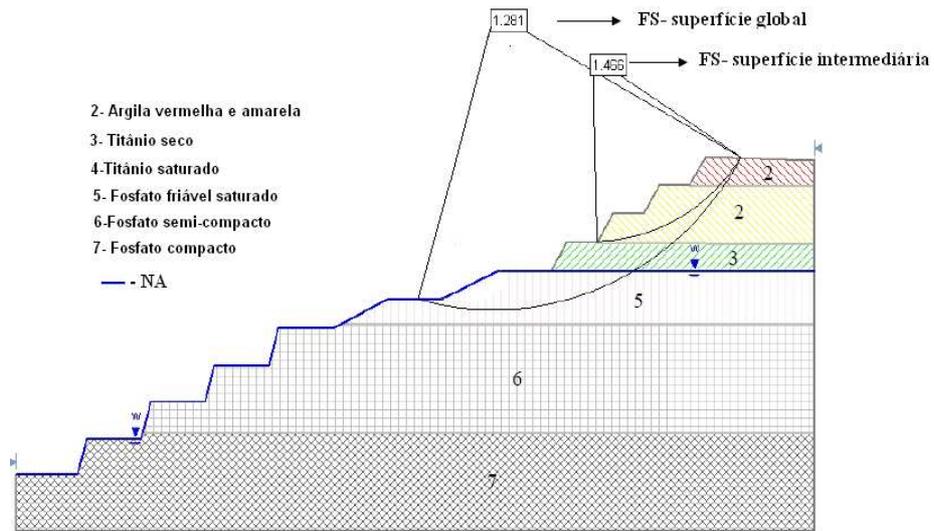


Figura II.3 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção D** na hipótese de NA normal.

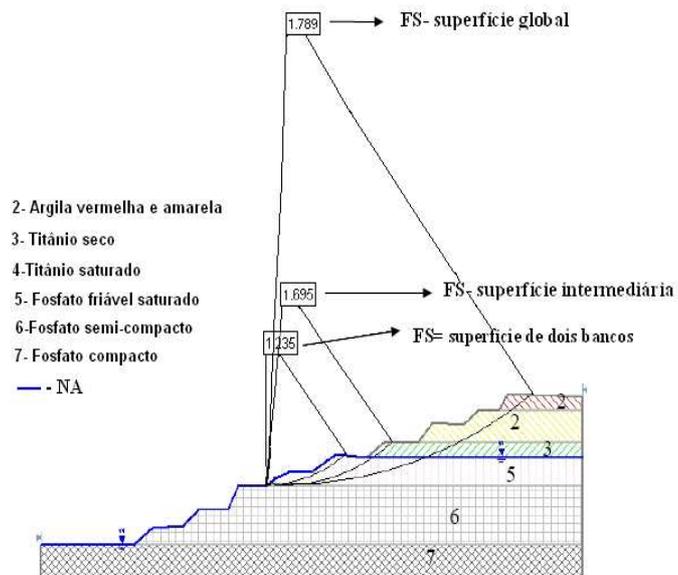


Figura II.4 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção D** na hipótese de NA normal.

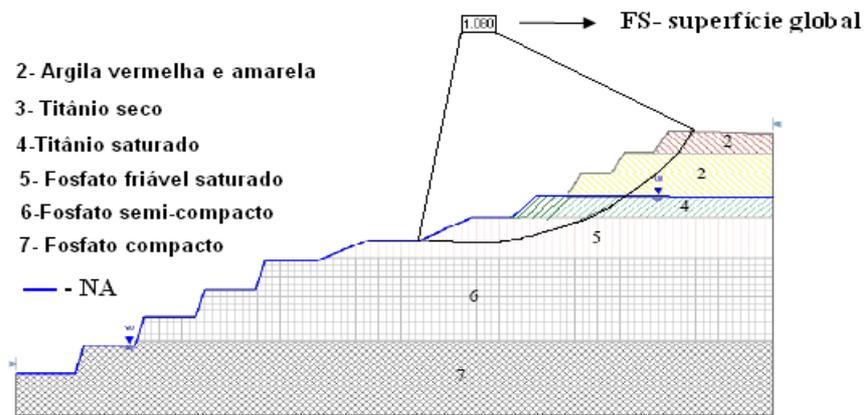


Figura II.5 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção D** na hipótese de NA elevado.

