

LÍLIA MASCARENHAS SANT'AGOSTINO

**“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM DEPÓSITO MINERAL
- UM ESTUDO DE CASO: O NIÓBIO DE CATALÃO I, GOIÁS”**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia.

São Paulo

1996

LÍLIA MASCARENHAS SANT'AGOSTINO

**“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM DEPÓSITO MINERAL
- UM ESTUDO DE CASO: O NIÓBIO DE CATALÃO I, GOIÁS”**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia Mineral

Orientador:

Prof. Dr. Henrique Kahn

1996

Ao

Prof. José do Valle Nogueira Filho,

quem propiciou minha primeira oportunidade profissional.

AGRADECIMENTOS

À Companhia ULTRAFÉRTIL (antiga GOIASFÉRTIL - Goiás Fertilizantes S.A.), pela liberação dos dados e informações utilizados no estudo de caso apresentado nesta tese, particularmente nas figuras de seu Gerente do Departamento de Operações, Eng^o Antonio Walter Santin, e do Gerente do Departamento Técnico da FOSFÉRTIL (“holding” do grupo empresarial), Eng^o Luís Antonio Fonseca de Barros, que viabilizaram esta liberação.

Estendo os agradecimentos à equipe técnica da METAGO - Metais de Goiás S.A.- pela colaboração e participação nos trabalhos realizados nas diversas épocas de execução dos estudos de caracterização.

Agradeço à equipe do LCT- Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP, pelo apoio e incentivo na elaboração desta tese, em particular ao seu coordenador Prof. Dr. Henrique Kahn, amigo e parceiro de trabalho, que se mostrou perseverante orientador.

Num sentido amplo, deixo aqui registrado meu reconhecimento a todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento e consolidação da especialidade de caracterização tecnológica de minérios no Brasil, principalmente por terem acreditado que seria possível fazê-lo. Destaco aqui a participação daqueles colegas que têm se dedicado a esta modalidade técnica, em especial àqueles com quem trabalhei diretamente.

Incluo aqui também, profissionais atuantes no setor mineral de forma variada, em áreas de interface e afins desta especialização, com quem tive oportunidade de compartilhar trabalhos. Seria muito extensiva a nomeação de cada uma destas pessoas, e eu correria o risco de cometer injustiças ao procurar torná-la uma listagem sucinta.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS	vi
RESUMO	vii
“ABSTRACT”	ix
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	2
3 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS	3
3.1 - Conceituação	4
3.2 - Adequação de Procedimentos e Métodos	6
3.3 - Aplicação da Caracterização Tecnológica	9
3.3.1 - Caracterização nas Etapas de Prospecção e Pesquisa Mineral.....	10
3.3.2 - Caracterização nas Etapas de Projeto e Planejamento de Empreendimento Mineiro.....	14
3.3.3 - Caracterização no Acompanhamento da Operação de uma Mina.....	15
3.4 - Histórico	16
4 - AMOSTRAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS	19
4.1 - Critérios de Seleção de Amostras	20
4.2 - Tipos de Amostras	22
4.3 - Definição de Tamanho de Amostras e Amostragem Secundária	24
5 - METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS	26
5.1 - Parâmetros do Minério	28
5.1.1 - Formas de Intercrescimento e Liberação.....	30

5.2 - Procedimentos de Laboratório.....	31
5.2.1 - Técnicas de Preparação de Amostras.....	32
5.2.2 - Técnicas de Separações Minerais.....	38
5.2.2.1 - Técnicas de Separação por Densidade.....	42
5.2.2.2 - Técnicas de Separação Magnética.....	43
5.2.2.3 - Técnicas Diversas de Separação Mineral.....	45
5.3 - Análises Mineralógicas.....	47
5.3.1 - Identificações de Espécies Minerais.....	47
5.3.1.1 - Técnicas de Microscopia Ótica.....	49
5.3.1.2 - Técnicas Diversas.....	50
5.3.2 - Quantificações de Espécies Minerais.....	52
6- METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE UM DEPÓSITO MINERAL.....	55
6.1 - Procedimento.....	55
6.2 - Tipologia de Minérios.....	56
6.3 - Modelamento dos Parâmetros Tecnológicos.....	59
6.3.1 - Recursos para Modelamento de Jazidas.....	60
6.3.1.1 - Métodos de Modelagem Tridimensional por Computação.....	61
6.3.1.2 - Recursos Computacionais Empregados.....	62
7 - UM ESTUDO DE CASO - CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITO DE NIÓBIO ASSOCIADO A COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO...	64
7.1. Apresentação do Projeto.....	64
7.1.1 - A Situação do Nióbio.....	64
7.1.2 - O Depósito de Nióbio de Catalão I.....	65
7.1.3 - Critérios e Objetivos do Projeto.....	68
7.1.3.1 - Estudos de Caracterização Tecnológica Realizados.....	69
7.2. Revisão Bibliográfica.....	70
7.2.1 - O Modelo da Mineralização.....	70
7.2.1.1 -Mineralização Primária.....	70
7.2.1.2 - Mineralização Secundária.....	72
7.2.1.3 - Mineralogia do Minério.....	73

7.2.1.4 - A Mineralização em Catalão I.....	76
7.2.2 - O Problema Tecnológico.....	80
7.2.3.1 - A Questão Tecnológica na Mineração Catalão.....	82
7.3. Procedimento Adotado na Caracterização.....	85
7.3.1- Abordagem dos Estudos.....	85
7.3.2 - Procedimentos e Técnicas Utilizados.....	87
7.3.2.1 - Amostragem.....	87
7.3.2.2 - Caracterização Tecnológica.....	90
7.3.2.3 - Ensaio de Concentração.....	93
7.3.2.4 - Modelagem das Reservas Tecnológicas.....	96
7.4 - Amostragem do Corpo de Minério.....	98
7.4.1 - Escavações de Pesquisa Disponíveis.....	98
7.4.2 - Definição de Tipos Litológicos de Minério.....	102
7.4.3 - Formação de Amostras Típicas.....	105
7.5 - Resultados da Caracterização Tecnológica.....	108
7.5.1 - Preparação das Amostras.....	108
7.5.2 - Separações Mineraias.....	113
7.5.3 - Composição Mineralógica do Minério.....	119
7.5.4 - Definição dos Tipos Mineralógicos de Minério.....	139
7.6 - Resultados dos Ensaio de Concentração.....	142
7.6.1 - Critério de Seleção de Amostras.....	142
7.6.2 - Resultados Obtidos no Roteiro Padronizado de Flotação.....	144
7.7 - Definição dos Tipos Tecnológicos de Minério.....	148
7.8 - Definição das Reservas Tecnológicas.....	151
7.8.1 - Delineamento do Corpo Mineralizado.....	153
7.8.1.1 - Avaliação de Reservas na Fase de Pesquisa Geológica.....	153
7.8.1.2 - Cálculo de Reservas através de Método de Computação.....	154
7.8.2 - Modelamento da Tipologia do Minério.....	160
7.8.2.1. Correlação Tipos Mineralógicos e Composição Química do Minério.....	162
7.8.2.2. Distribuição dos Tipos Tecnológicos de Minério.....	176
7.8.3 - Definição das Reservas Tecnológicas.....	180
7.9 - Conclusões do Estudo de Caso.....	196

8. CONCLUSÕES.....	199
---------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ANEXOS

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.2.1 - Metodologias Aplicadas na Preparação de Amostras para Caracterização.....	35
TABELA 5.2.2 - Principais Métodos de Determinação do Tamanho de Partículas Utilizados no Setor Mineral.....	37
TABELA 5.2.3 - Metodologias Aplicadas para Separações Minerais na Escala de Caracterização.....	38
TABELA 5.2.4 - Recursos e Ensaio de Tratamento Mineral em Escala de Bancada de Apoio à Caracterização	39
TABELA 5.3.1 - Técnicas de Mineralogia de Uso mais Difundido na Caracterização de Minérios .	47
TABELA 6.3.1 - Relação de Programas Integrados para Modelagem Tridimensional Mais Difundidos	63
TABELA 7.2.1 - Coletânea de Teores Típicos de Minérios Primários de Pirocloro	72
TABELA 7.2.2 - Coletânea de Teores em Depósitos Africanos com Mineralização Secundária	73
TABELA 7.2.3 - Principais Depósitos de Pirocloro no Brasil	73
TABELA 7.2.4 - Coletânea da Composição Química de Ba-pirocloros	75
TABELA 7.2.5 - Coletânea de Dados Típicos de Beneficiamento Industrial	81
TABELA 7.2.6 - Composições Químicas Típicas de Concentrados de Ba-Pirocloro	82
TABELA 7.3.1 - Reagentes e Condições Aplicadas nos Ensaio de Flotação	94
TABELA 7.4.1 - Relação e Procedência das Amostras Caracterizadas	106
TABELA 7.4.2 - Comparação de Teores nas Amostras Compostas	107
TABELA 7.5.1 - Sumário dos Resultados da Classificação em 0,208 mm	108
TABELA 7.5.2 - Sumário dos Resultados da Deslamagem em Microciclone	109
TABELA 7.5.3 - Sumário dos Resultados da Separação Magnética a Imã Permanente	114
TABELA 7.5.4 - Características do Produto Deslamado e Desmagnetizado (TQ+PM)	117
TABELA 7.5.5 - Resultados das Separações Eletromagnéticas a Média Intensidade (Frantz)	118
TABELA 7.5.6 - Fosfatos Secundários - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)	120
TABELA 7.5.7 - Minerais de Titânio - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)	122
TABELA 7.5.8 - Coletânea Bibliográfica da Composição Química de Ba-pirocloros de Catalão	128
TABELA 7.5.9 - Ba-pirocloros - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)	129
TABELA 7.5.10 - Composição Mineralógica das Amostras Estudadas - Produto Deslamado	139

TABELA 7.5.11 - Resumo da Tipologia Mineralógica do Minério	141
TABELA 7.6.1 - Características da Alimentação da Flotação para as Diversas Amostras	143
TABELA 7.6.2 - Composição Mineralógica das Amostras de Alimentação da Flotação	144
TABELA 7.6.3 - Sumário dos Resultados dos Ensaios de Flotação	145
TABELA 7.6.4 - Composição Mineralógica Estimativa nos Concentrados de Flotação	146
TABELA 7.7.1 - Tipos Mineralógicos de Minério Passíveis de Concentração nos Ensaios Realizados	148
TABELA 7.7.2 - Sumário dos Parâmetros de Processo dos Tipos Tecnológicos de Minério	149
TABELA 7.7.3 - Comparação de Dados da Alimentação da Flotação e de Produto das Separações Magnéticas a Média Intensidade (FRANTZ 0,5A.....)	150
TABELA 7.8.1 - Reservas Geológicas de Minério de Nióbio da Goiasfértil (extraído de ⁹¹).....	154
TABELA 7.8.2 - Reservas de Minério Potencial de Nióbio da Goiasfértil	158
TABELA 7.8.3 - Sumário das Correlações Tipos de Minérios Litológicos / Mineralógicos / Tecnológicos	160
TABELA 7.8.4 - Cálculo das Reservas de Minério Potencial por Nível.....	180
TABELA 7.8.5 - Partição das Reservas de Minério Potencial Segundo Tipos Tecnológicos de Minério.....	181

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.3.1 - APLICAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NAS DIVERSAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE UMA MINA.....	10
FIGURA 5.2.1 - ROTEIRO BÁSICO DE PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS.....	33
FIGURA 5.2.2 - GRANULOMETRIA DE APLICABILIDADE DOS PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO.....	34
FIGURA 5.2.3 - ROTEIRO BÁSICO DE APLICAÇÃO DAS SEPARAÇÕES MINERAIS.....	40
FIGURA 5.3.1 - CONJUGAÇÃO USUAL DE TÉCNICAS DE MINERALOGIA APLICADAS À CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS.....	48
FIGURA 6.1.1 - ROTEIRO PARA CARACTERIZAÇÃO DE UM DEPÓSITO MINERAL.....	57
FIGURA 7.1.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO.....	66
FIGURA 7.1.2 - MAPA DAS ÁREAS MINERALIZADAS EM CATALÃO I (adaptado de 78) CROQUI DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ALVARÁS DE PESQUISA	67
FIGURA 7.2.1 - MAPA GEOLÓGICO DO COMPLEXO ALCALINO DE CATALÃO I.....	78
FIGURA 7.2.2 - FLUXOGRAMA DA PLANTA DE FLOTAÇÃO DA MINERAÇÃO CATALÃO ⁹¹	84
FIGURA 7.3.1 - ROTEIRO ADOTADO NOS ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO UM ESTUDO DE CASO - O NIÓBIO DE CATALÃO I.....	88
FIGURA 7.3.2 - ESQUEMA DE PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EM LABORATÓRIO	91
FIGURA 7.3.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ADOTADO PARA OS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO.....	95
FIGURA 7.4.1 - MAPA TOPOGRÁFICO COM LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAAGEM...	99
FIGURA 7.4.2 - MAPA DE ISOTEORES DE NIÓBIO - NÍVEIS 780 E 800.....	100
FIGURA 7.4.3 - MAPA DE ISOTEORES DE NIÓBIO - NÍVEIS 820 E 830.....	101
FIGURA 7.4.4 - PERFIL ESQUEMÁTICO DO SOLO COM DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO.....	104
FIGURA 7.5.1 - GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO LITOLOGIAS & QUANTIDADE DE LAMAS..	111
FIGURA 7.5.2 - CORRELAÇÕES ENTRE QUANTIDADE DE LAMAS NATURAIS & DE MOAGEM.....	112
FIGURA 7.5.3 - GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO TEOR DO MINÉRIO & QUANTIDADE DE LAMAS NATURAIS.....	113

FIGURA 7.5.4-	CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DO MINÉRIO & QUANTIDADE DE MAGNÉTICOS.....	115
FIGURA 7.5.5-	CORRELAÇÃO ENTRE QUANTIDADES DE LAMAS & DE MAGNÉTICOS.....	115
FIGURA 7.5.6-	CORRELAÇÕES DO SOMATÓRIO DE LAMAS & QUANTIDADE DE MAGNÉTICOS.....	116
FIGURA 7.8.1-	MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE FUROS DE SONDAÇÃO COM TEORES DE Nb ₂ O ₅	152
FIGURA 7.8.2- *	DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE NIÓBIO NO MINÉRIO POTENCIAL.....	155
FIGURA 7.8.3- *	SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DOS TEORES DE Nb ₂ O ₅ - 2D..	156
FIGURA 7.8.4- *	SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DOS TEORES DE Nb ₂ O ₅ - 3D..	157
FIGURA 7.8.5- *	SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS SEGUNDO A DIREÇÃO VERTICAL	159
FIGURA 7.8.6- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE CÁLCIO E FÓSFORO NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	164
FIGURA 7.8.7- *	DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO CaO:P ₂ O ₅ NO MINÉRIO TOTAL E NO TIPO MINERALÓGICO A.....	165
FIGURA 7.8.8- *	DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO CaO:P ₂ O ₅ NOS TIPOS MINERALÓGICOS B E C.....	166
FIGURA 7.8.9- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO CaO:P ₂ O ₅ & Nb ₂ O ₅ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	168
FIGURA 7.8.10- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO BaO & Al ₂ O ₃	169
FIGURA 7.8.11- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO CaO:P ₂ O ₅ & BaO:Al ₂ O ₃	170
FIGURA 7.8.12- *	CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & Fe ₂ O ₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO....	173
FIGURA 7.8.13- *	CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & TiO ₂ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	173
FIGURA 7.8.14- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & SiO ₂ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	174
FIGURA 7.8.15- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & BaO:Al ₂ O ₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	174
FIGURA 7.8.16- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & BaO NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	175
FIGURA 7.8.17- *	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb ₂ O ₅ & Al ₂ O ₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO.....	175
FIGURA 7.8.18-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 800 N.....	177
FIGURA 7.8.19-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 900 N.....	178
FIGURA 7.8.20-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 1.000 N.....	179
FIGURA 7.8.21-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 760.....	182

FIGURA 7.8.22-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 770.....	183
FIGURA 7.8.23-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 780.....	184
FIGURA 7.8.24-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 790.....	185
FIGURA 7.8.25-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 800.....	186
FIGURA 7.8.26-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 810.....	187
FIGURA 7.8.27-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 820.....	188
FIGURA 7.8.28-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 830.....	189
FIGURA 7.8.29-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 834.....	190
FIGURA 7.8.30-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 838.....	191
FIGURA 7.8.31-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 842.....	192
FIGURA 7.8.32-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 846.....	193
FIGURA 7.8.33-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 850.....	194
FIGURA 7.8.34-	DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 854.....	195

* - gráficos extraídos pelo programa LYNX, em que foi mantido o formato original em idioma inglês.

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

FOTOMICROGRAFIA Nº 1 -	AGREGADOS COM FOSFATOS DE TERRAS RARAS.....	120
FOTOMICROGRAFIA Nº 2 -	AGREGADOS COM FOSFATOS DE TERRAS RARAS / MAGNETITA.....	121
FOTOMICROGRAFIA Nº 3 -	ILMENITA NIOBÍFERA	123
FOTOMICROGRAFIA Nº 4 -	ANATÁSIO.....	123
FOTOMICROGRAFIA Nº 5 -	AGREGADOS ARGILO-LIMONÍTICOS.....	124
FOTOMICROGRAFIA Nº 6A -	PIROCLORO.....	126
FOTOMICROGRAFIA Nº 6B -	PIROCLORO.....	126
FOTOMICROGRAFIA Nº 7 -	BA-PIROCLORO.....	129
FOTOMICROGRAFIA Nº 8 -	BA-PIROCLORO.....	130
FOTOMICROGRAFIA Nº 9 -	BA-PIROCLORO.....	131
FOTOMICROGRAFIA Nº 10 -	BA-PIROCLORO.....	132
FOTOMICROGRAFIA Nº 11A -	BA-PIROCLORO.....	133
FOTOMICROGRAFIA Nº 11B -	AGREGADO ARGILO-LIMONÍTICO COM PIROCLORO....	133
FOTOMICROGRAFIA Nº 12 -	BA-PIROCLORO EM GRÃO MISTO.....	134
FOTOMICROGRAFIA Nº 13 -	BA-PIROCLORO EM GRÃO MISTO.....	135
FOTOMICROGRAFIA Nº 14 -	AGREGADO ARGILO-LIMONÍTICO COM PIROCLORO....	136
FOTOMICROGRAFIA Nº 15A -	AGREGADO DE FOSFATOS SECUNDÁRIOS COM PIROCLORO.....	137
FOTOMICROGRAFIA Nº 15B -	AGREGADO DE FOSFATOS SECUNDÁRIOS COM PIROCLORO.....	137
FOTOMICROGRAFIA Nº 16 -	AGREGADO DE MINERAIS DE ZIRCÔNIO.....	138

RESUMO

O tema envolve a caracterização tecnológica integrada no contexto do depósito mineral, englobando a amostragem, o estudo das características do minério, a definição de tipos de minério, a distribuição desta tipologia no corpo mineralizado, e, finalmente o modelamento das reservas segundo tipos tecnológicos de minério.

A caracterização de minérios é amplamente discutida nos seus aspectos conceituais, numa abordagem que se apoia na vivência prática, fruto de uma atividade profissional centrada nesta especialização.

Inicialmente é abordada a sua conceituação, discorrendo-se sobre sua aplicabilidade e importância em avaliações técnico-econômicas, como instrumento para definição de alternativas de beneficiamento, nas várias etapas de estudos visando pesquisa e desenvolvimento de uma jazida.

Ressalta-se o aspecto do conhecimento básico multidisciplinar envolvido para realização dos estudos, pois sendo um setor de interface, exige interação com outros segmentos profissionais. É tratada como um ramo da mineralogia aplicada, que se apoia no conhecimento geológico, e se volta para os aspectos de beneficiamento do minério.

A colocação conceitual é complementada pela apresentação de uma metodologia de estudos, que consolida uma experiência adquirida na caracterização dos mais variados bens minerais. Cuida-se da colocação de critérios para elaboração de roteiros operacionais, bem como a seleção de procedimentos de laboratório e de técnicas analíticas, fazendo-se indicação de bibliografia atualizada sobre estes, mas sem aprofundamento na sua discussão.

A abordagem metodológica é finalizada com concisa discussão sobre métodos computacionais aplicados na modelagem tridimensional de jazidas, e de programas integrados utilizados na área mineral.

Faz-se ilustração do tema pela apresentação de um estudo de caso sobre um minério complexo: o minério de nióbio associado a ocorrência alcalino-carbonatítica de Catalão I, Goiás. É exposta a metodologia aplicada, em seus detalhes operacionais e analíticos, dando-se particular ênfase ao tratamento e interpretação de resultados obtidos, tanto no âmbito da caracterização, como no contexto do aproveitamento econômico do depósito mineral.

É abordada apenas uma porção da área total do complexo de Catalão I mineralizada a nióbio, relativa a minério laterítico associado a altos teores de fósforo. E a caracterização foi realizada em apoio a estudos de viabilidade econômica, como base para a definição de alternativas de processo.

Os resultados foram avaliados no contexto geológico do corpo mineralizado, tendo sido possível estabelecer correlação entre os processos de mineralização e o comportamento tecnológico do minério, e a definição das reservas recuperáveis pelos processos correntes de beneficiamento.

A caracterização foi realizada por procedimentos tradicionais de preparação das amostras e separações minerais, com apoio de ensaios de flotação em escala de bancada, e recursos de microscopia óptica e difração de raios-X para identificações mineralógicas. Possibilitou verificar que o minério é bastante heterogêneo, mostrando variações de características químicas/físicas/mineralógicas, controladas por processos geológicos, as quais conduziram à definição de sete diferentes tipos mineralógicos de minério.

O comportamento dos diversos tipos de minério no processo de flotação aplicado industrialmente, foi bastante distinto, no que se refere à recuperação de nióbio e às especificações do concentrado. Dois tipos de material não responderam favoravelmente ao processo, sendo considerados não concentráveis à luz da tecnologia corrente. O agrupamento de materiais com resultados semelhantes no beneficiamento, conduziu à revisão da tipologia original, e o estabelecimento de três tipos tecnológicos de minério.

Procedeu-se, então, ao modelamento das reservas segundo os tipos tecnológicos de minério, com base nas suas características, utilizando recursos de computação com programas de modelamento tridimensional, ambiente de estação gráfica, definindo as reservas tecnológicas.

As reservas tecnológicas mostraram expressiva redução dos valores originais de reserva geológica, calculada com base nos teores de nióbio, fato crítico para a viabilização da exploração econômica do depósito mineral.

ABSTRACT

This thesis presents a contribution to the subject of ore technological characterization integrated to orebody context, regarding sampling, ore characteristics, ore types definition and distribution through the mineral occurrence, and ore reserves modeling using technological parameters.

A professional experience in this specialization based a conceptual discussion of the mater, supported by a practical approach.

The initial approach is the subject definition, and it's importance for technological and economical feasibility studies, in all phases of mining research and development, as a tool for beneficiation alternatives definition.

The multidisciplinary aspect of the knowledge involved for ore characterization is remarked, considering that is an interface segment to be conduced interactively with others. It is an applied mineralogy, that needs some geological and some ore dressing imputes.

After the general considerations about importance and applicability, it follows a methodological approach of laboratory procedures and analytical techniques, as a result of practical experience acquired in the study of several ores. The main points discussed are related with criterion to organized laboratory preparation scheme and to select appropriated analytical techniques, without detailing them, for what some specialized bibliography is indicated.

Finalizing the theoretical explanation, there is a concise description about computers resources for 3D orebody modeling, and integrated softwares applied for geology and mining.

For illustration, it is exposed a complex ore case study: niobium mineralization associated with the alkaline-carbonatitic occurrence of Catalão I, located in Goias State, Brazil. Besides the explanation of laboratory procedures and methods applied, results treatment and interpretation are emphasized, under both characterization and economic point of view.

The case study refers only to a portion of the Catalão I complex area containing niobium resources, in the form of lateritic ore associated to phosphate high grades, in a very deep weathered mantle.

Applied mineralogical studies in the niobium rich material are reported, as a support for ore dressing tests and beneficiation circuit definition, integrating a technique-economical feasibility evaluation.

The results were analyzed under the ore body geological setting, and was possible to establish a correlation between mineralization process and technological behavior, defining the ore reserves recoverable by current beneficiation process.

The mineralized material is not homogeneous in its chemical/physical/mineralogical characteristics, with a heterogeneity largely controlled by the geological process. By the characterization studies, with traditional techniques of mineral separation and mineralogical identification (optical microscopy / X-ray diffraction), combined with some flotation bench tests, it was possible to define several mineralogical types of ore, representing known compartments of the ore body, with distinct characteristics.

As a direct consequence of ore characteristics, the flotation behavior for the known industrial process was widely different, also in the niobium recovery and in the concentrate specifications.

From seven mineralogical ore mineralogical types preliminary established, three technological ore groups were achieved as a result of clustering of materials with the same beneficiation behavior. Two original types can not be considered as ore in the technological point of view.

The orebody was discriminated according with technological types, based on ore characteristics, and, using 3D modeling software for workstation, it was defined the technological reserve, or the reserve that can be adequately transformed in a commercially niobium concentrate product.

It was observed an important reduction of the original geological reserve, calculated by niobium grade basis, to the technological ore, a critical factor to the mining exploration economical feasibility.

1 - INTRODUÇÃO

Este documento trata da temática de caracterização tecnológica de minérios, se propondo à uma discussão de conceituações relativas ao assunto. O tema envolve, também, a caracterização de um depósito mineral.

A forma escolhida para expor o assunto, aborda inicialmente uma metodologia conceitual, seguida por uma exemplificação prática, relatando um estudo de um caso.

O trabalho inicia-se com a conceituação do tema, contendo também uma descrição dos aspectos envolvidos no estudo de diferentes tipos de bens minerais. Em seguida discorre-se sobre a importância da caracterização tecnológica de minérios, e sua adequação às diversas etapas envolvidas para identificação, desenvolvimento e exploração de uma jazida.

Após a parte conceitual, é feito um apanhado amplo da caracterização no que se refere a critérios de amostragem, procedimentos e técnicas laboratoriais.

Neste documento encontra-se compilado o conhecimento adquirido pela autora no estudo dos mais diversos minérios, em apoio às etapas de prospecção, pesquisa e exploração mineral. Procura-se, aqui, consolidar metodologias e procedimentos otimizados pela vivência prática, advindos da experiência acumulada no exercício de uma atividade profissional junto ao setor mineral, essencialmente aplicados à caracterização tecnológica de minérios.

O caso estudado, parte do depósito de nióbio de Catalão I, GO, foi desenvolvido em apoio a estudos de viabilidade técnico-econômica visando implantação de um empreendimento mineiro. São discutidos aspectos relativos a uma fase de detalhamento / complementação da pesquisa mineral no depósito, prévia à sua exploração industrial, na qual os dados de outras jazidas com o mesmo modelo de mineralização constituem-se em importantes informações de base para os estudos.

O minério estudado situa-se dentro da ocorrência de rochas ultramáficas-alcálicas, em área de direitos minerários pertencentes à GOIASFÉRTIL (GOIÁS FERTILIZANTES S/A), que, apesar da pesquisa geológica já realizada, não se encontra em exploração.

Por se tratar de matéria prima tipicamente complexa, o minério de nióbio apresenta-se como um estudo de caso bastante completo e interessante para uma abordagem metodológica de caracterização.

2 - OBJETIVOS

O objetivo prescípua desta tese é a discussão sobre a metodologia a ser adotada na caracterização tecnológica de matérias primas minerais, visando a racionalização das várias etapas e atividades envolvidas.

A princípio são fornecidas diretrizes gerais que tratam da adequação de objetivos e conseqüente definição do detalhamento da investigação, tendo em vista o tipo de bem mineral e a fase do empreendimento em que os estudos são realizados.

É finalidade do tema proposto, discutir uma metodologia sobre a caracterização tecnológica de minérios, voltada para procedimentos laboratoriais, no que tange a critérios para organização e escolha dos mesmos, com discussão sobre a sua abrangência e aplicabilidade. Não se propõe, porém, a detalhar nenhuma das ferramentas e técnicas usadas para os estudos das características do minério, principalmente àquelas aplicadas a segmentos de especializações, cuidando tão somente de indicar bibliografias atualizadas de cada uma delas.

Incluem-se nos objetivos a discussão da caracterização do minério voltada para o depósito mineral, no estudo da variação de suas características ao longo do corpo mineralizado, as quais interferem diretamente na forma de seu aproveitamento. Finalmente, conceitua-se o assunto, mostrando a interação dos aspectos geológicos do depósito e dos aspectos de beneficiamento / lavra do minério, e ressaltando a importância da introdução dos parâmetros tecnológicos na definição e conhecimento das reservas de minério.

No estudo de caso, procura-se exemplificar a abordagem global do tema da tese, bem como introduzir a sistemática de tratamento e interpretação de dados com vistas a gerar, de forma objetiva, informações para fins de aproveitamento do minério.

3 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS

A expressão caracterização tecnológica de um modo geral pressupõe um estudo dos recursos minerais, tendo em vista tecnologias usuais de processamento destes recursos.

Para minérios as aplicações tecnológicas se vinculam ao seu aproveitamento, e se reportam a dois segmentos tecnológicos distintos: um deles se refere às técnicas de exploração mineira ou lavra, e o outro se vincula às técnicas de beneficiamento / processamento ou de adequação para a indústria de transformação.

O primeiro segmento é fundamental para obtenção de qualquer recurso mineral, o segundo é importante em grande parte dos bens minerais, e imprescindível para significativa parcela deles.

A caracterização tecnológica para fins de atividades de lavra, desmonte e manuseio do material desmontado, trata essencialmente do levantamento de parâmetros geomecânicos / geotécnicos, campo de estudo da geotecnia ou geologia de engenharia.

A caracterização tecnológica para fins do beneficiamento, se volta à avaliação de parâmetros básicos do depósito relacionados às alternativas tecnológicas de tratamento de minérios, assim envolve o conhecimento do minério naqueles aspectos que nelas interferem, portanto, aspectos relativos aos seus componentes minerais, desde que o beneficiamento tem por objeto a separação dos constituintes minerais.

Internacionalmente, a caracterização do minério voltada para o processo recebe denominações como “ore-dressing mineralogy”, “process mineralogy”, “metallurgical mineralogy”¹, “technological mineralogy”² e “mineralurgie”³, constituindo-se em uma especialização da mineralogia aplicada.

O termo caracterização tecnológica de minérios tem sido aplicado no Brasil para denominar o estudo do minério para fins de beneficiamento, abrangendo tanto o estudo das características do minério, como o levantamento de índices tecnológicos.

O levantamento de índices tecnológicos, a partir de simulações apoiadas em parâmetros do minério ou por determinações específicas, trata-se de segmento estreitamente vinculado ao desenvolvimento de processo e, muitas vezes, funde-se com o mesmo.

O estudo das características do minério de relevância para o beneficiamento, constitui-se na temática abordada nesta tese.

3.1 - CONCEITUAÇÃO

Para conceituação do tema faz-se necessária uma explanação clara das terminologias que serão utilizadas, mesmo que possa ser redundante em alguns aspectos, especificamente os termos: minério, e depósito mineral e jazida.

O termo **minério** será aqui aplicado com o sentido amplo de materiais para os quais se vislumbra desenvolvimento de mina, não obrigatoriamente com viabilidade de aproveitamento econômico já comprovada. Esta terminologia, que engloba termos como materiais geológicos, minério potencial e matérias primas minerais, visa simplificar as conceituações sobre **caracterização de minérios**, mantendo-se fiel a uma expressão difundida na prática. Segundo os mesmos critérios, assume-se aqui a expressão **tipologia de minérios** incluindo-se como minérios aquilo que se reporta ao corpo mineralizado, sem necessariamente vinculação com o aspecto econômico.

Para os outros dois termos, mantém-se a terminologia clássica. Depósito mineral é compreendido como uma ocorrência mineral, que contém volume de material expressivo para o bem mineral em pauta, para a qual não se dispõe da confirmação de viabilidade técnico-econômica para exploração comercial, jazida passa a ser o depósito mineral comprovadamente viável de exploração econômica. A expressão **corpo mineralizado** é aplicada como sinônimo de ambos os termos.

A caracterização tecnológica de minérios em sua expressão mais básica, compreende o estudo das suas propriedades físicas, químicas, físico-químicas e mineralógicas, conduzido de forma objetiva e voltado para o aproveitamento industrial.

Está inserida no contexto das investigações tecnológicas para exploração do bem mineral, significando, em seu objetivo primário, etapa prévia aos estudos de concentração ou de processo propriamente ditos, visando avaliar recursos minerais como matéria prima para indústrias de transformação (metalúrgica, química, diversas), ou menos freqüentemente para aplicação direta.

Trata-se de um estudo orientado pelas exigências do processo, cujos objetivos e finalidades são definidos face às especificidades de cada situação. Este estudo é conduzido de forma a fornecer informações sobre as características do bem mineral correlacionando-as com o comportamento no beneficiamento, de forma a gerar dados para avaliar as possibilidades e condições de adequação do minério às especificações desejadas. O conhecimento do minério permite melhor direcionamento do processo, bem como indica a qualidade esperada dos produtos, orientando para as aplicações industriais possíveis.

Além da interação com os conceitos básicos de tratamento de minérios, o estudo de caracterização se norteia também pelos requisitos das aplicações que utilizam o produto mineral, na medida que estes definem a qualidade necessária deste insumo, balizando o beneficiamento a ser aplicado^{1,2,4}.

Sendo realizada em escala de laboratório, utiliza técnicas e análises tradicionais de mineralogia, devidamente associadas a técnicas de beneficiamento, ou mesmo ensaios tecnológicos específicos, em escala de bancada. As amostras utilizadas são normalmente pequenas, com massas variáveis de centenas de gramas a dezenas de quilos, em função das características do material em estudo, podendo em casos extremos utilizar centenas de quilos.

Destaca-se como um estudo que, além de possibilitar a definição de metas para o aproveitamento do bem mineral, promove sensível redução de prazos e custos na fase de desenvolvimento de processo. Conjugando agilidade decorrente da escala de trabalho, e nível de conhecimento fornecido sobre a matéria prima, constitui-se em ferramenta imprescindível para a avaliação, exploração e utilização adequadas de um recurso mineral.

A caracterização tecnológica em seu objetivo mais amplo, *sensu lato*, integra a pesquisa com o beneficiamento mineral, muitas vezes também com a metalurgia. Sendo idealmente desenvolvida de forma conjugada, com interrelações e interdependências dos três segmentos de especialização, possibilita ampliação do conhecimento sobre o minério, agregando informações de cunho geológico e tecnológico, e fornece importantes subsídios para sua exploração econômica^{1,2,4,5,6}.

Inclui-se no âmbito da caracterização, o estudo da variação das características do minério ao longo do corpo mineralizado, com vistas ao reconhecimento de tipos com comportamento tecnológico distinto, bem como à verificação de sua distribuição no depósito mineral, o que se constitui na etapa de caracterização tecnológica voltada para conhecimento do corpo mineralizado^{1,6}.

A variabilidade dessas características ao longo do corpo de minério, e as decorrentes implicações no processo de beneficiamento, geram o conceito de tipologia do minério, ou variedades com comportamento diferenciado nas alternativas tecnológicas de processo, que deve ser devidamente considerado nas etapas de modelagem / parametrização das reservas, plano de aproveitamento econômico e planejamento operacional de uma mina.

A caracterização voltada para o conhecimento do corpo mineralizado, também conhecida no Brasil como Geometalurgia⁷, é consolidada com o modelamento do depósito utilizando os parâmetros tecnológicos de processo para definir o que se denomina de **reserva tecnológica**. Esta última significa a reserva de minério para a qual existem condições tecnológicas ideais de aproveitamento, sendo uma evolução do conceito da reserva geológica baseada em um modelo definido apenas a partir dos teores do minério.

3.2 - ADEQUAÇÃO DE PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

Os recursos usados para a caracterização são extremamente variados, constituindo-se a sua escolha / programação adequadas a base de um estudo criterioso e objetivo, cuja meta é o fornecimento de resultados necessários atendendo ao compromisso custo-benefício.

Os procedimentos aplicados na investigação dependem do bem mineral a ser estudado e do porte do corpo mineralizado, sendo que eles são condicionados pelos modelos de mineralização, e seu planejamento requer algum conhecimento básico de geologia econômica.

Por outro lado, é essencial o conhecimento de fundamentos dos processos usuais de beneficiamento do minério em questão, para o adequado direcionamento dos estudos de caracterização, visando obter os parâmetros críticos para seu processamento. Em alguns casos, tornam-se também necessárias noções incipientes dos processos de extração / transformação do produto mineral, para o devido equacionamento da questão tecnológica.

Avaliando-se a caracterização tecnológica sob a ótica de modelos de mineralização, é possível esboçar algumas generalizações quanto a complexidade / nível de detalhamento exigido, e também quanto a procedimentos e métodos da caracterização tecnológica, embora peculiaridades de cada minério requeiram detalhes específicos de procedimentos.

A complexidade dos estudos está estreitamente relacionada com a complexidade da mineralização, ou dos processos mineralizantes.

Mineralizações primárias associadas a rochas, via de regra, pressupõem caracterização mais detalhada, exigindo procedimentos mais elaborados, enquanto as mineralizações residuais podem apresentar média a baixa complexidade de estudos, já as aluvionares, na outra ponta, necessitam de estudos mais simplificados.

As mineralizações associadas a processos de intemperismo, com concentrações residuais somadas a neoformação de minerais, particularmente aquelas associadas a complexos alcalinos, costumam se destacar como mineralizações complexas, e seu estudo envolve procedimentos e métodos próprios, requerendo familiaridade com o assunto. O estudo de caso exposto nesta tese, é um exemplo típico desta categoria de mineralizações.

Em uma outra aproximação, mais ampla e que se prende basicamente a aspectos tecnológicos, a complexidade dos procedimentos usados na caracterização é diretamente proporcional à distância entre a qualidade do material *in natura* e a qualidade do produto desejado, ou o grau de pureza necessário neste produto e a flexibilidade das especificações. Numa abordagem prática simplificada, esta distância aquilata a extensão do beneficiamento a ser aplicado para adequar o produto mineral.

Assim, minérios de teores muito baixos, da ordem de partes por milhão, como é o caso de minérios de ouro, necessitam de procedimentos de caracterização minuciosos, via de regra complementados por ensaios de tratamento físico ou mesmo metalúrgico, os quais se justificam dentro do contexto econômico deste bem mineral. Este também é o caso de muitos minérios de metais preciosos, de urânio e de alguns metais menores (Mo, Sb, Co, Ga, Cd).

Minérios com teores baixos, da ordem de centésimos de a poucos por cento, costumam ter complexidade de estudos similar aos supra referidos, e que se multiplica quando da investigação conjunta de sub-produtos associados. Tratam-se usualmente de estudos minuciosos, desenvolvidos em íntima correlação com ensaios de beneficiamento e, menos freqüentemente, de tratamento metalúrgico. Tipicamente enquadram-se nesta categoria os

minérios polimetálicos, minérios de elementos de terras raras e minérios de metais base (Zn, Pb, Ni, Cu, Sn) e metais menores (Li, Be, V, W, Bi, Ta). Minérios de nióbio, como do estudo de caso, incluem-se neste tipo.

Minérios de teores da ordem de dezena de por cento, possibilitam uma investigação menos elaborada, sempre função das especificações almejadas, a qual poucas vezes necessita complementação por ensaios de beneficiamento. Encontram-se dentro desta categoria minérios de ferro de baixo teor e significativa parcela dos bens minerais industriais.

Bens minerais cuja exploração econômica pressupõe que os teores na jazida já sejam apropriados para a indústria de aplicação, com pouco ou nenhum processamento, costumam ter como caracterização tecnológica apenas a determinação de sua composição química, por vezes a granulometria, que são os parâmetros críticos para seu aproveitamento. Incluem-se nesta categoria, os calcários para fabricação de cimento, cal e para uso como corretivo de solos, minérios de ferro de alto teor, de alumínio, e de manganês.

É prática comum, para muitos bens minerais industriais, complementar-se o estudo de propriedades do minério com ensaios tecnológicos específicos e, por vezes padronizados por associações de normatização de procedimentos (nacionais ou estrangeiras), como por exemplo nos insumos de aplicação na indústria cerâmica em geral, e mesmo nos materiais de aplicação direta na construção civil. Nestes casos há maior flexibilidade de especificações pela maior adaptabilidade do processo de transformação, havendo maior preocupação com o desempenho na aplicação do que com a qualidade do produto mineral, fato que minimiza a necessidade de investigações sobre as características do minério.

Minérios de alto teor, cuja aplicação requer alto grau de pureza no produto mineral, têm sua investigação voltada para os menores constituintes deletérios, seu estudo se assemelha aos minérios com teores muito baixos, e os procedimentos serão tão extensivos quanto maior o grau de pureza desejado, sendo que em casos extremos é igual à problemática para metais preciosos. Citam-se, nesta categoria, areias industriais para aplicação na indústria de vidro / eletrônica / ótica, caulim para papel, zircão para cerâmica.

Finalmente, destaca-se que a caracterização de materiais finamente particulados, com grãos de dimensões micrométricas, é de alta complexidade por requerer procedimentos e métodos específicos, e, da mesma forma que o beneficiamento de ultrafinos, trata-se de um segmento com metodologias e operações peculiares.

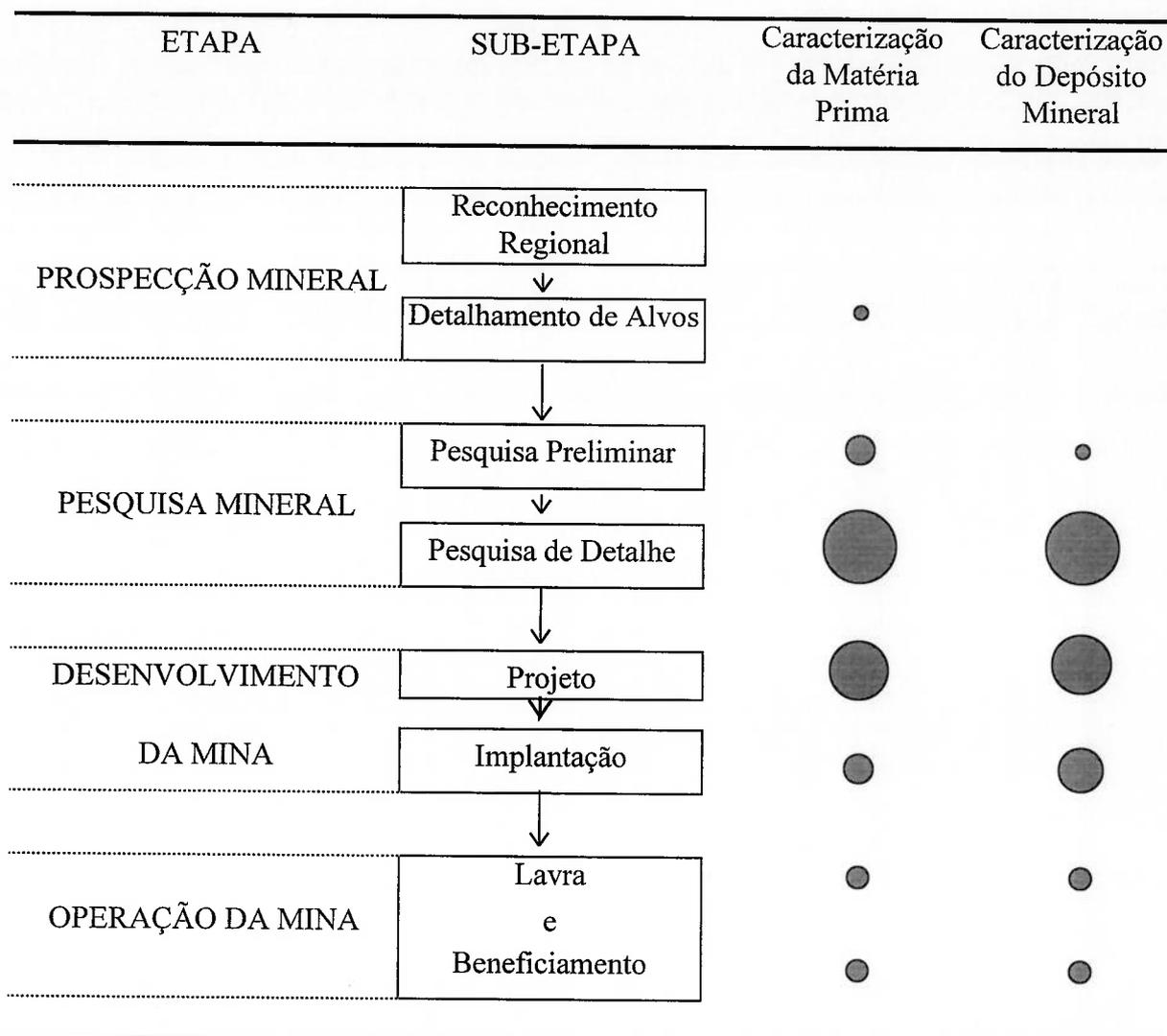
3.3 - APLICAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A caracterização constitui-se em ferramenta extremamente útil nos diferentes estágios de desenvolvimento de um empreendimento mineiro.

Aplica-se desde as etapas iniciais de descoberta da mineralização em apoio às atividades de prospecção, durante o estudo e equacionamento das reservas de minério nas atividades de pesquisa fornecendo subsídios para o projeto e planejamento de implantação de uma mina, e, no acompanhamento da operação industrial de exploração mineira, para otimização de processos e produtos. A intensidade relativa de aplicação da caracterização tecnológica nas diversas etapas, está ilustrada de forma genérica e esquemática no quadro da figura 3.3.1.

O detalhamento dos estudos é, então, modulado pela fase do empreendimento na qual são efetuados, como decorrência do nível de conhecimento do depósito mineral e do acesso físico a este depósito, ou a amostragem, mantendo o propósito de um estudo criterioso, com a meta de atender ao compromisso custo-benefício. Em cada etapa, os objetivos ou as informações que se deseja obter na caracterização são compatíveis com o grau de aproximação da investigação geológica / econômica realizada, os quais moldam o próprio desenvolvimento dos estudos de caracterização.

A caracterização tem maior aplicação, em termos de volume de trabalho, nas fases de pesquisa mineral de detalhe e planejamento do empreendimento mineiro, quando são definidas as tecnologias a serem empregadas para exploração da jazida. Durante a exploração da mina cresce em importância o estudo dos produtos da usina de beneficiamento.