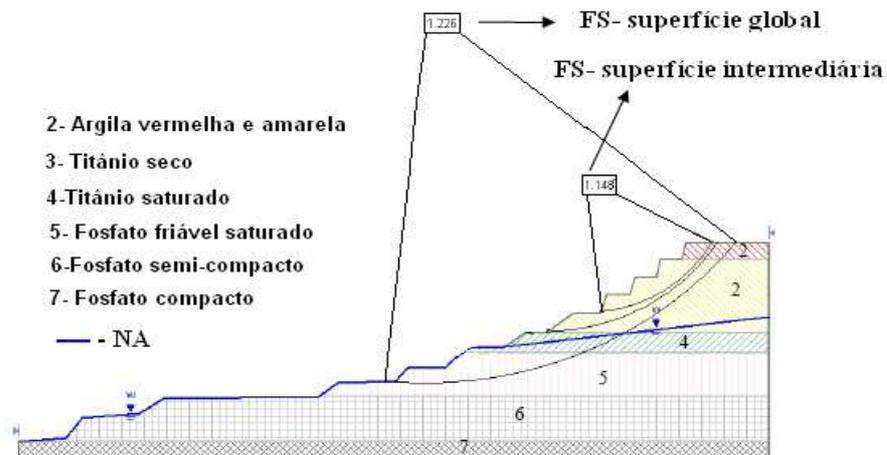


Figura II.6 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção E** na hipótese de NA normal.

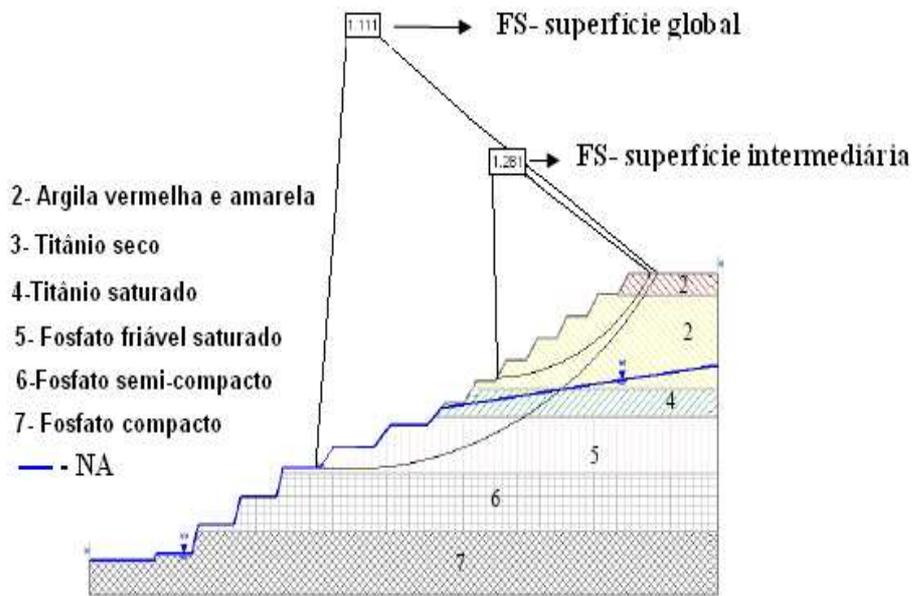


Figura II.7 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção E** na hipótese de NA normal.

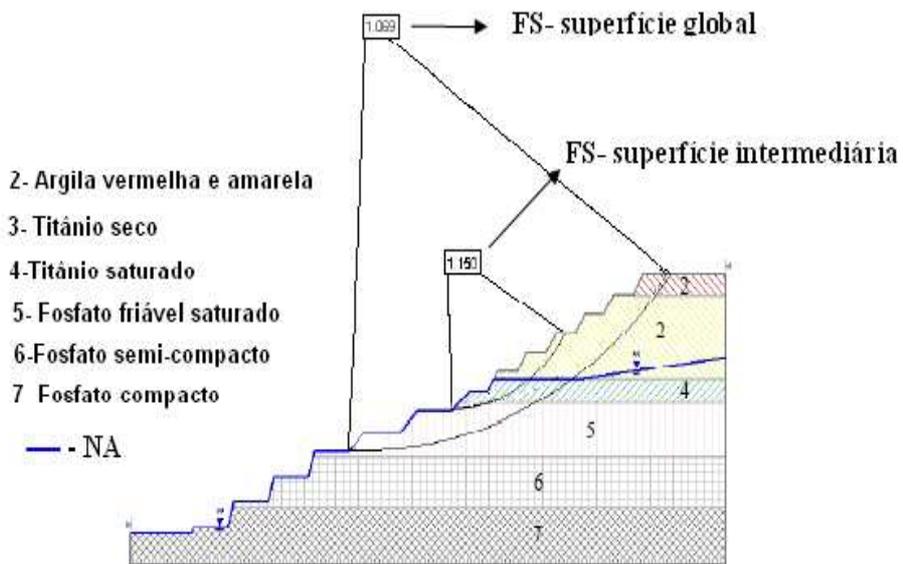


Figura II.8 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção E** na hipótese de NA elevado.

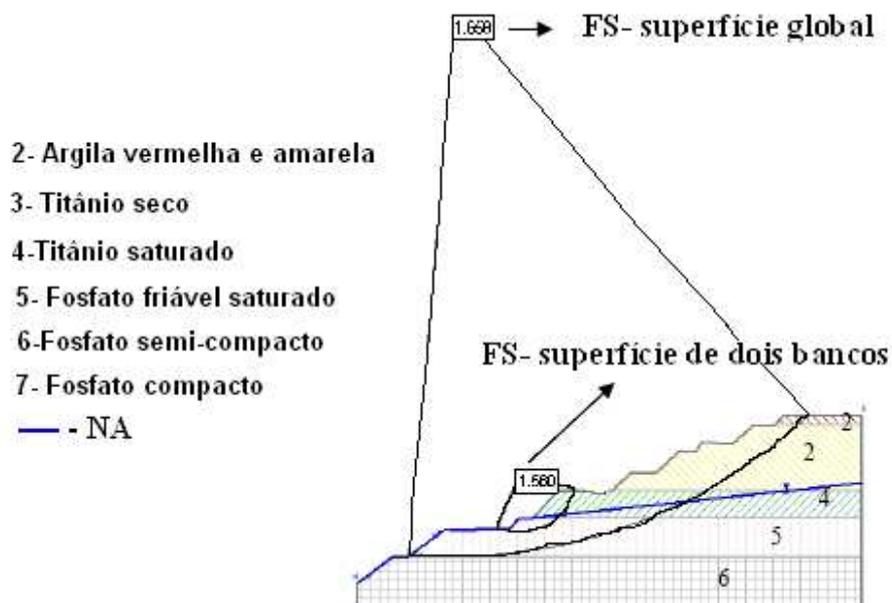


Figura II.9 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção F** na hipótese de NA normal.

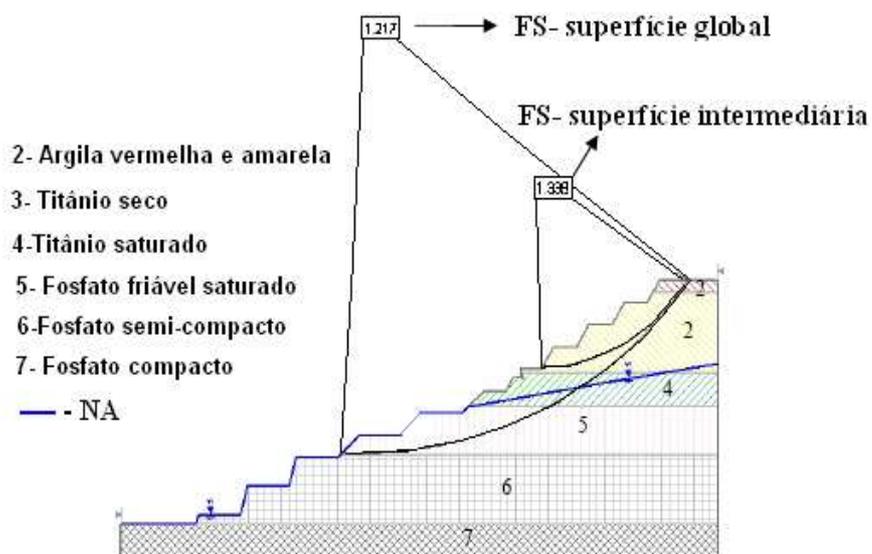


Figura II.10 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção F** na hipótese de NA normal.