● - intensidade relativa de aplicação

FIGURA 3.3.1
APLICAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA
NAS DIVERSAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE UMA MINA

3.3.1 - Caracterização nas Etapas de Prospecção e Pesquisa Mineral

Durante a prospecção mineral, na qual tipicamente é feito o reconhecimento preliminar de ocorrências minerais, é de extrema valia a realização de investigações tecnológicas em mineralizações detectadas nos trabalhos de campo, em complementação e apoio a estes, e numa extensão das análises químicas ou determinação de teores. Ressalta-se que enquanto estas últimas, face ao seu relativamente baixo custo e rapidez de resposta, podem ser extensivamente utilizadas em fases de alto risco como a prospecção, deve haver maior critério na realização de estudos de caracterização.

A caracterização nesta fase, é realizada sobre poucas amostras, criteriosamente escolhidas, e têm por objetivo fornecer dados básicos sobre a qualidade do minério potencial, para orientação dos trabalhos de pesquisa, quanto aos aspectos geológicos, e, principalmente, ponderando aspectos econômicos^{1,6}.

A determinação das características mineralógicas do minério e das associações minerais, provê subsídios para estabelecimento do modelo de mineralização, os quais, em função de características geológicas e mineralógicas comuns, podem ser classificados segundo tipos tecnológicos², aliando ao conceito de tipologia geológica, o de tipologia tecnológica de modelos de depósito.

Nesta fase de prospecção, os estudos de caracterização devem cuidar de gerar informações que possibilitem uma primeira aproximação da questão tecnológica, sem se preocupar com detalhamento de parâmetros.

A caracterização deve se voltar para a verificação de características que se mostram críticas no beneficiamento de minérios similares, e, se possível, avaliar e comparar tais comportamentos. O conhecimento adquirido na caracterização pode agilizar a prospecção na medida que acrescenta parâmetros sobre o material, alertando para as dificuldades tecnológicas esperadas para seu aproveitamento⁶.

Da mesma forma, pode-se evitar desperdício de esforços e recursos na investigação geológica de ocorrências cujo modelo de mineralização apresenta conhecida limitação tecnológica para viabilização de exploração econômica, abandonando-as ou dividindo esforços com investigações tecnológicas, se os aspectos econômicos da ocorrência mineral, quanto a teores e/ou volumes, forem suficientemente promissores para justificar desenvolvimento de novas tecnologias.

A pesquisa geológica, por sua vez, tem objetivos voltados para detalhamento de uma ocorrência, gerando o conhecimento necessário para delimitação física do depósito mineral, quantificação quanto ao conteúdo do(s) elemento(s) de interesse, e, equacionamento dos aspectos tecnológicos, quanto à lavra e o beneficiamento, e econômicos envolvidos para seu aproveitamento. Nesta fase torna-se, portanto, fundamental a realização de estudos de caracterização do minério potencial, com vistas à verificação das questões envolvidas para seu beneficiamento.

Idealmente, dependendo do porte do corpo mineralizado, a pesquisa mineral é desenvolvida em duas etapas: uma preliminar, para visualização global, com estimativa das reservas e uma primeira avaliação econômica; e outra mais detalhada, de detalhamento das investigações, tanto geológicas quanto tecnológicas, com vistas a obter maior precisão nas informações geradas na primeira etapa, para definição de um plano de aproveitamento econômico da jazida ^{5,8,9}.

Na etapa preliminar da pesquisa, a caracterização tecnológica fornece parâmetros para definição de alternativas de beneficiamento, com apoio de informações / índices de minérios similares, e, ocasionalmente, realização de ensaios exploratórios de concentração mineral. A definição de alternativas de processo, com estimação de parâmetros, é, então, feita a partir dos dados obtidos nos estudos de caracterização, cujo detalhamento é o necessário para fornecer tais parâmetros, sendo, portanto, essencial a integração com o beneficiamento.

Na fase de detalhamento da pesquisa intensificam-se as investigações tanto geológicas como tecnológicas, buscando maior precisão dos parâmetros econômicos preliminarmente levantados, e estudos de caracterização são realizados de forma extensiva, numa abordagem de avaliação prévia para definir amostras adequadas e auxiliar o desenvolvimento de processo de concentração.

A caracterização, nesta fase, interage com o beneficiamento, em apoio ao desenvolvimento deste, na investigação de produtos, avaliação da qualidade esperada de concentrados e sua adequação às especificações da indústria. Os dados obtidos no estudo de produtos são ferramenta auxiliar para controle e otimização dos ensaios de beneficiamento, seja em escala de bancada, seja em escala de usina piloto¹.

Destaca-se que, por maiores que sejam as similaridades observadas com materiais conhecidos, cada minério possui sua identidade única, requerendo adaptações maiores ou menores de processos existentes, ou até exigindo tecnologias especificamente desenvolvidas, para o que se faz fundamental o conhecimento de suas características.

Para alguns casos, envolvendo minérios para os quais a correlação entre as características / parâmetros e o comportamento no processo de beneficiamento é bem conhecida, não se mostra necessária a etapa de desenvolvimento de processo, e os resultados da caracterização servem de base para projeto e implantação da usina de beneficiamento.

Incluem-se aqui o carvão, e muitos casos de minérios de ouro, com exemplos brasileiros de sucesso reportados em literatura ¹⁰.

A partir da delimitação do corpo mineralizado, passa a ter importância o estudo da variabilidade das características ou parâmetros tecnológicos, para determinação da tipologia do minério e a sua distribuição no depósito mineral.

Considerando que a variação dos atributos de um material ao longo de uma ocorrência / depósito / jazida mineral, é consequência dos processos geológicos que geraram a mineralização, quando a caracterização se volta para o estudo do corpo mineralizado, ela interage com o modelo da mineralização, relacionando-se estreitamente com a pesquisa mineral. Vinculação que se estabelece como um fluxo contínuo de dados, tanto da caracterização balizando a pesquisa, como no sentido contrário.

A caracterização voltada para o conhecimento do corpo mineralizado fornece as reservas tecnológicas, e, através da introdução de parâmetros tecnológicos na quantificação das reservas de minério, possibilita a parametrização das reservas segundo tipos tecnológicos de minério, introduzindo conceitos fundamentais para o adequado planejamento de lavra.

Cabe mencionar que o conhecimento sobre o comportamento tecnológico do minério adquirido durante a pesquisa, por mais extensivo e criterioso, reporta-se a material que provém de escavações de pesquisa, e, portanto, tem a mesma representatividade que elas e poucas vezes consegue esgotar o assunto. À medida que se processa a exploração de uma jazida, novas informações são obtidas pelo maior acesso ao minério, podendo evidenciar aspectos não detectados na fase de pesquisa, que interferem significativamente no processo, inclusive provocando necessidade de alterações na linha de beneficiamento.

Nesta etapa de pesquisa, os estudos tecnológicos devem ser conduzidos de forma a detectar os tipos tecnológicos volumetricamente mais expressivos no corpo mineralizado, e as características do minério que interferem no beneficiamento, os quais precisarão ser acompanhadas durante a exploração mineira. São, então, estabelecidos os critérios, em termos de procedimentos e análises, para caracterização do minério no decorrer da vida da jazida, visando determinar, de forma sistemática, os parâmetros críticos para o processo.

3.3.2 - Caracterização nas Etapas de Projeto e Implantação de um Empreendimento Mineiro

Durante o projeto do empreendimento mineiro, os estudos geológicos bem como os tecnológicos são conduzidos no sentido de investigar materiais que não tenham sido amostrados e avaliados na pesquisa de detalhe.

É um período de detalhamento de informações, onde são realizadas escavações que permitem maior acesso físico ao minério, e são estendidos trabalhos em áreas que tenham se mostrado mais problemáticas. O objetivo é obter maior precisão de dados para o planejamento da lavra, sendo que, em muitos casos, desenvolve-se uma pré-lavra.

A caracterização acompanha o aprimoramento das investigações na jazida, investigando novas amostras, atualizando e aprimorando a distribuição dos tipos de minério ao longo do corpo mineralizado.

Para minérios com beneficiamento e/ou processos de transformação complexos, com muitas operações envolvidas, o desenvolvimento tecnológico, na forma de ensaios contínuos em escala piloto ou semi-industrial, estende-se durante o período inicial de projeto do empreendimento, situação característica quando o acesso físico é mais restrito nas fases de pesquisa, como para minérios não aflorantes a serem explorados por minas subterrâneas.

É de fundamental importância o papel da caracterização em produtos concentrados e rejeitos dos ensaios realizados, visando fornecer subsídios para melhor desempenho dos mesmos. Tais situações propiciam o aprofundamento do desenvolvimento tecnológico, buscando melhor aproximação da correlação de parâmetros do minério com comportamento no processo.

Cumprido destacar que, em função do tipo de bem mineral, porte do corpo mineralizado, e filosofia empresarial de abordagem da questão, a pesquisa de detalhe é realizada durante o projeto e planejamento para implantação do empreendimento, após uma decisão de investir recursos na exploração da jazida. São exemplos minérios de ouro, bens minerais industriais de aplicação na construção civil, argilas de aplicação na indústria cerâmica, dentre outros.

3.3.3 - Caracterização no Acompanhamento da Operação de uma Mina

Durante a exploração da mina, a caracterização tem dois objetos distintos: o minério e os produtos da usina de beneficiamento.

A caracterização do minério é extensivamente apoiada nos ensaios / roteiro padronizados especificamente definidos na fase de desenvolvimento da mina, confrontando-se os novos dados com os gerados anteriormente. Investigações mais detalhadas são realizadas apenas em minérios que apresentem comportamentos anômalos, e/ou novos tipos de minério não detectados nas fases de pesquisa.

O estudo do minério vai tornando-se menos crítico à medida que aumenta o conhecimento sobre o corpo mineralizado, e o comportamento do minério frente ao processo de beneficiamento.

Pode-se dividir os estudos do minério em dois segmentos distintos, intrinsecamente vinculados, quanto à procedências de amostras e objetivos: amostras de frentes de lavra, e amostras de alimentação da unidade de beneficiamento. O primeiro se volta à variabilidade da jazida e tem por objetivo apoiar o planejamento de lavra; o outro se volta para o desempenho do processo de tratamento e tem por finalidade fornecer subsídios para a otimização deste.

As investigações com amostras de frente de lavra têm por finalidade verificar as variações da qualidade do minério com o aumento da escala de amostragem, bem como correlacioná-las com a modificação da escavação realizada na coleta, ou seja escavações de pesquisa *versus* aberturas de lavra.

Através da caracterização de amostras de frentes de lavra, obtêm-se dados para otimização do modelo de tipologia previamente estabelecido, tanto na revisão da definição dos tipos de minério como na sua distribuição na jazida.

O estudo de amostras da alimentação da usina de concentração tem por objetivo um detalhamento dos parâmetros do minério, enfocando aqueles que se mostraram relevantes nos estudos prévios, escala de laboratório ou usinas piloto / protótipo. A finalidade é correlacionar as informações geradas na caracterização dos produtos da usina, e as variações da qualidade do minério, com base nas variações de resultados do beneficiamento.

A caracterização da alimentação da usina confunde-se com a da frente de lavra, nas situações em que apenas uma frente gera minério para a unidade de beneficiamento, usual em jazidas de pequeno / médio porte e/ou determinados métodos de lavra subterrânea.

Durante a operação da mina tornam-se essenciais os estudos de caracterização em produtos da usina, com vistas a fornecer subsídios para o aprimoramento do circuito de beneficiamento. Este estudos permitem aferir parâmetros que estão interferindo no beneficiamento, e muitas vezes evidenciam parâmetros adicionais de relevância aos já conhecidos, fornecendo dados para revisão da tipologia de minérios, simplificando-a ou não, num processo de retroalimentação de informações.

É freqüente, com minérios complexos, verificar-se que a tipologia estabelecida antes da operação da mina, representa apenas um esboço amplo da variabilidade do minério, o qual se mostra insuficiente ou até inadequado no acompanhamento da exploração da mina, necessitando de detalhamentos e ajustes.

Assim, na fase inicial de operação da mina é bastante importante o estudo dos produtos da usina, com vistas a fornecer dados de apoio para equilibrar e tornar estável a operação, a fim de se atingir o desempenho preconizado para a operação.

À medida que a operação se torne estável e que se obtenha maximização dos índices de recuperação na usina, diminui a necessidade de detalhamento das propriedades dos produtos nela gerados, a não ser quando ocorrem mudanças de tipo de minério na alimentação da usina, ou se deseja introduzir novas tecnologias de processamento.

3.4 - HISTÓRICO

A especialização em caracterização tecnológica de minérios surgiu no final da década de 60, desenvolvendo-se principalmente a nível interno de empresas de mineração. Veio a ter um grande impulso e divulgação nos anos 80, sendo atualmente consagrada a nível mundial.

Durante quase toda a década de 70, embora existam notícias da realização de trabalhos de caracterização em apoio a operações mineiras, as publicações técnicas ficaram pulverizadas em segmentos específicos de bens minerais ou técnicas de análises, ou mesmo junto ao setor de tratamento de minérios.

Apenas no final do período surgiram organizações internacionais que agregaram os especialistas da área e passaram a promover fóruns de debate e divulgação de trabalhos realizados, contribuindo significativamente para impulsionar o setor ¹¹. Atualmente é abundante a literatura sobre o assunto, tanto avulsa, em publicações de trabalhos apresentados em encontros/simpósios/congressos especializados, bem como de outros segmentos afins.

Saliente-se que embora esta literatura seja abundante, por se tratar de uma especialidade de interface, ela encontra-se pulverizada, não havendo ainda qualquer periódico ou revista dedicada à caracterização tecnológica.

Como uma especialização relativamente recente, vem ganhando espaço nos setores mineral e de transformação das minérios, com o objetivo de melhoria e adequação das operações unitárias de beneficiamento e da qualidade do produto final, bem como a agregação de valor através da utilização em finalidades mais nobres.

O desenvolvimento desta área no Brasil acompanhou o panorama mundial, sendo conduzida nos seus primórdios, que datam de 1969, no Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica. Uma reduzida equipe, integrada pela então recém formada autora desta tese, dava origem a um segmento de mineralogia aplicada trabalhando junto ao grupo de tratamento de minérios, que em curto prazo evoluiu para a especialização de caracterização tecnológica com seu conceito atual.

Neste período, almejava-se o aproveitamento dos recursos minerais associados a intrusões alcalinas, caracterizados por uma assembléia mineralógica complexa e até então desconhecida, particularmente exigindo conhecimento das suas características. Neste contexto, iniciaram-se os estudos de caracterização tecnológica, de uma forma ainda primária e tentativa, os quais, na investigação destes materiais, evoluíram na sua abordagem e nos seus procedimentos.

A partir da atuação deste núcleo, esta especialidade expandiu-se para as demais Universidades e desenvolveu-se principalmente nas empresas de mineração, com significativos frutos econômicos e de avanço tecnológico.

Destaca-se a iniciativa dos Professores Geraldo Conrado Melcher, José do Valle Nogueira Filho e Paulo Abib Andery na introdução dessa especialidade no estudo de uma quantidade expressiva de empreendimentos mineiros implantados no país na década de setenta, acompanhando o grande desenvolvimento ocorrido no setor mineral.

As informações geradas permaneceram, durante toda a década, nos arquivos das empresas, sendo que as primeiras publicações nacionais sobre o assunto datam de 1980^{8,9}, e se referem exatamente a mineralizações associadas a complexos alcalino-carbonatíticos.

Tem sido pouco freqüente a aplicação da caracterização tecnológica na fase de prospecção mineral. Embora estudos do minério nos seus aspectos mineralógicos e petrológicos sejam bastante difundidos, raras vezes eles são vinculados a questões tecnológicas visando aproveitamento econômico.

Durante a pesquisa geológica, na realidade brasileira, tem havido uma aplicação mais intensiva da caracterização, porém, via de regra, realizada posteriormente e de uma forma desvinculada do desenvolvimento da própria pesquisa, o que acarreta em significativa perda de benefícios técnicos e econômicos advindos de um trabalho integrado.

A caracterização tecnológica de minérios aplicada ao tratamento de minérios, em empreendimentos já em operação, vem apresentando um desenvolvimento contínuo e crescente no país, pela necessidade de melhorar o nível de conhecimento dos recursos minerais em exploração, visando a maximização de seu aproveitamento, bem como o desenvolvimento de novos produtos e subprodutos. Na otimização de processos, tanto de tratamento mineral como de transformação da minério, a caracterização tem se mostrado de extrema valia, fornecendo subsídios para alterações de circuitos industriais em processos consagrados, bem como fundamentando a introdução de novas tecnologias.

É ainda incipiente, mesmo a nível mundial, a prática da caracterização tecnológica do corpo mineralizado, principalmente com o enfoque de sua associação com os controles da mineralização, durante a pesquisa e na fase de detalhamento para implantação de uma mina. Sua aplicação normalmente tem ocorrido apenas em casos extremos, sendo implantada só tardiamente em uma fase avançada de exploração da mina, em caráter de remediação, após a constatação de problemas no beneficiamento/qualidade dos produtos finais, provocando prejuízos ou mesmo inviabilizando as operações mineiras.

4 - AMOSTRAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS

A caracterização idealmente deve se iniciar na coleta das amostras para estudos, senão na execução pelo menos uma participação no planejamento da mesma, de forma a introduzir conhecimentos da problemática tecnológica na seleção de amostras.

Considerando-se que a utilidade de qualquer estudo do minério é dependente da qualidade da(s) amostra(s) sobre a(s) qual(is) ele for realizado, particular atenção deve ser dada a possível inadequação da(s) mesma(s). As fontes de enfiamento, além dos erros operacionais ou de manuseio, se reportam a três aspectos principais, que podem ser evitados por um planejamento criterioso da amostragem, são eles:

- critérios de seleção de amostras;
- forma de coleta das amostras;
- volume representativo de amostras.

Será aqui feita uma introdução orientativa das precauções na amostragem, no que tange aos critérios de seleção e quanto ao volume de amostras a ser tomado, questões que interferem diretamente na qualidade e aplicabilidade dos resultados da caracterização.

A amostragem de um depósito mineral envolve questões de seleção e forma de coleta, distintas daquelas relativas à amostragem de uma usina de beneficiamento, e converge com esta nos aspectos relativos a volume de amostra.

Os critérios de seleção das amostras no depósito mineral se vinculam a fatores envolvidos nos controles da mineralização, e serão abordados na seqüência de uma forma orientativa para o planejamento criterioso de amostragem, sem aprofundar-se nestes fatores.

A tomada de amostras em usinas de beneficiamento deve atender aos mesmos critérios de sequenciamento de amostragem adotados para determinação de teores em pontos / produtos da usina, e a seleção destes pontos é função de investigações de processo, não estando sua abordagem aqui.

A forma de coleta de amostras deve atender aos requisitos dos dois outros aspectos mencionados, sendo função de questões práticas operacionais de acesso ao ponto de amostragem e recursos disponíveis de equipamentos, e sua discussão extrapola a abordagem conceitual deste trabalho.

Volumes de amostras para atingir representatividade satisfatória, são basicamente função de características do minério, da ordem de grandeza de teores e da granulometria de liberação do mineral útil ^{13,14,15}, conforme extensamente equacionado nas teorias de amostragem. Este assunto inclui-se na problemática da amostragem de materiais particulados, ou da tomada de amostras adequadas / representativas em massas relativamente pequenas, a partir de um todo heterogêneo, objeto de uma especialização ^{13,14} dentro da Engenharia Mineral.

4.1 - Critérios de Seleção de Amostras

A amostragem para caracterização do minério está vinculada à etapa de desenvolvimento de uma mina em que os estudos são realizados, aos aspectos de nível de conhecimento existente sobre a ocorrência mineralizada, e acesso físico a esta ocorrência ou escavações de pesquisa disponíveis, sendo também função dos objetivos dos estudos.

Portanto, conceitos e critérios distintos para esta amostragem estão envolvidos nas fases de prospecção / pesquisa mineral e nas de implantação e acompanhamento do empreendimento mineiro.

Considerando-se que a caracterização nas fases de prospecção / pesquisa é instrumento fundamental na definição de metas tecnológicas para o aproveitamento do bem mineral, e para decisões técnico-econômicas, particular cuidado deve ser tomado na amostragem. Face a aspectos de custos / prazos, os estudos são realizados em um número muito restrito de amostras, e qualquer enfiamento da(s) amostra(s) pode levar ao comprometimento da viabilidade econômica de exploração da ocorrência mineral.

Nas fases de prospecção e pesquisa, são normalmente estudadas uma ou poucas amostras, e o material a ser caracterizado deve ter representatividade adequada e conhecida na ocorrência mineralizada.

A seleção de amostras deverá tomar por base as feições mais comuns presentes na ocorrência, identificadas por observações interpretativas do minério e com base em análises químicas, evitando-se, ou individualizando-se em amostras separadas, porções mais anômalas

ou atípicas detectadas. A idéia básica é gerar amostra(s) que contenha(m) as características mais gerais e típicas do corpo mineralizado como um todo.

Os recursos disponíveis para a descrição interpretativa costumam estar centrados em observações macroscópicas, à vista desarmada e com lupa de mão, ou, menos freqüentemente, microscópicas com aplicação de microscópios estereoscópicos. Métodos complementares, empíricos ou não, são utilizados para casos específicos ou tipos específicos de bem minerais.

Os critérios a serem adotados nesta descrição, a qual assume papel relevante na diferenciação de tipos de materiais, incluem os critérios geológicos tradicionais com destaque de características que tem se mostrado como parâmetros determinantes de comportamento no beneficiamento, tanto em geral como especificamente para o bem mineral e o modelo de mineralização em questão.

Pressupõe-se, portanto, estreita interação com os estudos geológicos do depósito mineral, e com os aspectos de beneficiamento possivelmente envolvidos no aproveitamento do bem mineral em questão, seja a nível de informações bibliográficas ou, preferencialmente, em um estudo integrado com os dois segmentos de especialização.

Destacam-se, a seguir, características de minérios detectáveis na descrição interpretativa, que normalmente se constituem em, ou indicam, parâmetros do minério correlacionáveis com seu comportamento no beneficiamento:

- estado de agregação e friabilidade;
- cor e grau de alteração hidrotermal / supérgena;
- textura, cristalinidade e dimensões dos grãos / minerais componentes;
- mineralogia básica: quantidade de magnéticos, micáceos, argilo-minerais, carbonatos.

Análises químicas fornecem importante, e muitas vezes imprescindível, apoio para a seleção de amostras para caracterização, desde que refletem variações da composição mineralógica do minério. Neste sentido é fundamental que as amostras de escavações de pesquisa, de qualquer tipo, sejam sistematicamente analisadas para um elenco de elementos pertinentes ao tipo de mineralização em estudo, e não apenas para o(s) elemento(s) de interesse. A orientação sobre quais dosagens químicas a serem realizadas, deve ser buscada na literatura especializada e em minas em operação para minérios / jazidas similares.

Nas fases de desenvolvimento da mina, tanto durante a implantação do empreendimento como na exploração da mina, é maior o conhecimento sobre o minério e dos parâmetros são críticos para seu beneficiamento. Desta forma a seleção dos locais de amostragem / amostras para estudos detalhados de caracterização pode ser realizada de forma mais objetiva, considerando aspectos dos processos e do método de lavra.

A finalidade deste detalhamento por um lado se associa a otimizações de tipologia e modelagem da jazida, e os critérios de seleção de amostras se reportam à complementação / aferições de informações em áreas / tipos de materiais não amostradas anteriormente.

Por outro lado deve cuidar da interação dos método / planejamento de lavra com o beneficiamento, no que se refere a incorporação ao minério de material estéril e suas implicações no processo, caso em que é fundamental a caracterização deste material. Muitas vezes porções do minério com teores marginais podem portar características diversas, comprometendo o desempenho no processo quando incorporados à alimentação de uma usina, e devem também ser investigados.

Paralelamente a algum estudo detalhado, o levantamento sistemático de parâmetros tecnológicos, através de análises / caracterização expedita / ensaios padronizados definidos nos estudos preliminares, deve ser desenvolvido em amostras tomadas ao longo de todo o corpo de minério. A seleção, neste caso, é da densidade de amostragem e do tipo de amostra utilizada: de escavações de pesquisa (furos de sondagem, poços ou outras) ou de frente de lavra (amostras de canaletas ou volumétricas), se amostras compostas ou individuais.

4.2 - Tipos de Amostras

Considera-se que o material a ser estudado deve ter uma representatividade, no mínimo, compatível com a escala de lavra, para ter significância visando exploração mineira. Neste sentido, é usual a composição de amostras de minério, quando estas são obtidas em escavações de pesquisa.

O conceito de amostra representativa está relacionado com a tomada de material ao longo da extensão do universo a ser amostrado, realizável através de coleta de amostras

segundo uma malha regular de pontos, ou extração de todo o universo, alternativa descartada num depósito mineral ou jazida.

A utilização de uma amostra média, representativa de todo o corpo mineralizado, para estudos tecnológicos, sejam de caracterização sejam de desenvolvimento de processo, **deve ser evitada**, embora se trate de uma prática algo difundida. A mistura de diferentes materiais gera um minério híbrido e irreal, com características mistas e um comportamento no processo não necessariamente compatível com os tipos de minérios existentes, o qual pode não reproduzir material lavrado e de alimentação de uma usina de beneficiamento.

Idealmente procura-se a obtenção de amostras representativas de tipos de minérios, diferenciados pelas características observadas nas descrições interpretativas.

Em casos da inviabilidade de obtenção de amostras representativas, pelo nível de conhecimento e acesso aos ocorrência / depósito / jazida mineral ou não disponibilidade de amostras de todo o universo, recorre-se a amostras típicas pontuais ou de menor representatividade espacial. Estas procuram reproduzir, de forma a mais extensiva possível, as características predominantes de um dado tipo de minério ou material, apesar de não serem representativas de todo este universo.

A caracterização deve se iniciar com amostras representativas ou típicas de cada tipo de minério, evitando-se amostras de transição entre eles cujas características mistas podem conduzir a conclusões inadequadas, ou mesmo errôneas, sobre o seu comportamento tecnológico, mormente para situações em que um dos tipos não responde favoravelmente ao processo preconizado, não previsíveis *a priori*.

O estudo de materiais de transição e/ou mistos, bem como de amostras artificialmente formadas, com diferentes proporções de misturas, deve se realizar posteriormente, seja em escala de caracterização, ou na etapa de desenvolvimento de processo.

Para jazidas / métodos de lavra em que é prevista, na fase de projeto, diluição do minério com material estéril ou minério marginal encaixante da mineralização, faz-se necessária a caracterização deste material para avaliar sua eventual interferência no processo. Amostras compostas com proporções variadas de diluição, de acordo com alternativas de planejamento da lavra, são principalmente utilizadas para testes de processo, em escala de laboratório ou piloto.

4.3 - Definição de Tamanho da Amostra e Amostragem Secundária

As amostras utilizadas na caracterização muitas vezes tem seu volume limitado pela tipo de escavação de pesquisa, estando condicionada à representatividade do mesmo.

Nas etapas de desenvolvimento da mina nas quais o acesso físico ao minério é limitado, como na prospecção e pesquisa, utiliza-se principal, senão exclusivamente, amostras de furos de sondagens.

A questão da representatividade se prende ao fato de nos furos de sondagem, por maior que seja seu diâmetro, não serem reproduzidas as condições físicas do minério que futuramente alimentaria uma usina de beneficiamento, pelas suas dimensões face às do corpo mineralizado. Para rocha e materiais bem consolidados, tal aspecto é irrelevante, desde que a dimensão dos fragmentos do minério será determinada essencialmente pelo método de lavra.

Para materiais pouco consolidados, como elúvio / colúvio e aluviões, e mesmo rochas de menor consolidação, em que a granulação do material lavrado virá a ser uma interação entre as características do minério e o método de desmonte, muitas informações podem ficar viesadas utilizando-se apenas furos de sondagem, sendo recomendável, a amostragem através de escavações que acessem maior volume de minério. O caso mais crítico se refere a zonas de rocha alterada, com fragmentos de rocha de dimensões variadas, até matacões, imersos em material inconsolidado, argiloso ou arenoso.

Quanto às demais características do minério, a questão de representatividade dos furos de sondagem é normalmente resolvida por composição de intervalos de amostragem, e amostras provenientes de dois ou mais furos, os quais guardem coerência espacial em termos de proximidade.

Idealmente a definição do tamanho da amostra para atingir representatividade é feita com base na ordem de grandeza do teor do minério, devendo atender ao compromisso granulometria do minério-teor- liberação do mineral útil, segundo as regras amostragem de Gy^{13,14}. Entretanto, tanto o mineral útil, como sua granulometria de liberação, são parâmetros a serem investigados na caracterização, não há como conhecê-los *a priori*, e a teoria de Gy mostra-se adequada na amostragem, apenas quando já existe um conhecimento sobre o minério.

Em situações em que pouco ou nada se conhece sobre o minério, como é o caso nas fases de prospecção e pesquisa mineral, recorre-se a uma aproximação, com base em dados indiretos de granulometria geral do minério obtidos por uma análise textural acurada. Tal simplificação aplicada na equação de Gy tende a superestimar o tamanho mínimo representativo da amostra, e sua utilização de forma própria é balizada pela experiência prática.

Ressalta-se que as várias conceituações existentes sobre como dimensionar adequadamente amostras a serem processadas em laboratório, se referem essencialmente a materiais particulados, igualmente se apoiando no teor do minério e associando-o com o tamanho de grãos. Tais regras, são precursoras da teoria de amostragem de Gy, e normalmente prevêm pesos desnecessariamente grandes de minério, e na prática muitas vezes inviáveis.

A subdivisão das amostras em laboratório, ou a amostragem secundária, também precisa ser objeto de atenção, feita sempre por quarteamento e seguindo critérios da regra de amostragem. Basicamente a manutenção da representatividade da amostra original se faz pelo procedimento de redução de tamanho vinculada à uma redução de granulometria.

5 - METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS

A caracterização tecnológica é realizada através de uma série de ensaios e análises laboratoriais, para determinação dos parâmetros do minério, segundo seqüência de procedimentos e critérios planejada fundamentalmente em função do bem mineral em estudo.

O primeiro passo é o levantamento de informações sobre o bem mineral em questão, e o beneficiamento aplicado em operações mineiras existentes para minérios e jazidas similares.

Os dados sobre o bem mineral são orientativos quanto à sua aplicação e as indústrias de transformação que o utilizam como matéria prima. O que conduz à reunião de especificações de concentrados aplicadas por estas indústrias, bem como da flexibilidade e variações das mesmas, indicando faixas de teores desejadas e os elementos deletérios.

A partir das informações sobre minérios similares, obtida em literatura e/ou operações mineiras, esboça-se um roteiro de procedimento. Para melhor ajuste deste roteiro, é imprescindível uma avaliação visual, à vista desarmada, em lupa ou em microscópio estereoscópico, de parâmetros da(s) amostra(s).

O conjunto de operações realizadas em laboratório, pode ser genericamente agrupado em operações de preparação da amostra, envolvendo redução e classificação granulométrica, e operações de separação mineral, efetuadas para concentrar espécies minerais com vistas ao detalhamento de suas propriedades. Sendo que os próprios resultados obtidos nos ensaios de laboratório fornecem uma parcela dos parâmetros do minério que interferem no seu comportamento no beneficiamento.

O desempenho destas operações é básico para os estudos, e elas são controladas / reguladas por mecanismos sistemáticos de checagem da eficiência operacional.

Os ensaios de laboratório são acompanhados por pesagem dos produtos obtidos, para determinação do balanço de massa, e análises químicas, para o balanço metalúrgico. O balanço de massas fornece indicação da partição, e as análises químicas da composição do minério nos vários produtos de ensaios, ambos utilizados, também, para controle da qualidade operacional.

Na aferição da qualidade da operação recorrem-se aos balanços de massa, por comparação de peso alimentado no ensaio e a somatória dos pesos dos produtos, considerando-se como aceitáveis variações relativas inferiores a 5% relativos, idealmente 2%.

No desenvolvimento dos ensaios, procede-se sistematicamente à aferição da qualidade do conjunto manuseio de amostras / análise química, através da comparação de teores dosados e calculados por meio de balanço metalúrgico, normalmente aplicando-se como critério de aceitação o limite máximo de variação, entre valores dosado e calculado, de 10 % relativos.

As dosagens a serem realizadas para acompanhamento dos estudos, devem ser selecionadas em função das informações sobre minérios similares, tomando-se a precaução de efetuar análise completa da amostra de minério inicial (tal qual).

Idealmente, este acompanhamento é feito em número de elementos que cubra os elementos maiores constituintes do minério, e os menores relacionados com o(s) mineral(s) útil(eis), incluindo-se os deletérios para especificações comerciais. Entretanto, face ao elevado número de amostras geradas nos ensaios de caracterização, procura-se sempre reduzir criteriosamente as dosagens, de forma a obter as informações necessárias, minimizando custos e tempo dos estudos.

Particular atenção precisa ser dada aos resultados de análises químicas, pois os produtos gerados em ensaios de caracterização, tipicamente mostram teores e assembléias minerais bastante distintos, constituindo-se em peculiar problemática para determinações químicas¹⁶. Muito freqüentemente são detectados desvios analíticos, pela aferição constante feita durante a caracterização, os quais precisam ser dirimidos junto ao laboratório químico. Ressalta-se que as questões analíticas detectadas na caracterização são, em realidade, antecipação do que ocorrerá no beneficiamento.

A eficiência das operações, principalmente de separações minerais, é aferida ao longo de sua realização por observações em microscópios estereoscópico e ótico de polarização, prática que permite ajuste / otimização das condições operacionais. *A posteriori* esta eficiência é verificada pelos resultados de análises químicas, através do balanço metalúrgico.

Análises mineralógicas são, então, realizadas nos produtos das separações minerais, para determinação de características mineralógicas do minério, as quais vão compor o conjunto de parâmetros do minério que determinam seu comportamento no beneficiamento.

5.1 - PARÂMETROS DO MINÉRIO

Os parâmetros do minério que interferem no seu beneficiamento, podem ser indicados de forma genérica, com base naqueles que tem se mostrado importantes para um grande número de casos ^{1,4,6}. Entretanto, cumpre sempre lembrar, as generalizações no tema caracterização tecnológica de matérias primas minerais, são válidas como guias orientativos, as quais tomam por base exemplos de materiais razoavelmente complexos, existindo várias situações mais simples, em que não há sentido o esmiuçar das propriedades do minério.

O primeiro aspecto a verificar é o comportamento do minério na preparação, obtido pela distribuição em massa na classificação granulométrica, avaliando o balanço de frações grossa e finas de acordo com conceitos de beneficiamento.

Este comportamento será decorrente das seguintes características do minério: textura e estrutura, que definem as dimensões e forma de associação dos grãos minerais; estado de alteração dos minerais, decorrente de processos hidrotermais / metassomáticos e/ou supérgenos, e dureza dos minerais componentes.

Um dos parâmetros fundamentais é a distribuição do elemento de interesse na granulometria, dado obtido apenas pelos ensaios de preparação da amostra e análises químicas. Para minérios em que a totalidade do elemento de interesse esteja contida em apenas uma fase mineral, este parâmetro reflete o comportamento do mineral útil na granulometria, sendo que são bastante comuns casos em que existem duas ou mais fases que contêm o elemento de interesse (por exemplo minérios de titânio, de fosfato).

As fases portadoras do elemento de interesse, na maioria das vezes, têm comportamento diferente nos processos de beneficiamento, ocorrendo freqüentes situações onde uma das fases não responde favoravelmente a eles, e constitui-se, portanto, em mineral de ganga, como ocorre no minério de nióbio do estudo de caso desta tese.

É, então, importante determinar os minerais portadores do elemento de interesse e a partição deste elemento nas várias fases, bem como a distribuição delas na granulometria, fatores que dependem dos processos geológicos que formaram o minério.

Tais dados são produzidos no decorrer dos estudos, conjugando-se os resultados de ensaios de laboratório, análises químicas e mineralógicas, o mesmo ocorrendo com todos os demais parâmetros do minério, sejam eles relativos à mineralogia ou outros.

Os parâmetros relevantes para beneficiamento, que se referem às fases minerais portadoras do elemento de interesse, resumem-se aos seguintes aspectos:

- identidade da(s) fase(s) e sua composição química;
- formas de associações minerais / inclusões;
- impregnação / recobrimento superficial por variedades neoformadas;
- estado de alteração;
- grau de liberação.

Identificado o(s) mineral(is), obtém-se da literatura suas propriedades físicas e a sua composição química teórica, bem como as possíveis substituições por elementos menores constituintes. Muitas vezes torna-se necessária a determinação da composição química da(s) fase(s), através de recursos indiretos baseados em análises químicas de concentrados obtidos em laboratório, ou diretamente por microanálise, principalmente no caso destes elementos serem críticos nas especificações de concentrados.

Além das propriedades do mineral útil, são importantes dados sobre a ganga no que se refere à identificação das espécies minerais, conseqüentemente é necessária a obtenção de suas propriedades físicas e químicas, e quantificação ou determinação das proporções minerais.

O estudo dos minerais de ganga deve atentar para possíveis sub-produtos, detalhando o comportamento de espécies de interesse econômico, tratando-as como mineral útil, com vistas a fornecer subsídios para seu eventual aproveitamento.

As determinações minerais são realizadas através das técnicas de identificação, e a quantificação mineral, que invariavelmente possui caráter estimativo, é feita pela conjugação da identificações com os dados de ensaios de separação mineral e de análises químicas nos produtos destes ensaios.

Não é situação incomum, entretanto, o defrontar com minérios para os quais tais recursos não são suficientes para caracterizar / quantificar os minerais de interesse econômico e/ou a ganga associada. Recorrem-se, então, a técnicas específicas para quantificações mineralógicas.

5.1.1 - Formas de Intercrescimento e Liberação

As formas de associações entre as diferentes fases portadoras do elemento de interesse, tornam-se importantes sempre que elas apresentarem comportamento diferencial no beneficiamento, e, tornam-se críticas quando uma delas é mineral de ganga.

As associações do mineral útil com os de ganga são aspectos que interferem diretamente com a granulometria de liberação do minério, determinando as condições para individualizar partículas monominerálicas.

Feições de exsoluções e inclusões no mineral útil, normalmente de dimensões micrométricas, podem conduzir a liberação em granulometria compatível com tais dimensões, quando são constituídas por elementos indesejáveis nas especificações comerciais. Se, entretanto, forem compostas por espécies que não prejudiquem a qualidade do concentrado comercial, sua presença nos grãos de mineral útil é irrelevante e não interfere na liberação.

Aspecto peculiarmente importante para mineralizações de algum modo vinculadas a processo de alteração supérgena, é a presença de impregnação / recobrimento superficial por variedades neoformadas (óxi-hidróxidos de ferro, argilo-minerais, ou outros), geralmente em películas que recobrem parcial a totalmente as partículas minerais.

Tais partículas, ainda que monominerálicas, têm propriedades de superfície, e por vezes de suscetibilidade magnética, diferentes das apresentadas por partículas límpidas, e respondem de forma distinta a beneficiamento que se apoie em tais propriedades. Portanto, embora de proporções reduzidas na partícula mineral, trazem sérias implicações no comportamento no processo.

De forma similar, os aspectos de alteração do mineral útil podem modificar substancialmente as características das partículas, interferindo no seu comportamento no beneficiamento, e devem ser considerados no conceito de liberação do minério.

Finalmente, como um dos objetivos principais dos estudos de caracterização, obtém-se o grau de liberação do mineral útil, determinando a granulometria onde ocorre a sua individualização em partículas monominerálicas para efeitos do beneficiamento e/ou especificações da matéria prima mineral.

A liberação é dependente dos processos de mineralização determinantes das dimensões de cristalização dos minerais, e obtém-se interessante parâmetro de balizamento na análise da distribuição do tamanho de grãos para 90 a 95% de todas as rochas e minerais de minério, que mostra frequência máxima entre 0,005 e 5 mm⁴.

O grau de liberação, que na sua conceituação tradicional representa a quantidade percentual do mineral útil que está contido em partículas livres, em realidade mostra-se um conceito inadequado ou insuficiente, à medida que a definição de partículas livres, ou monominerálicas, torna-se relativa por feições de inclusões, recobrimentos ou alteração. É imprescindível um equacionamento cuidadoso destes aspectos, para que o dado de liberação obtido na caracterização seja efetivamente um parâmetro correlacionável com o comportamento do minério no beneficiamento para ele preconizado^{1,12,17,18}.

5.2 - PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

A preparação das amostras em laboratório deve seguir procedimentos compatíveis com o beneficiamento mineral, os quais de alguma forma reproduzam, ou simulem, características físicas e de distribuição de partículas minerais esperadas no processamento do minério.

Tal preparação é aplicada como recurso auxiliar para a caracterização, tanto no que se refere a fornecer parâmetros para futura definição de fluxograma de beneficiamento, como para permitir melhor equacionamento dos estudos das características intrínsecas ao minério.

Ressalta-se ser prática interessante a realização de procedimentos laboratoriais padronizados sempre que for objetivo a comparação do comportamento entre várias amostras, provenientes de uma mesma jazida ou não.

O roteiro de procedimento experimental para caracterização de amostras possui uma estruturação básica, indicada na figura 5.2.1, que é adaptada e detalhada em função do bem mineral e tipo de minério.

5.2.1 - Técnicas de Preparação de Amostras

A primeira atividade se refere à redução da granulometria do material, a qual se faz indispensável, sempre que o material se encontrar em dimensões maiores que as desejadas.

A granulometria a ser adotada para os estudos é balizada pela granulometria dos minerais componentes do minério, e pelas especificações granulométricas do produto (concentrado) mineral desejado, ou do processo de beneficiamento a ser aplicado.

A granulometria do minério é obtida por uma análise de textura do material, realizada por observações macroscópicas acuradas, por vezes com aplicação de microscópio estereoscópico, realizada previamente.

Algumas considerações gerais sobre especificações granulométricas podem ser traçadas:

- Granulometrias grossas, de dimensões da ordem de 2,5 a 10 mm, se referem a matérias primas para a indústria siderúrgica, tanto minérios metálicos como insumos;
- Processos metalúrgicos, em geral, pressupõem granulometrias finas, da ordem de mm, com reduzida proporção de ultrafinos, abaixo de 0,074 mm;
- Matérias primas para a indústria química costumam ter granulometrias finas a ultrafinas, de dimensões inferiores a 0,150 mm;
- Cargas minerais pressupõem dimensões ultrafinas, inferiores a 0,037 mm.

Por outro lado, deve ser considerada a faixa ótima de aplicação da maioria dos processos de beneficiamento físico, que é entre 5 e 0,010 mm à luz da tecnologia atual disponível, com tipos de processo de concentração mais adequados para as diversas faixas, como indicado na figura 5.2.2 .

Materiais que ocorrem naturalmente desagregados muitas vezes não necessitam de redução granulométrica, ou a requerem apenas para a parcela de fragmentos mais grossos. Neste último caso, freqüentemente, faz-se uma classificação granulométrica separando os grossos e os finos naturais, que tendem a apresentar características diferentes, implicando em comportamento distinto no beneficiamento. Estuda-se, então, a amostra em duas porções separadas: os grossos moídos e os finos naturais.

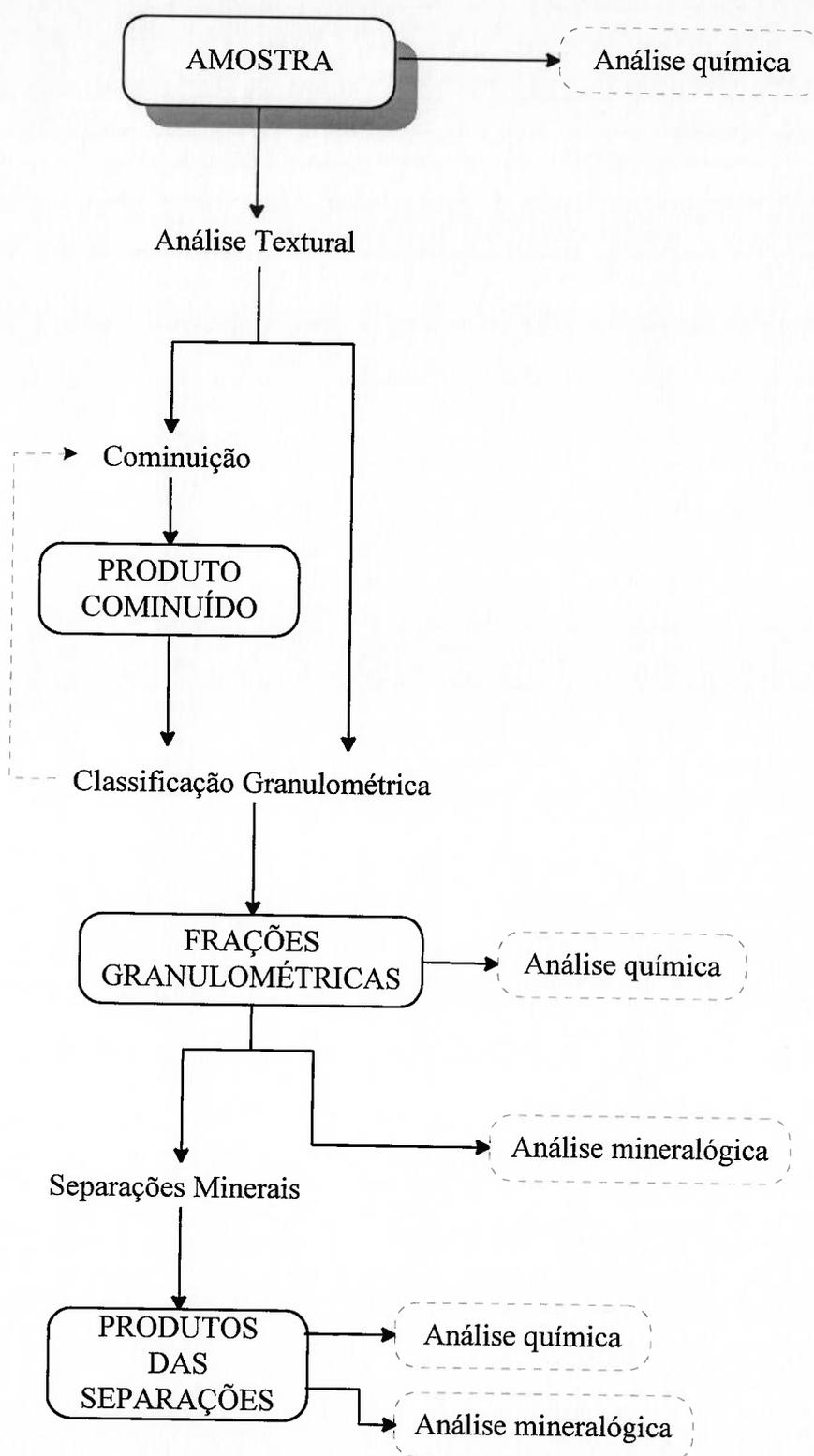


FIGURA 5.2.1
ROTEIRO BÁSICO DE PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL
PARA CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS

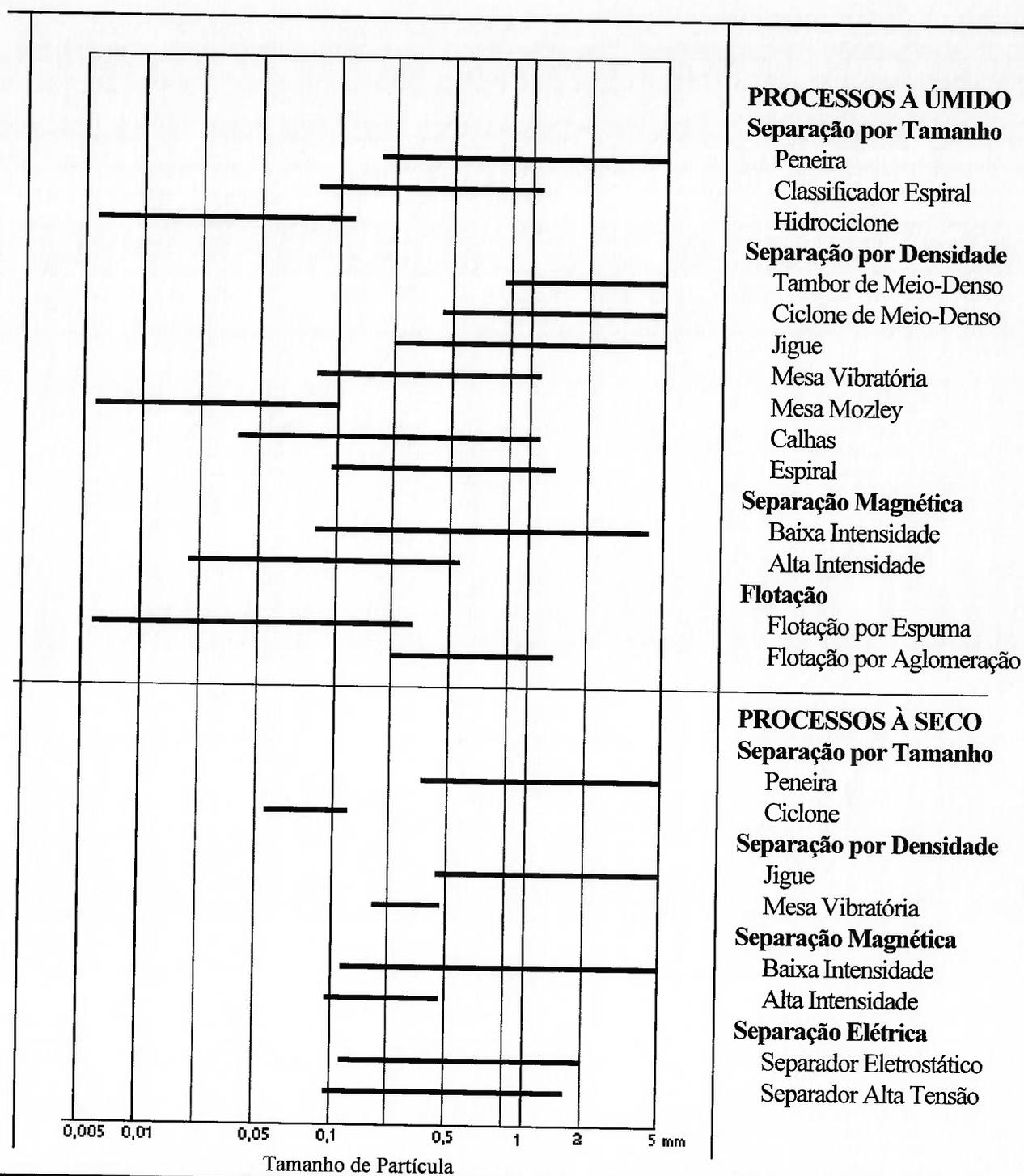


FIGURA 5.2.2

GRANULOMETRIA DE APLICABILIDADE DOS PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO (extraído de 1,12)

O conjunto de procedimentos para redução de tamanho dos fragmentos rochosos, genericamente denominados de cominuição, envolvem as operações de britagem e moagem, sendo que os tipos de equipamentos normalmente utilizados estão indicados na tabela 5.2.1.

TABELA 5.2.1

Metodologias Aplicadas na Preparação de Amostras para Caracterização

Atividade	Metodologia / Tipo de Equipamentos
Cominuição / britagem	britador de mandíbulas moinho de martelos
Cominuição / moagem	moinho de rolos moinho de jarros (bolas e/ou barras)
Classificação granulométrica	peneiramento / infrapeneiramento classificação em microciclones / cicloclassificador sedimentação / sedimentação por centrífuga

A forma de cominuição pode ser variada, procurando-se adotar procedimentos que evitem a geração excessiva de finos, e que, ao mesmo tempo, possam gerar um produto cuja distribuição granulométrica seja, de alguma forma, correlacionável com o que se espera obter numa operação em escala industrial. Neste sentido, é prática comum conjugar-se a cominuição com peneiramento na granulometria máxima desejada, em circuito fechado, com retorno à cominuição apenas do material grosso, retido na peneira.

A cominuição normalmente passa por uma etapa de britagem que reduz o material a dimensões da ordem de 6,3 a 25,4 mm, faixa de granulometria mais usual na escala de caracterização. Granulometrias mais finas são obtidas por operação de moagem, iniciando-se por operação a seco em moinho de rolos, que pode reduzir as dimensões das partículas até abaixo de 0,89 mm, e posterior moagem em moinhos de jarros ou similares.

A moagem feita em moinhos de jarros, é uma operação à úmido, com preenchimento de carga de meios moedores (bolas ou barras), de água e de material adaptado a partir de índices de operações industriais *, podendo ser realizada em batelada ou simulada, em procedimento que imita operação contínua.

Existem na literatura especializada, descrições de procedimentos para simulação de moagem em escala de laboratório, que fornecem interessantes guias para preparação de amostras para caracterização, ressalta-se que o fundamental é que possibilitem a obtenção de uma distribuição granulométrica correlacionável com o produto industrial ^{1,18,19,20,21}.

Normas de Procedimentos para Moagem Simulada - Laboratório Mineral da PAULO ABIB ENGENHARIA, Normas de Procedimentos Internos, 1979.

A atividade seguinte, invariavelmente aplicada nos estudos de caracterização de matérias primas minerais, é a classificação granulométrica.

Em materiais naturalmente desagregados ou no produtos de cominuição, a verificação da distribuição de tamanho das partículas com a partição do elemento útil nesta distribuição, é parâmetro fundamental na caracterização. Além da obtenção dos parâmetros, a classificação granulométrica tem por objetivo individualizar frações para posteriores análises e separações minerais.

O peneiramento, manual ou mecanizado, em procedimentos a seco ou a úmido, é o recurso básico utilizado, tratando-se de operação fartamente descrita e discutida na literatura especializada, tanto dos segmentos de beneficiamento mineral, como de mineralogia, sedimentologia, e outros.

Em alguns casos, para auxílio na remoção de películas / agregados argilosos, aplica-se ultra-som ou atrição, porém os dois procedimentos podem interferir significativamente na distribuição granulométrica original da amostra por quebra de partículas. Sua utilização deve ser criteriosa e apenas em casos específicos, não generalizada.

Os equipamentos de ultra-som de uso em laboratório possuem cubas de tamanho variado, e permitem o desprendimento de películas por vibração ultra-sônica das partículas imersas em meio líquido. A atrição normalmente é realizada em células próprias, equipamentos usuais para ensaios de beneficiamento em escala de bancada (vide tabela 5.2.4), que promovem choque / atrito das partículas entre si.

A classificação por peneiramento abrange granulometrias finas até 0,037 mm, sendo atualmente também disponíveis telas metálicas de peneiras nas faixas de granulação tradicionalmente denominadas de infrapeneiramento, atingindo dimensões^{22,23,24,,25,26} de até 0,005 mm. Entretanto, a operação de classificação nas granulometrias de infrapeneiramento é extremamente morosa, fato que somado à fragilidade das telas e alto custo das mesmas, faz com que seja recurso de uso limitado e para casos especiais.

Para classificações em granulometrias inferiores a 0,074 mm recorre-se, usualmente, a técnicas de separação por ciclonação, que se apoiam na lei de Stokes com efeito de centrifugação.

O cicloclassificador ²⁷ é um dos recursos usados, o qual propicia classificação em seis faixas de tamanho, cujos limites de granulação são variáveis em função da densidade das partículas componentes do minério, sendo o corte inferior da ordem de 0,013 a 0,020 mm.

Trata-se de uma técnica de operação relativamente rápida, porém limitada por requerer massas inferiores a 50 g de material, sendo inadequada quando o interesse reside nos ultrafinos (<0,013 mm), pois uma parcela destes é perdida no ensaio.

Alternativamente, e como melhor técnica para processar massas da ordem de centenas de gramas a quilos de material, a ciclonagem pode ser realizada em microciclones de laboratório (25 ou 12,5 mm de diâmetro) ^{28,29}. Para melhor eficiência da separação, a operação deve ser realizada em circuito fechado com retorno do produto grosso, promovendo lavagem intensa dos grãos minerais.

Como técnica tradicional e válida, quando não se dispõe de recursos laboratoriais, cita-se o ensaio de sedimentação em proveta, cujo procedimento operacional tem sido objeto de publicações técnicas das áreas de beneficiamento mineral, engenharia hidráulica, saneamento, sedimentologia, engenharia civil, dentre outras ^{22,23,24,26,30}. A morosidade deste ensaio, particularmente nas frações mais finas (<0,002 mm), inviabiliza sua utilização rotineira.

As técnicas de análise granulométrica, atualmente com ampla gama de alternativas de métodos ^{24,25,26,30,31}, indicadas na tabela 5.2.2, fornecem a distribuição granulométrica de partículas, e constituem-se em recurso de importância na caracterização de minérios.

TABELA 5.2.2
Principais Métodos de Determinação do Tamanho de Partículas Utilizados no Setor Mineral

TÉCNICAS	MÉTODO	Tamanho (micrômetros)	Equipamentos Disponíveis
Classificação	Peneiramento	37 a 4.000	peneiras, vibradores
	Infrapeneiramento	5 a 37	peneiras
Processos Dinâmicos	Ciclonagem	2 a 50	microciclone
	Elutriação à úmido	13 a 100	cicloclassificador
	Por gravidade	1 a 100	pipeta de Andreasen
	Por centrifugação à úmido	0,01 a 100	
	Por centrifugação à seco		classificador pneumático
Varredura de Campo	Microscopia óptica	0,5 a 2.000.000	
	Microscopia eletrônica de varredura	0,05 a 100.000	
Varredura de Fluxo	Espalhamento de luz	0,1 a 1.000 0,1 a 100	analísadores por difração laser Sedigraph

Ressalta-se que apenas as técnicas de classificação granulométrica possibilitam a geração de frações de partículas para estudos de liberação e determinação de composição mineral.

5.2.2 - Técnicas de Separações Mineraias

Na seqüência, via de regra, realizam-se ensaios de separação cujo objetivo é concentrar espécies minerais baseados em uma ou mais propriedades que as diferenciem, isolando os minerais de ganga do mineral útil, para detalhar a investigação de suas características.

Nestes ensaios atinge-se maior eficiência operacional, ou maior pureza de produtos, quanto mais estreita a faixa de dimensões de partículas nas frações; entretanto o fracionamento granulométrico excessivo nem sempre acrescenta informações relevantes, e por multiplicar tempo e custos dos estudos, deve ser aplicado com critério, apoiado por observações em microscópio estereoscópico.

Vários são os recursos de separações em escala de caracterização, conforme indicado na tabela 5.2.3, e os recursos / equipamentos de beneficiamento em escala de laboratório utilizados para a caracterização, como indicado na tabela 5.2.4.

TABELA 5.2.3
Metodologias Aplicadas para Separações Mineraias na Escala de Caracterização

Tipo de Separação	Recurso Laboratorial / Equipamentos (referências bibliográficas)
Separações por densidade	líquidos densos / suspensões densas ^{1,12,32,33,34,35,36,37} separadores magneto-densitários ^{12,38,39,40} mesa Mozley ⁴¹ batéia (manual ou mecanizada)
Separações magnéticas	ímã permanente (ímã de mão) ^{12,32,33,34, 35, 37} separadores magnéticos Frantz (isodinâmico e de barreiras) ^{1,32,33,42,43,44,45} tubo Davis
Recursos Especiais	determinação de potencial zeta/ponto de carga zero ¹ microflotação (tubo de Hallimond)

A escolha do método, ou conjugação deles, é baseada nas propriedades das espécies minerais componentes do material em estudo, e a seleção do tipo de recursos / equipamentos, dependente de disponibilidade e facilidade operacional.

TABELA 5.2.4
Recursos e Ensaio de Tratamento Mineral em Escala de Bancada de Apoio à Caracterização

Metodologia de Concentração / Tratamento	Tipo de Equipamento (escala de laboratório)
Atrição	célula de atrição
Separação por densidade	mesa vibratória
Separação magnética	polia magnética (imã permanente) separador de rolos induzidos ¹² separador de imã de terras raras separadores de matrizes (WHIMS, HGMS) ^{46,47}
Separação eletrostática	separador de rolos separador de placas - placa/tela ¹²
Flotação	células mecânicas de bancada coluna de flotação

Uma genérica da organização sequencial de técnicas de separação, que consiste em procedimento usual básico (vide figura 5.2.2), consta de: separação por densidade, separação magnética no produto composto por minerais pesados, e, em casos específicos, separação eletrostática no produto não magnético.

O critério básico é a seleção de metodologias / equipamentos que possibilitem a realização de separações essencialmente devidas às propriedades dos grãos minerais, com interferência operacional minimizada, conceituando-se como separação ideal aquela que se reporta exclusivamente às propriedades dos grãos.

Tem-se como meta a obtenção de parâmetros dos ensaios que se refiram às características do minério o mais independentemente possível do desempenho operacional. Neste sentido as técnicas laboratoriais de caracterização desenvolveram-se na adaptação / implementação de métodos de mineralogia e de beneficiamento em escala de laboratório, escolhendo dentre estes últimos aqueles que possam atender, por operações cuidadosas, o critério de separações ideais.

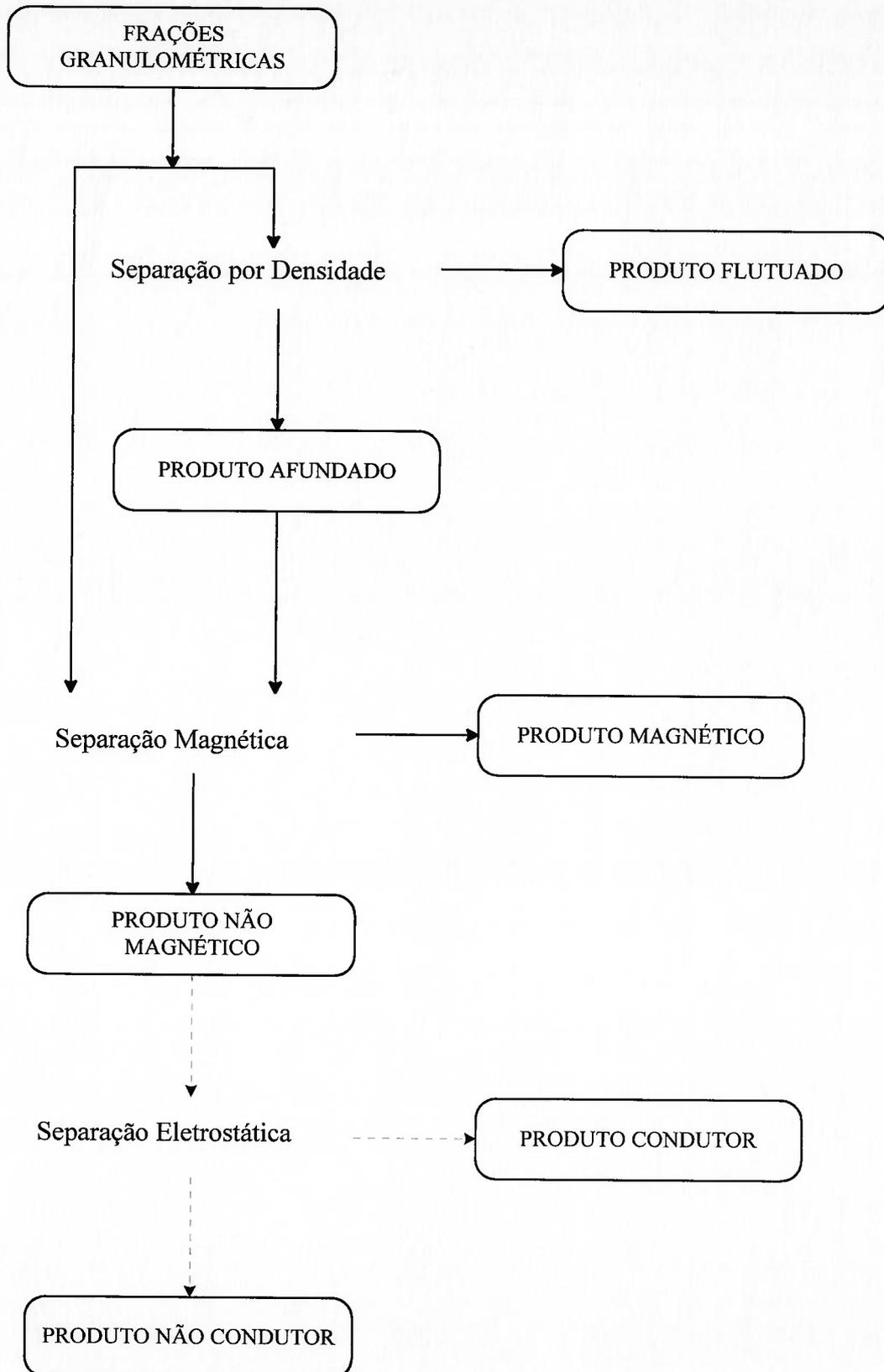


FIGURA 5.2.3
ROTEIRO BÁSICO DE APLICAÇÃO DAS SEPARAÇÕES MINERAIS

A maioria dos equipamentos de beneficiamento em escala de laboratório, dificilmente consegue promover separações minerais eficientes em operação individualizada e descontínua, tipicamente requerem otimização das condições de ensaio para cada material processado, em operações mais contínuas. Trata-se de situação poucas vezes real nos estudos de caracterização, até pela disponibilidade de massas de material, devendo sua aplicação ser criteriosa.

Ressalta-se que, os parâmetros do minério, obtidos através de ensaios de caracterização, não se constituem em parâmetros de engenharia ou aqueles a serem diretamente aplicados como índices de beneficiamento, por estarem afeitos às propriedades do material, e se referirem, portanto, a separações ideais. Parâmetros de beneficiamento se reportam à interação dos parâmetros do minério com o desempenho operacional dos processo / equipamento, em alguns casos significando valores inferiores, e em outros superiores pelo efeito de recirculação de produtos intermediários.

Os processos de concentração no beneficiamento mineral dependem das propriedades do minério, ou mais precisamente das características das partículas que o compõem, tais como tamanho das partículas, propriedades físicas dos minerais (peso específico, susceptibilidade magnética, etc..) e liberação. Qualquer processo / equipamento de beneficiamento permite separação / concentração das partículas que atendam a uma determinada, e típica, faixa de variação da(s) propriedade(s) em foco.

Considerando a conjugação destes dois fatores, existirá no minério um conjunto de partículas cujas propriedades físicas permitem a sua separação. Tal população de partículas mostra uma distribuição de frequência da(s) propriedade(s) em foco que pode ser traduzida por uma curva de frequência, que se constitui na *curva de separabilidade*²³, a qual habilita à previsão do comportamento do minério na separação.

Ressalta-se que a curva de separabilidade indica a separação ideal, ou o máximo de separação, que pode ser alcançada no minério em função de suas propriedades físicas, significando meta a ser buscada no processo. A caracterização tecnológica do minério deve buscar o levantamento das curvas de separabilidade, fornecendo os parâmetros do minério que, em complemento a dados de eficiência de separação e equação que a rege, possibilitem simulações matemáticas da separação a ser obtida no processo em escala industrial.

5.2.2.1 - Técnicas de Separação por Densidade

O conjunto de operações mais freqüentemente aplicado se refere a separações em função da diferença de densidade dos minerais, destacando-se entre elas as separações em meio-denso que se apoiam na capacidade ou não de sedimentação das partículas quando imersas em líquido de uma dada densidade.

Separações utilizando líquidos orgânicos densos constituem-se em técnica tradicional de mineralogia e sedimentologia, sendo que os líquidos conhecidos cobrem faixa de densidade desde 1,6 até 4,3 g/cm³. Densidades maiores podem ser alcançadas com suspensões densas, compostas de materiais densos micronizados, as quais, entretanto, apresentam problemas de estabilidade e têm uso menos difundido. Esta é uma técnica que permite realizar separação ideal, que se reporta quase exclusivamente às propriedades das partículas minerais.

A operação de separação é feita em baldes para partículas grossas com dimensões superiores a 10 mm, em bequers para partículas de dimensões até 0,8 mm, funis de separação, para partículas de até 0,1 mm, ou centrífuga, para partículas até 0,01 mm, sendo que para granulometrias de dimensões inferiores a eficiência da operação é muito baixa. Os limites granulométricos mencionados têm caráter indicativo, não sendo estanques.

Como recurso alternativo de separações por densidade citam-se os separadores magneto-densitários, dos quais existe um único equipamento comercializado, Magstream, o qual conjugando forças geradas em fluido paramagnético sob a ação de um campo magnético com forças gravitacionais ou centrífugas, logra estabelecer gradiente de densidades que permite promover separações na faixa de densidades de 1,5 até 20 g/cm³.

Embora uma proposta interessante como metodologia, sua operação requer cuidados operacionais pela sensibilidade às condições de operação, e a eficiência de separação é bem inferior à obtida com os líquidos orgânicos, sendo sua aplicação indicada em complementação a estes para faixas de densidades mais elevadas.

Deve ser feita referência aos procedimentos de bateamento manual, muito difundido em operações de campo em apoio à prospecção e pesquisa mineral, que é também adotado em alguns laboratórios por batéias manuais ou mecânicas. A metodologia se apoia na velocidade diferencial impressa aos minerais num fluxo em meio aquoso, sendo um procedimento

rudimentar, que promove perda de finos, e pouco recomendado pela baixa reprodutibilidade dos resultados, ainda que feito pelo mesmo operador. Entretanto, sua aplicação no caso de materiais naturalmente desagregados permanece devido à praticidade e baixo custo, tomando-se o cuidado de padronizar os procedimentos.

A mesa Mozley (modelo C-900), equipamento que promove separações em meio aquoso através de movimentos de oscilações, construído de forma a reproduzir os movimentos de bateamento, é a alternativa mais interessante para separações em densidades superiores aos líquidos densos, ou mesmo em substituição a estes em alguns casos específicos. É um equipamento onde pode-se obter resultados mais reprodutíveis que o bateamento, mas requer cuidados operacionais com acurado controle visual da qualidade dos produtos.

Em alguns segmentos tem-se utilizado mesas vibratórias para preparação de amostras de caracterização, metodologia que, operando em ensaios descontínuos, apresenta elevada imperfeição operacional, motivo pelo qual na maioria dos casos fornece produtos mistos, não adequados para os estudos. Sua utilização é recomendada apenas para operações de desbaste visando redução de massa, com a separação sendo *a posteriori* aprimorada por outra metodologia, para o caso de materiais com elevado conteúdo de minerais leves.

5.2.2.2 - Técnicas de Separação Magnética

Outro conjunto de operações de uso freqüente são as separações baseadas na diferença de suscetibilidade magnética dos minerais, e se apoiam no seu comportamento quando submetidos à ação de um campo magnético externo, sendo que os recursos existentes de equipamentos estão também indicados na tabela 5.2.3.

Separações magnéticas costumam ser realizadas nos concentrados de minerais pesados, desde que os minerais ferromagnéticos apresentam elevada densidade. Também têm intensa aplicação na caracterização de películas / impregnações por óxidos de ferro em minerais de densidades baixas.

O procedimento mais difundido é a separação magnética a imã permanente, sendo realizado em escala de caracterização normalmente por imã de mão em operação criteriosa, que evita arraste mecânico de grãos de minerais de menor suscetibilidade magnética.

Tal procedimento costuma apresentar excelente reprodutibilidade apesar de não ser mecanizado, face ao forte magnetismo dos minerais concentráveis nesta intensidade de campo, que são essencialmente aqueles do grupo das magnetitas (espinélios ferrosos) e alguns do grupo das pirrotitas (sulfetos ferrosos).

Outro recurso para separação magnética de baixa intensidade é por operação a úmido em polia magnética, escala de laboratório, operação que pode ser razoavelmente reprodutível e eficiente nos ensaios descontínuos, em alguns casos adequando-se para os estudos de parâmetros do minério.

Para separações magnéticas ideais, ou com desempenho operacional otimizado, recorre-se aos separadores Frantz, de uso tradicional em mineralogia, que operam à seco, submetendo um fluxo de partículas a um campo magnético com intensidade variável e ajustável pelo operador, gerado através de uma bobina elétrica, que promove caminhamento diferencial das partículas magnéticas, logrando separar minerais de relativamente baixa suscetibilidade magnética específica. Existem dois modelos básicos deste equipamento, com princípios operacionais algo distintos, ambos aplicáveis em caracterização: o tipo isodinâmico, mais antigo e de uso consagrado, e o tipo de barreiras.

O Frantz isodinâmico mantém a força magnética sobre as partículas constante ao longo de toda a zona de separação, conseguindo separar minerais com suscetibilidade magnética específica de $0,2 \times 10^{-6}$ a aproximadamente 600×10^{-6} , tanto diamagnéticos como paramagnéticos. É um equipamento ideal para se trabalhar com granulometrias entre 0,6 e 0,04 mm, e, ao lado de sua elevada eficiência de separação mostra baixa taxa de alimentação, sendo mais indicado para pequenas massas de amostras (menor que 50 g).

O Frantz de barreiras mostra desenho do equipamento e características de operação similares ao isodinâmico, possuindo arranjo diferente para geração do campo magnético, que possibilita a criação de gradiente mais elevado de forças magnéticas, que melhora a eficiência da separação. Na prática, isto possibilita separações na mesma faixa de suscetibilidades, mas habilita o equipamento a maior capacidade de alimentação, com desempenho similar, e operações com limites maiores de granulometrias (2 a 0,01mm).

Separadores magnéticos de rolos induzidos à seco, em escala de bancada, constituem-se em boa alternativa para separações magnéticas até altas intensidades de campo. A separação é realizada pelo desvio do percurso de partículas com maior suscetibilidade

magnética, por meio de campo magnético gerado por uma bobina. Embora a separação dependa mais das condições operacionais, consegue-se estabelecer procedimentos / condições que a tornam função basicamente das diferenças de suscetibilidade magnética dos minerais. São disponíveis equipamentos para realização de ensaios com massas pequenas de amostras.

Os separadores magnéticos que utilizam matrizes de operação (WHIMS, HGMS), promovem separação a partir da captura de espécies minerais magnéticas em malha de fios ou matriz imantada, a partir de um fluxo de partículas normalmente suspensas em meio aquoso.

Nesta categoria de equipamentos, o desempenho da operação é controlado por meio da regulagem do fluxo de alimentação (velocidade e densidade de sólidos na suspensão) e da intensidade do campo magnético, sendo críticos os fenômenos de interação das forças magnéticas estáticas entre o elemento da matriz e das partículas, bem como entre as partículas. Tais aspectos tornam a separação significativamente dependente de condições operacionais, e das granulometria / assembléia mineral da alimentação, motivos pelos quais sua aplicação na caracterização é pouco difundida, sendo utilizado principalmente para finos e ultrafinos.

O tubo Davis também se baseia na captura de espécies minerais magnéticas a partir de um fluxo de partículas normalmente suspensas em meio aquoso, quando este é submetido a um campo magnético. Neste caso, não existem matrizes, e as partículas são capturadas ao longo do tubo localizado entre os pólos, arranjo que, na prática, logra separação de espécies de suscetibilidade magnética maior por gerar forças magnéticas menores.

5.2.2.3 - Técnicas Diversas de Separação Mineral

Para minérios com assembléias de minerais de alta densidade e não magnéticos, podem se tornar importantes recursos de separações eletrostáticas, as quais baseiam-se nas diferenças de condutividade elétrica das espécies minerais. Baseiam-se em promover, através do fluxo do material seco em atmosfera carregada de íons, obtida por eletrodos submetidos a altas tensões, carregamento de cargas na superfície das partículas, que após contato com uma superfície metálica tem caminhamento diferencial: as partículas condutoras descarregam e acompanham o fluxo de alimentação, as não condutoras tendem a permanecer aderidas à superfície metálica.

Os equipamentos existentes, vide tabela 5.2.4, são para ensaios de beneficiamento em escala de laboratório, e sua capacidade de alimentação é de dezenas de quilos/hora, extrapolando a escala de caracterização. Além disto, sua operação depende de muitas variáveis tanto do equipamento, como de condições de temperatura e umidade do minério de alimentação e do ambiente. Como recurso de caracterização podem ser aplicados em casos muito específicos, nos quais esta se funde com o desenvolvimento de processo.

A caracterização das propriedades físico-químicas superficiais das partículas, com vistas à separações minerais seletivas nelas baseadas, visa fornecer subsídios a processos de beneficiamento por flotação. É uma temática complexa pelos vários fatores envolvidos neste tipo de processo, que associa as características do mineral útil e da assembléia mineral do minério, com diversos tipos de reagentes e a ação deles na superfície dos grãos, sendo sensível às condições do meio aquoso em que se processa a separação.

Citam-se a determinação do potencial zeta e a microflotação em tubo de Hallimond, como recursos de caracterização elaborados com o objetivo de obter parâmetros de flotação. Nenhuma das duas técnicas, porém, tem se mostrado adequada para caracterizar o comportamento de minerais. A prática adotada tem sido complementar os estudos com a realização de ensaios, em escala de laboratório (0,25 a 2 kg de amostra), padronizados a partir de informações obtidas em literatura e/ou experiência no beneficiamento de minérios similares, que permitam, de alguma forma, vislumbrar o comportamento do material frente a este processo.

Outros recursos para a caracterização de minérios de aplicação muito específica não foram aqui referidos, pois extrapolam os objetivos da compilação de procedimentos e técnicas mais usuais e de ampla aplicação no setor mineral. Da mesma forma não foram incluídos testes tecnológicos específicos, tais como testes cerâmicos, por excederem o escopo da tese.

5.3 -ANÁLISES MINERALÓGICAS

Na caracterização tecnológica de matérias primas minerais, análises mineralógicas constituem-se em recurso essencial na identificação dos constituintes e determinação de suas propriedades.

São de importância similar as técnicas / recursos de análises que possibilitam a quantificação das espécies minerais, viabilizando a determinação da composição mineral, ainda que estimativa, e do grau de liberação do mineral útil.

5.3.1 - Identificações de Espécies Minerais

As técnicas que acessam a observação e a identificação das espécies minerais são fundamentais na determinação dos parâmetros do minério, sejam eles mineralógicos ou não. As mais usuais aplicadas à caracterização estão sumarizadas na tabela 5.3.1.

TABELA 5.3.1
Técnicas de Mineralogia de Uso mais Difundido na Caracterização de Minérios

Técnica		Propriedades
Microscopia Óptica ^{1,2,3,4,6,12}	microscópios estereoscópicos microscópios ótico de polarização	forma, cor, alterações, propriedades ópticas, associações, liberação
Difração de Raios-X ^{12,49,50,51,52,53}	método do pó câmara de monocristal	estrutura cristalina
Microscopia Eletrônica de Varredura ^{54,55,56}	microscópio eletrônico de varredura	forma, associações, liberação
Sistemas de Microanálise ^{56,57,58}	dispersão de energia (EDS) dispersão de comprimento de onda (WDS)	composição química
Recursos Diversos	Análise Termodiferencial ⁵⁹ Análise Termogravimétrica ⁶⁰ Análise por Infravermelho ^{61,62}	transformações de fases composição química
Luminescência	Catodoluminescência ⁶³ Fluorescência ⁶⁴	excitação por elementos ativadores

A utilização delas pressupõe certo recurso laboratorial e alguma experiência no assunto, sendo que as mais sofisticadas, normalmente são mais dispendiosas e exigem operação por um especialista.

Serão aqui discutidas as técnicas tradicionais mais comuns na caracterização de matérias primas minerais. Ressalta-se existirem, atualmente, inúmeras outras utilizadas no estudos de materiais, as quais mostram-se adequadas para alguns segmentos específicos de minérios.

Na identificação dos minerais componentes de uma assembléia, deve-se ter presente que, na maioria dos casos, não é suficiente uma única técnica de análise, fazendo-se necessária a conjugação de duas ou mais.

A figura 5.3.1 traz um croqui ilustrativo da conjugação usual de técnicas de caracterização tecnológica, classificadas em técnicas de aplicação mais genérica e as de uso específico para determinadas espécies minerais ou para dirimir dúvidas. Tal quadro pode modificar-se completamente no estudo sistemático e rotineiro de minérios conhecidos, onde houve pré-seleção de técnicas mais adequadas de investigação.

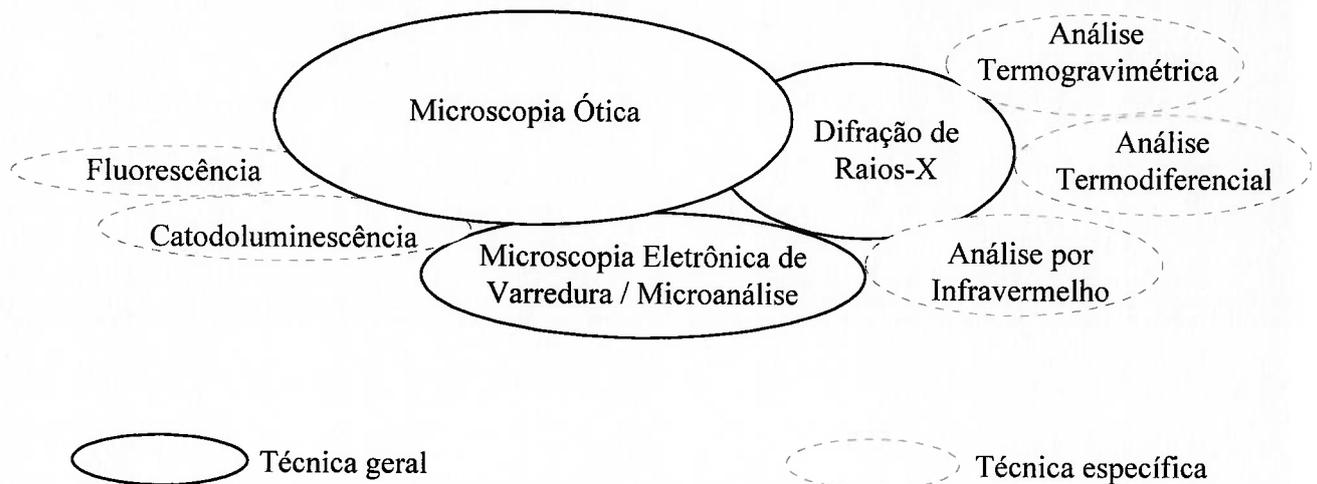


FIGURA 5.3.1
CONJUGAÇÃO USUAL DE TÉCNICAS DE MINERALOGIA APLICADAS À CARACTERIZAÇÃO

A identificação é preferencialmente realizada em produtos das separações minerais, que além de fornecerem algumas propriedades físicas dos minerais, também promovem concentrações das espécies, reduzindo o número de minerais na assembléia das amostras analisadas, o que facilita a sua determinação em qualquer das técnicas descritas na seqüência.

5.3.1.1 - Técnicas de Microscopia Óptica

A microscopia óptica é recurso mais básico e tradicional, tanto utilizando microscópios estereoscópicos como petrográficos. Destaca-se que a mineralogia de apoio à caracterização é essencialmente mineralogia de grãos, monominerálicos ou não, sendo menos freqüente a análise em fragmentos de rocha.

Microscópios estereoscópicos, ou lupas binoculares, constituem-se em recursos imprescindíveis na caracterização, desde as primeiras observações das propriedades do material prévias aos estudos, para orientação do planejamento dos mesmos, até o acompanhamento dos ensaios de separações minerais, para afinamento das condições operacionais, bem como na própria identificação mineral.

Equipamentos padrão têm recursos de luz incidente e possibilitam obter os seguintes dados sobre as partículas ou grãos minerais: formas / hábitos, características de superfície, cor, associações minerais; sendo que os mais completos dispõem também de recursos para luz transmitida e sistemas de polarização de luz, possibilitando a determinação de propriedades ópticas. As observações são feitas sem quaisquer montagens dos grãos, e a faixa de aumento típica é de 10 até 500 vezes.

Os microscópios petrográficos, com recursos de observação em luz transmitida e/ou refletida, têm capacidade de aumento típica de 30 a 900, podendo atingir até 2.000 vezes. São utilizados para as identificações mais detalhadas, em produtos finais das separações, e exigem montagem do material.

Para observações em luz transmitida, próprias para minerais transparentes ou translúcidos, vários tipos de montagens são usadas, conforme o tipo e granulometria do material, são elas:

- não fixas, diretamente em lâminas de vidro cobertas por lamínulas, por imersão em óleo ou bálsamo - ideal para grãos límpidos e granulometrias finas (0,3 a 0,01 mm);
- fixas, diretamente em lâminas de vidro cobertas por lamínulas, por imersão em bálsamo cozido ou resina - quando é necessário o arquivamento das montagens;

- seções delgadas por montagem prévia dos grãos em resina, corte da resina em fatia, colagem em lâmina de vidro e desbaste até atingir espessura de lâminas petrográficas, de 0,03 mm, recobrimento com lamínula - própria para grãos com recobrimento ou impregnação por óxidos de ferro e granulometrias grossas (3,5 a 0,3 mm);
- seções delgadas / polidas obtidas pelo polimento das seções descritas acima ⁶⁵.

Observações em luz refletida, recurso adequado para minerais opacos, exigem confecção de seções polidas, feitas a partir do corte e polimento de montagens dos grãos em resina, sendo que opcionalmente pode-se usar seções delgadas / polidas ⁶⁶. Acessórios de medida de refletividade e o microdurímetro Vickers, ambos de aplicação mais difundida em metalografia, constituem-se em recursos complementares para identificação de minerais opacos, na determinação de refletância e de microdureza dos grãos ^{12,34}.

5.3.1.2 - Técnicas Diversas

A difração de raios-X, metodologia que permite a determinação das fases a partir de espectro gerado por sua estrutura cristalina, é ferramenta extremamente útil na identificação de espécies minerais. Na caracterização de matérias primas minerais é comumente aplicada em duas modalidades básicas: método do pó e câmaras de monocristal.

O método do pó é adequado para determinação de maiores constituintes de uma assembléia mineral, sendo tanto mais conclusivo na identificação quanto menor o número de espécies presentes. Misturas complexas, com muitos minerais presentes e/ou séries isomorfas e/ou grupos com estrutura similar, são de difícil identificação. As amostras são pulverizadas (abaixo de 0,037 mm) e prensadas em porta amostras apropriados para cada equipamento.

As câmaras de monocristal, muito utilizadas para análise de grãos individuais, tanto na sua identificação como na determinação de parâmetros de cela unitária, atualmente podem ser parcialmente substituídas pelo método do pó, com configuração de equipamento / intensidade de raios-X e montagens da amostra adequados.

A microscopia eletrônica de varredura produz a imagem através da interação de um feixe de elétrons com a amostra, permitindo aumentos de 30 a 100.000 vezes. Em sua configuração padrão é apropriada para análise de formas de partículas.

Para análise em microscopia eletrônica de varredura as amostras precisam ser recobertas por uma película (filme) condutora, podendo ser observadas diretamente na forma de grãos ou partículas coladas a um suporte, ou montagens em lâminas delgadas sem lamínula ou seções polidas, como supra indicadas para a microscopia óptica.

O microscópio eletrônico de varredura, quando conjugado com detetores de elétrons retroespalhados, permite a distinção entre espécies minerais pela diferença de número atômico médio dos elementos constituintes, através de tons de cinza diferenciados.

A identificação das espécies minerais é muito auxiliada pela determinação da sua composição química, o que pode ser obtido através dos sistemas de microanálise, os quais habilitam à análise de elementos em áreas pequenas, de até 0,001 mm (análises pontuais).

A metodologia de análise aplicada é a espectrometria por fluorescência de raios-X, utilizando detetor de dispersão de energia (EDS) ou de dispersão de comprimento de onda (WDS), ambos adequados para análises qualitativas de elementos, e para as quantitativas diferindo em resolução / sensibilidade: a primeira com capacidade para determinações de teores de 0,1 a 100%, e a segunda para teores da ordem de dezenas a centenas de partes por milhão ($> 0,01\%$).

Os sistemas de microanálise são acopláveis ao microscópio eletrônico de varredura, ou montados em equipamentos específicos de microsonda. Para as microanálises, especialmente nas determinações quantitativas, é imprescindível que a superfície do material esteja bem polida, para obtenção de precisão e exatidão analíticas.

Dentre os inúmeros outros recursos de análise de fases atualmente disponíveis, são mencionados abaixo alguns de aplicação mais extensiva para os estudos de caracterização, como indicado na tabela 5.3.1.

A análise termodiferencial permite a verificação do comportamento de minerais sob condições de aquecimento e atmosfera controladas, permitindo a identificação de espécies por comparação do espectro de temperaturas em que são observadas transformações de fase, com os padrões obtidos para substâncias puras. Muitas vezes complementa-se este recurso com difração de raios-X, na identificação das fases de transformação geradas na análise. A técnica exige quantidades de algumas microgramas de material, pulverizado.

Análises termogravimétricas, aplicadas em conjugação com a termodiferencial ou isoladamente, permitem detectar variações de peso sob condições de aquecimento e atmosfera controlados, as quais são relacionadas com transformações minerais a partir de comparação com padrões de banco de dados estabelecido para substâncias puras.

Finalmente, citam-se as técnicas de luminescência, também de aplicação muito específica e restrita. Destaca-se a catodoluminescência, recurso acoplável à microscopia, seja ela óptica ou eletrônica de varredura, que possibilita a diferenciação de fases devido à excitação de elementos ativadores associados à fase mineral em quantidades muito pequenas, da ordem de ppb ou ppm, e se referem a heranças ou assinaturas dos processos mineralizadores ou de formação dos minerais. Incluem-se aqui os recursos de reconhecimento de espécies pelo fenômeno de fluorescência, propriedade tipicamente apresentada por alguns minerais quando por observação, macroscópica ou microscópica, sob iluminação por lâmpada de ultravioleta (onda longa ou curta).

5.3.2 - Quantificações de Espécies Minerais

Os métodos diretos aplicados para quantificação mineralógica e determinação do grau de liberação, reportam-se, essencialmente, à contagem de grãos, objeto da aplicação da estereologia em mineralogia ⁶⁷, seja sob microscopia óptica, seja sob microscopia eletrônica de varredura, não importando quais os recursos auxiliares para identificação utilizados.

Esta metodologia é apoiada em avaliações visuais, tradicionalmente conhecida pela sua morosidade, imprecisão e baixa reprodutibilidade ^{68,69,70}, sendo extremamente dependente do operador, e inevitável em muitos casos.

Na prática, procura-se contornar as dificuldades / efeitos desta metodologia, promovendo-se quantificações estimativas em produtos obtidos nos ensaios de separações minerais, os quais são compostos por número reduzido de espécies. Os desvios inerentes ao método de contagem de grãos, tornam-se minimizados, e a própria operação é mais rápida devido ao menor número de espécies. O controle por análises químicas auxilia no balizamento das contagens efetuadas.

São também disponíveis metodologias para quantificações minerais por sistemas de análise de imagens^{71,72}, onde a avaliação das proporções é automatizada, com a diferenciação das espécies minerais feita por propriedades de cor. O emprego destes programas permite notável redução do tempo necessário para a obtenção das informações quantitativas, bem como sensível aprimoramento na qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

A metodologia pressupõe geração de uma imagem em microscopia, e envio para um sistema que possui recursos para tratar esta imagem, onde são ressaltadas nuances de variações de cores entre as espécies minerais. Através de operações entre imagens binárias, é feita a quantificação automatizada na imagem transformada, inclusive com determinação das percentagens minerais em grãos mistos, nas suas várias categorias de proporções de misturas, num refinamento do processo de avaliação visual das tradicionais contagens por um operador.

A adaptação de rotinas dos programas de análise de imagens, visando sua aplicação para um dado minério e/ou dada assembléia mineral, a partir da imagem gerada por um determinado microscópio, constitui-se em um trabalho de programação dirigido e especializado. Tal desenvolvimento normalmente só se justifica para determinações em número extensivo de amostras, seja no estudo de uma jazida, seja no acompanhamento de uma operação de lavra / beneficiamento industrial.

Questões mais simples, como determinação de forma de partículas, determinações de distribuições granulométricas, ou mesmo quantificações em assembléias de poucas fases minerais, bem diferenciadas no sistema microscópico de geração da imagem, são mais adequadas para processamento via analisadores de imagem.

Outra técnica de quantificação ainda em desenvolvimento, de uso mais restrito por ser sujeita a várias fontes de interferências, é a análise quantitativa por difração de raios-X, que vem ganhando impulso em situações específicas. Os fatores de interferência na análise se prendem aos aspectos de cristalinidade dos minerais componentes, granulometria do material e interferência de espectro dos diferentes minerais, fatores que se tornam críticos para muitas matérias primas minerais, inviabilizando a aplicação da técnica.

Vários são os procedimentos aplicáveis, a maioria deles se apoia nas metodologias tradicionais de análise instrumental, que pressupõe o levantamento de curvas de calibração a partir de materiais com proporções minerais conhecidas.