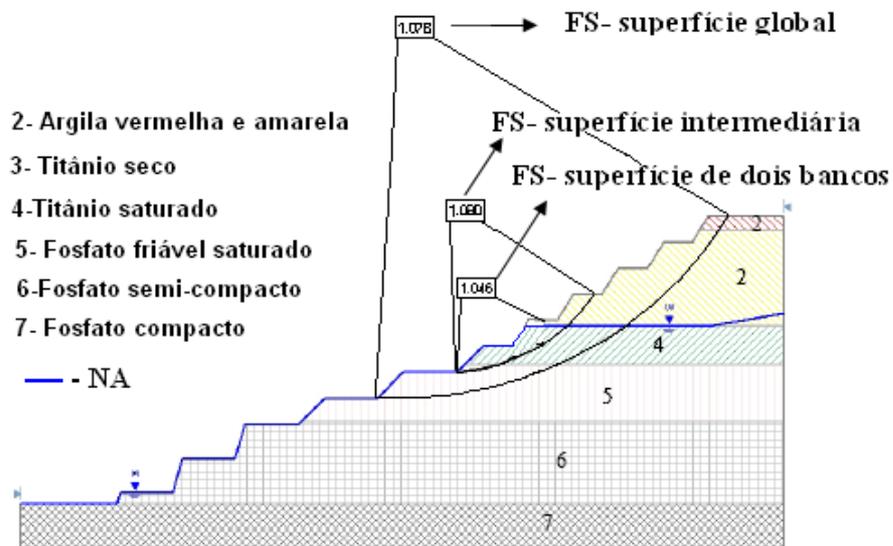


Figura II.11– Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção F** na hipótese de NA elevado.

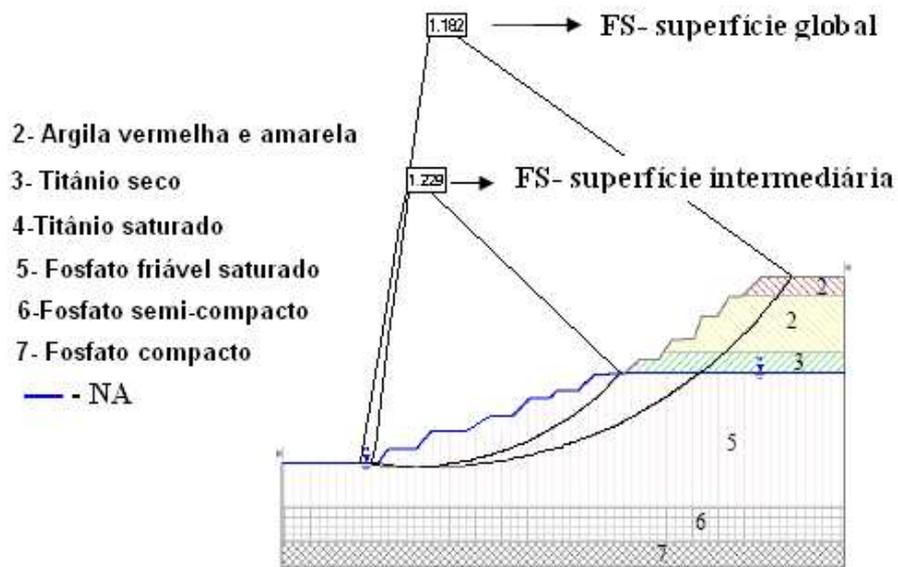


Figura II.12 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção G** na hipótese de NA normal.

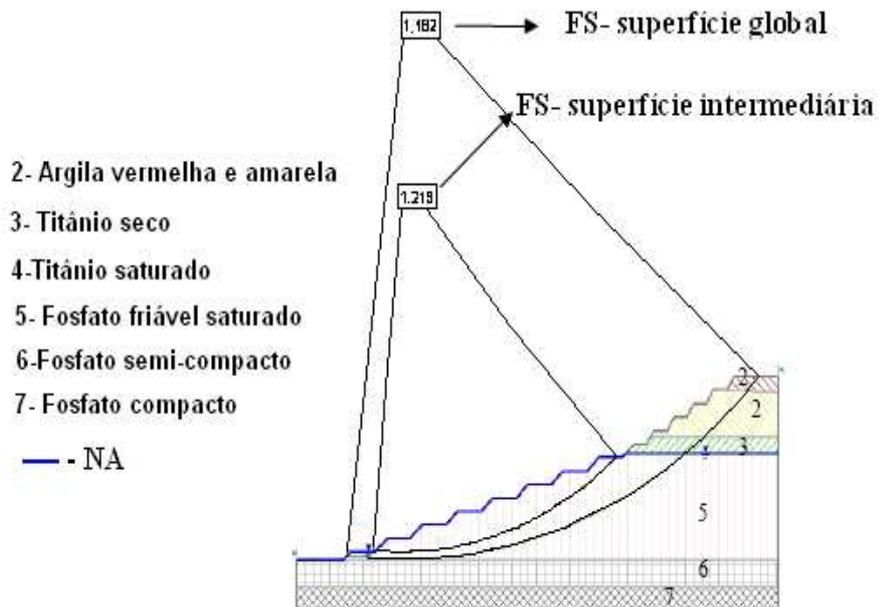


Figura II.13 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção G** na hipótese de NA normal.

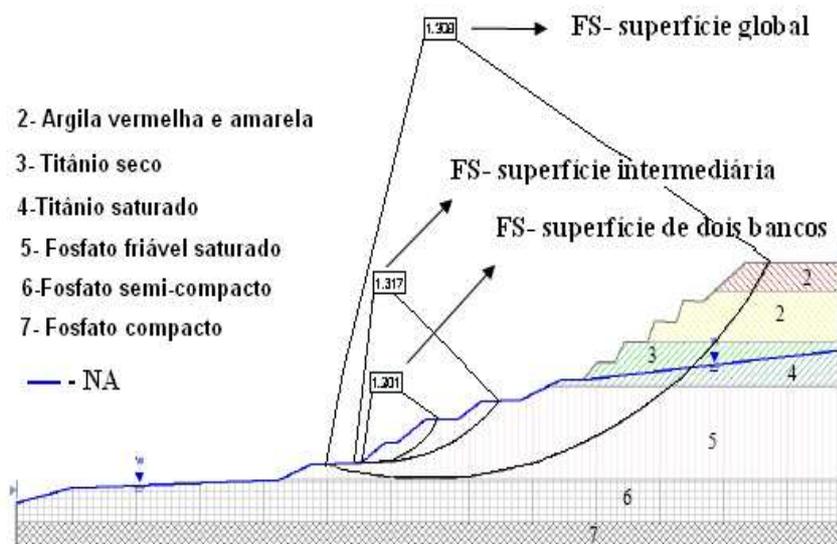


Figura II.14 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção H** na hipótese de NA normal.