Deve-se, ainda, fazer referência à possibilidade de análises quantitativas por difratometria de raios-X, pela aplicação de programas de computação que se apoiam no método de Rietveld ^{73,74}. O método pressupõe uma assembléia mineral conhecida, e realiza simulações do difratograma gerado por variações de proporções relativas das espécies, até ajuste deste com o difratograma real obtido para a amostra. Atualmente sua aplicação é rara, tratando-se mais de metodologia a ser investigada, e, novamente, é mais indicada para assembléias compostas por reduzido número de minerais.

6 - METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE UM DEPÓSITO MINERAL

A caracterização de uma jazida implica no conhecimento das características do minério que a compõem de uma forma abrangente, na extensão física do corpo de minério. Portanto, é pertinente às situações em que existe delimitação de um corpo de minério, ou seja, às fases de pesquisa mineral, desenvolvimento e exploração de mina.

Os procedimentos de estudos são distintos para avaliação da jazida nas fases de pesquisa, quando existe baixa densidade de informações, e para fases de detalhamento de informações com maior conhecimento do minério, na pesquisa de detalhe, no desenvolvimento da mina ou já na extração do minério.

A caracterização de uma jazida na fase de pesquisa mineral, permite uma visualização ampla da problemática tecnológica envolvida; não tem por objetivo, até pelo nível de conhecimento sobre a jazida, verificar nuances de variações do comportamento do minério, ou tipos de minério com comportamento muito peculiar. Mostra, inclusive, a necessidade de detalhamento de um ou outro aspecto, e de tipos de minério de menor representatividade. O objetivo é um equacionamento das questões relativas ao aproveitamento do minério, a um grau de confiança compatível com a confiabilidade da própria pesquisa.

O detalhamento de amostragem do corpo de minério, obtido em pesquisa de detalhe e/ou nas frentes de lavra, na fase de desenvolvimento e exploração da jazida, permite um aprimoramento contínuo dos dados, servindo tanto para aferições do modelamento de tipos de minério previamente efetuado, como, principalmente, para ajustes do mesmo.

6.1 - PROCEDIMENTO

Como procedimento prévio, é fundamental o levantamento de informações sobre o bem mineral em questão, os modelos de mineralização envolvidos e o beneficiamento aplicado em operações mineiras existentes para minérios e jazidas similares. Procedimento este mais crítico na caracterização de um depósito mineral, do que no estudo individual de amostras de minério.

As informações sobre modelos ou tipos de jazidas fornecem idéia da assembléia mineral componente do minério, e, eventualmente, noções a respeito de granulometria do mineral útil. São, ainda, essenciais no entendimento do contexto geológico da jazida, e vão auxiliar nas interpretações relativas à distribuição da tipologia no corpo de minério, pela correlação da variabilidade dos parâmetros do minério com os processos de mineralização.

A problemática tecnológica envolvida no aproveitamento do minério, é equacionada a partir dos dados de minas em operação. Os parâmetros do minério que costumam ser relevantes ou que interferem no seu beneficiamento, constituem-se em excelentes indicadores para o desenvolvimento dos estudos de caracterização de jazidas.

A caracterização de uma jazida necessariamente se faz pelo estudo de amostras provenientes de vários pontos ou porções do corpo de minério, criteriosamente amostrados, de forma a possibilitar uma visualização ampla, conforme ilustrado na figura 6.1.1.

A metodologia para definição das reservas tecnológicas, implica no estabelecimento da tipologia do minério e dos parâmetros que definem esta tipologia, os quais devem ser levantados sistematicamente, para serem aplicados no modelamento das reservas.

A definição das reservas tecnológicas, obtida pelo modelamento utilizando os parâmetros tecnológicos do minério, consolida a caracterização voltada para a jazida, sendo uma evolução do conceito da reserva geológica baseada em um modelo definido essencialmente a partir dos teores do minério.

6.2 - TIPOLOGIA DO MINÉRIO

A partir da caracterização tecnológica de diversas amostras de minério, obtém-se o espectro de variabilidade dos seus parâmetros tecnológicos. A avaliação da significância destas variações face ao beneficiamento, conduz ao agrupamento das amostras em tipos tecnológicos de minério, e conseqüente estabelecimento da tipologia de minérios.

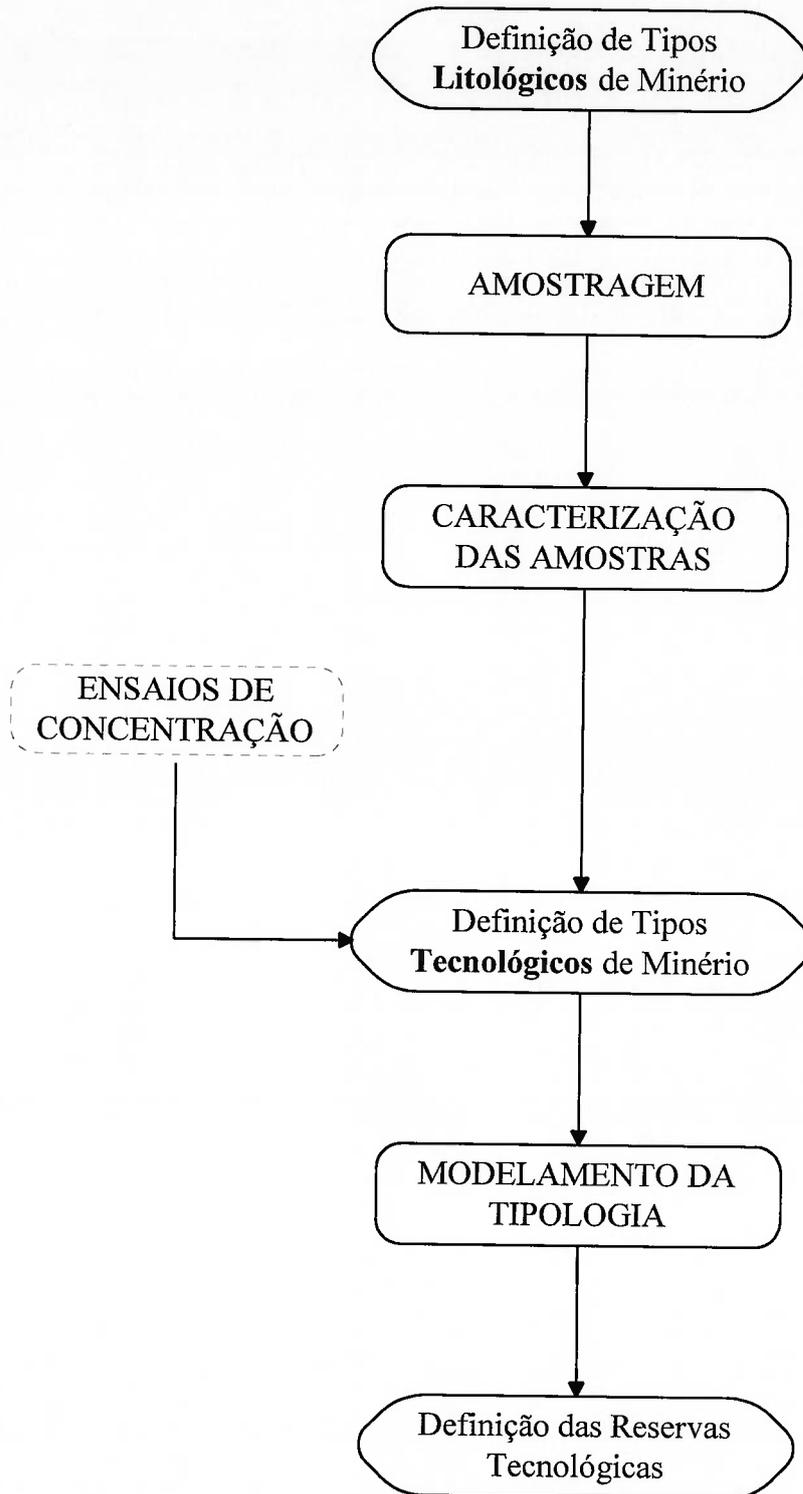


FIGURA 6.1.1
ROTEIRO PARA CARACTERIZAÇÃO DE UM DEPÓSITO MINERAL

Paralelamente ao reconhecimento de tipos de minério, procura-se definir critérios para seu reconhecimento, através de análises simples, realizáveis (quanto a custos e prazos) em campanhas extensivas de amostras. Em realidade é estudada uma parametrização para um dado minério e uma dada jazida, a qual permita classificar o minério quanto ao seu comportamento no beneficiamento; esta parametrização vai servir de guia para planejamento e acompanhamento de lavra.

Numa etapa subsequente, procura-se determinar os parâmetros distintivos de tipos de minério em amostras das escavações de pesquisa, de forma a obter a distribuição deles ao longo do corpo de minério. Obtém-se, então, subsídios para modelamento da jazida segundo a tipologia de minério, e o cálculo das reservas tecnológicas.

A tipologia de minérios reconhecida em relação ao processo, pode ser definida pela mineralogia do minério e/ou estado de alteração dos grãos minerais, e/ou alteração de espécies minerais específicas, e/ou grau de liberação, e/ou parâmetros físicos do minério, em aspectos não necessariamente ligados ao mineral útil, ou mesmo à mineralogia.

Os parâmetros para reconhecimento dos tipos de minério se revelam bastante variados. No caso mais simples consegue-se definir a tipologia por análises químicas em correlação direta teores de óxidos-mineralogia-tipo de minério. Ainda no caso da composição mineralógica refletir o comportamento do minério, ocorrem casos mais complexos em que esta mineralogia só pode ser obtida por meio de índices químicos ou de análises mineralógicas.

Inúmeras vezes, para obtenção dos parâmetros do minério, adota-se uma rotina de caracterização, envolvendo ou não ensaios padronizados de beneficiamento em escala de bancada, principalmente no caso de minérios complexos.

Sempre que as características do minério correlacionáveis com o seu comportamento no processo puderem ser expressas através de índices numéricos, e estes índices forem disponíveis para um número extensivo de amostras que cubram todo o corpo de minério, as técnicas matemáticas de análises de agrupamentos (“cluster analyses”) podem se constituir em ferramentas importantes de auxílio na definição da tipologia de minérios.

Ressalta-se, que a utilização de análises grupais deve ser realizada sempre com balizamento de parâmetros geológicos / litológicos / mineralógicos do minério, que se referem aos controles da mineralização, pois sua aplicação desvinculada de tais controles pode conduzir a conclusões com coerência matemática porém dissociadas da realidade do corpo mineralizado.

6.3 - MODELAMENTO DOS PARÂMETROS TECNOLÓGICOS

As características básicas que interferem no beneficiamento do minério, ou os parâmetros tecnológicos do minério, são correlacionáveis com os controles da mineralização (primários-secundários-alteração supérgena), e, portanto, suscetíveis de modelamento com critérios semelhantes aos utilizados para os geologia / teores, promovendo integração da caracterização com a estruturação geológica da jazida. Neste caso, em uma interpretação voltada para as características tecnológicas, onde faz-se a delimitação dos tipos de minério.

Na prática, a interpretação geológica torna-se fundamental quando os parâmetros que definem a tipologia do minério não são traduzíveis em índices numéricos, ou quando, situação extremamente comum durante a pesquisa geológica, não há disponibilidade destes índices na densidade adequada de informações para possibilitar parametrizações matemáticas.

Quando existem tais índices numéricos, a modelagem dos parâmetros tecnológicos é similar à de teores, sendo inclusive possível a aplicação de critérios de geostatística. Procura-se, durante o desenvolvimento da mina alcançar esta situação, habilitando a que o acompanhamento da exploração da mina se apoie em tipologia traduzida por índices numéricos, e muitas vezes índices econômicos, obtidos para um determinado método de lavra e processo de tratamento.

6.3.1 - Recursos para Modelamento de Jazidas

O delineamento de um corpo mineralizado segundo a tipologia do minério, se apoia em recursos e métodos de modelamento em três dimensões, tanto para determinação da forma geométrica como para interpolação de valores. Destacam-se, então, como de muita relevância na caracterização de um jazida, os recursos de traçado geométrico em três dimensões.

Na interpretação geológica, passa-se necessariamente pelo traçado de limites em duas dimensões, seções ou planos, a partir da conexão de informações locais das escavações de pesquisa. A extensão destas informações para a terceira dimensão, nos recursos manuais, clássicos de interpretação geológica, é efetuada por meio de zonas de influência, numa projeção perpendicular ao plano original de traçado da interpretação, fato que acarreta nas tradicionais e discutidas aproximações da realidade que se tornam críticas para formas geométricas complexas^{62,63,64,65,66,67,68}.

Para interpolação de valores numéricos, sejam eles teores, índices ou parâmetros tecnológicos, existe uma limitação na aplicação de métodos de cálculo com recursos manuais que não possibilitam o processamento de quantidades substanciais de informações. O uso de recursos de computação neste cálculos abriu perspectivas para cálculos mais elaborados, sendo atualmente bastante difundido no setor mineral^{76,77,78}.

A utilização da computação no modelamento de jazidas, atualmente se apoia em programas específicos, os quais possuem recursos de modelagem tridimensional e que diferem entre si nos critérios de interpolação de teores e de delineamento geométrico do corpo de minério. A limitação destes critérios^{76,77,78,79,80,81}, tem feito com que haja alguma resistência de utilização de recursos de computação no modelamento geológico e cálculo de reservas, embora eles sejam excepcionalmente ágeis, tendo sido, por vezes, reportadas significativas discrepâncias no confronto com os resultados obtidos através de processos clássicos manuais.

6.3.1.1 - Métodos de Modelagem Tridimensional por Computação

O estado da arte em modelagem tridimensional por computação aplicada à mineração, pode ser sumarizado na existência de **métodos tradicionais**, disponíveis desde a década de 70, baseados na técnica de discretização retangular para representação da distribuição espacial de teores, limites e volumes dos depósitos minerais e minas, e **métodos que utilizam a técnica de 3-D "Component Modeling"**, uma inovação no conceito introduzida em 1988.

Os Métodos Tradicionais utilizam a discretização retangular do corpo de minério, com os componentes de modelamento definidos como blocos ("paralelepípedos") de tamanho variado, e podem ser diferenciados em :

- Métodos 3-D por modelagem de blocos - constituem-se nas melhores técnicas disponíveis para representação acurada da distribuição espacial de teores de minério. Entretanto, para a representação geométrica de volumes e limites de corpos introduz aproximações, as quais são geralmente inaceitáveis para depósitos de minérios complexos, mesmo quando as mesmas são otimizadas por técnicas de sub-blocagem;
- Métodos de modelagem utilizando "wire-frame" - constituem-se em uma extensão dos métodos por modelagem de blocos, aplicada com o objetivo de obter melhor definição dos limites ou contornos de corpos de minério. Tratam-se de um avanço técnico em relação aos primeiros métodos, porém não logram eliminar as aproximações inerentes à técnica de divisão do corpo de minério em blocos.

Além das limitações mencionadas para a representação tridimensional da geometria, reportam-se também a esses tipos de métodos, erros e conflitos geoestatísticos causados por não ser considerada a relação existente entre estimativas de teores e aspectos geométricos /espaciais do corpo de minério. Acrescentam-se, ainda ineficiências genéricas ao longo do processo de modelagem impostas pela utilização de um único critério e modelo para representar a geologia, os teores e os limites da mina.

O método de 3-D "Component Modeling" foi desenvolvido especificamente para uma melhor avaliação e representação dos aspectos geométricos / volumétricos de corpos de minério e jazidas, sendo que a partir de 1990 foi também integrado aos cálculos geoestatísticos envolvidos na modelagem^{80,81}.

Este método permite que a caracterização geométrica (tamanho e forma) dos elementos de modelamento, ou os componentes individuais do modelo, seja feita pelo usuário, que define, então, o nível de precisão desejado.

A nova técnica possibilitou, no estágio atual de desenvolvimento de programa, a racionalização do processo de modelagem utilizando o conceito de componentes individuais do modelo aplicado para os elementos utilizados nas estimações geoestatísticas, elementos que se constituem nas regiões de influência dos teores. Para o cálculo da distribuição dos teores nos elementos, a nova tecnologia de estimação significou uma implementação para terceira dimensão dos critérios existentes para áreas irregulares em 2-D, e, em essência, envolve a representação de um sólido por um conjunto tridimensional de pontos discretos contidos na geometria desse volume.

A nova abordagem, estendida para os cálculos geoestatísticos, consegue eliminar não só as dificuldades de reprodução de volumes / geometria, como apresenta tratamento geoestatístico dos teores no mesmo sólido gerado, possibilitando evitar os conflitos inerentes à utilização de modelos diferentes para representar a geologia, os teores e os limites da mina.

6.3.1.2 - Recursos Computacionais Empregados

Programas para micro computadores que atendam parcial ou totalmente as atividades relativas à avaliações de um corpo de minério, são amplamente disponíveis no mercado mundial e nacional. Invariavelmente tratam-se, entretanto, de programas que utilizam os métodos tradicionais de modelagem, com as limitações técnicas já discutidas.

Existem programas simplificados, que atendem atividades específicas relativas ao modelamento de jazidas, podendo ser aplicados de uma forma integrada, e que trazem como vantagem a facilidade de utilização. Tais programas se mostram muito úteis em fases de avaliações de corpos de minério onde o objetivo é obter uma primeira visualização de quantidades, sem preocupação com precisão de cálculos, situações em que inclusive os dados costumam ser esparsos e nem permitem avaliações com maior confiabilidade.

Os programas com maiores recursos são os denominados de "pacotes integrados" ("integrated package"), considerados como tecnologia de ponta, que contém recursos para planejamento de mina, e possuem os seguintes tópicos para modelagens de jazidas:

- Edição e gerenciamento do Banco de Dados,
- Recursos gráficos e de confecção de mapas,
- Modelamento em dimensões de 2D e 3D.

Existem vários programas integrados disponíveis no mercado mundial, aplicados à mineração, sendo os mais difundidos referidos na tabela 6.3.1 reproduzida abaixo, muitos dos quais possuem versões para operação em micro computadores e para estações gráficas.

As versões para micro computadores usualmente possuem recursos mais restritos para a confecção e manuseio de modelos tridimensionais. Cada um deles mostra especialização em um determinado aspecto técnico, destacando-se o da Lynx como o único programa a possuir a técnica de modelagem 3-D "Component Modeling" .

TABELA 6.3.1

Relação de Programas Integrados para Modelagem Tridimensional Mais Difundidos

Programa	Fornecedor	Ambiente
MICROMINE	Micromine	microcomputador
MINEMAP		microcomputador
STRATIGRAPH	Geostat Systems	microcomputador
SURPAC		microcomputador
VULCAN	KRJA	microcomputador
DATAMINE	Datamine	microcomputador / estação de trabalho
EAGLES-PC	Morrinson-Knudsen	microcomputador / estação de trabalho
LYNX	Lynx Geosystems	microcomputador (Microlynx) estação de trabalho (Lynx MMS)
MEDSYSTEM	Mintec	microcomputador / estação de trabalho
PC-XPLOR / PC-MINE	Gemcom	microcomputador / estação de trabalho
MINESCAPE	Mincom	estação de trabalho
MINEX	Exploration Computer Services	estação de trabalho

Referências: 82,83,84

7 - UM ESTUDO DE CASO - CARACTERIZAÇÃO DE UM DEPÓSITO DE NIÓBIO ASSOCIADO A COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO

7.1 - INTRODUÇÃO

A caracterização da jazida de nióbio selecionada como estudo de caso para esta tese, foi realizada como parte de um projeto de avaliação técnico-econômica que vislumbrava a instalação de uma operação mineira, com atividades de lavra, beneficiamento e tratamento metalúrgico para produção de ferro-nióbio, junto ao parque industrial para exploração de fosfato da GOIASFÉRTIL, instalado no local da jazida.

Para melhor visualização do contexto em que foram realizados os estudos, é apresentado neste capítulo um breve sumário da situação do bem mineral em foco, e uma sinopse do projeto como um todo, com as implicações da caracterização nos seus resultados econômicos.

7.1.1 - A Situação do Nióbio

O início da aplicação industrial do nióbio data da década de 30, utilizado como elemento de adição em aços inoxidáveis (ferro-nióbio).

A sua produção comercial mostra dois períodos bastante distintos quanto à matéria prima fonte, os quais conseqüentemente se diferenciam também quanto às atividades mineiras (lavra e beneficiamento mineral) e metalúrgicas (extração do metal) ^{85,86,87}.

No primeiro período, 1930 a 1960, a fonte do metal era o mineral columbita-tantalita, obtido a partir de jazidas pegmatíticas, com elevado preço pela escassez da matéria prima, e conseqüente uso metalúrgico restrito a alguns tipos de aço inoxidáveis e algumas superligas.

O segundo período, desencadeado pela viabilização técnico-econômica de obtenção de nióbio a partir do mineral pirocloro, de ocorrência em jazidas associadas a complexos carbonatíticos, marcou uma transformação radical nos aspectos de preço e disponibilidade de matéria prima.

A atual situação é de reservas abundantes estimadas em 4.200×10^3 Nb (1993) em um quadro de 31.299×10^3 t Nb de recursos minerais conhecidos, na forma mineral principal de pirocloro ⁸⁸.

O Brasil destaca-se como o maior detentor das reservas mundiais, perfazendo 95% do total conhecido. Considerando-se a demanda atual, são reservas suficientes para abastecer o consumo mundial por mais nove séculos, sendo que os recursos alcançariam 20 séculos ^{87,88}.

Atualmente a produção é regulada pelo consumo, sendo o Brasil o maior produtor mundial, responsável por 80% do total produzido nos últimos três anos ^{89,90}. Trata-se de uma indústria verticalizada, com a comercialização quase exclusiva de produtos transformados (nióbio-ligas e óxido de nióbio). A quase totalidade da produção mundial é obtida pela exploração comercial de apenas três jazidas:

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| • Araxá, MG, Brasil | 15.200 t Nb (1994) |
| • Catalão, GO, Brasil | 950 t Nb (1994) |
| • Saint Honoré, Quebec, Canadá | 2.400 t Nb (1994) |

Existiu operação de uma usina protótipo de concentração de pirocloro na Lueshe Mine no Zaire, a qual produziu 500 t Nb (1993) e teve sua operação suspensa no decorrer de 1993, por motivo de situação política no país ^{88,89}.

7.1.2 - O Depósito de Nióbio de Catalão I

O complexo intrusivo ultramáfico-alcálico de Catalão I situa-se no Município do Ouvidor, comarca de Catalão, dentro da micro-região Sudeste de Goiás, tendo coordenadas geográficas aproximadas de 47°48' longitude oeste e 18°08' latitude sul, em área distante cerca de 23 km da cidade de Catalão, conforme mapa de localização da figura 7.1.1 ⁹¹.

O complexo tem forma elíptica, com eixos NS de 6 km e EW de 5,5 km, e destaca-se na topografia como um proeminente platô. Está totalmente coberto por um manto de intemperismo, não existindo exposições de rocha fresca em superfície. Neste manto laterítico foram delimitadas áreas contendo mineralizações de vermiculita, fosfato, titânio, nióbio e terras raras, como ilustrado no mapa da figura 7.1.2, onde observam-se duas porções distintas mineralizadas a nióbio, uma delas com mineralização de fosfato associada ⁹¹.

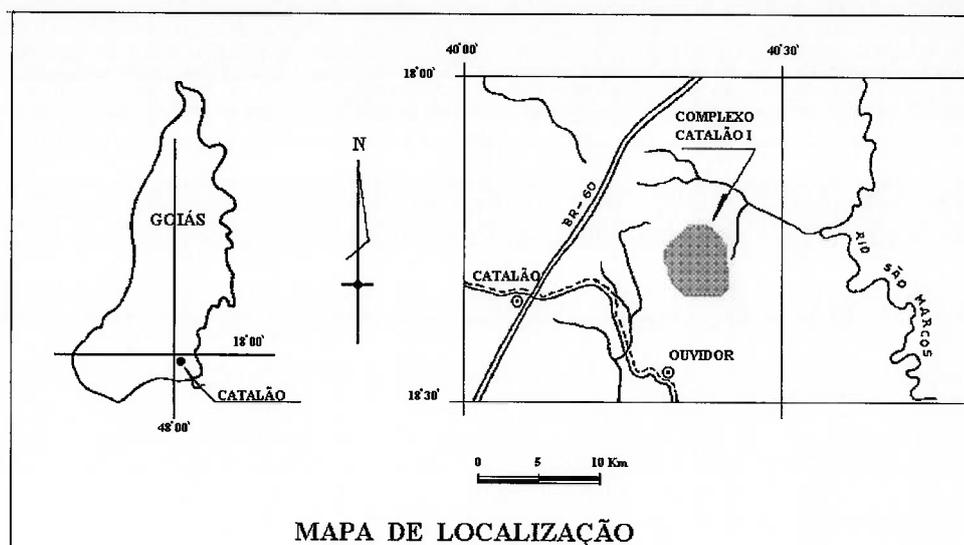


FIGURA 7.1.1
MAPA DE LOCALIZAÇÃO

O complexo tem forma elíptica, com eixos NS de 6 km e EW de 5,5 km, e destaca-se na topografia como um proeminente platô. Está totalmente coberto por um manto de intemperismo, não existindo exposições de rocha fresca em superfície. Neste manto laterítico foram delimitadas áreas contendo mineralizações de vermiculita, fosfato, titânio, nióbio e terras raras, como ilustrado no mapa da figura 7.1.2, onde observam-se duas porções distintas mineralizadas a nióbio, uma delas com mineralização de fosfato associada ⁹¹.

A região objeto deste estudo localiza-se na porção central da ocorrência alcalina, a oeste de depressão central no domo, denominada Lagoa Seca, e abrange uma área restrita, com aproximadamente 1 km², contém mineralização de fosfato e nióbio, e é caracterizada por elevado coeficiente de variação de teores de nióbio (máximo de até 6,0 % Nb₂O₅).

A área mineralizada a nióbio encontra-se dividida em alvarás pertencentes a dois grupos empresariais distintos. Uma parte, com direitos minerários da MINERAÇÃO CATALÃO DE GOIÁS, tem reservas de 4.200.000 t minério com teor de 1,20% Nb₂O₅, está em operação industrial produzindo ferro-nióbio desde 1976 ⁹², um croqui da situação dos alvarás está indicado no mapa da figura 7.1.2.

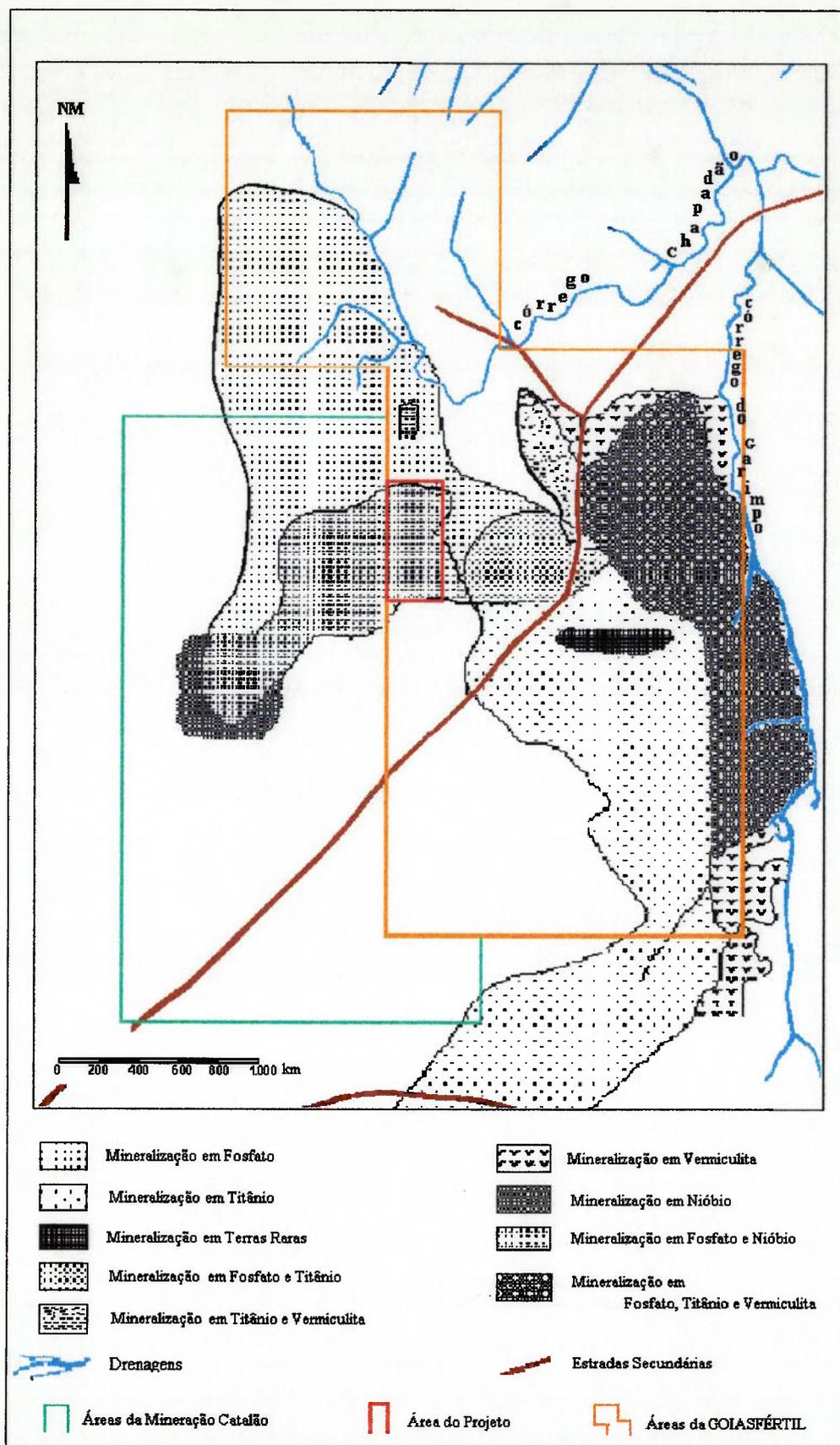


FIGURA 7.1.2

MAPA DAS ÁREAS MINERALIZADAS EM CATALÃO I (adaptado de 91)
CROQUI DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ALVARÁS DE PESQUISA

O restante da área com mineralização de nióbio, totalizando reservas de 144.659.066 t de minério (teores $> 0,3\% \text{ Nb}_2\text{O}_5$) 91,93, corresponde a uma região não explorada, dentro de áreas com direitos minerários pertencentes à GOIASFÉRTIL desde 23/01/1979, e constitui-se no objeto desta tese .

7.1.3 - Critérios e Objetivos do Projeto

A descoberta da mineralização de nióbio na região de Catalão I data de 1894 ⁹⁴.

No início da década de 70, como resultado de uma campanha intensiva de pesquisa mineral no complexo alcalino-ultramáfico, realizada pela METAGO - METAIS DE GOIÁS - houve a delimitação de corpos mineralizados ⁹³.

A pesquisa então realizada, apoiou-se em trabalhos de superfície e de sub-superfície, estes realizados através de furos de sondagem com profundidades variáveis, normalmente executados de forma a penetrar todo o manto de intemperismo, tendo fornecido dados sobre as características do manto de alteração e poucas informações sobre a rocha subjacente.

Esta pesquisa redundou no bloqueio de uma reserva geológica de nióbio, que somente veio a ser objeto de investigações tecnológicas na década de 80, visando avaliação técnico-econômica para sua exploração.

Nesta época foram realizados trabalhos complementares de pesquisa mineral na região da Lagoa Seca, com execução de uma campanha adicional de 1.000 m de sondagem, visando detalhamento da área mineralizada a nióbio, a qual forneceu também amostras para estudos tecnológicos ⁹⁴.

Foram, então, desenvolvidos estudos do minério em apoio a uma etapa de viabilidade técnico-econômica prévia à elaboração de projeto para implantação de mina, e as investigações tecnológicas desencadeadas tiveram a precisão nos índices alcançados compatível com esta etapa, fornecendo subsídios para decisão de realização do empreendimento ⁵.

Os estudos compreenderam caracterização tecnológica, ensaios de concentração mineral e testes hidrometalúrgicos para limpeza do concentrado de pirocloro, em um projeto integrado com interação dos três setores de especialização, o que imprimiu excelente performance à pesquisa tecnológica, tendo possibilitado acurada definição dos parâmetros críticos para aproveitamento deste minério e desta jazida.

Os estudos de caracterização foram efetuados pela autora desta tese, e fazem parte integrante dos resultados percorridos no corpo do presente documento.

Com base nos estudos tecnológicos e nos trabalhos complementares de pesquisa, foi feita uma reavaliação das reservas de minério, definindo as reservas tecnológicas, que se constituíram no minério considerado nos estudos econômicos.

7.1.3.1 - Estudos de Caracterização Tecnológica

A caracterização foi norteada pelas premissas do projeto, e não teve por objeto, portanto, esgotar as investigações tecnológicas de uma temática tão complexa como minérios de pirocloro, mas sim verificar as possibilidades e condições básicas orientativos para decisões quanto à exploração da jazida ⁵.

Ressalta-se que o nível de conhecimento necessário para equacionamento da problemática do minério nesta etapa é aquele que permite definir se o minério é concentrável ou não, e quais são os parâmetros básicos de processo, tais como recuperações esperadas e qualidade do concentrado.

Não se propôs, este estudo prévio, a detalhar as variações do minério em escala de amostragem compatível com a exploração da mina. Os parâmetros do minério que permitam o conhecimento adequado de seu comportamento tecnológico deverão ser levantados em apoio à exploração e à medida da lavra do corpo de minério.

As amostras utilizadas para a caracterização foram essencialmente de furos de sondagem, e procuraram abranger toda a área de interesse para o projeto. Foram usados recursos e técnicas tradicionais de mineralogia, associadas a ensaios de flotação, neste caso aplicados como recurso complementar da caracterização, prática necessária face à complexidade do minério.

7.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Numa primeira etapa, de levantamento de dados, procedeu-se à coletânea de informações da literatura, dos estudos geológicos desenvolvidos para a área em foco e áreas semelhantes, e das operações de lavra / beneficiamento em projetos similares. As atividades desenvolvidas foram:

- revisão bibliográfica, complementação da compilação das informações disponíveis na literatura sobre depósitos e minérios similares;
- obtenção, junto às companhias de mineração envolvidas com a área de interesse e com todo o Complexo de Catalão I, das informações geológicas e tecnológicas existentes, geradas durante e após os trabalhos de pesquisa da jazida mineral;
- levantamento e análise dos processos de beneficiamento a partir de dados da literatura bem como outros obtidos junto à empresa que explora nióbio em Catalão I, a Mineração Catalão.

Esta primeira fase de coletânea, estudo e avaliação de informações conduziu ao estabelecimento de um panorama do modelo da mineralização e do problema tecnológico expostos nos subitens subsequentes.

7.2.1 - O Modelo da Mineralização

7.2.1.1 - Mineralização Primária

A mineralização primária de pirocloros é condicionada a complexos alcalinos-carbonatíticos.

A geometria dos corpos mineralizados é a mais variada possível, existindo uma classificação das mineralizações conhecidas de nióbio em relação à associação litológica e geometria⁹⁵:

- carbonatitos em complexos alcalinos anelares;
- carbonatitos em complexos alcalinos não anelares;
- carbonatitos não associados a complexos alcalinos;
- carbonatitos extrusivos (vulcânicos).

O conteúdo de elementos menores e traços de rochas carbonatíticas é comparado com o das rochas ígneas e sedimentares, sendo notável a concentração de Nb, elementos de terras raras (ETR), Zr e F, além de Sr, Mo, e S em menores proporções^{95,96,97,98}.

Esses elementos ocorrem nos carbonatitos em três formas básicas^{95,98}:

- substituindo outros elementos nos minerais acessórios;
- em minerais acessórios, onde são os elementos principais;
- em minerais específicos.

O nióbio concentra-se junto aos carbonatitos sovíticos (calcíticos), que se constituem nas primeiras fases carbonatíticas a se formarem. Parece ser mais raro nos complexos alcalinos em que o carbonatito associa-se a volumes importantes de rochas silicatadas, onde é proeminente apenas a primeira fase de intrusão carbonática. Por outro lado, também é raro nos carbonatitos típicos de fase tardia de intrusão (carbonatitos ankeríticos/sideríticos). A imobilidade geoquímica do nióbio faz com que ele permaneça na massa carbonatítica principal, raramente sendo transgressivo às encaixantes^{95,99}.

Nos carbonatitos o nióbio ocorre em mineral próprio, o pirocloro, responsável pelas concentrações econômicas. O pirocloro é um dos minerais mais comuns dos carbonatitos, encontrado em praticamente todas as ocorrências conhecidas e em quantidades extremamente variadas, desde de raro acessório a menor constituinte da assembléia mineral.

A ocorrência mais comum é em complexos onde os sovitos perfazem o maior volume de rochas carbonatadas, exceção feita a Araxá, onde o Nb parece derivar de transformação de beforsitos (carbonatitos dolomíticos)^{99,100}.

Teores típicos de Nb em depósitos primários são da ordem de 0,5 a 0,7 % Nb₂O₅, como apresentado na tabela 7.2.1.

TABELA 7.2.1
Coletânea de Teores Típicos de Minérios Primários de Pirocloro

Localidade	% Nb ₂ O ₅
Saint Honoré, Canadá	0,65
James Bay, Canadá	0,52
Nemegosenda, Canadá	0,47
Oka, Canadá	0,45
Lackner Lake, Canadá	0,23
Ondurakorume, Namíbia	0,30
Sandkopsdrif, África do Sul	0,15
Fen Complex, Noruega	0,50

Referências: 95,97,98,101,102,103

7.2.1.2 - Mineralização Secundária

Carbonatitos e rochas alcalinas associadas são extremamente suscetíveis à ação do intemperismo por serem rochas insaturadas em sílica, originárias do manto, e, portanto, bastante instáveis nas condições superficiais de pressão e temperatura. Em regiões tropicais estão normalmente muito intemperizados, formando mantos de laterização que podem atingir mais de 200 m de espessura.

O processo de alteração supérgena promove a solubilização de alguns dos constituintes maiores das rochas (carbonatos e silicatos), com efeitos de concentração residual de menores constituintes. Para o nióbio ocorre importante enriquecimento no manto residual laterítico, onde são encontrados teores da ordem de 2 a 4 % Nb₂O₅. A mineralização secundária representa importante controle de mineralização de nióbio nos depósitos localizados em regiões tropicais, como no Brasil e na África.

Na África são conhecidos alguns depósitos enriquecidos pela mineralização secundária, contendo de pirocloro muito fino, de difícil recuperação^{95,104,105,106,107,108}, com teores indicados na tabela 7.2.2.

No Brasil a mineralização secundária foi processo decisivo na diferenciação dos teores, comparando-se com os demais depósitos do mundo, e são três as mineralizações principais conhecidas, como exposto na tabela 7.2.3.

TABELA 7.2.2
Coletânea de Teores em Depósitos Africanos com Mineralização Secundária

Localidade	% Nb ₂ O ₅
Mbeya, Tanzânia (Panda Hill)	0,30 (0,79)
Mrima Hill, Kenia	0,70
Mabounié, Gabão	1,90
Lueshe, Zaire	1,34
Chilwa Island, Malawi	1,00

Referências: 87,95,102,103,104,105,106,107,108

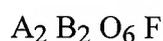
TABELA 7.2.3
Principais Depósitos de Pirocloro no Brasil

Localidade	% Nb ₂ O ₅
Catalão, Goiás	1,50
Araxá, Minas Gerais	2,50
Tapira, Minas Gerais	0,67

Referências: 87,92,109,110,111, 112,113, 114,115

7.2.1.3 - Mineralogia do Minério

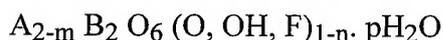
Os minérios primários de nióbio contêm como mineral útil o pirocloro, o qual representa um grupo composto por minerais de simetria cúbica, com dureza Mohs 5 a 5,5, densidade 4 a 4,4 g/cm³, brilho resinoso e cor variável. Sua fórmula geral é ^{95,97,116,117}:



onde, **A** -- principalmente Na⁺ e Ca²⁺, com freqüentes substituições e vacâncias

B -- principalmente Nb⁵⁺, Ti⁴⁺ ou Ta⁵⁺

As substituições isomórficas na sua estrutura cristalina são muito comuns, formando subgrupos, e a fórmula mais adequada, seria:



A natureza e a abundância dos cations na posição **B**, permite a separação em três subgrupos maiores:

- subgrupo do pirocloro = Nb + Ta > 2 Ti e Nb > Ta
- subgrupo da microlita = Nb + Ta > 2 Ti e Nb < Ta
- subgrupo da betafita = Nb + Ta < 2 Ti

A forma de ocupação do cation na posição A permite distinções dentro dos subgrupos, e é consenso atual a distinção apenas pela aplicação do cation predominante na frente do nome do subgrupo, abandonando a prolixa nomenclatura de espécies gerada nos estudos mineralógicos detalhados ¹¹⁷.

Com base na ocupação de cations na posição A, os pirocloros também podem ser separados em dois grandes subgrupos: membros sódico-cálcicos (Na-Ca exclusivos até 20% da posição A) e outros membros.

A composição química é função dos subgrupos, com o teor de nióbio variando:

- | | |
|--|--|
| • espécie Na Ca Nb ₂ O ₆ F | 73 % Nb ₂ O ₅ |
| • subgrupo pirocloro-microlita | 30 a 80 % Nb ₂ O ₅ |
| • subgrupo da betafita | 10 a 30 % Nb ₂ O ₅ |

Nos complexos alcalino-carbonatíficos, embora o mineral útil seja essencialmente pirocloro, existem duas outras espécies minerais portadoras de nióbio, que ocorrem associadas, e têm relevância nos processos de mineralização secundária, são elas:

- grupo da tantalita-columbita: A B₂ O₆,
a columbita (Fe, Mn)Nb₂O₆ em série isomorfa com (Fe,Mn)Ta₂O₆,
ocorre como substituições de granulação fina no pirocloro;
- grupo das perovskitas: A B O₃, onde,
A = Na⁺, ETR, Ca²⁺ B = Ti⁴⁺, Nb⁵⁺, Fe²⁺, Mn²⁺

Na mineralização secundária, o mineral útil formado corresponde a um pirocloro hidratado de bário - a pandaíta ou Ba-pirocloro - que mostra teores de 60 a 78 % Nb₂O₅ e ao redor de 15 % BaO, conforme ilustrado na tabela 7.2.4.

A evolução do processo de alteração do pirocloro ao longo do perfil do solo parece ter um zoneamento, com presença importante de pirocloro primário e Ba-pirocloro no nível de rocha alterada ^{104,105,107}, caminhando para presença exclusiva de Ba-pirocloro nos níveis mais superficiais.

A natureza química do processo de alteração se caracteriza pela substituição dos cations A (Na e Ca), por um número menor de ions com raio iônico maior como o Ba, Sr e K, com simultânea hidratação ^{116, 117}, no panorama geral de:

- pirocloro original: muito Ca^{2+} pouco Sr^{2+}
- pirocloro alterado: pouco Ca^{2+} até 32% Sr^{2+} e 44% Ba^{2+}

As etapas do processo envolveriam a expansão do retículo acompanhada por perda de cations Ca, Na e F, e reocupação das vacâncias por cations menos solúveis como Sr, Ba e moléculas de H_2O .

TABELA 7.2.4
Coletânea de Composição Química de Ba-pirocloros

óxido	Araxá	Araxá	Araxá	Mrima Hill	Mrima Hill	Panda Hill
% BaO	16,01	16,51	14,21	15,3	15,31	12,88
% Nb ₂ O ₅	61,26	63,42	65,97	57,4	65,60	69,06
% Ta ₂ O ₅	--	0,15	0,07	0,5	0,57	0,23
% TiO ₂	2,30	2,30	4,74	4,1	4,63	3,87
% Fe ₂ O ₃	4,37	2,63	1,19	--	--	0,44
% MnO	0,16	0,13	0,01	--	--	--
% CaO	0,43	0,44	0,06	1,4	1,37	0,86
% SrO	0,40	nd	nd	tr	--	6,60
% La ₂ O ₃ + CeO ₂	4,39	3,29	1,63	2,1	2,17	2,06
% P ₂ O ₅	0,15	nd	nd	--	--	--
% PbO	0,40	0,42	0,90	0,2	0,23	--
% ThO ₂	2,27	2,34	1,65	0,8	0,92	0,62
% SnO ₂	0,10	0,10	0,08	nd	nd	--
% H ₂ O	8,26	8,50	8,26	8,9	8,17	4,11
Referências	114	87,115	97	104	108	106

-- = abaixo do limite de detecção analítico

nd = não disponível

O papel do Sr não é bem conhecido, desde que ele está completamente depletado no Ba-pirocloro, presume-se que ou seja removido pelo Ba na intensificação do processo, ou seja eliminado do sistema pela ação supérgena logo no início e não participe do processo.

A natureza física da alteração corresponde ao desenvolvimento no mineral de uma textura micro granular, além de menor densidade. Caracteristicamente o Ba-pirocloro forma um agregado de microcristalitos, translúcido e friável, fato que faz com que usualmente se concentre em granulometrias muito finas. A alteração inicia-se na superfície e ao longo de fissuras dos cristais do pirocloro original, evoluindo de fora para dentro^{104,106}.

Esse processo deve-se, provavelmente, à ação supérgena, podendo ter contribuição de processos hidrotermais de baixa temperatura, com efeitos semelhantes aos dos processos supérgenos. A natureza original do pirocloro, se metamítico ou não, torna-o mais suscetível a essas alterações, porém os fatores mais importantes se prendem à intensidade dos processos hidrotermais/supérgenos^{98,99,115,118}.

Os minerais associados à Ba-pirocloro são principalmente óxidos de ferro hidratados (goethita, limonita), fosfatos aluminosos e ferrosos (microcristalinos e/ou amorfos) e argilo-minerais¹⁰⁵.

7.2.1.4 - A Mineralização em Catalão I

O complexo de Catalão I tem idade cretácea superior, sendo intrusivo em metamorfitos pré-cambrianos, fenitizados ao longo do contato com o complexo alcalino. É composto por um núcleo de rochas ígneas de natureza silico-carbonatítica, representado por ultramáficas principalmente glimeritos e foscoritos^{99,119,120}, com peridotitos e piroxenitos serpentinizados, cortado por veios e intrusões irregulares carbonatíticas (sovitos).

Enquadra-se no tipo geométrico de complexos carbonatíticos anelares, apresentando uma sucessão de tipos petrográficos intrincados e confusos, resultantes de cinco estágios de intrusões magmáticas carbonatíticas, alternados com processo de metamorfismo alcalino, em muito se assemelhando ao complexo carbonatítico de Sokli, na Finlândia^{99,118,119}.

Silexitos distribuídos irregularmente por todo o complexo, evidenciam intensa participação de processos de silicificação^{113,120,121}. O domo foi preservado por um anel de quartzitos que circunda as rochas ígneas que foi truncado por uma superfície de aplainamento.

Os dados disponíveis sobre as rochas subjacentes, limitado a informações obtidas por sondagens, indicam mineralização primária de Nb no carbonatito central do Complexo, associada essencialmente ao segundo estágio magmático, que apresentou atividade pneumatólítica-hidrotermal tardia carbonatítica. As maiores quantidades de nióbio se associam a rochas ricas em magnetita, flogopita e apatita, contendo pirita como acessório, e que se referem a uma das fases iniciais da atividade carbonatítica. Os teores na rocha variam de 0,4 a 3,3 % Nb₂O₅, com média de 1,0%¹¹⁹.

A mineralização associada ao manto de alteração parece ser decorrente de enriquecimento supergênico a partir do intemperismo químico das rochas intrusivas, tendo ocorrido também importante participação de processos hidrotermais de baixa temperatura com estágios de silicificação ^{118,119,120,121}.

Os processos mineralizadores de nióbio se prendem aos hidrotermais de baixa temperatura, responsáveis pela transformação de pirocloros primários Na-Ca (kopita) em Ba-pirocloros (pandaíta) ¹²², e aos de intemperismo químico, que promoveram intensa lixiviação de minerais primários com enriquecimento de minerais resistatos ^{112,118,120,121}. Os teores no minério residual oscilam de 0,4 a 3,0 % Nb₂O₅, com média da ordem de 1,5 % ¹¹⁹.

Dentre os depósitos de pirocloro associados a mineralização secundária, situa-se como um tipo de médio a alto teor, sendo que apresenta conteúdo inferior à jazida de Araxá, cujos teores são excepcionais ^{87,114,123}.

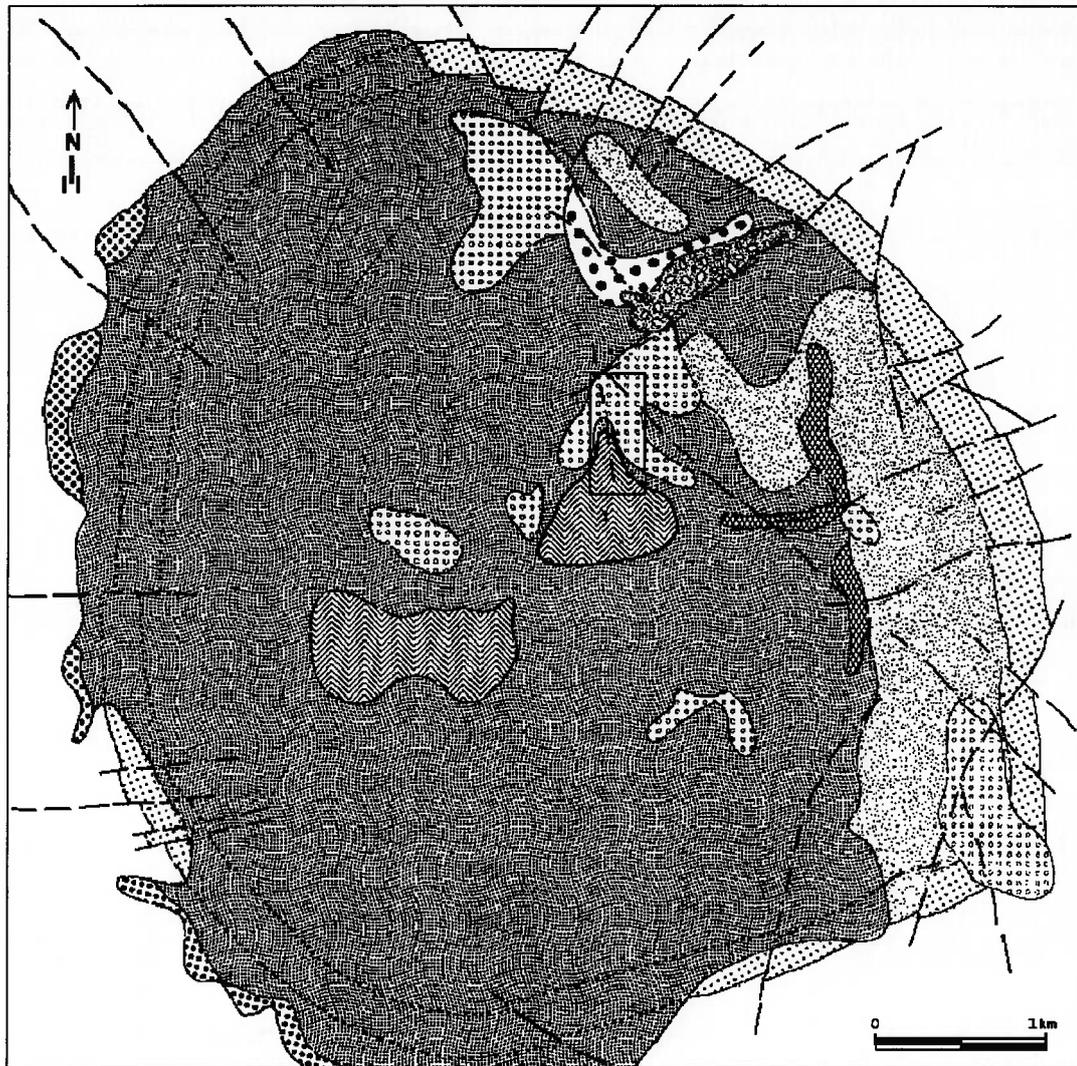
O manto de intemperismo que cobre o depósito, tem caráter laterítico e localmente atinge de 15 até 250 m de espessura, com as maiores espessuras ocorrendo principalmente na porção oeste da estrutura. São aí reconhecidos e descritos unidades ou tipos de materiais bastante característicos, sendo que apenas alguns deles são de relevância na área do projeto. O mapa geológico do complexo (vide figura 7.2.1), trata-se, em realidade, de um mapa de variedades de solo, como consequência da escassez de informações sobre a rocha subjacente, devida ao espesso manto de alteração.

Manchas esparsas de crosta limonítica, caracterizadas pela presença de magnetita, são descritas em toda a área da intrusão. As cangas magnetíticas têm espessura inferior a 15 m, ocorrendo em aglomerados de grandes matacões, isolados, restos de extenso manto de laterização que já cobriu a região. É uma canga escura, concrecionária, contendo magnetita em porfiroblastos centimétricos imersos em matriz microscópica de magnetita e outros óxidos de ferro; veios e cavidades preenchidas por quartzo submilimétrico são freqüentes ^{119,120}.

A maior expressão da canga rica em magnetita ocorre nas cercanias da Lagoa Seca, e, localmente cede lugar a uma canga contendo nióbio, sempre cortada por veios de quartzo submilimétrico ^{119,113, 120, 121}.

MAPA GEOLÓGICO DO COMPLEXO DE CATALÃO I

SIMPLIFICADO DE CARVALHO, 1974 - BAECKER, 1983



LEGENDA

	Sedimentos Recentes		Quartzito Fenizado
	Solo Laterítico Rico em Magnetita		Área do Projeto
	Solo Laterítico Rico em Vermiculita		Contacto Detectado
	Laterita Nodular		Contacto Aproximado
	Canga Laterítica Rica em Magnetita		Contacto Encoberto
	Conglomerado Limonítico		Falha Indiscriminada
	Sedimentos Argilosos da Lagoa Seca		Falha Encoberta
	Silexito		
	Metamorfitos		

FIGURA 7.2.1
MAPA GEOLÓGICO DO COMPLEXO ALCALINO DE CATALÃO I ⁸⁷

Como unidade de maior representatividade na intrusão destaca-se um solo laterítico síltico-argiloso, amarelo a vermelho, contendo magnetita, ilmenita, martita, quartzo, barita e, eventualmente, apatita caracterizando-se por elevada quantidade de magnetita e pouco quartzo. Forma horizontes de até 2 m de espessura, sendo provável produto da desagregação mecânica de crostas limoníticas; abaixo deles o solo mostra-se de coloração amarela, mais argiloso e friável, com menor porcentagem de magnetita ^{113,119, 120, 121}.

Na depressão central da estrutura dômica, conhecida como Lagoa Seca, são encontrados sedimentos argilosos, de possível idade terciária, relativos a uma dolina de dissolução ou desmoronamento, localizada sobre o núcleo carbonatítico do Complexo, com preenchimento por material transportado das encostas vizinhas. Constituem-se em 30 a 150 m de espessura de argilas plásticas, caulínicas, de cor branca a cinza clara, contendo pequenos núcleos de matéria orgânica associada ^{89,102,110,111}.

Na área do projeto, as duas unidades de maior expressão em superfície são a canga magnetítica rica em nióbio, e os sedimentos argilosos na zona de influência da Lagoa Seca, como ilustrado no mapa geológico do Complexo da figura 7.2.1.

A composição mineralógica do minério de nióbio descrita ^{113,119,120, 121,122} é:

- minerais de Fe: titanomagnetita, ilmenita, ilmeneo-hematita, hematita, goethita, e limonita;
- minerais de Ti: leucoxênio (anatásio), perovskita e titanita, além dos Fe-Ti;
- fosfatos: apatita, colofana, wilkeita, florencita, goiazita, alunita-svanbergita, lusungita, vivianita, hinsdalita, rabdofanita (monazita hidratada);
- minerais de Nb: pirocloro, Ba-pirocloro (pandaíta) e secundariamente o leucoxênio e a perovskita;
- silicatos: quartzo, micáceos, clorita e argilo-minerais;
- outros: barita, badeleíta, zirconolita e Nb-zirconolita.

Foram identificadas três espécies de pirocloro - kopita e Ti-Fe-pirocloro, com cristais bem formados, e outra microcristalina - Ba-pirocloro. O Ba-pirocloro é a espécie amplamente predominante no solo residual laterítico ¹¹⁹, possui significativo conteúdo de Sr e, por vezes, manchas metamíticas. Foram reconhecidas, por estudos em microscopia eletrônica de varredura, variedades de Ba-pirocloro contendo Pb em sua estrutura cristalina, ao lado de variedades sem este elemento; a presença de chumbo se relaciona com cristais menores ¹¹⁹.

7.2.2 - O Problema Tecnológico

Um longo e árduo caminho, iniciado em 1954 nos laboratórios do "Bartelle Memorial Institute" com o minério de Araxá, foi percorrido para ser alcançado um processo economicamente viável para a concentração de pirocloro, investigação tecnológica esta motivada pela então escassez de columbita-tantalita e abundância de reservas na forma de pirocloro ⁹⁰.

Praticamente toda a experiência mundial atual no beneficiamento de minérios com pirocloro está polarizada nas pesquisas de processo e experiências industriais das minerações brasileiras, bem como das minerações canadenses situadas em complexos similares, porém com rochas não alteradas ^{124,125}.

As diferenças fundamentais no que se refere a ação de processos intempéricos sobre a rocha originalmente portadora de nióbio, promoveram características do minério distintas entre as minas canadenses e as brasileiras, tendo conduzido a assembléias minerais peculiares de alteração, diferentes daquelas apresentadas pela rocha alcalina-carbonatítica matriz.

Os minérios intemperizados, além de conterem uma variedade distinta de pirocloro, o Ba-pirocloro ou pandaíta, apresentam grande quantidade de lamelas.

Não obstante uma ampla diversidade das rotas de processamento prescrustadas, todas as pesquisas de processo convergiram para soluções aplicáveis industrialmente ^{92,111,113,123,125}, com as seguintes características principais:

- preparação do minério na forma de britagem, moagem, deslamagem e separação magnética de baixa intensidade para remoção de magnetita;
- flotação direta do pirocloro em pH ácido, através de um coletor catiônico combinado ou não com um coletor não iônico, seguida de um estágio de limpeza do concentrado da flotação direta, em pHs crescentemente ácidos;
- calcinação do concentrado de flotação associada a lixiviação ácida, para redução de teores de menores constituintes deletérios à metalurgia.

Em todos os processos aplicados industrialmente, as lamas constituem importante foco de perdas de nióbio, pela tendência dos Ba-pirocloros se concentrarem junto aos finos naturais. Por outro lado, é inevitável a operação de intensa lavagem e deslamagem prévia à flotação, desde que esta pode ser prejudicada pela presença de partículas finas (micrométricas). Visando minimizar essas perdas, é prática corrente a aplicação de processos eficientes de classificação granulométrica, que possibilitam a recuperação de finos com dimensões superiores a 5 micrômetros^{123,125}.

Também é característica, nos minérios lateríticos, a abundância de magnetita presentes no minério de nióbio, o que tem justificado a inclusão no processamento de um etapa de separação magnética de baixa intensidade, normalmente aplicada antes da moagem visando diminuir custos de energia nesta operação, ainda que permaneça uma parcela de pirocloro não liberado associado à elas (vide dados de processo na tabela 7.2.5).

TABELA 7.2.5
Coletânea de Dados Típicos de Beneficiamento Industrial

	Mina de Barreiro em Araxá, MG	Mina de Catalão, GO
Teor de alimentação da usina	3 % Nb ₂ O ₅	1,14 % Nb ₂ O ₅
Massa abaixo de 37 µm	45 %	nd
Nb contido abaixo de 37 µm	55 %	nd
Perda em massa nas lamas - 5 µm	12 %	14 %
Perda de nióbio nas lamas - 5µm	5 a 7 %	16 %
Perda em massa nos magnéticos	10 a 25 %	35 %
Perda de nióbio nos magnéticos	1 a 2 %	13 %
Recuperação de Nb na flotação	75 %	nd
Recuperação total de Nb	60 a 80 %	48 %

Referência: 92, 111, 123,125

nd = dado não disponível

Os minérios brasileiros, bem como materiais intemperizados similares de ocorrência na África, pelas suas características, não possibilitam a obtenção de concentrado comercializável apenas através do beneficiamento. Os concentrados de pirocloro gerados, tanto em usinas industriais como em escala de investigações de laboratório, mostram-se contaminados por impurezas prejudiciais ao processo metalúrgico, conforme ilustrado na tabela 7.2.6, a qual apresenta teores típicos de concentrados de pirocloro antes e após tratamento piro/hidrometalúrgico^{92,119,123,125}.

As impurezas mais típicas, para os minérios intemperizados, são: fósforo, enxofre, chumbo e titânio ^{92,125,126}. Na prática corrente, os três primeiros elementos são removidos por tratamento piro/hidrometalúrgico, o qual propicia também o enriquecimento em nióbio, enquanto as impurezas de titânio têm seu nível controlado no próprio beneficiamento físico.

TABELA 7.2.6
Composições Químicas Típicas de Concentrados de Ba-Pirocloro

óxidos / elementos	Minério de Araxá, MG		Minério de Catalão I, GO
	Concentrado de Flotação *	Concentrado Lixiviado *	Concentrado de Flotação *
Nb ₂ O ₅	55 a 60 %	59 a 65 %	50 %
BaO	15 a 18 %	1 a 3 %	nd
CaO	0 a 0,2 %	15 a 20 %	nd
H ₂ O	5 a 7 %	0,1 a 0,3 %	nd
Fe ₂ O ₃	2 a 8 %	2 a 8 %	7 %
SiO ₂	0,1 a 0,5 %	0,1 a 0,5 %	1,2 %
TiO ₂	nd	nd	4,5 %
Al ₂ O ₃	nd	nd	3 %
MnO ₂	nd	nd	2,5 %
P	0,3 a 0,8 %	0,05 a 0,10 %	0,61 %
S	0,02 a 0,2 %	0,01 a 0,5 %	0,07 %
Pb	0,2 a 1,0 %	0,01 a 0,05 %	nd

* = produto industrial ^{92,111,123}

nd = dado não disponível

7.2.3.1 - A Questão Tecnológica na Mineração Catalão

O parque industrial instalado pela Mineração Catalão, dentro da área do complexo, compreende as unidades de beneficiamento do minério e de metalurgia ⁷⁹. O minério extraído na mina é homogeneizado em pilhas antes de ser enviado para a usina de tratamento, que compreende etapas de moagem, deslamagem, separação magnética de baixa intensidade, e flotação, conforme fluxograma da figura 7.2.2 ⁷⁹. O concentrado de flotação é submetido a um tratamento por lixiviação ácida à quente, com posterior calcinação cáustica, seguida por calcinação a 700°C.

A qualidade do minério é controlada por caracterização metalúrgica (termo adotado internamente na Mineração), que compreende uma rotina de preparação de amostras (moagem abaixo de 0,210 mm, deslamagem em 0,010 mm e separação magnética a imã permanente) seguida por ensaio padronizado de flotação*. O teor de Nb_2O_5 recuperável neste procedimento de laboratório, é o parâmetro de controle adotado para a operação da mina^{92,119}.

A exploração da mina se baseia nas reservas calculadas segundo o conceito de nióbio recuperável, desde que o critério convencional de avaliação da jazida apoiada apenas nos teores do minério, ao longo da vida da mina, mostrou-se inadequado, face à complexidade do minério¹¹⁹. O teor de corte aplicado é de 2,60 kg de Nb_2O_5 recuperável por tonelada de minério (0,26% Nb_2O_5 recuperável).

O conhecimento das características do minério, foi adquirido através de estudos mineralógicos apoiados por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica, e pelo ensaio de controle da qualidade do minério. Como parâmetros do minério críticos para o beneficiamento, destacam-se:

- minério com magnetita fornece as melhores recuperações;
- granulometria do pirocloro, que tem tendência a ser fina;
- variação da liberação do pirocloro ao longo da jazida;
- presença de agregados poliminerálicos, contendo pirocloro, cimentados por limonita;
- grãos de Ba-pirocloro com películas de limonita ou óxidos de manganês;
- presença de badeleíta e zirconolita competindo com o Ba-pirocloro no processo de concentração;
- ocorrência de Ba-pirocloro contendo Pb em sua estrutura cristalina, podendo chegar a comprometer a qualidade do concentrado final do beneficiamento;
- zoneamento mineralógico do minério, caracterizado por diferentes proporções de pirocloro com e sem Pb.

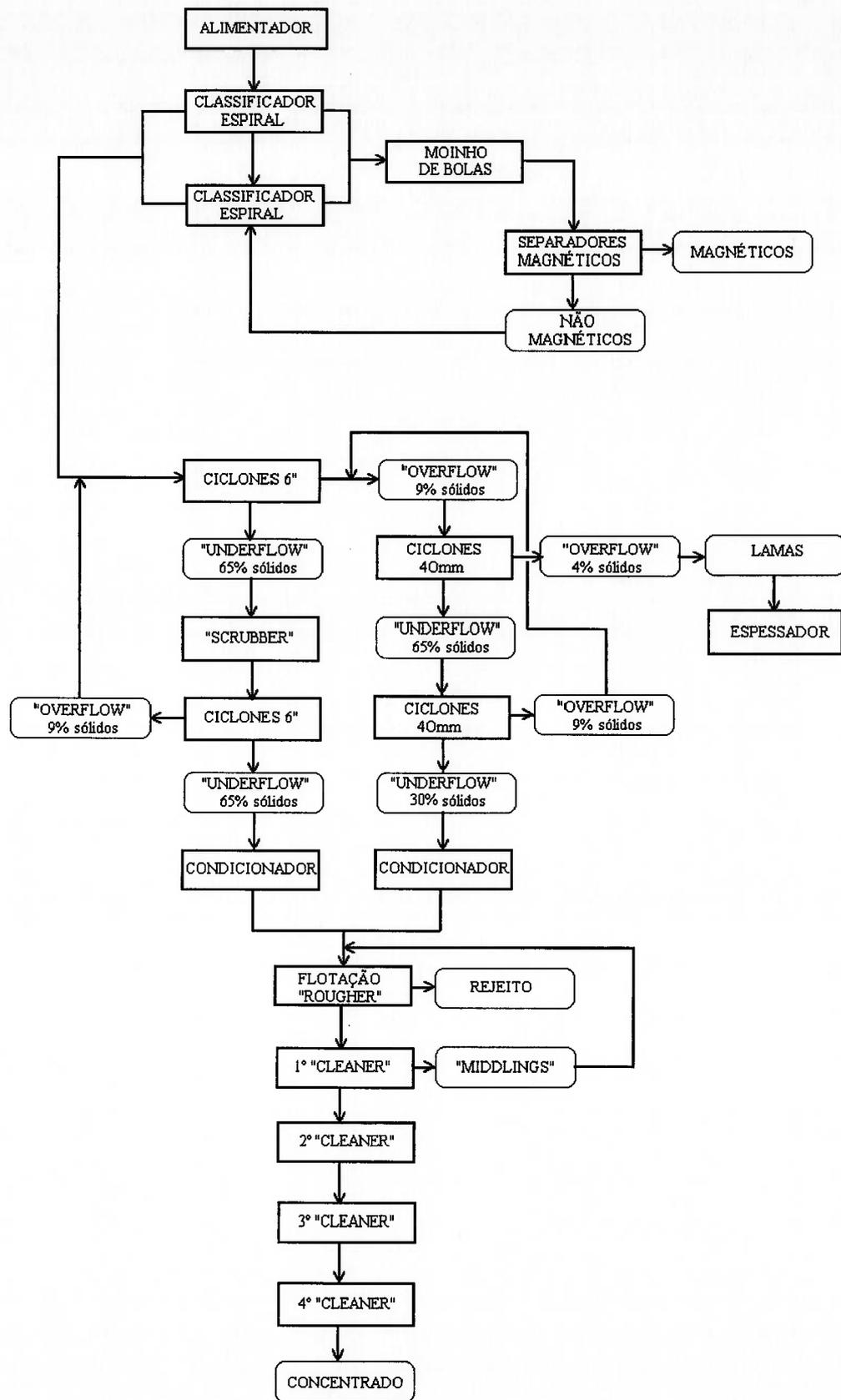


FIGURA 7.2.2

FLUXOGRAMA DA PLANTA DE FLOTAÇÃO DA MINERAÇÃO CATALÃO⁹²

7.3. PROCEDIMENTO ADOTADO NA CARACTERIZAÇÃO

O conhecimento adquirido a partir da revisão bibliográfica, possibilitou a organização do roteiro dos estudos de caracterização, bem como a definição do procedimento experimental de amostragem e ensaios de laboratório, que estão incorporados a este item de procedimento adotado, onde é enfatizada a metodologia de um estudo de caracterização.

7.3.1 - Abordagem dos Estudos

O roteiro da caracterização propriamente dito, desenvolvido na seqüência da análise dos dados da jazida, constituiu-se em trabalhos práticos de coleta de amostras e ensaios de laboratório, que foram finalizados com a reavaliação da jazida e das reservas à luz das informações obtidas na caracterização, ou seja, utilizando, além dos teores do minério, também os parâmetros tecnológicos.

A metodologia de trabalho das investigações tecnológicas, ou a sistemática dos estudos de caracterização realizados, está indicada no diagrama de blocos da figura 7.3.1.

Cada uma das fases maiores indicadas no diagrama, constituiu-se em um encadeamento lógico de atividades sincronizadas para atingir as metas do estudo de forma ágil e em detalhamento compatível com um estudo de viabilidade econômica, porém consubstanciado tecnicamente, conforme discriminado na seqüência.

- Amostragem - foi desenvolvida na jazida, e nos locais de arquivo de amostras da pesquisa geológica, e incluiu as atividades:
 - descrição interpretativa das escavações de pesquisa;
 - definição dos tipos litológicos de minério;
 - estabelecimento de um plano de amostragem;
 - coleta das amostras para caracterização.

Na finalização desta etapa dos estudos, obteve-se a formação ou **composição de amostras típicas** para desenvolvimento dos estudos em laboratório.

- Caracterização das Amostras - compreendeu o processamento em laboratório, segundo procedimento experimental especificamente definido para minérios de nióbio associados a manto de intemperismo, e constou das atividades:
 - preparação das amostras na forma de cominuição e deslamagem;
 - ensaios de separações minerais com apoio de análises químicas;
 - identificações minerais e determinação da composição mineralógica.

Como recurso de apoio à caracterização, essencial para este tipo de minério, foram realizados ensaios padronizados de flotação em escala descontínua (de bancada) em alguns dos **tipos mineralógicos de minério** definidos pelas atividades supra mencionadas. A interação dos ensaios desenvolvidos possibilitou à determinação dos parâmetros relevantes para o beneficiamento do minério e à definição dos **tipos tecnológicos de minério**.

- Modelamento do Corpo de Minério - etapa de integração dos resultados experimentais com os dados da jazida, realizada com recursos de computação, utilizando programa integrado em ambiente de estação de trabalho, tendo sido composta pelas atividades:
 - montagem do banco de dados com as informações de furos de sondagem;
 - traçado das zonas de minério;
 - análises estatística dos dados das sondagens;
 - modelamento do corpo de minério;
 - avaliação da significância dos tipos de minério no contexto da jazida.

Finalizando os trabalhos foi feita uma revisão das reservas de minério à luz dos parâmetros tecnológicos estabelecidos, com a definição das **reservas tecnológicas**.

As denominações de tipos de minério aplicadas no estudo de caracterização deste minério e esta jazida, são assim conceituadas:

- tipos litológicos - agrupamento de litologias reconhecidas em mapeamento de superfície e nas descrições interpretativas de furos de sondagem, com recursos de observação do material tal qual, à vista desarmada e com auxílio de microscópio estereoscópico;
- tipos mineralógicos - agrupamento de materiais em função de sua composição mineralógica, segundo dados obtidos nos estudos de caracterização;

- tipos tecnológicos - agrupamento de materiais em função de seu comportamento no processo de concentração, de acordo com os parâmetros obtidos nos ensaios de concentração realizados em apoio aos estudos de caracterização.

7.3.2 - Procedimentos e Técnicas Utilizados

São descritos neste capítulo os procedimentos e técnicas aplicados no estudo de caso, num sequenciamento de metodologias envolvendo a amostragem, os trabalhos desenvolvidos em laboratório, e o modelamento da jazida.

Os resultados obtidos, bem como avaliação, interpretação e discussão dos mesmos integram os itens 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 desta tese.

7.3.2.1 - Amostragem

Os estudos de caracterização iniciaram-se por uma avaliação e descrição dos testemunhos de sondagem, como procedimento prévio com vistas à definição da forma mais adequada de amostragem, considerando-se, por um lado o material disponível, e por outro os objetivos do estudo.

Foi realizada uma descrição interpretativa detalhada dos testemunhos disponíveis, à vista desarmada e utilizando-se microscópio estereoscópico, na forma de uma observação que procurou detectar as variações do minério que pudessem ter relevância do ponto de vista de aproveitamento tecnológico.

Considerando tratar-se de material de alteração supérgena, intensamente laterizado, esta descrição atentou basicamente à observação dos aspectos de:

- agregação e friabilidade;
- cor e grau de alteração supérgena;
- textura e faixa de granulometria dos grãos componentes;
- mineralogia, quantidade de magnéticos.

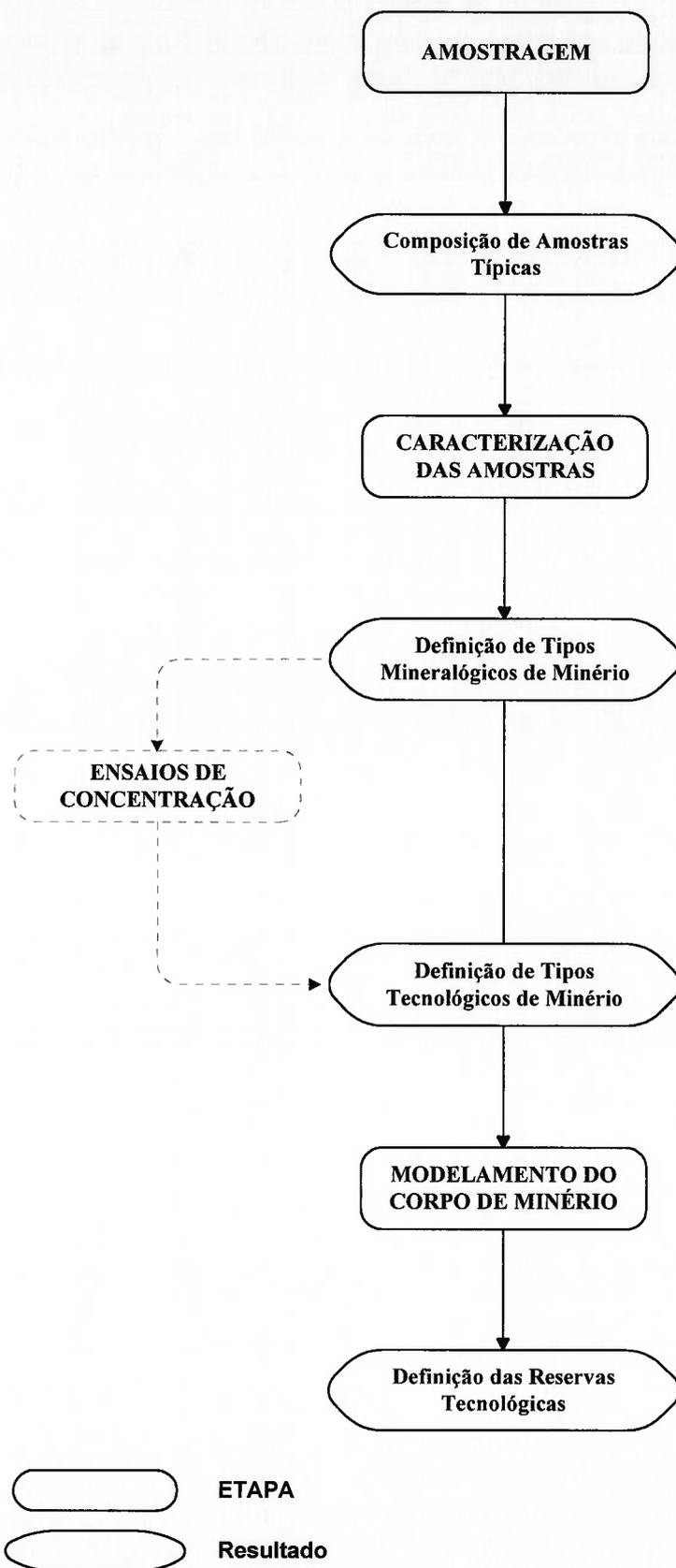


FIGURA 7.3.1
ROTEIRO ADOTADO NOS ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO
UM ESTUDO DE CASO - O NIÓBIO DE CATALÃO I

Foi dada particular atenção a características do minério que tem se mostrado críticas para o seu aproveitamento na operação de minas em jazidas com este modelo de mineralização, destacando-se a quantidade de finos ou lamas e a presença de magnetita.

A partir do conhecimento adquirido através da descrição dos testemunhos e avaliações de campo, com suporte dos dados coletados em literatura^{91,93,119,121}, foram definidos tipos litológicos de minério, e fez-se a seleção das amostras para o presente estudo de caracterização.

Foram selecionados intervalos de profundidade, procedentes de diferentes pontos do jazimento, relativos aos diversos tipos litológicos de minério, com os quais fez-se a composição de amostras para desenvolvimento da caracterização tecnológica. As amostras usadas para composição corresponderam a intervalos amplos de profundidade de um mesmo furo de sondagem, ou mesmo englobaram mais de um furo, guardando a proporcionalidade relativa das dimensões dos intervalos.

A amostragem dos furos de sondagem originalmente correspondia a intervalos de 2 m de profundidade, e para formação das amostras típicas tomaram-se massas iguais para cada intervalo de 2m de profundidade considerado.

Os testemunhos, em sua quase totalidade, mostravam-se desagregados, na forma de solo, contendo fragmentos maiores com dimensões da ordem de 2 a 3 cm. O procedimento de preparação de cada intervalo de testemunho visando a composição de amostras, consistiu em:

- secagem em estufa, em temperatura inferior a 100° C;
- desagregação por operação em moinho de rolos, controlada por peneiramento manual à seco, em circuito fechado, com o retido na peneira retornando ao moinho até a obtenção de todo o material abaixo de 3,367 mm (6 # Tyler);
- redução de massa do produto de britagem por quarteamento em quarteador tipo Jones, até a obtenção de uma alíquota com peso aproximado de 300 g para composição de amostras;
- composição e homogeneização das alíquotas relativas aos intervalos selecionados de cada amostra típica, por operações sucessivas no quarteador, gerando alíquota para os estudos.

Foram, então, formadas catorze amostras do minério, as quais foram submetidas a ensaios de laboratório visando a sua caracterização tecnológica.

7.3.2.2 - Caracterização Tecnológica

Para a caracterização foi adotado procedimento experimental, aplicado em cada uma das amostras compostas, que envolveu preparação, ensaios de separações minerais e identificações mineralógicas, segundo o esquema exposto na figura 7.3.2.

Os ensaios foram controlados por pesagem das alimentações e produtos, e acompanhados por balanço de massa. Em produtos diversos dos ensaios foram efetuadas análises químicas de apoio, com dosagens de Nb_2O_5 , Fe_2O_3 e BaO por metodologia de fluorescência de raios-X, realizadas nos laboratórios da METAGO- METAIS DE GOIÁS.

No desenvolvimento dos ensaios de laboratório, procedeu-se sistematicamente à aferição da qualidade do conjunto manuseio de amostras / análise química através da comparação de teores dosados e calculados.

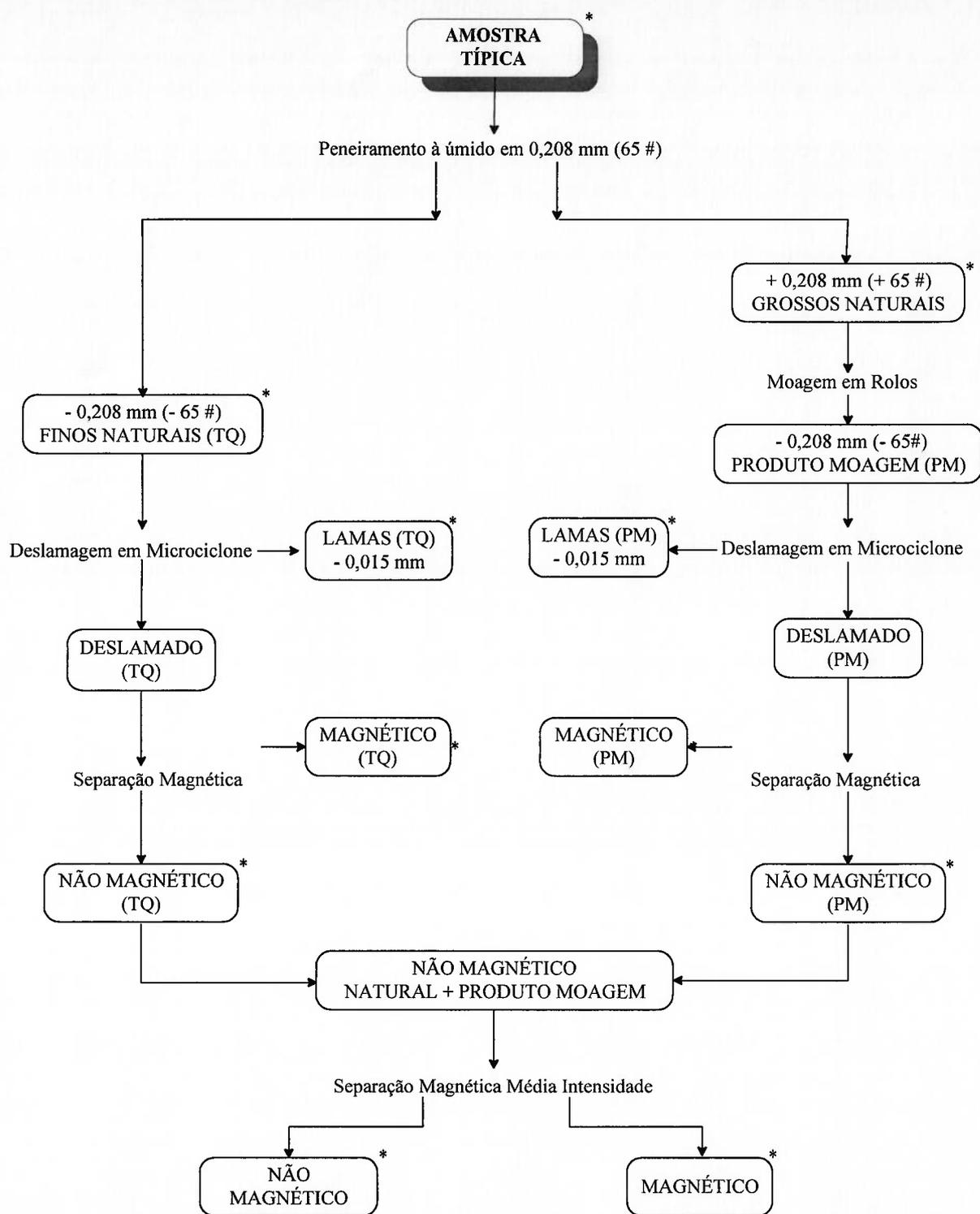
O roteiro de preparação adotado, procurou determinar parâmetros do minério que se constituem em pontos críticos para o seu beneficiamento e, conseqüentemente, para seu aproveitamento econômico, dois deles bastante referidos na literatura especializada.

Esquema similar, sem incluir, entretanto, qualquer identificação mineralógica, é rotineiramente efetuado para avaliação da qualidade do minério que alimenta a usina de concentração da Mineração Catalão, na área vizinha à do presente estudo, desde 1982.

Nas amostras compostas, que se encontravam britadas abaixo de 3,367 mm, foi feito peneiramento à úmido em 0,208 mm (65# TYLER), em operação que envolve intensa lavagem dos grãos minerais e desagregação de torrões argilosos, sem entretanto, maiores interferências no tamanho original dos grãos. A granulometria adotada para a classificação baseou-se nos dados de liberação do minério advindos da experiência da Mineração Catalão, que explora o minério de nióbio na área vizinha à em estudo^{92,119}.

Deste ponto em diante, cada amostra foi separada em duas frações: os GROSSOS e FINOS naturais, respectivamente o retido e o passante na peneira de 0,208 mm.

O material retido em 0,208 mm, foi cominuído abaixo desta granulometria em moinho de jarros de laboratório com carga de bolas, em operação à úmido, controlada e simulando operação contínua.



* Amostra com Análises químicas para Nb, Fe, Ba

FIGURA 7.3.2
ESQUEMA DE PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS EM LABORATÓRIO

Foram geradas, então, duas frações de granulometria abaixo de 0,208 mm para o desenvolvimento em paralelo da seqüência de ensaios abaixo descritas: os finos naturais (TQ) e o produto de moagem dos grossos naturais (PM).

Em ambas as frações, trabalhadas individualmente, procedeu-se à deslamagem por microciclone de laboratório (25 mm de diâmetro), tendo-se logrado obter um corte granulométrico aproximado em 0,015 mm.

Os produtos DESLAMADOS foram submetidos à ensaios de separações minerais, essencialmente constituídas por separações magnéticas. Inicialmente fez-se separação magnética à seco por meio de imã de mão, procurando separar junto aos magnéticos apenas a magnetita, em operação criteriosa que evitou carrear a ilmenita mais ferromagnética. Nesta separação trabalhou-se individualmente os finos naturais (TQ) e os finos produto de moagem da fração naturalmente mais grossa (PM).

No prosseguimento dos ensaios de laboratório, foi realizada uma outra separação mineral, com objetivo menos dirigido para a determinação de parâmetros tecnológicos, e, sim, como recurso de caracterização, enfocando principalmente auxiliar na identificação mineralógica detalhada.

De acordo com tal objetivo, fez-se a composição dos produtos não magnéticos à imã de mão gerados a partir dos finos naturais (TQ) e dos obtidos pela moagem dos grossos (PM). Nas amostras compostas procedeu-se à uma separação magnética à seco, por meio de Separador Isodinâmico Frantz, aplicando-se intensidade de campo suficiente (0,5 A, inclinação lateral de 20° e frontal de 30°) para carrear a ilmenita para os magnéticos à média intensidade (produto fortemente magnético).

Nos diversos produtos das separações minerais, foram efetuadas identificações minerais com determinação estimativa das proporções dos maiores constituintes. As identificações foram realizadas preliminarmente por microscopia, com exame em luz transmitida de montagens de grãos em lâminas / lamínulas utilizando óleo mineral (Nujol) como meio de imersão.

Para identificação das espécies minerais, aplicou-se difratometria de raios-X pelo método do pó. Face à complexidade mineralógica das amostras, esta técnica foi necessária basicamente para reconhecimento das fases, completando as observações microscópicas.

Como recurso auxiliar na caracterização das espécies minerais e também na determinação da composição química destas espécies, recorreu-se à microscopia eletrônica de varredura, através de detetores de elétrons retroespalhados e com sistemas de microanálise. O sistema analítico foi por EDS (fluorescência de raios-X por dispersão de energia), instrumental que possibilita obtenção de análises químicas pontuais.

Após a devida identificação e caracterização das espécies, correlacionando-as criteriosamente com os aspectos observáveis em microscopia, procedeu-se a avaliação da composição mineral essencialmente baseada em contagens sistemáticas de grãos ao microscópio.

7.3.2.3 - Ensaio de Concentração

A partir dos resultados obtidos na caracterização foram selecionadas nove das catorze amostras, para realização de ensaios de flotação, tendo-se decidido por trabalhar individualmente os diferentes tipos de minério, e não compor amostras, pois tipos híbridos poderiam fornecer resultados irreais, não refletindo o comportamento individual.

São aqui indicados, de forma simplificada e resumida, com objetivo apenas de fornecer uma visão global da investigação tecnológica realizada, os testes de concentração em escala de laboratório realizados como recurso complementar para a caracterização do minério, sendo que eles seguiram um roteiro previamente estabelecido e foram realizados pela equipe de processos que participou do projeto ^{125,126}.

A preparação das amostras para a flotação, constituiu-se em cominuição / deslamagem / retirada de magnéticos a baixa intensidade ou intensidade de campo de imã permanente (1.500 a 2.000 Gauss), segundo roteiro idêntico ao da figura 7.3.3, sendo a alimentação da flotação o produto deslamado e desmagnetizado.

Os ensaios compreenderam dois estágios de flotação: retirada de barita, seguida por concentração do Ba-pirocloro em vários estágios, com um desaguamento / deslamagem entre eles, conforme exposto no esquema da figura 7.3.4. Um sumário dos reagentes e condições operacionais aplicados em cada estágio e cada etapa, estão indicados na tabela 7.3.1.

Optou-se pela modalidade de testes com coleta estagiada, isto é, com sucessivas adições de coletor e remoção da espuma produzida, até esgotamento da mesma, de forma a tornar mais sensível ao experimentador os efeitos dos níveis de adição de coletor utilizados.

Cada seqüência de ensaios, ou cada amostra, gerou:

- concentrado de barita;
- lamas após condicionamento;
- rejeitos para descarte (da flotação "scavenger");
- rejeitos para recirculação (dos estágios de limpeza + flotação final);
- concentrado de Ba-pirocloro.

TABELA 7.3.1
Reagentes e Condições Aplicadas nos Ensaios de Flotação

Estágio	Operação	Reagentes	pH
Flotação de Barita	condicionamento	NaOH + Flotisor AT	9,5
	flotação	NaOH + Flotisor AT	9,5
Flotação da Pandaíta	condicionamento	Fluorsilicato de sódio	3,9
	condicionamento	Duomac T + Genagem + óleo de mamona	4,0
	flotação "rougher"	Duomac T + Genagem	4,0
	flotação 1º "scavenger"	Duomac T + Genagem	4,0
	flotação 2º "scavenger"		3,8
	condicionamento	NaOH + colamil cáustico	3,2
	condicionamento	Flotisor P184 + MIBC	3,2
	flotação final		3,2

obs: a regulagem do pH ácido foi feita por adição de ácido clorídrico

Os produtos gerados em cada ensaio foram submetidos à análises químicas com dosagens de Nb_2O_5 , TiO_2 , BaO e Fe_2O_3 , sendo que os concentrados de nióbio foram também submetidos a estudos mineralógicos, basicamente realizados por microscopia óptica, para determinação estimativa de sua composição mineralógica.

Os produtos gerados em cada ensaio foram submetidos à análises químicas com dosagens de Nb_2O_5 , TiO_2 , BaO e Fe_2O_3 , sendo que os concentrados de nióbio foram também submetidos a estudos mineralógicos, basicamente realizados por microscopia óptica, para determinação estimativa de sua composição mineralógica.