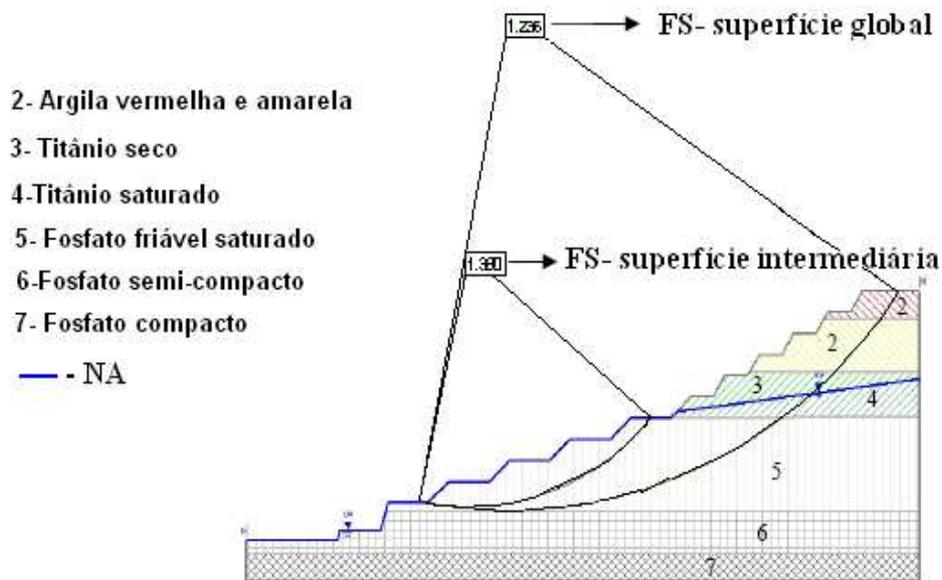


Figura II.15 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção H** na hipótese de NA normal.

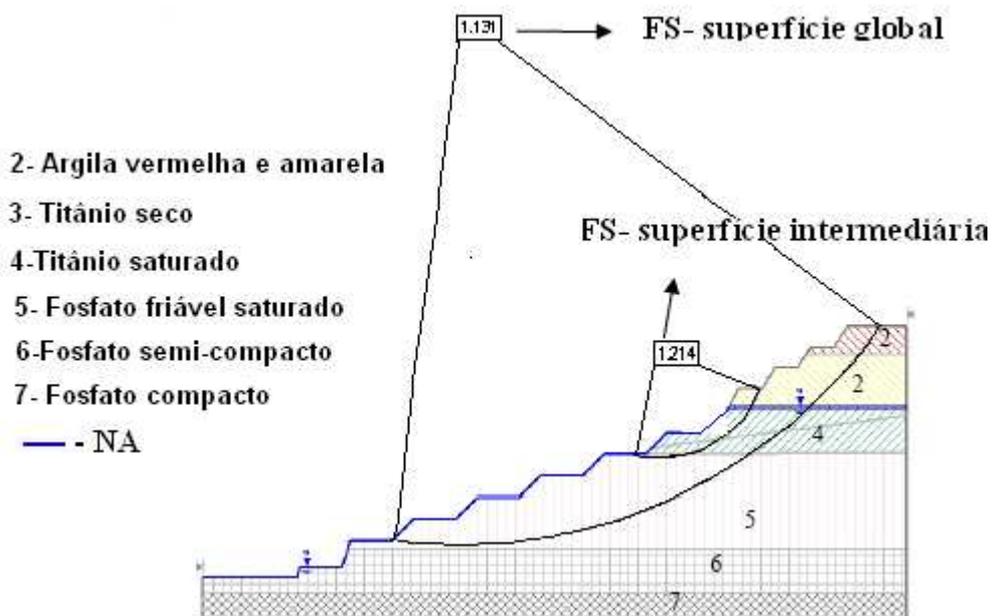


Figura II.16 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção H** na hipótese de NA elevado.