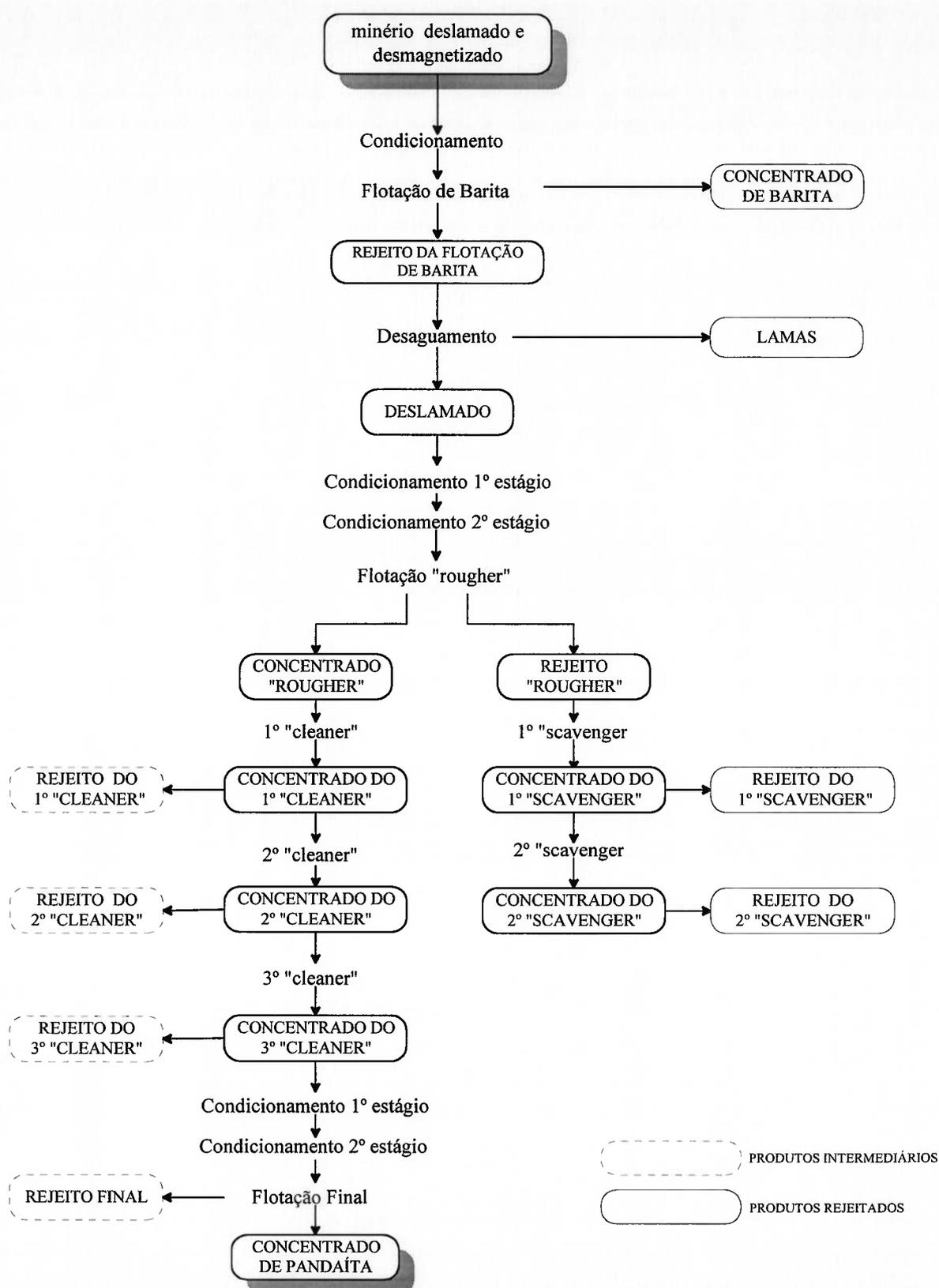


FIGURA 7.3.3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ADOTADO NOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO

7.3.2.4 - Modelagem das Reservas Tecnológicas

Os dados disponíveis para modelagem de reservas referiam-se essencialmente a testemunhos de sondagem, com apoio de mapeamento de superfície e um poço de pesquisa.

Os furos de sondagem, embora dispostos segundo uma malha quadrática, apresentavam uma densidade irregular de distribuição ao longo da área alvo do projeto, maior na porção com teores mais elevados de nióbio. Também em profundidade havia muita irregularidade do nível de informação, com furos de comprimento de 50 a 180 m, embora tenha sido mantida uma regularidade de intervalo amostral ao longo de todos os testemunhos.

Os testemunhos, amostrados em intervalos de 2 m, dispunham de análises químicas, realizadas na METAGO por metodologia de fluorescência de raios-X, com dosagens de Nb_2O_5 , P_2O_5 , CaO, MgO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , e BaO, não tendo sido dosados todos estes óxidos EM todos os furos de sondagem executados. Descrições interpretativas voltadas para a caracterização foram realizadas nos furos relativos à porção de maior densidade de sondagens, sendo disponíveis para os demais descrições sumárias essencialmente apoiadas em variações de cores do solo.

A modelagem foi realizada procurando-se conjugar as informações existentes, tendo sido bastante apoiada em interpretações razoavelmente subjetivas. Face à irregularidade, e localmente insuficiência de densidade, das mesmas, ficou prejudicada a aplicação de alguns tipos de tratamentos matemáticos, principalmente geoestatísticos, no modelamento do corpo de minério. Ressalta-se ser esta, na realidade brasileira, uma situação freqüente quando do estudo de um depósito mineral, notadamente na fase de pesquisa mineral.

Todo o tratamento de dados e a modelagem do corpo mineralizado inseridos nesta tese, foram realizados utilizando-se programa integrado de computação, o LYNX MMS-Mining Modeling System (vide capítulo 6 item 6.3.2), em ambiente de estação gráfica acoplada a mesa digitalizadora para a entrada de dados.

Inicialmente procedeu-se à avaliação da distribuição da litologia na área em estudo utilizando-se os dados existentes de descrições dos testemunhos de sondagem. Os diferentes tipos litológicos de minério são bem caracterizados pelos seus aspectos macroscópicos, e são, portanto, distinguíveis ao longo da área mineralizada através destas descrições.

Com o objetivo de conseguir guias que, associados a descrição macroscópica, pudessem auxiliar na distinção das variações mineralógicas, na separação de tipos do minério, procurou-se associar as composições mineral e química, a partir do conhecimento adquirido na caracterização.

O aprofundamento da avaliação de correlações tipologia-composição química, forneceu ferramenta complementar para mapeamento da distribuição dos tipos de minério ao longo da zona mineralizada, dado o caráter abstrato intrínseco de descrições litológicas, bem como a não disponibilidade de informações para todos os testemunhos de sondagem realizados na área de interesse do projeto.

Procedeu-se, então, à modelagem do corpo de minério segundo os tipos tecnológicos. A partir do traçado de seções paralelas de direção NS, nas quais fez-se interpretação dos dados dos furos de sondagem, com delimitação dos tipos de minério, fez-se a interpretação tridimensional e ajustes do modelo criado.

A técnica aplicada foi de interpolação automatizada entre as seções, seguida por ajustes manuais em tela de detalhes, que se mostraram necessários face à complexidade do zoneamento do corpo mineralizado, principalmente horizontal. Tal complexidade é decorrente da presença de falhamentos geológicos e da sucessão de pequenos corpos de litologias superficiais na área de estudo.

O modelo criado de tipologias tecnológicas de minério, de dimensões aproximadas de 1.000 x 400 m em superfície, e 150 m de profundidade, inseriu toda a região mineralizada a nióbio dentro da área da GOIASFÉRTIL, até o limite a norte, com a mineralização de fosfato.

O modelamento e definição do corpo mineralizado foi feito utilizando-se o teor total de nióbio, aplicando-se para a interpolação de valores a técnica do inverso do quadrado da distância, considerada a mais adequada face às informações disponíveis, como já ressaltado.

Obtiveram-se dados de reservas totais estimadas, sem discriminação de confiabilidade quanto a valores de medida, estimada ou inferida, discretização própria de estudos específicos de avaliação de reservas, e que se trata de abordagem não inserida na caracterização tecnológica do corpo mineralizado, tema desta tese. Como balizamento fez-se confronto com os dados obtidos por métodos clássicos da pesquisa geológica⁹³.

Finalmente, promoveu-se à integração do modelo de teores com o de tipologia, que possibilitou a divisão dos valores de reservas segundo os tipos tecnológicos de minério.

7.4 - AMOSTRAGEM DO CORPO DE MINÉRIO

A área em estudo tem topografia bastante suave, com máxima diferença de nível menor que 15 m, apresenta dois domínios morfológicos distintos, representados por uma região mais elevada a oeste da área, ou área do morrote com cotas de 850 m, e por uma zona baixa onde há acúmulo de água, principalmente na época das chuvas, que corresponde à depressão da Lagoa Seca, conforme evidenciado pelo mapa topográfico da figura 7.4.1.

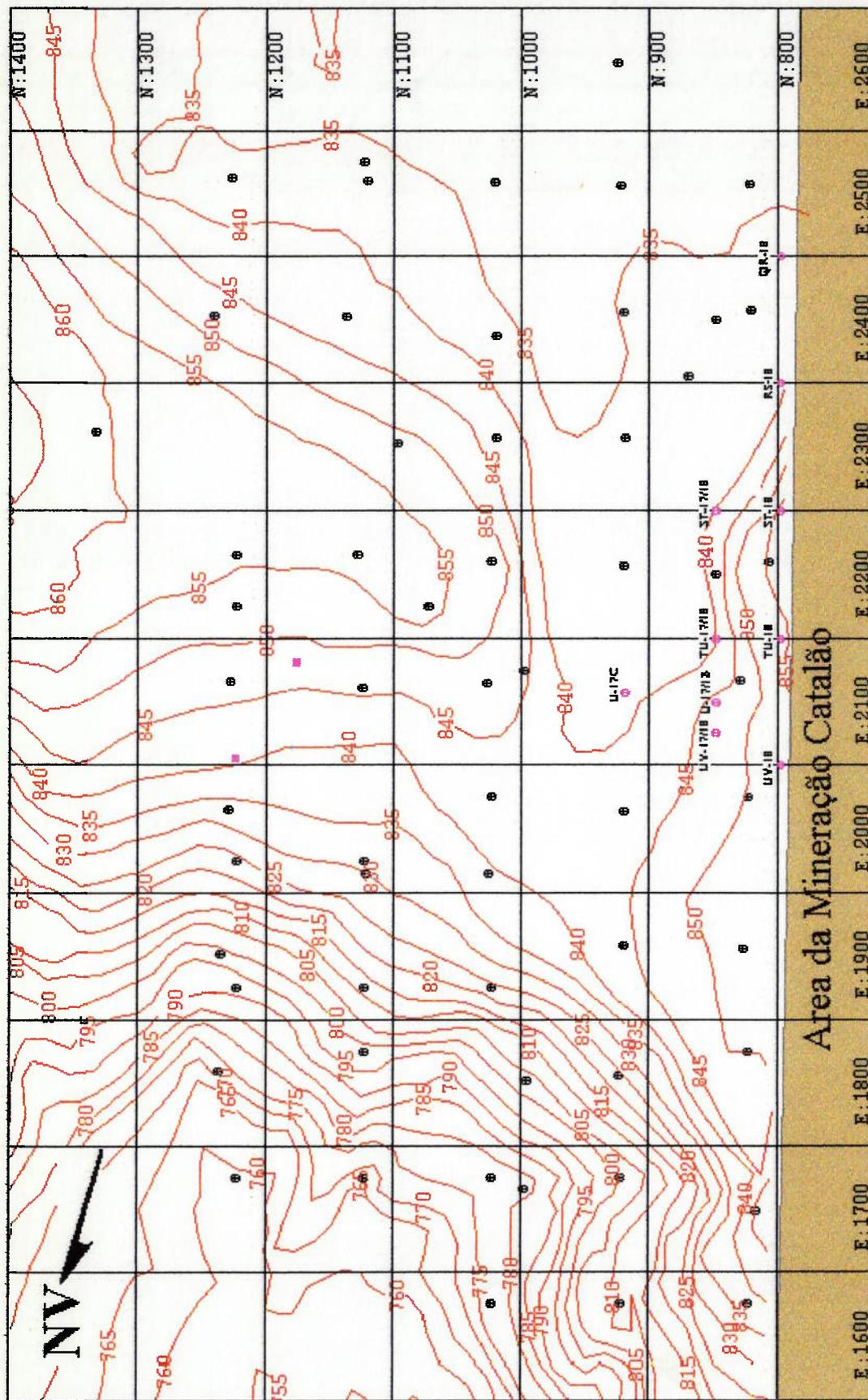
Trata-se de uma região compreendida entre as coordenadas geográficas 204.000 a 204.500 E e 7.992.300 a 7.992.900 N, dentro da zona mineralizada a nióbio e fosfato. Foi estabelecido um teor de corte de 0,4 % de Nb_2O_5 , como critério de projeto baseado em dados econômicos¹²⁸, para delimitação da porção com interesse para exploração.

A coleta de amostras para caracterização foi realizada dentro da área limitada pelo teor de corte, essencialmente contida na porção oeste, vizinha ao limite com a Mineração Catalão, conforme ilustrado em mapas de isoteores das figuras 7.4.2 e 7.4.3.

As amostras utilizadas para caracterização e ensaios tecnológicos foram obtidas basicamente nos testemunhos de sondagem, e apresentam a mesma representatividade em termos espaciais no corpo de minério que as informações de teores, sendo limitadas pela quantidade de material coletada neste tipo de escavação de pesquisa. Amostras avulsas coletadas em frentes de lavra da operação de exploração de fosfato pela GOIASFÉRTIL, nos limites da mineralização de nióbio, foram utilizadas na complementação dos estudos.

7.4.1 - Escavações de Pesquisa Disponíveis

A pesquisa geológica no corpo de minério foi realizada através de furos de sondagem rotativa a diamante, iniciados com diâmetro NX (furo 59,6 / testemunho 42 mm) e estreitados para BX (furo 75,3 / testemunho 54 mm) após os primeiros três metros, com revestimento dos furos. Foi aplicada lama de perfuração bentonítica e testemunhagem contínua por embuchamento, procedimento que permitiu coletar testemunhos ao longo de todo o furo, com recuperação superior a 85%⁹³.



LEGENDA

-850- curva de nível

N: 800 coordenadas locais do projeto

o furo de sondagem

U-17 furo de sondagem

■ frente de lavra

Locais de Amostragem para Caracterização

FIGURA 7.4.1

MAPA TOPOGRÁFICO COM LOCALIZAÇÃO DOS FURROS DE SONDAAGEM

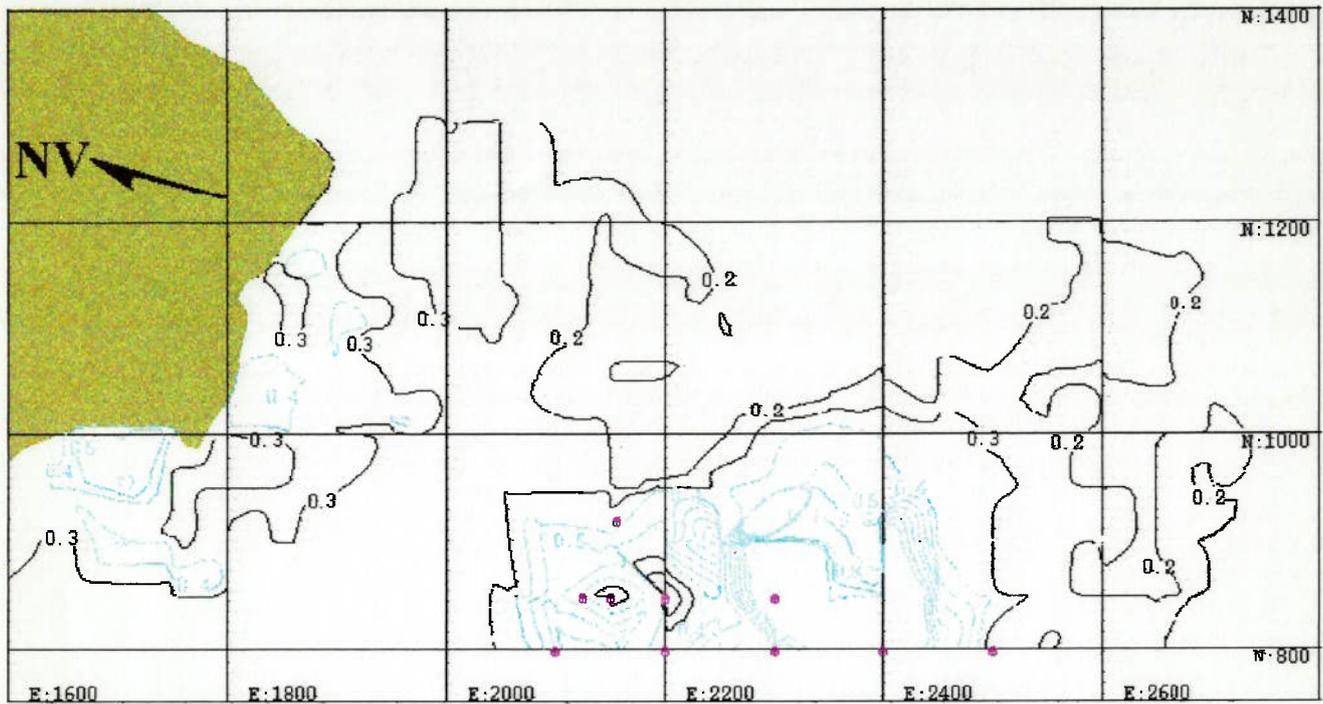


FIGURA 7.4.2 A - NÍVEL 780

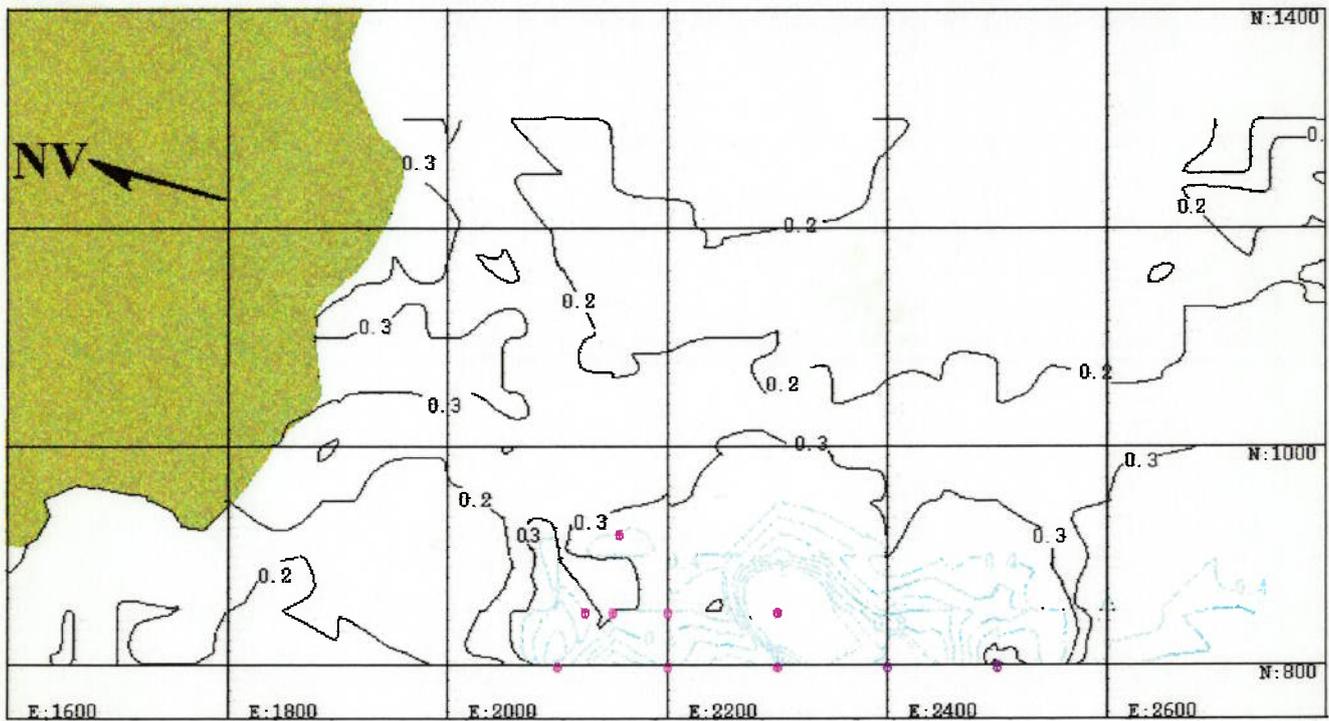


FIGURA 7.4.2 B - NÍVEL 800

LEGENDA

- | | | | |
|-------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| N:800 | coordenadas locais do projeto | Curvas de Isother de Nb_2O_5 | Locais de Amostragem para Caracterização |
| | abaixo do limite topográfico | menor que 0,4 % | furo de sondagem |
| | | maior que 0,4 % | |

FIGURA 7.4.2
MAPA DE ISOTERES DE NIÓBIO - NÍVEIS 780 E 800

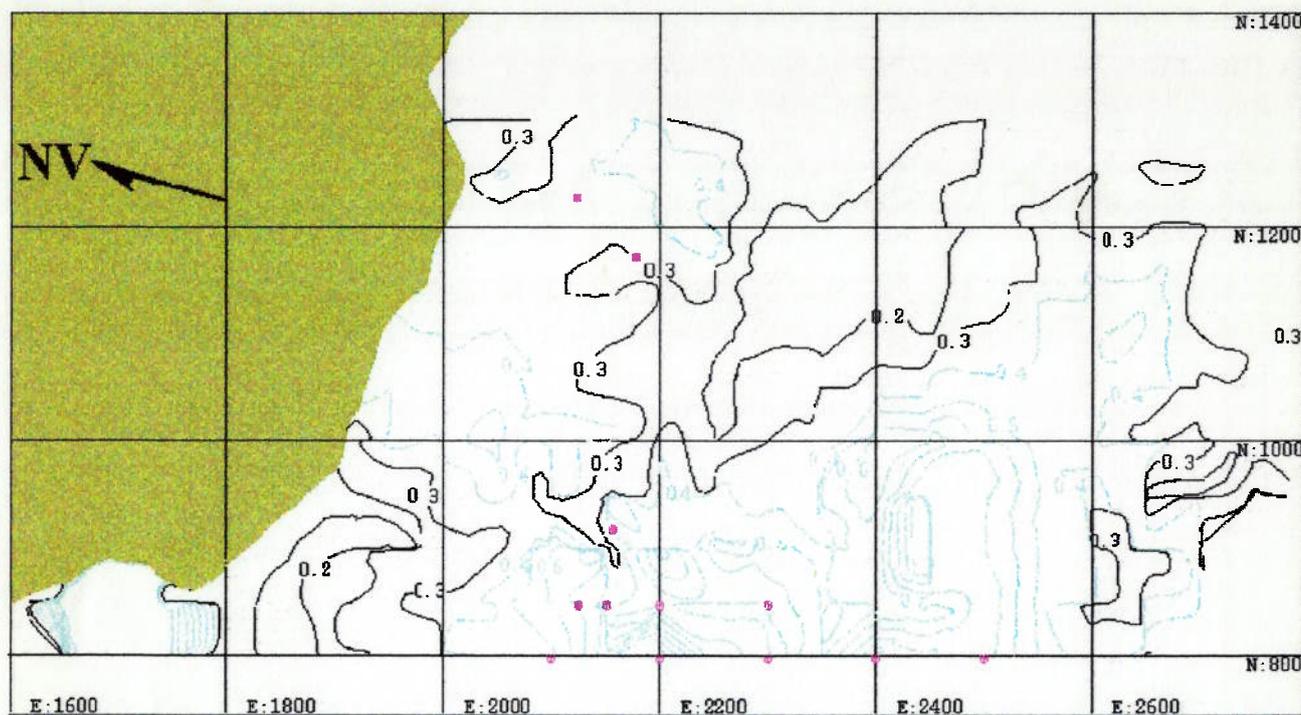


FIGURA 7.4.3 A- NÍVEL 820

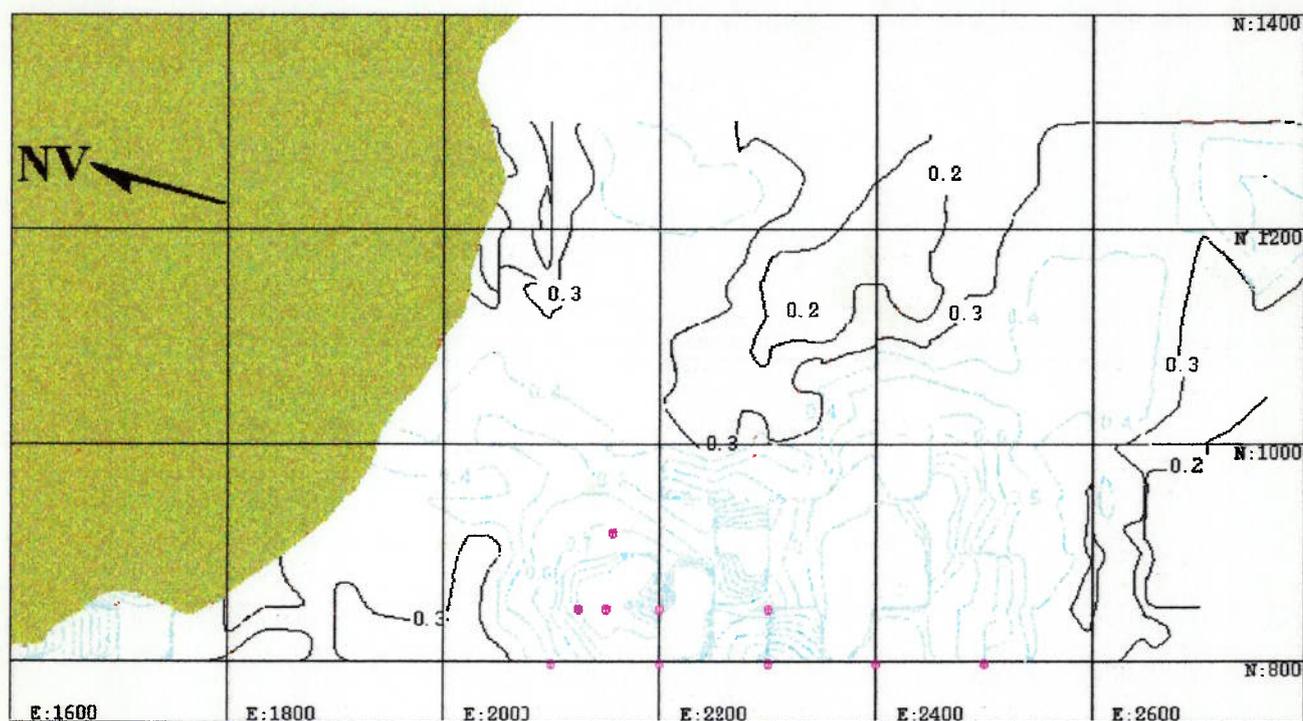


FIGURA 7.4.3 B- NÍVEL 830

LEGENDA

N: 800 coordenadas locais do projeto
 abaixo do limite topográfico

Curvas de Isóteor de Nb₂O₅
 — menor que 0,4 %
 — maior que 0,4 %

Locais de Amostragem para Caracterização
 U-17 furo de sondagem
 ■ frente de lavra

FIGURA 7.4.3
 MAPA DE ISÓTEORES DE NIOBIO - NÍVEIS 820 E 830

A campanha global de sondagens foi executada em duas etapas, utilizando-se malha de sondagem quadrática, com espaçamento de 100 m, localmente reduzido para 50 m nas zonas mais promissoras para nióbio. Os furos, em sua quase totalidade, foram conduzidos até 50 m de profundidade com amostragem a intervalos de 2 m.

Face às condições de arquivamento, os testemunhos da primeira etapa da campanha de sondagem existentes por ocasião da tomada de amostras para estudos tecnológicos do minério, estavam comprometidos e tiveram que ser desconsiderados, mesmo para a descrição litológica. Assim sendo, tanto a descrição dos testemunhos com vistas à caracterização tecnológica do minério, como a coleta das amostras para os ensaios de laboratório, ficaram limitados aos furos da segunda etapa da campanha de sondagens.

Os estudos de caracterização, iniciaram-se por uma avaliação e revisão acurada dos testemunhos de sondagem, com vistas à definição do tipo mais adequado de amostragem, considerando-se, por um lado o material disponível, e por outro os objetivos do estudo.

Para elaboração desta tese, por não haver mais disponibilidade de amostras de furos de sondagem, nem de poços e trincheiras obtidas nas fases de pesquisa / investigações tecnológicas, nem mesmo de trabalhos de pesquisa recentes, tomaram-se amostras da cava de extração do minério de fosfato. A operação industrial de exploração de fosfato, teve seu avanço de lavra na direção do minério de nióbio, o que expôs na frente de lavra material na zona de influência da mineralização de nióbio, onde foram coletadas amostras.

Assim sendo, as descrições e considerações apresentadas na seqüência, são bastante fundamentadas em memoriais de caderneta de campo e o conhecimento adquirido pela autora desta tese em vários estudos desenvolvidos com o minério de Catalão. Amostras de frente de lavra do minérios de fosfato, foram utilizadas apenas com o intuito de detalhamento dos estudos mineralógicos, face a sua baixa representatividade no corpo mineralizado.

7.4.2 - Definição de Tipos Litológicos de Minério

Nas observações de campo, detecta-se diferença marcante na constituição do solo entre os dois domínios morfológicos que compõem a zona mineralizada a nióbio, identificável sobre o terreno. A zona um pouco mais elevada, ou zona do morrote, tem aspecto de

cangueiro marron-avermelhado, com crostas endurecidas de tamanho variado, contrastante com uma região de depressão, relativa a antiga lagoa, formada por solo fino, argiloso, de cor cinza ou bege; nos dois domínios existe camada centimétrica de húmus com raízes vegetais.

A descrição interpretativa dos testemunhos de sondagem, conjugada com as observações de campo, levou à distinção de sete tipos litológicos de minério, com variações de características basicamente relacionadas à ação supérgena, e portanto, fortemente vinculadas aos processos formadores do solo na região. Conseqüentemente, a descrição dos tipos de minério se associa e, por vezes, se confunde com a descrição do perfil do solo.

Os tipos de materiais mostram zoneamento horizontal e vertical ao longo do corpo mineralizado, essencialmente controlados por processos de intemperismo, tendo a ação química promotora de dissoluções e neoformações de minerais no perfil do solo, como agente principal, e alguma ação física de erosão e transporte de material como agente de importância restrita, em uma interação que gerou feições típicas de perfil de solo de laterização, bem desenvolvido. Na avaliação efetuada foram reconhecidos níveis e feições de solo descritos na literatura e sumariamente expostos no capítulo 7.2.1.4.

O perfil do solo observado na área enquadra-se como típico nos mantos de alteração intempérica relacionados à intrusões alcalinas associadas a carbonatitos, já discutidos na literatura nacional para depósitos de fosfatos, o qual apresenta, quando bem maduro e desenvolvido, cinco horizontes, da base para o topo: rocha alterada, nível com alguma preservação de silicatos originais da rocha, nível micáceo apatítico (oxidado), nível fosfatado sem apatita, e capeamento laterítico argiloso e/ou crostas de canga ferruginosa¹²⁶.

Na área em foco, observou-se que o perfil do solo ocorre bem desenvolvido para os níveis mais superficiais, embora não apresente todos os níveis intermediários descritos na literatura, conforme croqui da figura 7.4.4, e descrição detalhada feita na seqüência.

Como horizonte mais profundo, imediatamente sotaposto à rocha, ocorre o nível de rocha decomposta constituído por material friável, pouco argiloso, tendo como peculiaridade grande preservação de características texturais e mineralógicas da rocha, inclusive com presença de fragmentos da mesma. Este nível de solo, com maior ou menor possança, é descrito ao longo de todo o corpo de minério^{91,93,94,119,120}, sendo que localmente mostra teores elevados de Nb₂O₅. Este tipo litológico de minério foi denominado de ROCHA DECOMPOSTA, no presente trabalho.

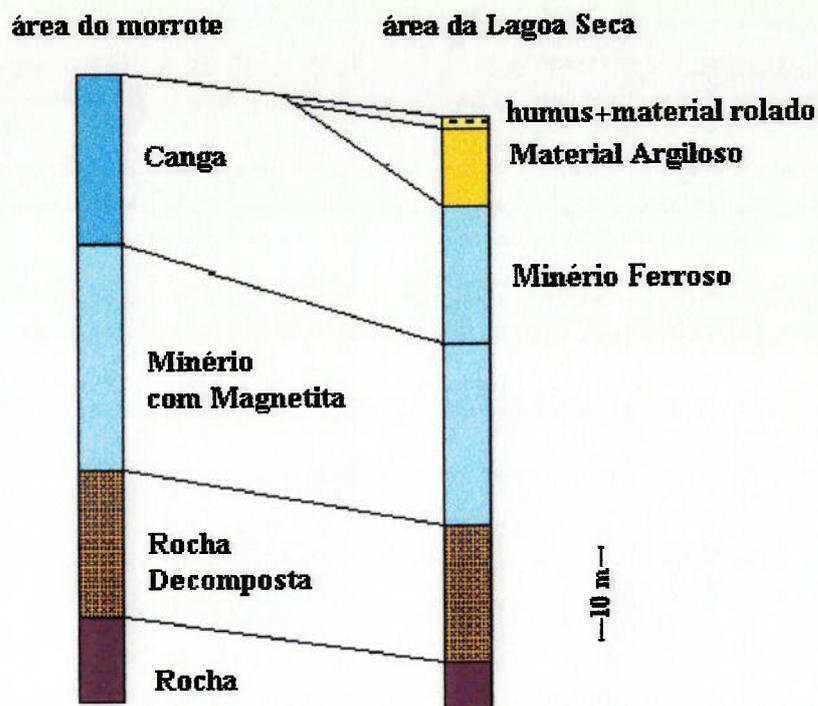


FIGURA 7.4.4
PERFIL ESQUEMÁTICO DO SOLO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO

Sobre a rocha decomposta e em contacto gradacional, existe espesso horizonte de material mais alterado, de coloração amarelo-avermelhada e bastante argiloso, onde se nota completa alteração dos constituintes da rocha, o nível oxidado¹²⁶, tendo como característica a presença de magnetita em quantidades importantes. Neste nível ocorrem zonas, veios ou bolsões enriquecidos em barita; as zonas sem barita tem teores acima de 1% Nb₂O₅, enquanto o minério com barita é algo mais pobre. Para tal tipo de minério deu-se a denominação de MINÉRIO COM MAGNETITA.

Em contacto ora abrupto ora gradacional de dezenas de centímetros a metro, o horizonte imediatamente superior do solo mostra-se argiloso e essencialmente ferroso, composto por óxidos de ferro e sílica com pouca ou nenhuma magnetita, caracterizado como o tipo litológico de MINÉRIO FERROSO.

Este horizonte apresenta importante zoneamento horizontal largamente condicionado pelas características do relevo pretérito da área^{91,93,128}, o qual se reflete de forma abrandada na sua compartimentação morfológica atual. Na região do morrote é representado por um cangueiro de consolidação irregular, entremeado por níveis pouco espessos de sílica, o tipo litológico denominado de CANGA; já na região da Lagoa Seca perde as características de cangueiro, mostrando-se menos consolidado; também neste horizonte são observadas concentrações locais de barita.

Existe, ainda um nível mais superficial, de ocorrência apenas na região da Lagoa Seca, composto por material de aparência sedimentar, muito argiloso, de coloração cinza ou bege, com pequenos nódulos pretos formados por matéria orgânica, e que contém teores elevados de nióbio, tipo litológico identificado, no presente trabalho, como MATERIAL ARGILOSO. Este horizonte é coberto por camada centimétrica de húmus com material de cangueiro, provavelmente rolado das encostas da Lagoa ^{93,106} em épocas remotas quando o relevo da área apresentava variações topográficas mais acentuadas entre os domínios morfológicos.

7.4.3 - Formação de Amostras Típicas

Para desenvolvimento da caracterização tecnológica do minério optou-se por compor amostras típicas das litologias reconhecidas na área, a partir do material disponível em testemunhos de sondagem. O critério adotado foi o de ampla representatividade no corpo mineralizado, para o que foram tomadas amostras de vários pontos, considerando os diversos tipos litológicos detectados na avaliação macroscópica.

Procurou-se fazer composição de material de um furo, ou englobando furos próximos, com o objetivo de manter número reduzido de amostras, guardando a maior representatividade possível, e com quantidade de massa suficiente para desenvolvimento dos estudos de laboratório, fator bastante crítico quando se dispõe essencialmente de furos de sondagem.

Mesmo considerando-se a heterogeneidade do minério de nióbio de Catalão ^{91,92,93}, este tipo de amostragem é um dos mais adequados quando o objetivo é conhecer as características globais e verificar o comportamento tecnológico dos diversos materiais detectados na ocorrência, de forma preventiva, ou seja, abranger toda a gama de possibilidades de variações de comportamento do minério nos processos de beneficiamento, para um adequado equacionamento de projeto.

Apenas onze dos testemunhos de sondagem apresentavam-se intactos quanto às suas características originais de granulometria / agregação, e em boas condições de armazenamento

para ser amostrada visando estudos de caracterização tecnológica do minério. Localizam-se, nas coordenadas locais, entre as linhas 700 a 1.600 N e 1.700 a 2.600 E, e são: QR-18, R-17/18, RS-18, ST-17/18, ST-18, T-17/18, TU-17/18, TU-18, U-17/18, UV-17/18 e UV-18.

Adicionalmente, amostrou-se uma área limítrofe de litologias por meio de um poço de diâmetro aproximado 1,5 m e profundidade de 20 m, localizado na área da Lagoa Seca. A localização em planta dos pontos de coleta de amostras está indicada no mapa da figura 7.4.1, inclusive das duas amostras de canaletas tomadas em frente de lavra do fosfato, no nível de cota de 815 e 820 m, e que foram utilizadas apenas para estudos mineralógicos complementares, por microscopia eletrônica de varredura.

Desta maneira foram formadas catorze amostras de tipos litológicos distintos do minério, tendo sido incluídas variedades detectadas dentro dos tipos maiores com os critérios de avaliação aplicados, motivo que levou a um número maior de amostras que de tipos de materiais descritos. Evitou-se selecionar amostras de intervalos de profundidade que mostravam transições ou limites entre tipos litológicos, conforme exposto na tabela 7.4.1.

Para composição das amostras típicas tomaram-se pesos iguais para cada intervalo de profundidade dos testemunhos considerado. Os testemunhos apresentavam-se na forma de solo com fragmentos maiores de dimensões da ordem de 2 a 3 cm, e foram preparados para obtenção de uma alíquota para composição, cuja massa foi padronizada. As alíquotas relativas a cada amostra típica foram compostas, gerando as amostras para estudos.

TABELA 7.4.1
Relação e Procedência das Amostras Caracterizadas

Tipos Litológicos	Amostra	Testemunhos (Intervalos de Profundidade)
Material Argiloso (cinza)	CA	RS-18(2-8 m) + QR-18 (2-12 m) + ST-17/18 (2-14 m)
Material Argiloso (bege)	BA-1 BA-2	TU-17/18 (2-4 m) + U-17/18 (4-16 m) + UV-17/18 (6-18 m) Poço U-17C (4-18 m)
Canga	CG	ST-18 (0-16m) + UV-18 (0-14 m)
Minério com Barita	MB-1 MB-2 MB-3	UV-17/18 (28-42 m) + TU-17/18 (28-44 m) ST-18 (28-48 m) TU-17/18 (14-26 m) + ST-17/18 (14-22 m) + ST-18 (16-28 m)
Minério Ferroso	MG-1 MG-2	ST-17/18 (26-36 m) TU-18 (22-34 m)
Mín. com Magnetita e Barita	MMB-1 MMB-2	ST-17/18 (56-66 m) TU-18 (44-64 m) + UV-18 (46-56 m)
Minério com Magnetita	MMG-1 MMG-2	ST-17/18 (36-56 m) + RS-18 (46-66 m) UV-18 (14-44m)
Rocha Decomposta	CM	RS-18 (76-88 m) + ST-17/18 (76-82 m)

Para composição das amostras típicas tomaram-se pesos iguais para cada intervalo de profundidade dos testemunhos considerado. Os testemunhos apresentavam-se na forma de solo com fragmentos maiores de dimensões da ordem de 2 a 3 cm, e foram preparados para obtenção de uma alíquota para composição, cuja massa foi padronizada. As alíquotas relativas a cada amostra típica foram compostas, gerando as amostras para estudos.

Inicialmente procedeu-se à determinação dos teores de Nb_2O_5 , BaO e Fe_2O_3 nas amostras compostas e, para aferição da representatividade do material estocado bem como da compatibilidade dos dados de análise obtidos durante as campanhas de pesquisa geológica com aqueles utilizados para apoio dos estudos de caracterização, efetuou-se o confronto entre teores calculados a partir dos dados dos testemunhos e os obtidos nas amostras compostas.

Na tabela 7.4.2 estão lançados os dados químicos comparativos, podendo-se notar diferenças pouco significativas para os teores de nióbio e ferro, e um desvio em limites mais críticos para os valores de bário. Dessa forma, embora tal aferição não tenha atingido número de informações estatisticamente mais significativo, forneceu a adequada confiança na representatividade das amostras preparadas para os estudos.

TABELA 7.4.2
Comparação de Teores nas Amostras Compostas

AMOSTRA	Teores obtidos na	% Nb_2O_5	% Fe_2O_3	% BaO	% Al_2O_3	% SiO_2	% P_2O_5	% CaO	% TiO_2
BA-1	Pesquisa	1,71	10,88	5,66	8,08	37,32	9,56	4,77	13,3
	Caracterização	1,29	9,45	4,78	nd	nd	nd	nd	nd
MG-1	Pesquisa	1,64	33,82	5,82	nd	nd	nd	nd	nd
	Caracterização	1,93	33,81	6,96	nd	nd	nd	nd	nd
MG-2	Pesquisa	1,47	52,97	4,03	2,52	15,85	6,42	6,75	2,62
	Caracterização	1,53	51,57	4,05	nd	nd	nd	nd	nd
MMG-1	Pesquisa	1,68	45,35	3,73	2,65	13,62	9,09	10,96	3,75
	Caracterização	1,83	42,71	4,85	nd	nd	nd	nd	nd
MB-1	Pesquisa	0,34	25,55	12,53	11,50	11,50	13,41	8,59	4,56
	Caracterização	0,25	21,53	10,90	nd	nd	nd	nd	nd
MB-2	Pesquisa	0,52	26,64	12,65	10,48	13,97	9,69	12,23	3,69
	Caracterização	0,36	26,61	13,17	nd	nd	nd	nd	nd
MMB-1	Pesquisa	2,13	42,25	9,42	6,56	6,99	8,03	10,57	2,60
	Caracterização	2,36	43,76	9,50	nd	nd	nd	nd	nd
MMB-2	Pesquisa	1,13	30,58	14,47	8,00	14,27	10,13	11,84	2,77
	Caracterização	0,80	30,19	12,38	nd	nd	nd	nd	nd
CM	Pesquisa	1,55	42,84	2,85	1,72	8,77	7,34	11,18	2,77
	Caracterização	1,74	42,33	2,74	nd	nd	nd	nd	nd

Teores da Pesquisa = composição por cálculo ponderado a partir dos testemunhos de sondagem

Teores da Caracterização = obtidos nas amostras compostas

nd = dado não disponível

7.5 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A avaliação e análise dos resultados obtidos, forneceu subsídios para definição de tipos mineralógicos de minério, possibilitando, com este aporte de informações mais detalhadas sobre as características do minério, uma revisão da tipologia litológica preestabelecida, a qual levou ao agrupamento de tipos previamente descritos.

7.5.1 - Preparação das Amostras

Cada amostra apresentava-se como material britado, composto a partir dos testemunhos de sondagem, e foi classificada em GROSSOS e FINOS naturais, respectivamente o retido e o passante em 0,208 mm. A partição em massa entre as duas frações, está sumarizada na tabela 7.5.1.

TABELA 7.5.1
Sumário dos Resultados da Classificação em 0,208 mm

AMOSTRA	Tipo Litológico	% Nb ₂ O ₅ no minério	GROSSOS (+0,208 mm)			FINOS (-0,208 mm)		
			% peso	% Nb ₂ O ₅	% partição Nb ₂ O ₅ na amostra	% peso	% Nb ₂ O ₅	% partição Nb ₂ O ₅ na amostra
CA	material argiloso	1,82	24,74	0,71	9,64	75,26	2,19	90,36
BA-1	material argiloso	1,29	24,66	0,34	6,49	75,34	1,60	93,51
BA-2	material argiloso	0,49	29,62	0,81	49,26	70,38	0,35	50,74
CG	canga	2,74	49,48	1,94	34,98	50,52	3,53	65,02
MB-1	minério com barita	0,28	51,90	0,16	33,47	48,10	0,34	66,53
MB-2	minério com barita	0,36	62,90	0,11	18,97	37,10	0,80	81,03
MB-3	minério com barita	1,06	47,69	0,71	31,95	52,31	1,38	68,05
MG-1	minério ferroso	1,93	52,64	1,51	41,25	47,36	2,39	58,75
MG-2	minério ferroso	1,53	81,45	1,61	85,91	18,55	1,16	14,09
MMB-1	min. com magn /barita	2,36	56,52	1,37	32,83	43,48	3,64	67,17
MMB-2	min. com magn /barita	0,80	60,12	0,57	43,05	39,88	1,14	56,95
MMG-1	minério com magnetita	1,83	58,61	1,30	41,74	41,39	2,57	58,26
MMG-2	minério com magnetita	1,41	79,90	1,34	76,10	20,10	1,67	23,90
CM	rocha decomposta	1,74	43,98	1,52	38,33	56,02	1,92	61,67

Nota-se que o MATERIAL ARGILOSO tem mais de 70 % em peso nos finos naturais, os quais mostram enriquecimento em Nb e carregam a quase totalidade deste elemento contido na amostra, à exceção da amostra BA-2, em que o nióbio se divide igualmente nas duas frações.

A tendência de enriquecimento de nióbio nos finos naturais permanece para os demais tipos litológicos, com proporções variadas da quantidade deste elemento que se associa a eles, e significativamente inferiores às observadas para o MATERIAL ARGILOSO. Destaca-se comportamento diferencial para as amostras MG-2 e MMG-2 em que a maior parcela de Nb se associa aos grossos naturais.

Na seqüência dos trabalhos, cada amostra gerou duas frações para caracterização: os finos naturais (TQ) e o produto de moagem (PM) dos grossos naturais, ou do material retido em 0,208 mm, sendo que ambos os produtos submetidos à deslamagem em microciclone, forneceram os resultados expostos na tabela 7.5.2.