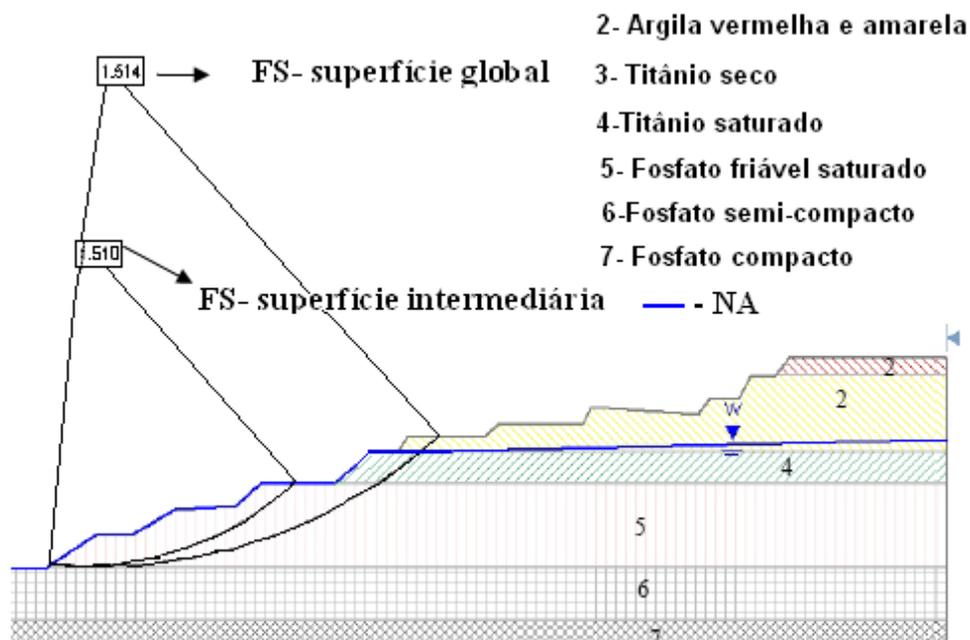


Figura II.17 – Análise de estabilidade do talude atual da **Seção I** na hipótese de NA normal.

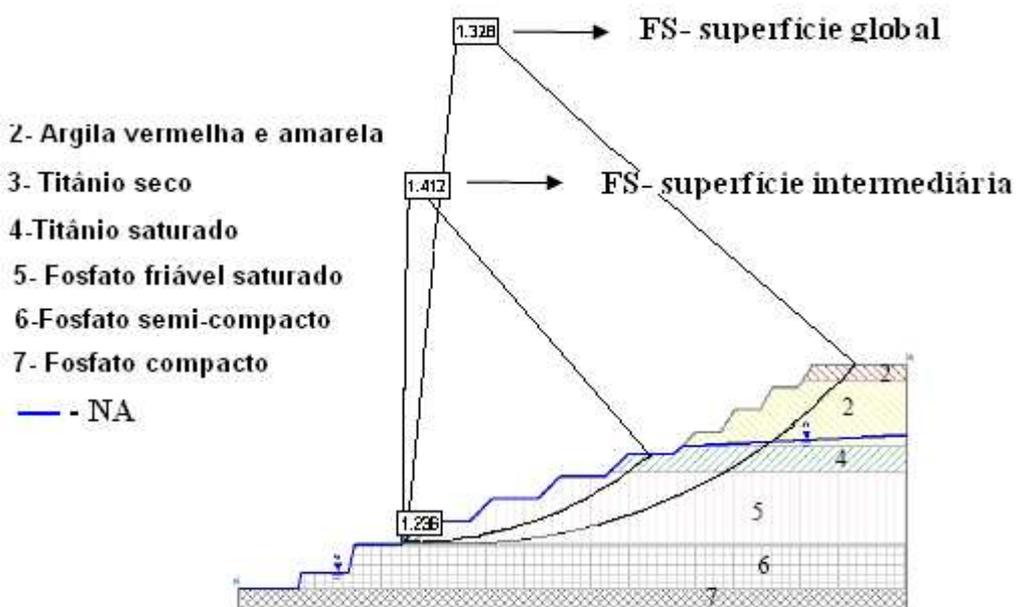


Figura II.18 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Seção I** na hipótese de NA normal.

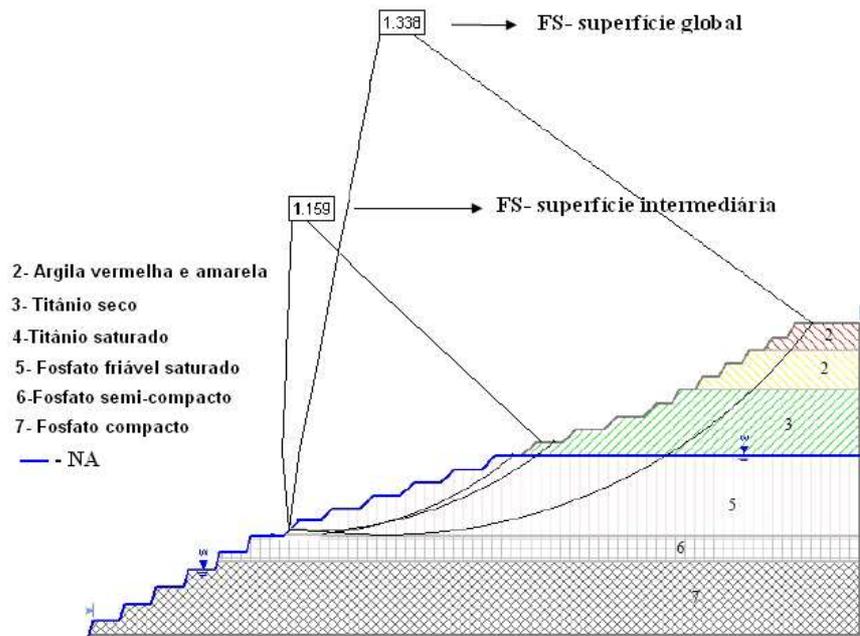


Figura II.19 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA rebaixado.

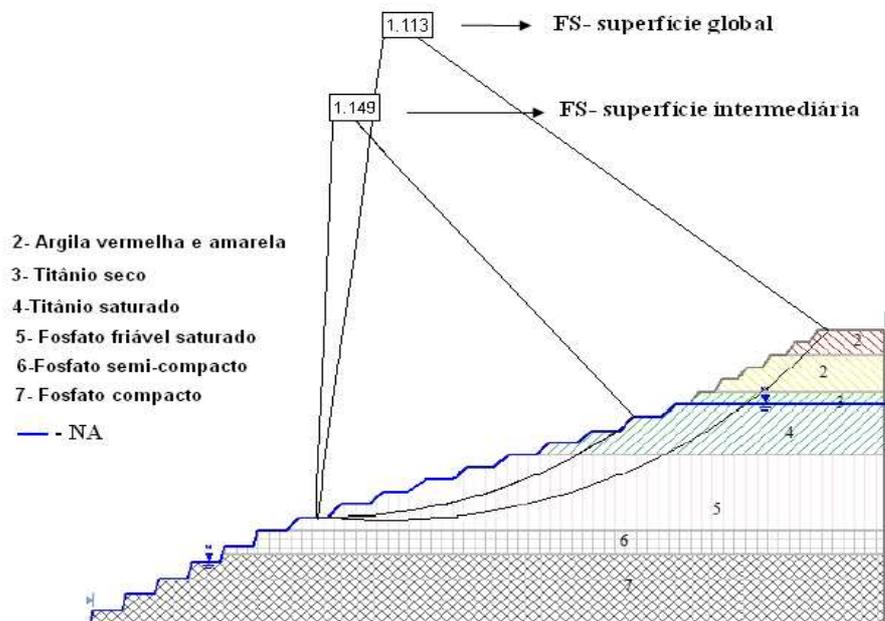


Figura II.20 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA elevado.

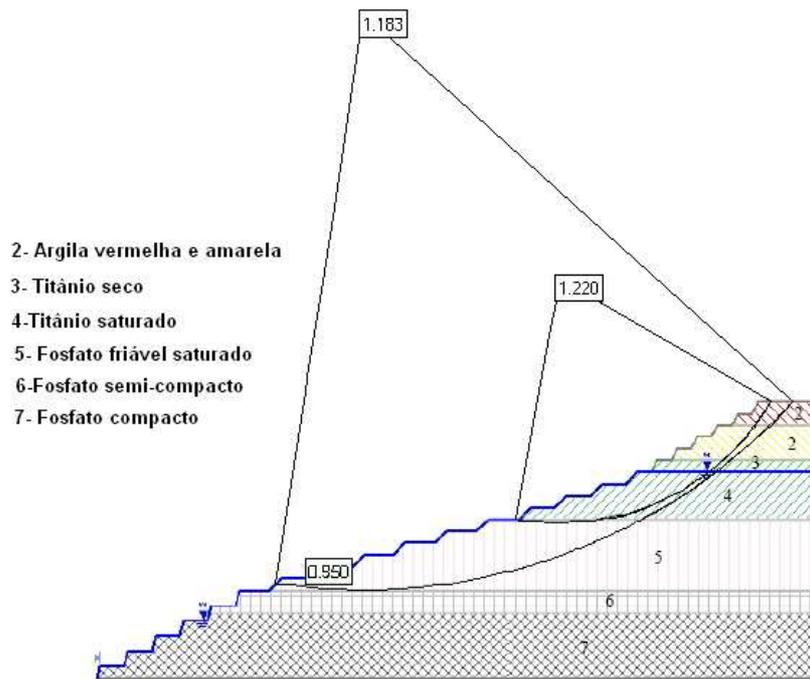


Figura II.21 – Análise de estabilidade do talude projetado da **Bigorna** na hipótese de NA elevado.