TABELA 7.5.2
Sumário dos Resultados da Deslamagem em Microciclone

AMOSTRA	Tipo Litológico	% Nb ₂ O ₅ no minério	Lamas Naturais (TQ)			Lamas Moagem (PM)			Total Lamas (TQ+PM)		
			% peso	% Nb ₂ O ₅	% partição Nb ₂ O ₅ na amostra	% peso	% Nb ₂ O ₅	% partição Nb ₂ O ₅ na amostra	% peso	% Nb ₂ O ₅	% partição Nb ₂ O ₅ na amostra
CA	material argiloso	1,82	41,70	1,55	35,47	4,96	0,72	1,96	46,66	1,46	37,43
BA-1	material argiloso	1,29	33,36	1,38	35,65	5,76	0,38	1,69	39,12	1,23	37,34
BA-2	material argiloso	0,49	29,00	0,31	18,46	10,05	0,77	15,89	39,05	0,43	34,35
CG	canga	2,74	23,18	3,64	30,75	17,36	2,36	14,93	40,54	3,09	45,68
MB-1	min. com barita	0,28	9,69	0,17	6,64	16,48	0,27	17,93	26,17	0,23	24,57
MB-2	min. com barita	0,36	15,19	0,72	29,98	15,26	0,13	5,44	30,45	0,42	35,42
MB-3	min. com barita	1,06	16,96	1,23	19,68	11,39	0,66	7,09	28,35	1,00	26,78
MG-1	minério ferroso	1,93	14,71	2,37	18,09	11,95	1,80	11,16	26,66	2,11	29,25
MG-2	minério ferroso	1,53	4,74	1,10	3,42	20,14	2,27	29,95	24,88	2,05	33,37
MMB-1	min. magn /barita	2,36	11,95	4,21	21,33	10,82	1,81	8,30	22,77	3,07	29,63
MMB-2	min. magn /barita	0,80	13,32	1,25	20,92	13,55	0,94	16,00	26,87	1,09	36,92
MMG-1	min. com magnetita	1,83	10,96	3,18	19,09	10,10	2,18	12,06	21,06	2,70	31,15
MMG-2	min. com magnetita	1,41	5,68	2,06	8,32	15,89	1,88	21,23	21,57	1,93	29,55
CM	rocha decomposta	1,74	16,96	1,09	10,60	6,02	1,86	6,42	22,98	1,29	17,02

Os diferentes tipos litológicos de material mostraram características bastante distintas quanto à quantidade de lamas, sendo feição comum, mas não generalizada, o enriquecimento em nióbio nas lamas, as quais chegam a carrear de 25 a 45% do total contido na amostra. A ROCHA DECOMPOSTA apresenta conteúdo significativamente menor de Nb_2O_5 associado às lamas.

A maior quantidade de lamas, cerca de 40 % em massa, é observada nas litologias de superfície, tanto no MATERIAL ARGILOSO como na CANGA, sendo que no primeiro tipo são lamas essencialmente naturais, enquanto na CANGA há significativa contribuição das lamas geradas na moagem. Estes tipos litológicos são também os que apresentam as maiores perdas de nióbio associadas à lamas, de 35 a 45% do total da amostra.

Nas litologias intermediárias no perfil do solo, sejam materiais com ou sem magnetita, as lamas naturais representam de 10 a 15 % em peso, com conteúdo da ordem de 20 % do Nb_2O_5 total da amostra, as lamas de moagem apresentam igual porcentagem em peso, e contém cerca de 10 % do Nb_2O_5 total. Exceção deste comportamento é observada para duas amostras (MG-2 e MMG-2) que apresentam menor quantidade de lamas naturais e maior nas de moagem, totalizando valores similares aos observados para as demais amostras; ressalta-se terem estas amostras apresentado quantidades excepcionalmente maiores em peso e nióbio associados aos grossos naturais.

Nos minérios com magnetita as lamas totais variam de 20 a 25% em peso, estando a elas associados 30 a 35% do total de nióbio contido no minério. Nos tipos litológicos de MINÉRIO FERROSO, elas perfazem 25 a 30 % em peso, sendo a parcela de nióbio a elas associado mais variável, de 25 a 35 %.

Na litologia ROCHA ALTERADA cerca de 23% em peso correspondem às lamas, as quais carreiam 17% do total de nióbio, sendo expressiva parcela advinda de lamas naturais.

Em suma, os tipos litológicos apresentam comportamento algo diferencial quanto à quantidade de lamas e/ou perda de nióbio associado, parâmetro este que é de relevância para minérios residuais de nióbio. Entretanto, não há como estabelecer uma correlação característica entre cada tipo e este parâmetro tecnológico, como ilustrado nos gráficos das figuras 7.5.1 e 7.5.2. Nota-se, tipicamente, maior porcentagem de lamas no MATERIAL ARGILOSO e na CANGA, as demais litologias tem comportamento similar.

Por outro lado, as amostras com maior porcentagem de lamaz naturais foram as que geraram menor quantidade de lamaz na moagem, sugerindo que em realidade os materiais apresentam grau semelhante de friabilidade, estando alguns já naturalmente desagregados enquanto outros necessitam imposição de um processo mecânico que acaba por promover o mesmo estado de desagregação dos primeiros.

Dessa forma existe uma correlação inversa exponencial entre a quantidade de lamaz naturais e as de moagem, conforme evidenciado em gráfico. Correlação inversa do mesmo tipo, porém bem mais definida, é observada para o conteúdo de nióbio associado às lamaz naturais e de moagem (figuras 7.5.1 e 7.5.2).

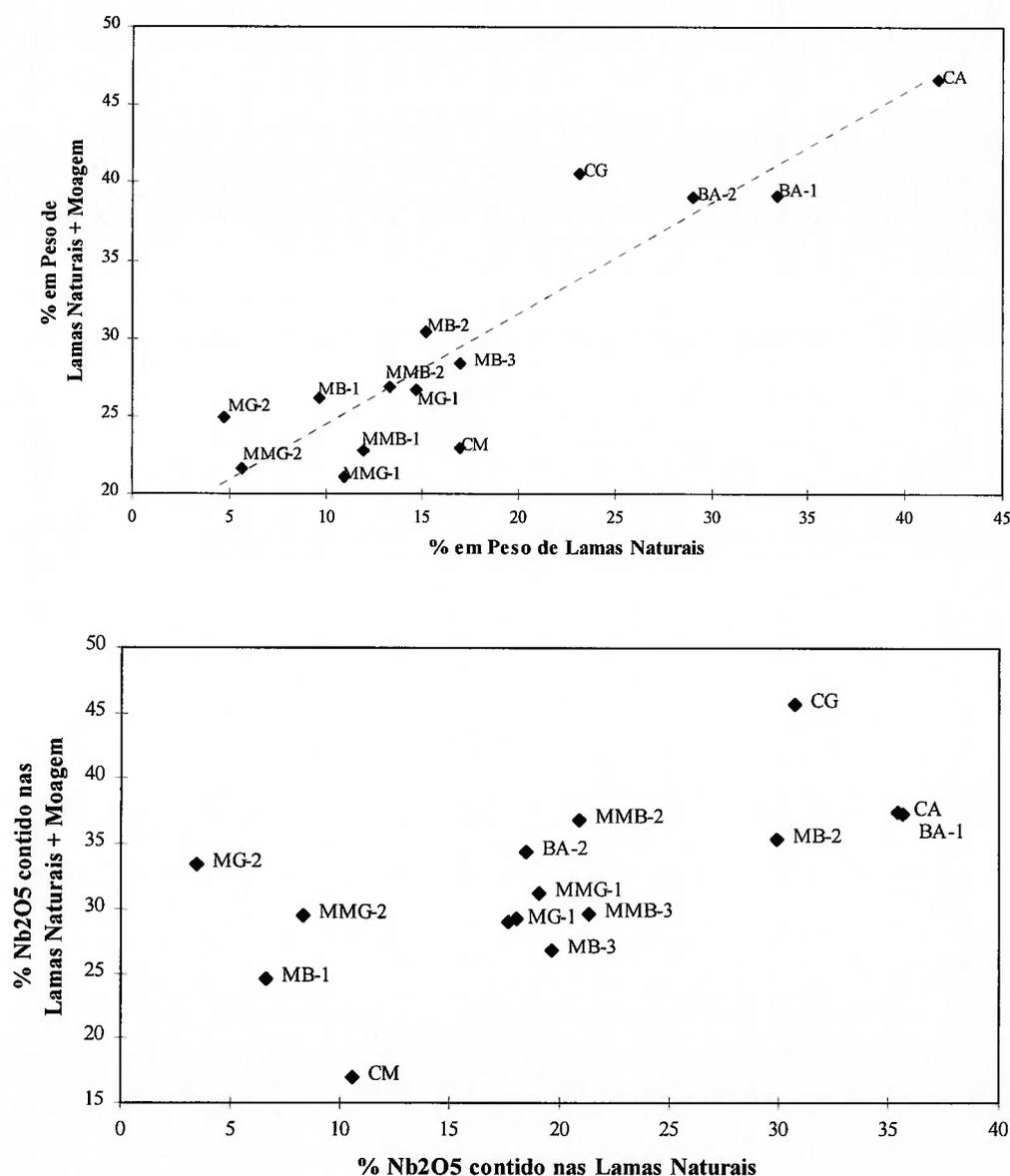


FIGURA 7.5.1
CORRELAÇÃO ENTRE LITOLOGIA & QUANTIDADE DE LAMAS

Também é possível vislumbrar, com as amostras estudadas, associação entre o teor do minério e a quantidade de lamas naturais, nitidamente os minérios mais ricos apresentam maior conteúdo de lamas naturais e maior perda de nióbio associado a estas lamas, em duas tendências algo distintas conforme ilustrado nos gráficos da figura 7.5.2. As amostras dos tipos litológicos de MINÉRIO FERROSO e CANGA alinham-se numa tendência, enquanto as litologias de materiais argilosos e minério com barita definem a outra. A ROCHA DECOMPOSTA segue a tendência dos minérios ferrosos.

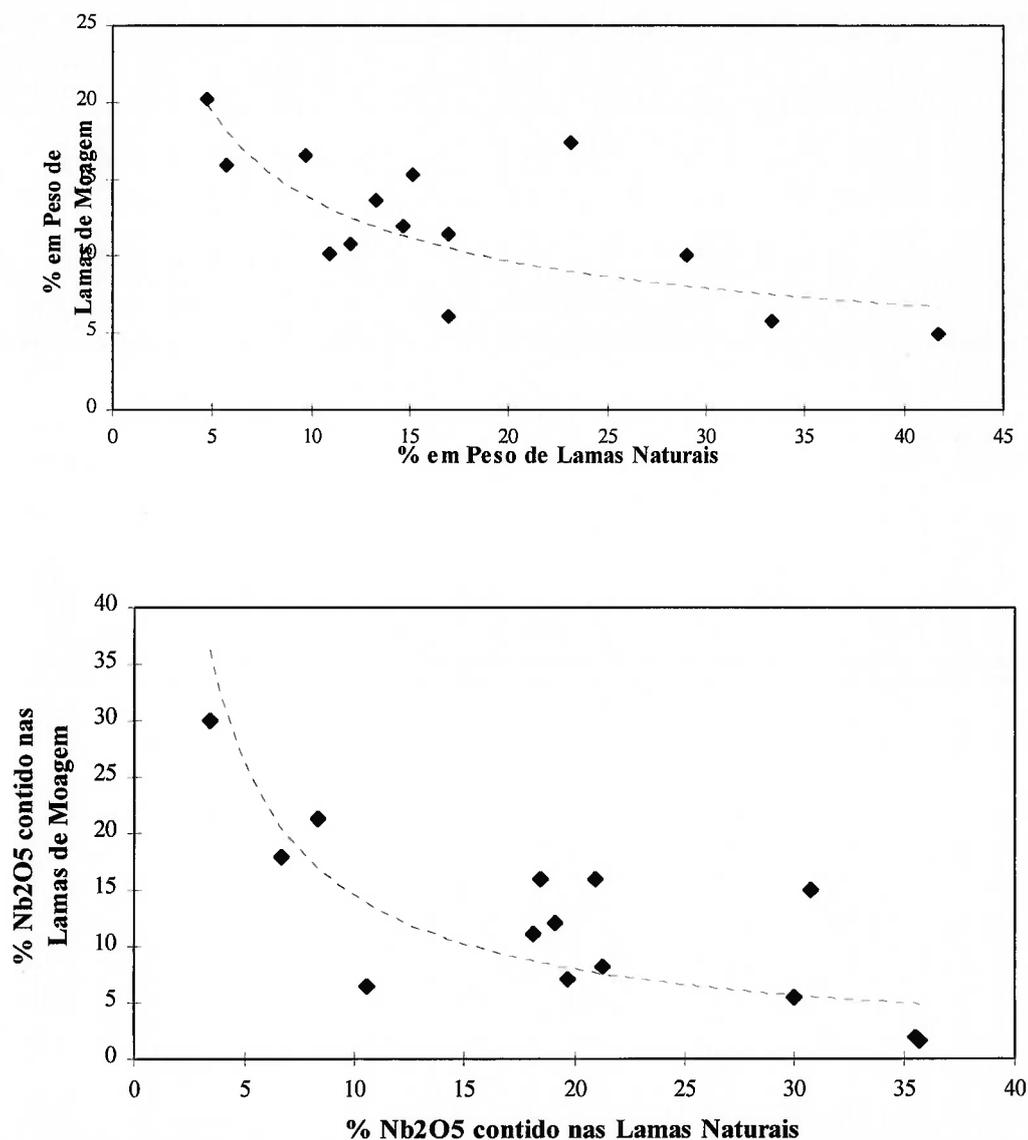


FIGURA 7.5.2
CORRELAÇÕES ENTRE QUANTIDADE DE LAMAS NATURAIS & DE MOAGEM

Porém, não se observa correlação entre teor do minério e quantidade de lamas totais (TQ +PM), que é o parâmetro tecnológico de significância, sendo que na verdade existem uma faixa de variação do peso e partição do nióbio nas lamas totais, independentemente do teor do minério.

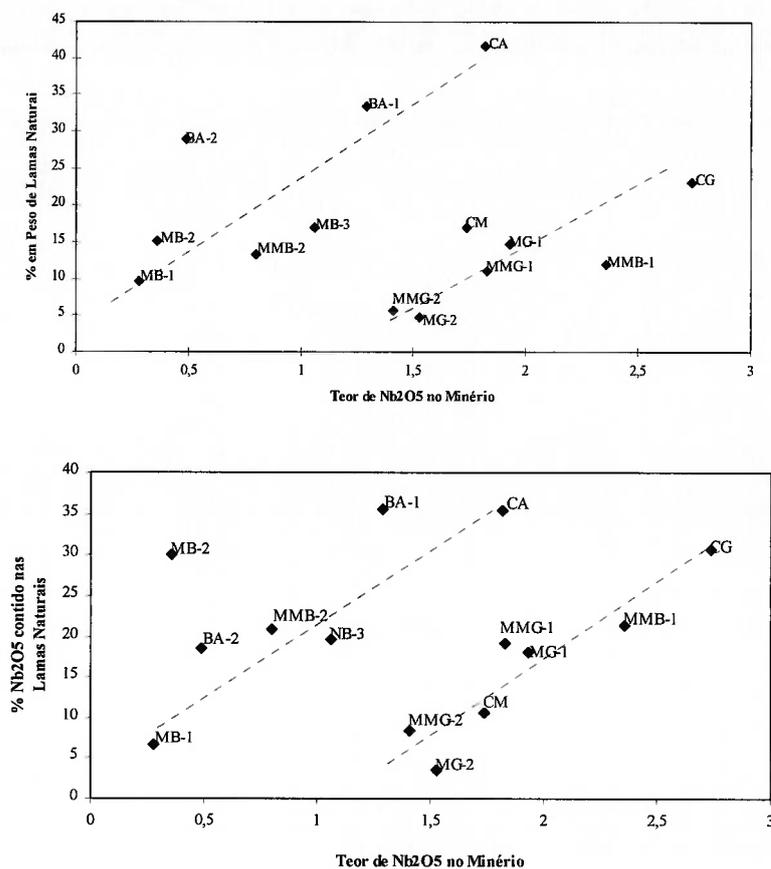


FIGURA 7.5.3
CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DO MINÉRIO & QUANTIDADE DE LAMAS NATURAIS

7.5.2 - Separações Minerais

Os produtos DESLAMADOS foram, então, submetidos à ensaios de separações minerais. Inicialmente fez-se separação magnética de baixa intensidade, processando-se individualmente os finos naturais (TQ) e os finos produto de moagem da fração naturalmente mais grossa (PM), sendo que os resultados obtidos são sumarizados na tabela 7.5.3.

A quantidade de material magnético associada ao minério varia bastante, confirmando o que havia sido detectado na descrição macroscópica. As litologias de MATERIAL ARGILOSO não contém magnéticos; na CANGA eles atingem 7% em peso; no MINÉRIO FERROSO amostrado, os magnéticos perfazem de 0 até 15% em peso; e nos tipos litológicos com magnetita, este valor oscila de 18 até 40 % em peso.

É comum, embora não genérica, a feição dos teores de Nb_2O_5 associados aos magnético serem significativamente inferiores aos observados no minério. As perdas associadas a estes magnéticos variam de 1 a 10 % do total de nióbio contido no minério; para a ROCHA DECOMPOSTA este valor é de 15%.

TABELA 7.5.3
Sumário dos Resultados da Separação Magnética a Imã Permanente

AMOSTRA	Tipo Litológico	% Nb_2O_5 no minério	Magnéticos dos Finos Naturais (TQ)			Magnéticos dos Finos de Moagem (PM)			Total de Magnéticos (TQ+PM)		
			% peso	% Nb_2O_5	% partição Nb_2O_5 na amostra	% peso	% Nb_2O_5	% partição Nb_2O_5 na amostra	% peso	% Nb_2O_5	% partição Nb_2O_5 na amostra
CA	material argiloso	1,82	tr		tr	tr		tr	tr		tr
BA-1	material argiloso	1,29	tr		tr	tr		tr	tr		tr
BA-2	material argiloso	0,49	tr		tr	tr		tr	tr		tr
CG	canga	2,74	1,81	0,93	0,61	5,03	0,32	0,59	6,84	0,48	1,2
MB-1	min. com barita	0,28	2,67	0,10	1,08	6,62	0,10	2,67	9,29	0,10	3,74
MB-2	min. com barita	0,36	1,72	0,10	0,47	5,48	0,10	1,50	7,20	0,10	1,97
MB-3	min. com barita	1,06	0,67	0,10	0,06	1,48	0,10	0,14	2,15	0,10	0,20
MG-1	minério ferroso	1,93	1,70	0,63	0,56	1,55	2,00	1,61	3,25	1,28	2,16
MG-2	minério ferroso	1,53	2,23	0,58	0,85	12,25	0,45	3,61	14,48	0,47	4,46
MMB-1	min. com magn /barita	2,36	16,10	0,95	6,48	22,65	0,38	3,65	38,75	0,62	10,13
MMB-2	min. com magn /barita	0,80	5,65	0,48	3,41	13,01	0,16	2,61	18,66	0,26	6,02
MMG-1	min. com magnetita	1,83	10,33	0,78	4,41	19,32	0,45	4,76	29,65	0,56	9,18
MMG-2	min. com magnetita	1,41	2,97	0,80	1,69	19,13	0,68	9,25	22,10	0,70	10,94
CM	rocha decomposta	1,74	12,72	1,36	9,92	22,66	0,42	5,46	35,38	0,76	15,38

A observação global dos dados de todas as amostras, não indica qualquer relação direta entre os teores do minério e a quantidade de magnéticos, entretanto uma avaliação mais detalhada evidencia alguma forma de correlação entre estes dois parâmetros, conforme traçado no gráfico da figura 7.5.4.

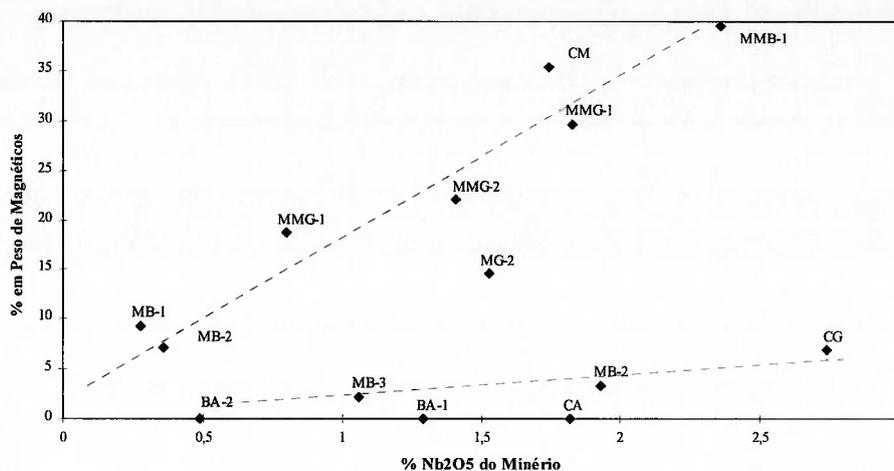


FIGURA 7.5.4
CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DO MINÉRIO & QUANTIDADE DE MAGNÉTICOS

É possível esboçar duas linhas de tendência as quais delimitam todo o campo de variação da quantidade de magnéticos; uma delas, a mais inclinada e limite superior do campo, une os tipos de minérios que contém magnetita e a outra nos quais a proporção de magnetita é menos expressiva. A análise das duas populações separadamente, sugere haver relação direta entre teores de nióbio e o conteúdo de magnéticos, maiores teores se associam a maiores quantidades de magnetita.

Associações entre os dois parâmetros físicos dos materiais, quantidade de lamaz e de magnéticos, são observáveis no gráfico da figura 7.5.5.

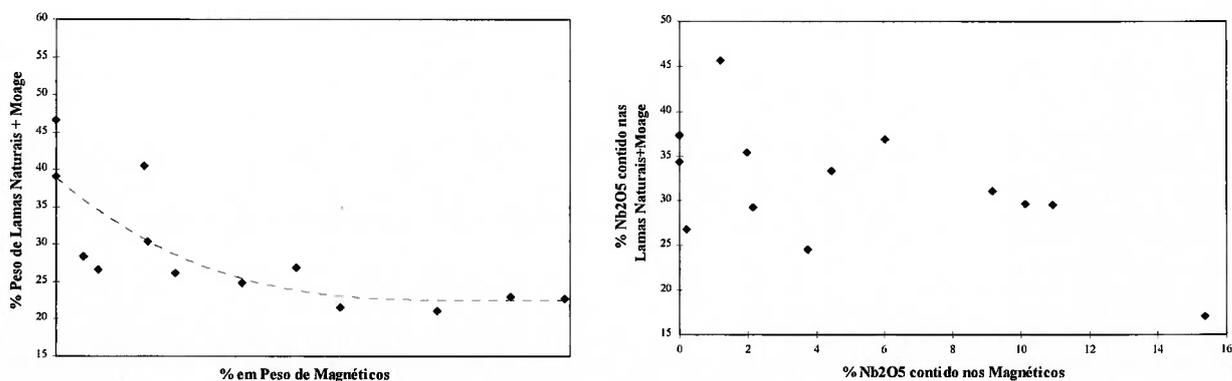


FIGURA 7.5.5
CORRELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE LAMAS & DE MAGNÉTICOS

Em realidade, excetuando-se os materiais de superfície, argilosos e CANGA, ocorre uma variação muito pequena da porcentagem de magnéticos para permitir qualquer análise mais profunda; o mesmo é observado para o conteúdo de nióbio associado a lamas e magnéticos. Finalmente, procurou-se avaliar o comportamento da soma de lamas + magnéticos, parâmetros que refletem as perdas de massa e em nióbio nas fases de processamento anteriores à concentração por flotação.

Devido à relação pouco expressiva entre teores do minério e os magnéticos, não se observa qualquer correlação de significância entre teores e a porcentagem em peso da soma de lamas + magnéticos, conforme exposto no gráfico da figura 7.5.6.

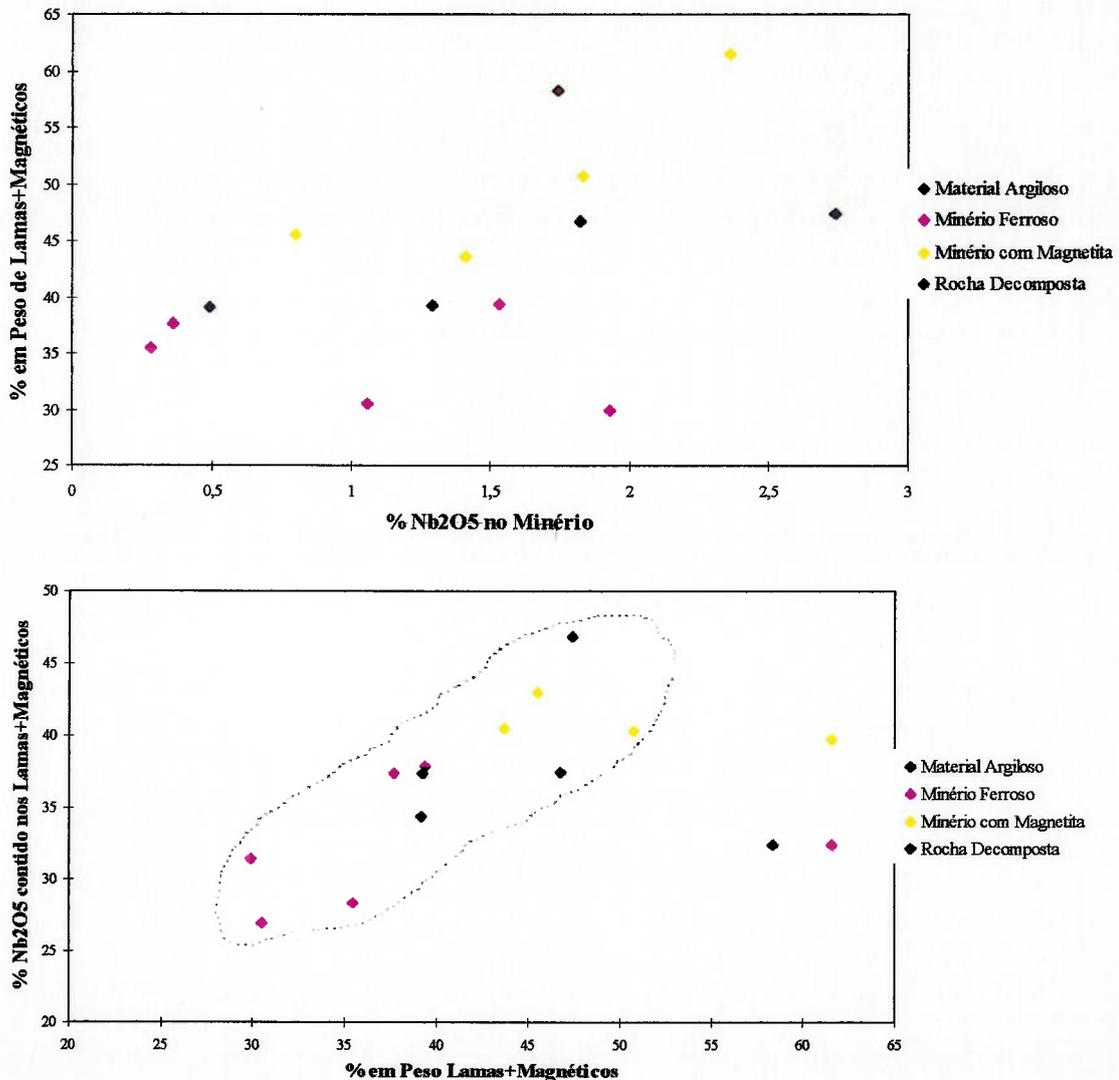


FIGURA 7.5.6
CORRELAÇÃO ENTRE O SOMATÓRIO DE LAMAS & QUANTIDADE DE MAGNÉTICOS

A plotagem da soma de lammas + magnéticos contra o nióbio associado à estes produtos, mostra dispersão dos pontos, grosseiramente sugerindo uma nuvem de correlação inclinada de 45°, com correlação direta de aumento da quantidade de lammas + magnéticos e aumento das perdas de nióbio .

Na tabela 7.5.4 estão sumarizados os dados relativos aos produtos moídos / deslamados / desmagnetizados, os quais indicam o quanto do minério, em termos de massa e nióbio contido, estará disponível para a concentração do pirocloro propriamente dita. Nota-se expressiva redução da massa inicial do minério para todos as tipologias, a massa de material apta a ser beneficiada significa de 40 a 70 % do total do minério.

TABELA 7.5.4
Características do Produto Deslamado e Desmagnetizado (TQ+PM)

AMOSTRA	Tipo Litológico	teores no Minério (%)			% peso na amostra	teores (%)			partição na amostra (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
CA	material argiloso	1,82	8,31	6,07	53,34	2,14	8,81	5,19	62,59	56,59	45,66
BA-1	material argiloso	1,29	9,45	4,78	60,88	1,33	10,95	3,90	62,69	70,52	49,71
BA-2	material argiloso	0,49	9,07	3,58	60,94	0,52	10,58	3,03	65,63	71,06	51,59
CG	canga	2,74	40,95	6,74	52,62	2,78	37,49	7,19	53,22	48,17	56,14
MB-1	min. com barita	0,28	21,53	10,90	64,54	0,32	13,73	12,35	82,72	41,16	73,10
MB-2	min. com barita	0,36	26,61	13,17	61,35	0,37	16,61	14,91	62,20	38,30	69,45
MB-3	min. com barita	1,06	26,13	12,31	69,50	1,12	21,20	13,00	73,40	56,38	73,40
MG-1	minério ferroso	1,93	33,81	6,96	70,09	1,89	29,23	6,73	68,59	60,59	67,72
MG-2	minério ferroso	1,53	51,57	4,05	60,64	1,56	46,57	3,82	61,93	54,76	57,29
MMB-1	min. com magn /barita	2,36	43,76	9,50	38,46	3,69	14,12	13,96	60,20	12,41	56,53
MMB-2	min. com magn /barita	0,80	30,19	12,38	54,47	0,83	13,82	14,20	57,02	24,93	62,48
MMG-1	min. com magnetita	1,83	42,71	4,85	49,19	2,22	19,88	5,88	59,81	22,90	59,61
MMG-2	min. com magnetita	1,41	48,08	4,54	56,33	1,48	36,00	4,82	59,22	42,18	59,80
CM	rocha decomposta	1,74	42,33	2,74	41,64	2,84	15,11	3,96	67,82	14,86	60,23

Os teores de nióbio associados mostram-se de mesma ordem do teor inicial do minério, com tendência pouco significativa à enriquecimento, exceção feita à duas amostras de MINÉRIO MAGNÉTICO e a amostra de ROCHA DECOMPOSTA. Do total de nióbio contido no minério, apenas cerca de 60% permanece disponível no produto deslamado e desmagnetizado para a etapa de concentração.

Para duas das amostras de MINÉRIO FERROSO COM BARITA, MB-1 e MB-2 não se verificou, após os processos de deslamagem e desmagnetização, enriquecimento interessante, permanecendo com teores inferiores a 0,4 % Nb₂O₅. Decidiu-se, então, por não dar continuidade ao seu estudo, por se tratar de minério com teores marginais e que assim permanecem, mesmo após a retirada das lammas e dos magnéticos.

Também não se observam variações significativas nos teores de ferro e bário com a deslamagem e desmagnetização, a menos dos tipos de minério com magnetita, nos quais ocorre expressiva redução do ferro contido.

Para a seqüência das separações minerais, foi feita composição dos produtos não magnéticos gerados a partir dos finos naturais (TQ) e de moagem (PM), nos quais procedeu-se à separação magnética de média intensidade, e os resultados são apresentados na tabela 7.5.5.

TABELA 7.5.5
Resultados das Separações Eletromagnéticas a Média Intensidade (Frantz)

AMOSTRA	Tipo Litológico	PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição na amostra (%)		
				Nb2O5	Fe2O3	BaO	Nb2O5	Fe2O3	BaO
CA	material argiloso	Magn.Média Intensidade	5,97	0,78	30,10	0,86	2,89	22,83	0,84
		Não Mag.Méd.Intensidade	47,37	2,03	5,61	5,80	59,70	33,76	44,82
		Total Não Magnéticos calculado	53,34	1,89	8,35	5,25	62,59	56,59	45,66
BA-1	material argiloso	Magn.Média Intensidade	12,46	0,81	30,30	1,16	8,23	44,04	3,05
		Não Mag.Méd.Intensidade	48,42	1,38	4,69	4,56	54,46	26,49	46,65
		Total Não Magnéticos calculado	60,88	1,26	9,93	3,86	62,69	70,52	49,71
BA-2	material argiloso	Magn.Média Intensidade	16,66	0,65	30,60	1,00	17,94	51,31	4,08
		Não Mag.Méd.Intensidade	44,28	0,65	4,43	4,38	47,69	19,74	47,51
		Total Não Magnéticos calculado	60,94	0,65	11,58	3,46	65,63	71,06	51,59
CG	canga	Magn.Média Intensidade	16,33	1,00	56,80	2,30	6,32	23,11	5,84
		Não Mag.Méd.Intensidade	36,29	3,34	27,70	8,91	46,91	25,05	50,30
		Total Não Magnéticos calculado	52,62	2,61	36,73	6,86	53,22	48,17	56,14
MB-3	minério com barita	Magn.Média Intensidade	17,21	0,54	59,20	2,09	8,71	36,52	3,01
		Não Mag.Méd.Intensidade	52,29	1,32	10,60	16,10	64,69	19,87	70,40
		Total Não Magnéticos calculado	69,50	1,13	22,63	12,63	73,40	56,38	73,40
MG-1	minério ferroso	Magn.Média Intensidade	25,91	1,15	67,00	1,77	14,99	48,10	6,88
		Não Mag.Méd.Intensidade	44,19	2,41	10,20	9,18	53,59	12,49	60,85
		Total Não Magnéticos calculado	70,10	1,94	31,19	6,44	68,59	60,59	67,72
MG-2	minério ferroso	Magn.Média Intensidade	34,38	1,13	71,60	1,25	26,16	45,68	11,40
		Não Mag.Méd.Intensidade	26,16	2,03	18,70	6,61	35,76	9,08	45,88
		Total Não Magnéticos calculado	60,54	1,52	48,74	3,57	61,93	54,76	57,29
MMB-1	minério com magnetita e barita	Magn.Média Intensidade	10,09	2,48	43,60	5,10	10,53	9,76	5,63
		Não Mag.Méd.Intensidade	28,37	4,16	4,20	16,40	49,67	2,64	50,90
		Total Não Magnéticos calculado	38,46	3,72	14,54	13,44	60,20	12,41	56,53
MMB-2	minério com magnetita e barita	Magn.Média Intensidade	10,42	0,69	53,90	2,66	9,66	17,80	2,44
		Não Mag.Méd.Intensidade	44,05	0,80	5,11	15,50	47,36	7,13	60,04
		Total Não Magnéticos calculado	54,47	0,78	14,44	13,04	57,02	24,93	62,48
MMG-1	minério com magnetita	Magn.Média Intensidade	16,01	1,77	49,10	2,21	15,46	18,11	7,52
		Não Mag.Méd.Intensidade	33,18	2,45	6,27	7,39	44,35	4,79	52,09
		Total Não Magnéticos calculado	49,19	2,23	20,21	5,70	59,81	22,90	59,61
MMG-2	minério com magnetita	Magn.Média Intensidade	28,05	1,21	62,90	2,24	24,01	34,81	14,32
		Não Mag.Méd.Intensidade	28,28	1,76	13,20	7,06	35,21	7,37	45,49
		Total Não Magnéticos calculado	56,33	1,49	37,95	4,66	59,22	42,18	59,80
CM	rocha decomposta	Magn.Média Intensidade	11,30	2,08	33,50	2,81	13,92	9,43	11,59
		Não Mag.Méd.Intensidade	30,34	3,00	7,19	4,39	53,90	5,43	48,63
		Total Não Magnéticos calculado	41,64	2,75	14,33	3,96	67,82	14,86	60,23

O produto magnético a média intensidade é composto essencialmente por ilmenita e grãos mistos de magnetita com as diversas espécies minerais componentes do minério, sendo que o nióbio contido neste produto está sob a forma de grãos mistos.

7.5.3 - Composição Mineralógica do Minério

As identificações minerais efetuadas nos diversos produtos das separações minerais, por microscopia óptica com apoio de difração de raios-X, conduziram à definição das características dos minerais componentes do minério, descritas neste item.

Ressalta-se como feição comum a muitas das espécies minerais a microcristalinidade gerando agregados, monominerálicos ou não, de agregados de cristalitos submilimétricos com relativa coesão e freqüentemente impregnados por óxidos de ferro. Tal característica explica a tendência de geração de finos verificada neste minério, seja por processos naturais de intemperismo, seja por um processo imposto de cominuição.

O detalhamento das associações minerais nos agregados, bem como alguma caracterização da composição das espécies neles contidas, foi realizado por microscopia eletrônica de varredura acoplada a um sistema de microanálise por EDS. Ressaltando-se que tal detalhamento foi realizado apenas em amostras coletadas nas frentes de lavra do minério de fosfato em exploração pela GOIASFÉRTIL.

a) Minerais de fósforo -

Nos materiais mais superficiais, que correspondem aos horizontes de depleção de cálcio, os fosfatos presentes ocorrem invariavelmente micro a criptocristalinos, sob forma de agregados de cristalitos com dimensões de 1 a 5 micrômetros freqüentemente associados com óxidos de ferro, e subordinadamente com ilmenita, quartzo e/ou apatita. Feições típicas dos agregados contendo fosfatos, são ilustradas nas fotomicrografias nº 1 e 2.

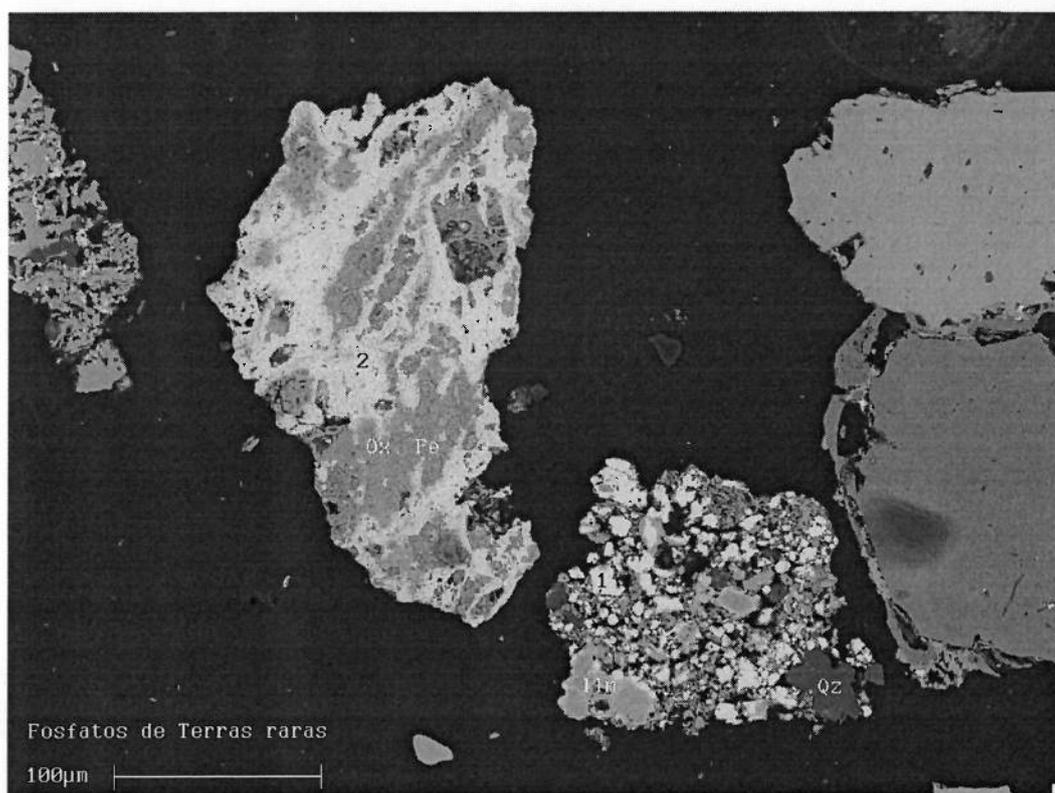
Composições químicas obtidas por microanálise, ilustradas na tabela 7.5.6, evidenciam presença de dois grupos de espécies bem distintos: um essencialmente um alumino-fosfato de bário com pequena quantidade de cálcio, e outra um fosfato de elementos de terras raras (ETR), com significativa variabilidade dos elementos constituintes.

Como característica similar, independentemente dos cations associados, nota-se um conteúdo de fósforo da ordem de 30 %, nos dois grupos de fosfatos. Os de bário, com teores típicos de 23% BaO, 27 % Al₂O₃, e 10 % H₂O, apresentam certa quantidade de ferro, que tanto pode ser na estrutura cristalina como decorrentes de íntima associação de películas.

Dentre os fosfatos de ETR, observa-se presença constante de Ce e La, embora as proporções relativas variem muito, e pela composição química identifica-se espécies do grupo das monazitas, em dois sub-grupos: um apenas com Ce e La, e o outro contendo também Nd e Pr.

Tabela 7.5.6
Fosfatos Diversos - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)

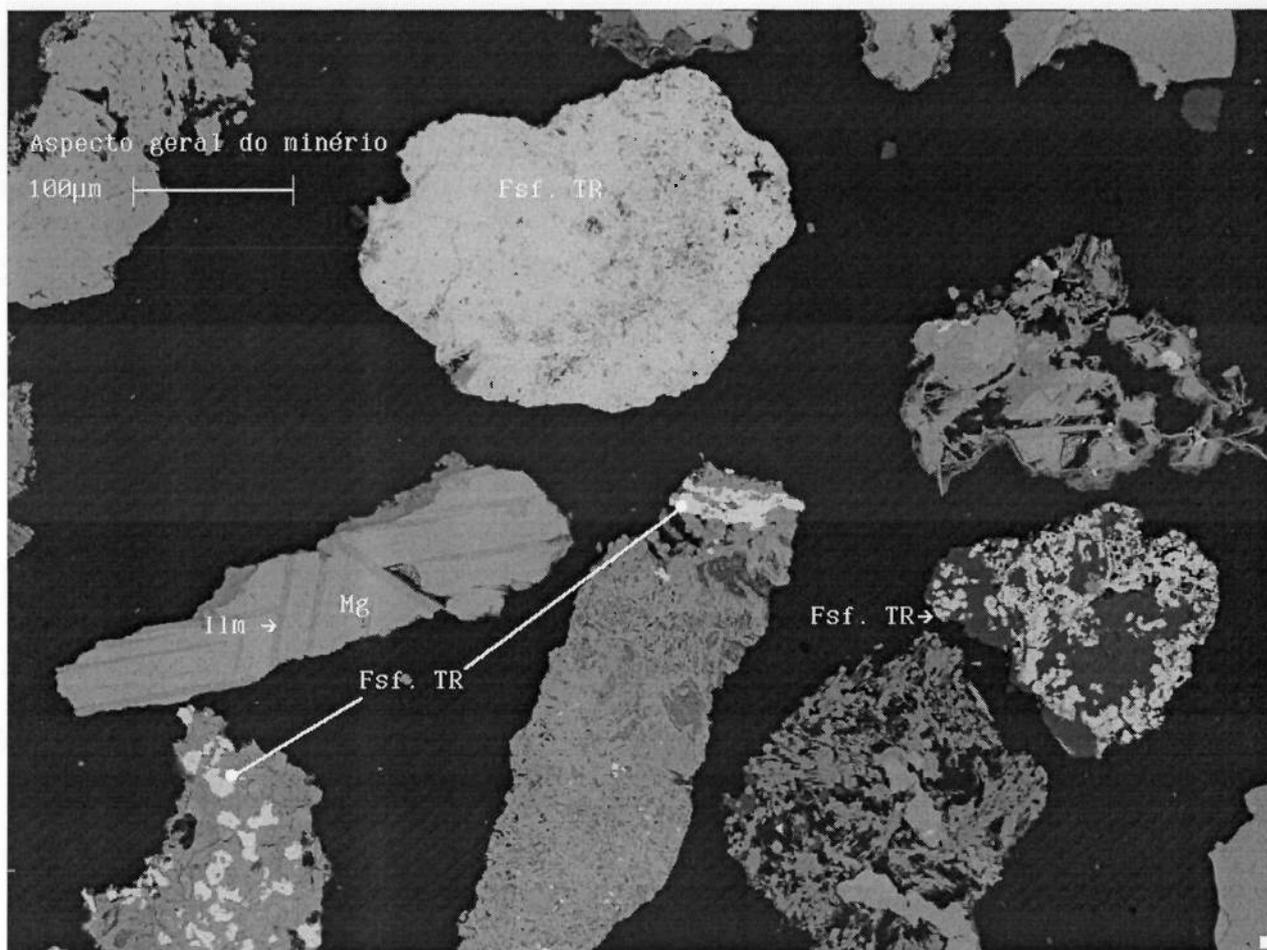
Óxidos	Alumino-Fosfatos de Ba			Fosfatos de Elementos de Terras Raras			
BaO	23,04	23,80	22,95	-	-	-	-
CaO	1,88	1,82	2,03	4,03	4,52	3,14	2,85
SrO	-	-	-	-	-	3,33	3,68
TiO ₂	-	-	-	0,20	2,63	-	-
Fe ₂ O ₃	7,92	7,38	6,67	1,84	32,34	1,14	-
Al ₂ O ₃	27,59	26,82	28,20	0,57	6,71	-	-
P ₂ O ₅	28,96	29,87	30,28	39,04	30,57	29,55	29,05
MgO	-	-	-	-	0,41	-	-
CeO ₂	-	-	-	42,28	14,54	32,72	33,76
La ₂ O ₃	-	-	-	12,25	8,92	10,78	11,19
Y ₂ O ₃	-	-	-	0,67	-	-	-
Nd ₂ O ₃	-	-	-	-	-	12,34	12,91
Pr ₆ O ₁₁	-	-	-	-	-	4,69	3,74



FOTOMICROGRAFIA Nº 1 - AGREGADOS COM FOSFATOS DE TERRAS RARAS

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados; microanálise por EDS.

Descrição: Diversas feições de agregados de fosfatos de Elementos de Terras Raras (pontos 1 e 2).



FOTOMICROGRAFIA Nº 2 - AGREGADOS COM FOSFATOS DE TERRAS RARAS / MAGNETITA

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados; microanálise por EDS.

Descrição: Diversas feições de agregados de fosfatos de Elementos de Terras Raras .

Por difração de raios-X, foram identificadas as espécies:

- | | |
|--|--------------|
| - gorceixita $(\text{Ba,Ca,Ce})\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | predominante |
| - monazita $(\text{Ce,La,Th})\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ | accessória |

Nos horizontes mais profundos e no nível de ROCHA DECOMPOSTA, o fosfato predominante é a apatita, sendo que as espécies identificadas alinham-se entre uma típica hidróxi-apatita e uma fluorapatita. As feições texturais características da apatita são: apatita bem cristalizada com / sem película parcial a total de óxidos-hidróxidos de ferro, ou encapsulada por agregados de apatita secundária, microcristalina, com impregnação variada por óxidos-hidróxidos de ferro; agregados microcristalinos de apatita secundária com / sem os óxido-hidróxidos de ferro; e agregados de grãos de apatita cimentados por fosfatos secundários.

b) Minerais de titânio -

Várias foram as espécies de minerais de titânio identificadas no minério pela conjugação das técnicas de mineralogia utilizadas, são elas:

- ilmenita	FeO. TiO ₂	essencial
- anatásio	TiO ₂	essencial
- ilmenorutilo	(Ti,Nb,Ta,Fe) O ₂	traços
- pseudo-rutilo	TiO ₂	traços
- perowskita	CaO. TiO ₂	traços
- titanita	CaSiTiO ₄	traços
- priderita	KTiO ₃	traços

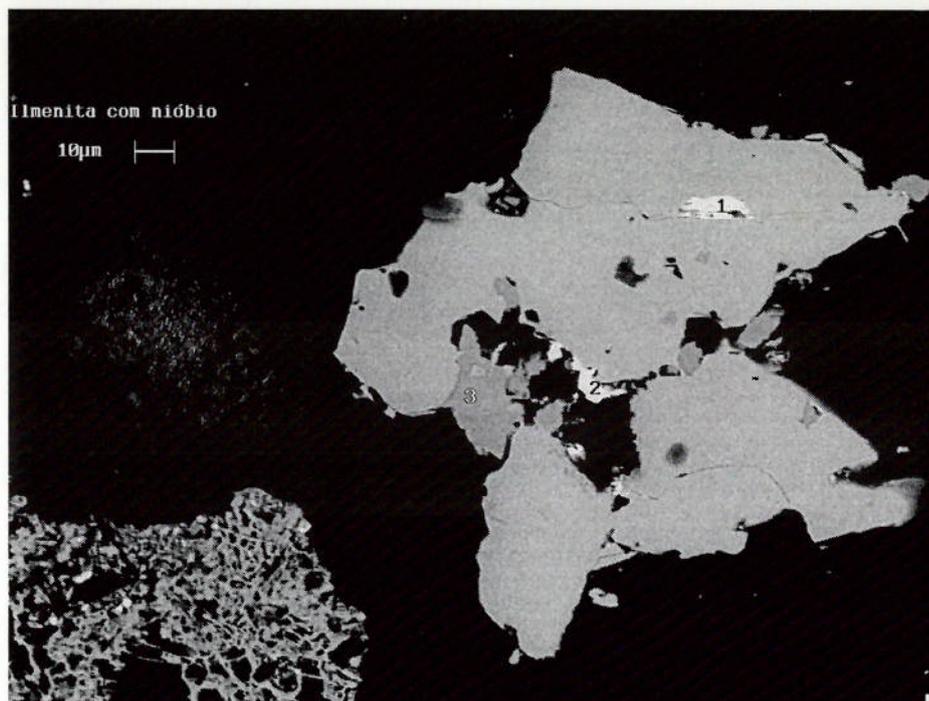
A ilmenita ocorre originalmente livre ou associada à magnetita sob forma de lamelas em vários estágios de alteração com formação de leucoxênio. Os termos intermediários da transformação ilmenita-leucoxênio, tais como ilmeno-rutilo e pseudo-rutilo, são pouco significativos em quantidade. A ilmenita apresentou cerca de 3% de MnO, sendo que foram detectadas variedades contendo teores da ordem de 1% de Nb₂O₅, como indicado na tabela 7.5.7 e ilustrado na fotomicrografia n° 3.

O leucoxênio de Catalão é essencialmente constituído pela espécie mineral anatásio. Forma caracteristicamente agregados algo porosos de cristalitos com dimensões de 0,001 a 0,005 mm, com intensa impregnação por óxidos de ferro, fato que lhes proporciona um aspecto terroso, avermelhado, podendo estar intercrescidos com grãos de magnetita, ilmenita, e/ou perowskita / priderita; os agregados maiores freqüentemente apresentam núcleos de uma destas espécies. Como feição menos freqüente, detectou-se presença de fosfatos não apatíticos associados aos agregados de anatásio e variedades de niobio-anatásio, contendo associados na estrutura cristalina algum Zr e até 1,5 % de Nb₂O₅, como ilustrado na fotomicrografia n° 4.

Tabela 7.5.7

Minerais de Titânio - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)

	Ilmenita Niobífera			Nb-Anatásio	
CaO	0,04	0,11	0,16	0,41	4,19
Nb ₂ O ₅	1,70	0,75	0,89	1,52	0,73
TiO ₂	48,13	49,16	49,32	85,70	90,13
ZrO ₂	-	-	-	7,11	1,95
Fe ₂ O ₃	46,60	47,64	48,15	3,06	2,37
Al ₂ O ₃	0,16	0,13	-	0,83	-
MnO	3,16	2,64	2,44	-	-
SiO ₂	-	-	-	1,58	0,61



FOTOMICROGRAFIA N° 3 - ILMENITA NIOBÍFERA

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados; microanálise por EDS.

Descrição: Ilmenita com inclusões de zirconolita (1), fosfatos de ETR(2) e fosfato de Ba (3),



FOTOMICROGRAFIA N° 4 - ANATÁSIO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados; microanálise por EDS.

Descrição: Agregado de anatásio em partícula com forma reliquiar.

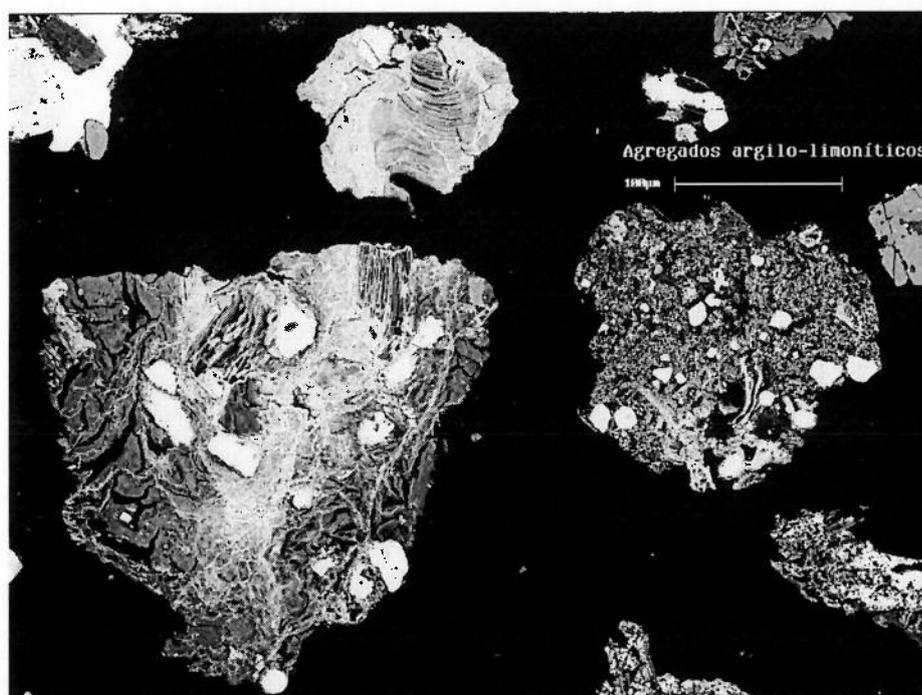
Os demais minerais de titânio identificados no minério, tem menor expressão , sendo mais significativos apenas nas amostras de ROCHA DECOMPOSTA, tanto a perowskita / priderita, como a titanita.

c) Silicatos

O grupo de minerais denominados neste trabalho por argilo-minerais / micas compreende os filossilicatos, caracterizados, por difração de raios-X, como uma mistura de espécies do grupo das:

- flogopitas	$K_2Mg_4Al_2Si_6O_{20}(OH)$
- vermiculitas	$Mg_x(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10} \cdot 6H_2O$
- hidromicas	K-Mg-Fe-Al-Si-O-OH

Apresentam grau variado de alteração e hidratação, significando micas de composição semelhantes, interestratificadas (10-12-14 A), com baixo conteúdo de alumínio e proporções bastante variadas de magnésio e ferro. Normalmente ocorrem sob forma de agregados criptocristalinos, muito impregnados por óxidos de ferro, genericamente denominados de agregados argilo-limoníticos, vide fotomicrografia nº 5.



FOTOMICROGRAFIA Nº 5 - AGREGADOS ARGILO-LIMONÍTICOS

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados; microanálise por EDS.

Descrição: Aspectos típicos de agregados argilo-limoníticos com grãos de óxidos de ferro.

Associada às micas foi detectada a presença de cloritas, tendo-se identificado espécies:

- lizardita $(\text{Mg,Al})_3(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- clinocloro $(\text{Mg,Al})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}_3(\text{OH})_6$

Quartzo, geralmente impregnado por óxidos / hidróxidos de ferro, está presente ao longo de toda a área amostrada, independentemente do tipo ou profundidade do minério, seja a forma de cristais bem desenvolvidos, seja na forma, mais rara, de agregados microcristalinos com intensa impregnação por óxidos de ferro.

d) Minerais de Ferro

Os minerais de ferro observados foram identificados como sendo:

- magnetita Fe_3O_4
- hematita Fe_2O_3
- maghemita Fe_2O_3
- goetita $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- limonita $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (amorfa)

A magnetita é titanífera, admitindo até 10 % de TiO_2 em sua estrutura cristalina, e por vezes com exsoluções de ilmenita, na forma de finas lamelas ou “box-work” (vide fotomicrografia nº 2 e). É observada tanto fresca como em vários graus de alteração.

Dentre os demais óxidos predomina amplamente a goethita, com menor quantidade de hematita e maghemita, que ocorrem em grãos individuais ou cimentando agregados minerais.

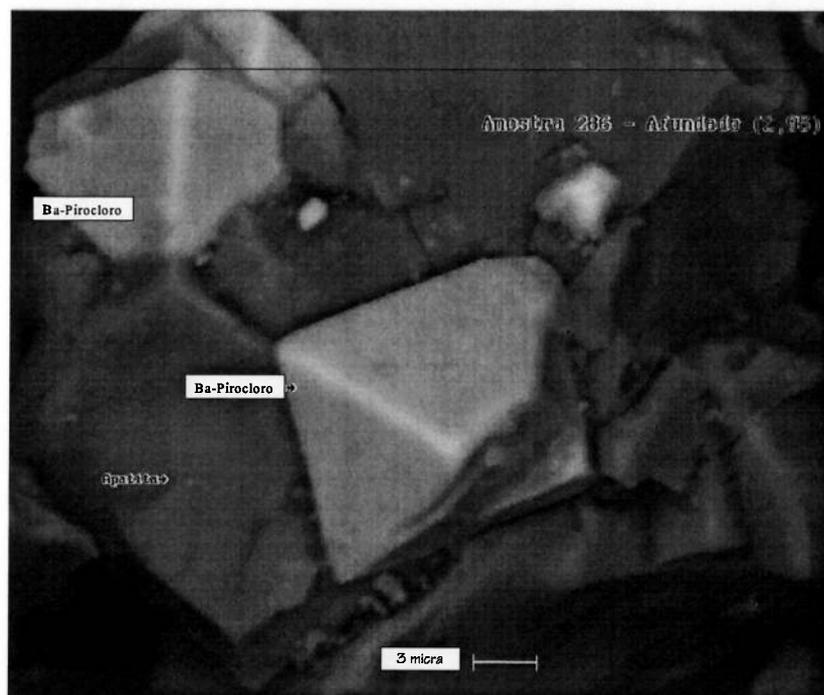
e) Minerais de Nióbio

No material estudado foram reconhecidas duas variedades de pirocloro, com características bem distintas quando observados sob microscopia ótica.

Uma variedade mostra-se bem cristalizada, em cristais transparentes e límpidos, normalmente com forma octaédrica, ou pseudo-octaédrica, e coloração castanha a amarelo-citrino, identificado como uma variedade cálcica, ou pirocloro propriamente dito ^{119,122}. A outra, em agregados microcristalinos leitosos, de cor branca a amarelo pálido, com cristalitos de dimensões submilimétricas a micrométricas, foi identificada como Ba-pirocloro, por vezes com forma octaédrica milimétrica, reliquiar (fotomicrografia nº 6).

**FOTOMICROGRAFIA Nº 6A**

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados.

**FOTOMICROGRAFIA Nº 6B**

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados.

Descrição: Formas típicas de grãos de pirocloro, sejam liberados (fotoA) ou mistos (fotoB).

As respectivas composições químicas teóricas das espécies detectadas, são:

- membros cálcicos $\text{Na Ca Nb}_2 \text{O}_6 \text{F}$
- Ba-pirocloro $(\text{Ba,Sr})_{2-m} (\text{Nb,Ti})_2 \text{O}_6 (\text{O,OH,F})_{1-n} \cdot p\text{H}_2\text{O}$

A literatura faz referência a estas duas variedades, identificando a fase mais bem cristalizada como kopita ¹²², e a microcristalina como Ba-pirocloro, ou pandaíta ^{119,122}. Existe ainda a referência bibliográfica ¹¹⁹ da presença de pirocloro portador de Ce e com Pb.

As relações texturais típicas entre as duas espécies de pirocloro quando associados em grãos mistos, é de presença do Ca-pirocloro interna aos agregados de Ba-pirocloro, sob forma de um núcleo ou simplesmente inclusa no agregado.

A massa de cristalitos ou os agregados de Ba-pirocloro freqüentemente tem óxidos de ferro associados em grãos, seja como finas películas impregnando os cristalitos de pirocloro, seja como núcleos inclusos nos agregados. Feição mais rara, é presença de cristalitos de fosfatos não apatíticos a eles associados, o mesmo ocorrendo com cristalitos de anatásio.

As variedades cálcicas podem ocorrer em quantidades similares ao Ba-pirocloro, ou predominarem sobre ele, em função da profundidade da amostra.

Das características do Ba-pirocloro, críticas para a viabilização técnico-econômica de seu aproveitamento, sobressaem-se as feições relacionadas com sua forma de cristalização, tipicamente micro a criptocristalina, com os cristalitos formando agregados de friabilidade variável. A microcristalinidade se vincula a aspectos de estrutura cristalina do Ba-pirocloro, independentemente dos controles locais de mineralização, enquanto a compactação dos agregados é decorrente de fenômenos locais, típicos para cada ocorrência mineral.

Como conseqüência da característica de microcristalinidade e presença de agregados de cristalitos, há tendência do Ba-pirocloro ocorrer em granulação fina, se concentrando junto aos finos naturais, e, de irem compor significativa parte das lammas de moagem.

A composição química da Ba-pirocloro de Catalão tem sido objeto de investigações, conforme dados do quadro da tabela 7.5.8, tendo mostrado teores de 14 a 18 % de BaO e 61 a 68 % de Nb₂O₅, com um conteúdo de cerca de 5% de TiO₂.

TABELA 7.5.8
Coletânea Bibliográfica da Composição Química de Ba-pirocloros de Catalão

% Nb ₂ O ₅	61,0	65,0	63,5	65,7	64,8	64,6	65,4	58,11	40,0
% Ta ₂ O ₅	nd	0,38	nd						
% TiO ₂	6,1	3,6	5,1	4,7	4,2	4,6	4,2	4,51	6,5
% Fe ₂ O ₃	4,44	1,33	2,89	1,78	2,44	2,00	1,33	3,62	8,0
% MnO	nd	0,09							
% Na ₂ O	nd	5,16	nd						
% BaO	14,2	17,4	15,9	18,0	17,3	18,0	18,4	13,98	9,0
% CaO	nd	2,0							
% SrO	nd	0,52							
% Ox. ETR	nd	0,95	4,54						
% P ₂ O ₅	nd	6,0							
% Al ₂ O ₃	nd	3,83	1,8						
% SiO ₂	nd	0,48	nd						
% PbO	nd	0,38	nd						
% ZrO ₂	nd	0,87	nd						
% ThO ₂	nd	1,4	4,3						
% S	nd	0,012	nd						
% UO ₂	nd	0,36	nd						
% PF	16,7	13,2	14,2	10,6	10,8	12,6	11,4	5,16	11,8
Referências	93	93	93	93	93	93	93	109	122
Metodologia	Microsonda	An.Química							

nd = dado não disponível

O detalhamento das características dos agregados de pirocloro desenvolvido no presente trabalho, revelou alguns aspectos peculiares, complementares aos que haviam sido reportados anteriormente. Foram reconhecidas diversas variedades de pirocloro, quimicamente classificadas como Ba-pirocloro, com teores de 9 a 20 % BaO, contendo até 5 % SrO e proporções de 0 a 14 % PbO, conforme discriminado na sequência.

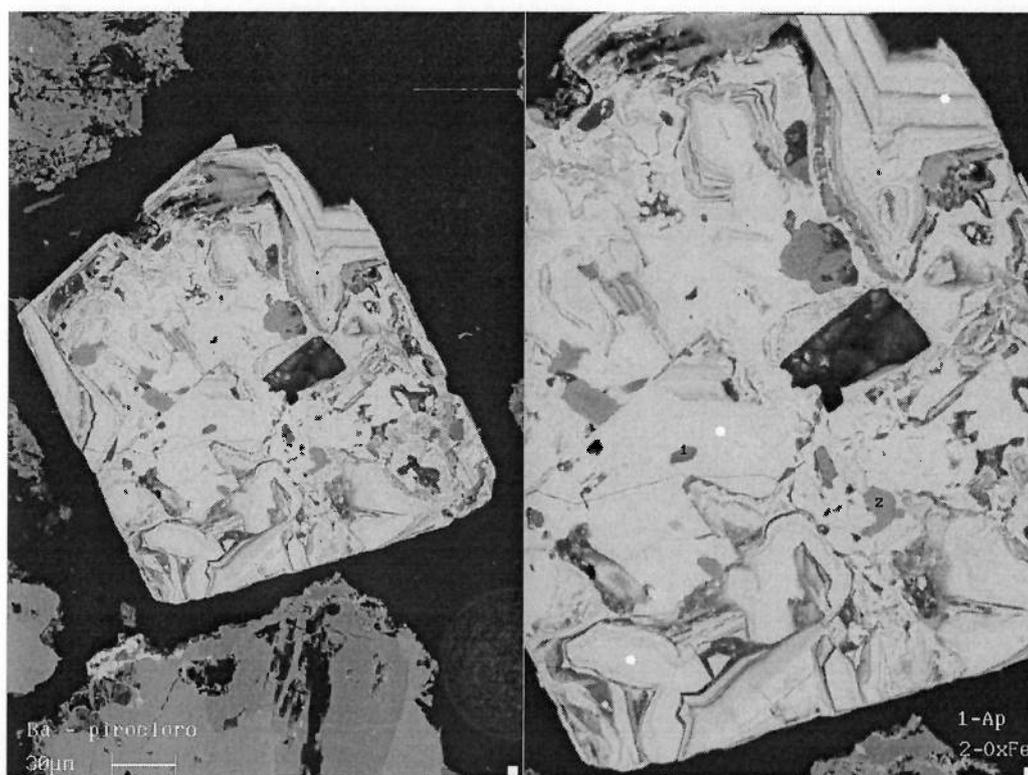
Verificou-se para o Ba-pirocloro a composição química exposta na tabela 7.5.9. Trata-se de espécie com variada hidratação e proporções de 55 a 70 % Nb₂O₅, marcada por variações significativas de teores de ferro e pequena quantidade de Al, Sr e Pb, sendo que foi possível reconhecerem-se dois grupos distintos pela presença de Ti, Zr e Th. Teores mais elevados de nióbio parecem se relacionar com menor quantidade de hidroxilas na estrutura.

Feições típicas dos agregados de Ba-pirocloro estão ilustradas nas fotomicrografias nº 7 a 10. São frequentes zoneamentos de fases de pirocloro com composição química distinta, por vezes formando núcleos, além da frequente presença de óxidos de ferro ao longo de linhas de crescimento ou preenchendo microfraturas, inclusões de fosfatos (apatita e/ou fosfatos secundários) e vazios. Os agregados mostram dimensões variáveis de 0,015 a 0,100 mm, e cristalitos mostram dimensões da ordem de 0,003 a 0,005 mm.

Tabela 7.5.9
Ba-pirocloros - Microanálises Químicas Semiquantitativas por EDS (teores em %)

Óxidos	AM6	AM4	AM5	AM7	Média	AM31	AM27	Média
BaO	18,77	18,33	18,25	20,51	18,96	13,35	16,37	14,86
CaO	0,44	0,26	0,18	-	0,22	0,76	0,38	0,57
SrO	1,68	1,53	1,54	2,13	1,72	2,29	1,15	1,72
Na ₂ O	0,18	0,14	0,17	0,21	0,17	1,43	0,22	0,83
Nb ₂ O ₅	57,54	59,72	62,92	70,81	62,75	54,46	66,04	60,25
TiO ₂	-	-	-	-	-	4,32	3,19	3,75
ZrO ₂	-	-	-	-	-	4,16	3,81	3,98
PbO	1,85	1,09	0,97	0,72	1,16	0,68	0,55	0,62
Fe ₂ O ₃	1,38	1,03	0,82	-	0,81	5,18	0,82	3,00
Al ₂ O ₃	0,81	0,49	0,57	-	0,47	0,59	0,59	0,59
SO ₂	-	-	-	-	-	-	0,36	0,18
ThO ₂	-	-	-	-	-	0,60	0,75	0,68

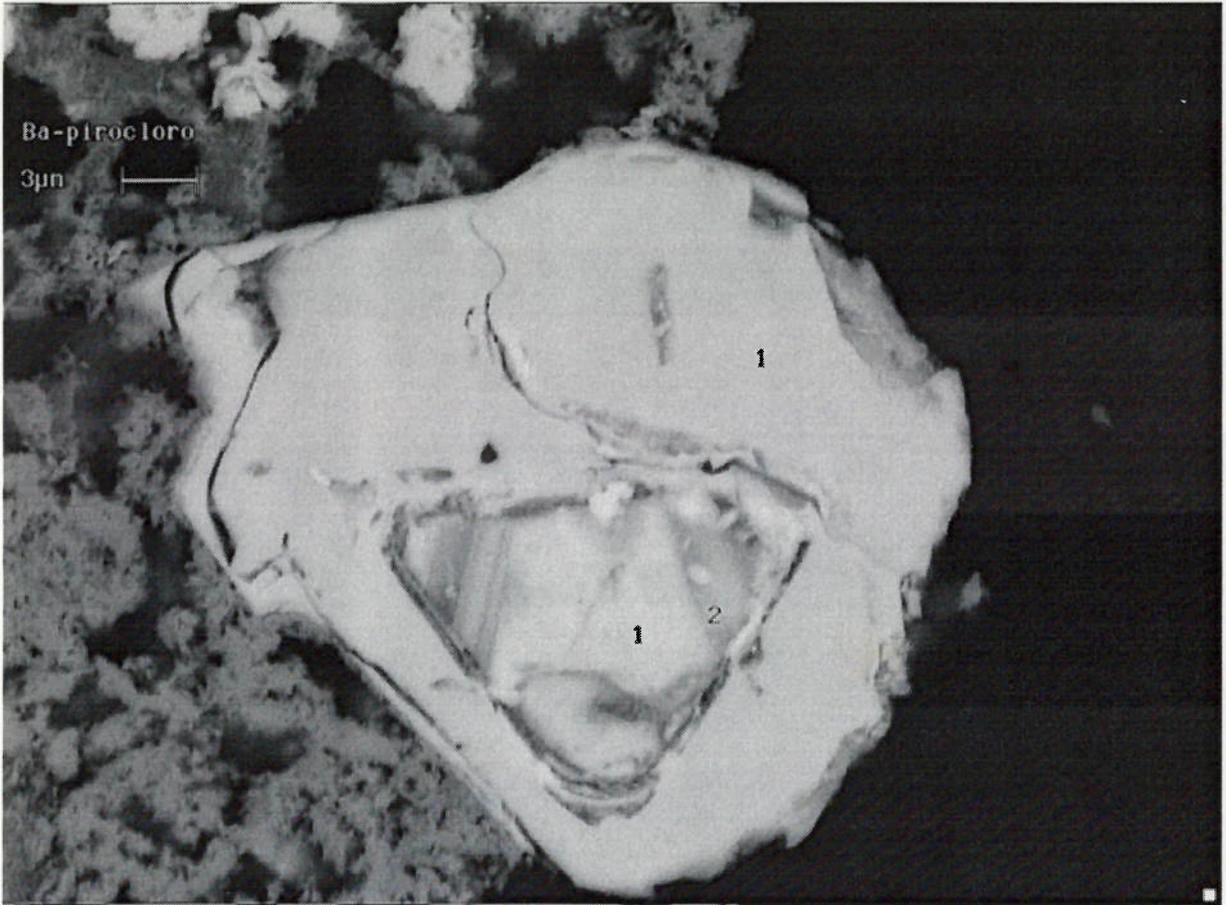
Foram detectadas também espécies de Ba-pirocloro portadoras de Ti e Ta em teores de até 5% e com Pb algo mais elevado, que são bem menos abundantes e tendem a ocorrer em agregados / grãos de dimensões inferiores a 0,010 mm (fotomicrografias de nº 11 a 15). Teores de Pb mostram estreita correlação com os de enxôfre, embora estes sejam inferiores a 3 % SO₂. E, finalmente, foi detectada uma variedade de pirocloro em que o cation predominante é o Pb, com menor Ba (fotomicrografia n°14), a qual ocorre em proporções de traços.



FOTOMICROGRAFIA N° 7 - BA-PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detectores de elétrons retroespalhados.

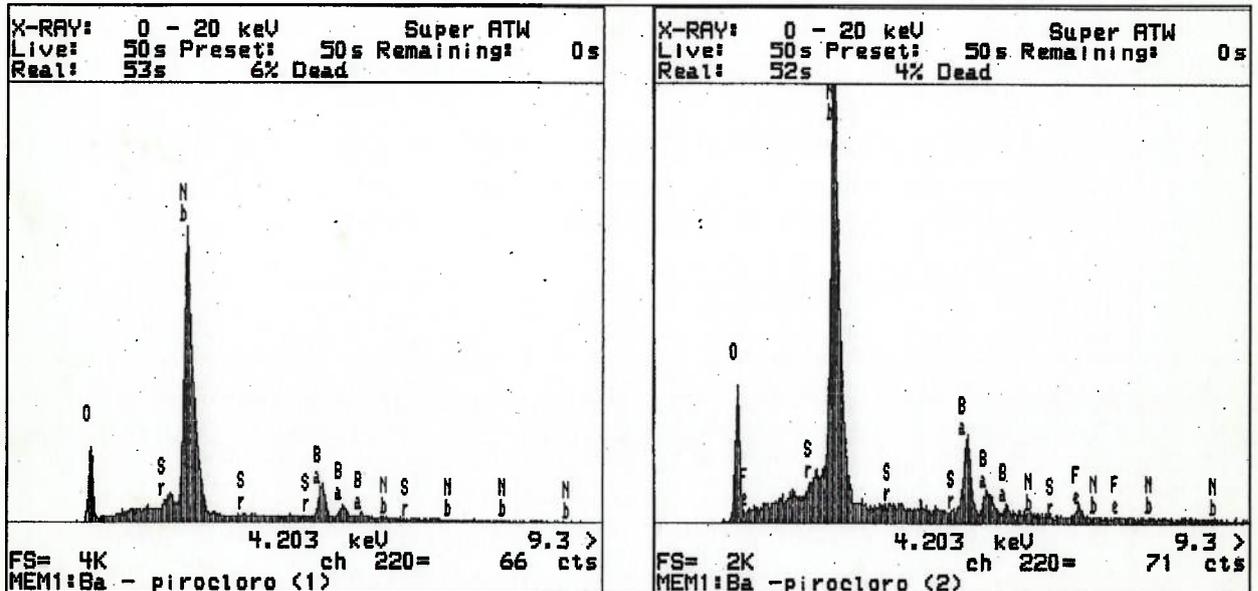
Descrição: Detalhe de um grão / agregado de pirocloro mostrando muitas linhas de crescimento com outras fases associadas, de coloração mais escura, basicamente apatita e óxidos de ferro.

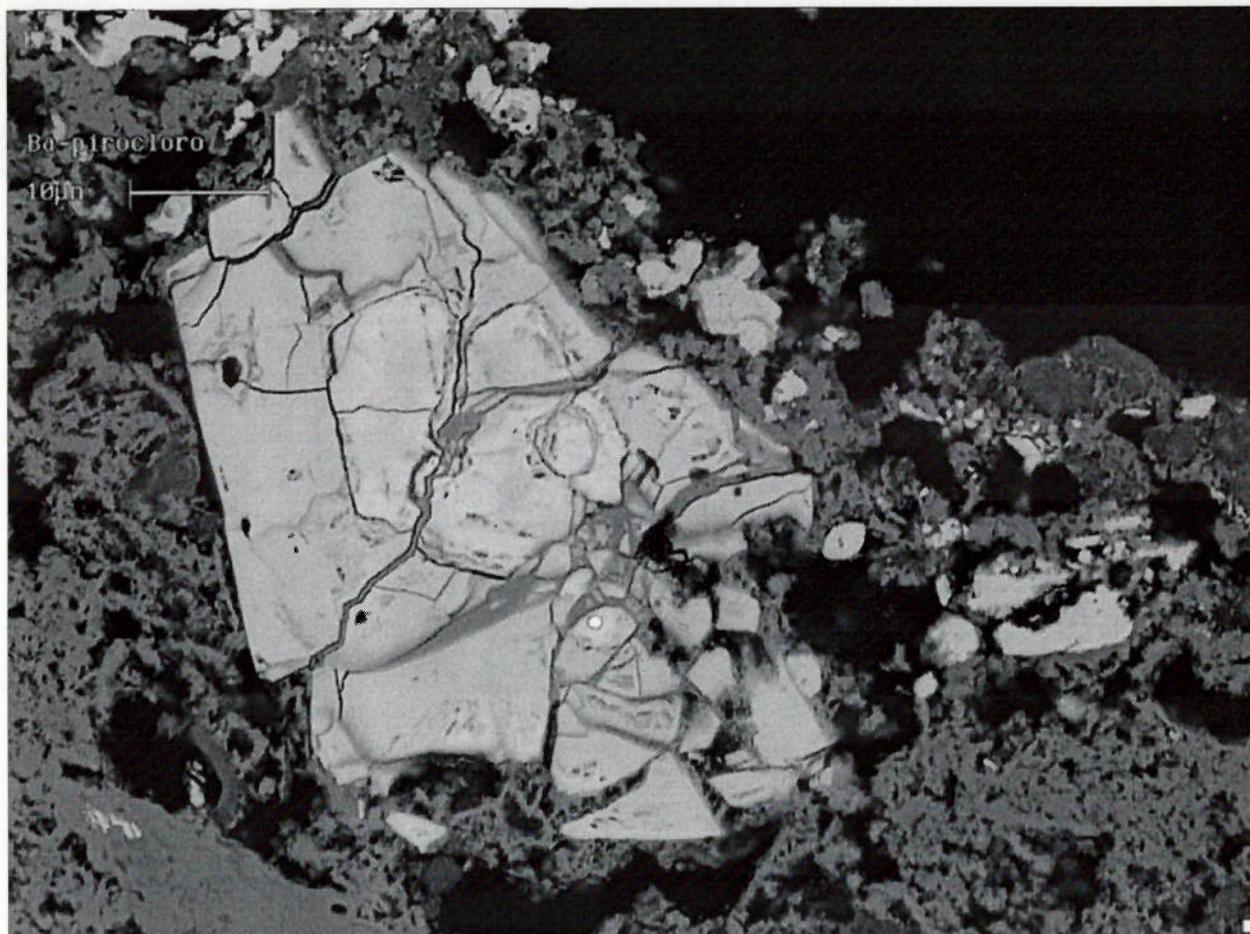


FOTOMICROGRAFIA Nº 8 - BA-PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados.

Descrição: Detalhe do interior de um grão / agregado de Ba-pirocloro mostrando zoneamento com um núcleo bem definido e isolado da massa circundante. Quimicamente as duas fases contém Sr como menor constituinte, e se diferenciam pela presença de Fe na fase 2, como ilustrado nos espectros abaixo.





FOTOMICROGRAFIA Nº 9 - BA-PIROCLORO

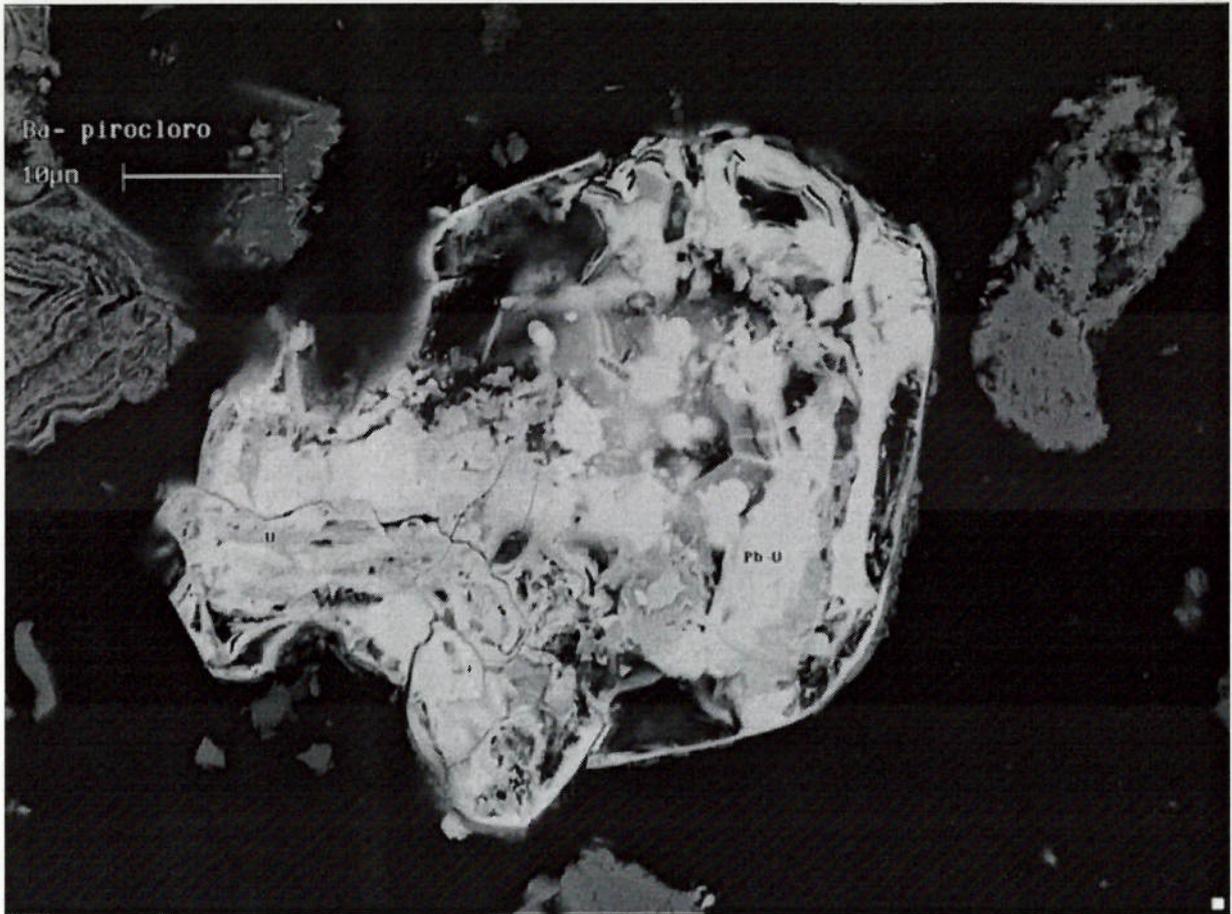
Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Detalhe do interior de um grão / agregado de Ba-pirocloro mostrando zoneamento com um núcleo bem definido e isolado da massa circundante. Notar desenvolvimento de óxidos de ferro, mais escuros, ao longo das fraturas no grão.

Quimicamente as duas fases são hidratadas, contém Sr e Pb como menor constituinte, e se diferenciam pela maior presença de Pb no núcleo mais branco, como ilustrado abaixo.

FOTOMICROGRAFIA Nº 9 -Análises semiquantitativas por EDS (teores em %)

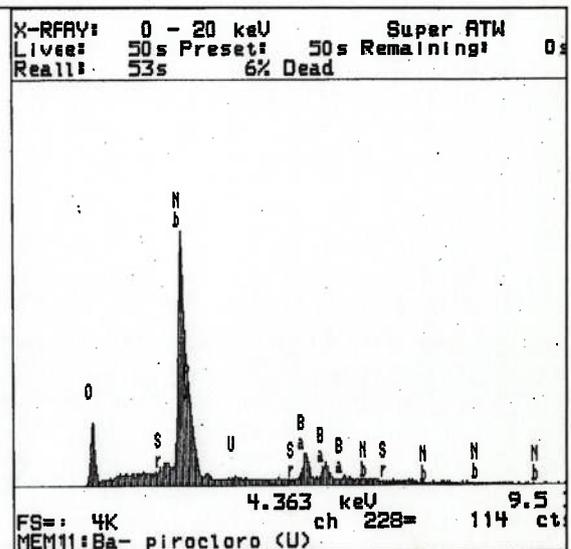
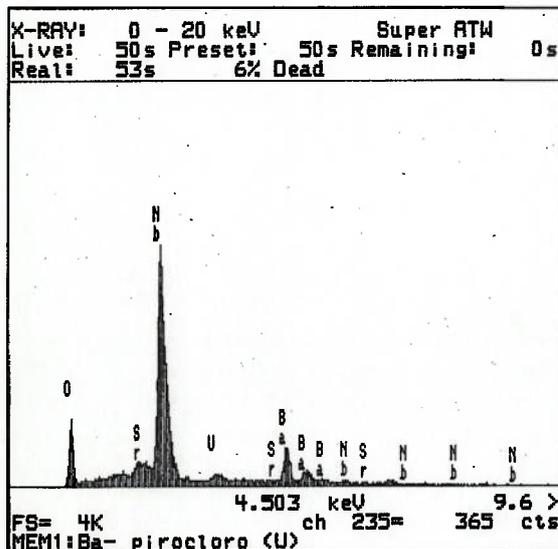
	AM1 núcleo	AM3 massa de borda
BaO	16,32	15,36
CaO	0,73	0,25
SrO	0,96	1,49
Na ₂ O	0,08	0,26
Nb ₂ O ₅	49,61	44,42
PbO	1,81	0,94
Fe ₂ O ₃	1,15	1,30
Al ₂ O ₃	4,12	0,97

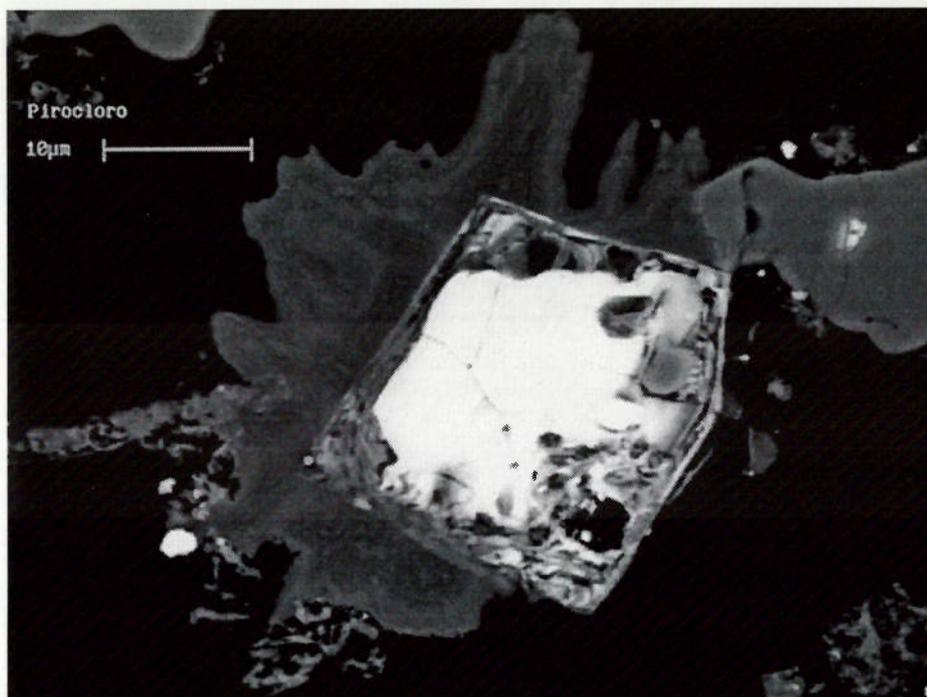


FOTOMICROGRAFIA Nº 10 - BA-PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detectores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Detalhe do interior de um agregado de Ba-astroclorite mostrando zoneamento com porções mais claras compostas por um Ba-astroclorite com traços de U, e porções mais escuras de Ba-astroclorite típico, como ilustrado nos espectros abaixo; notar acentuada presença de vazios.

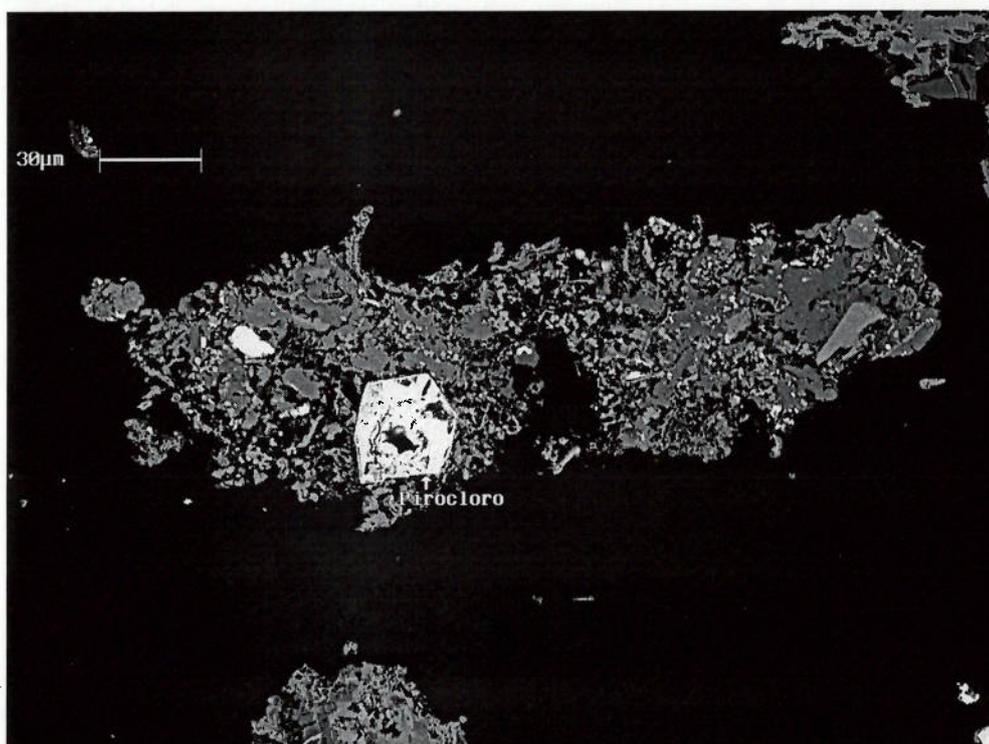




FOTOMICROGRAFIA Nº 11A - BA-PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados.

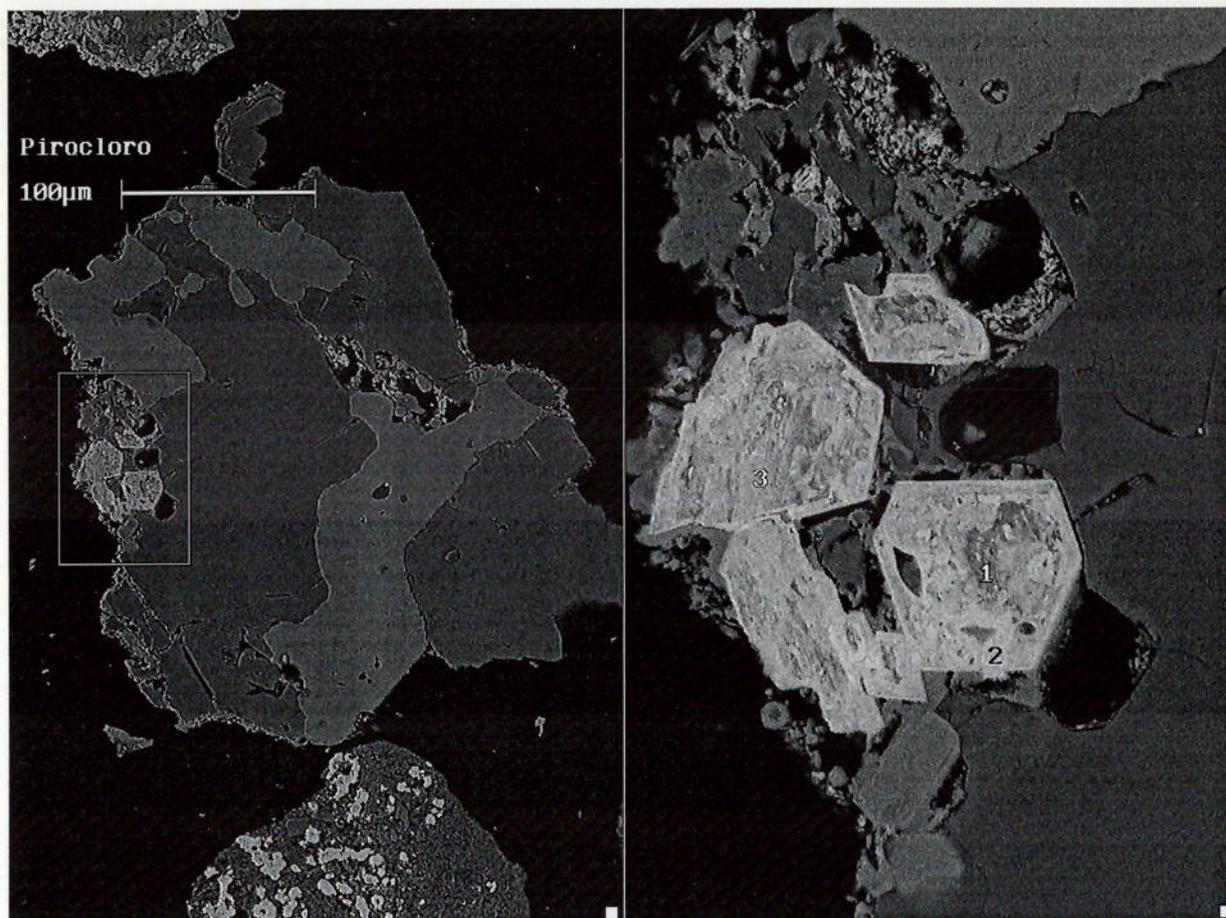
Descrição: Núcleo de Ba-pirocloro contendo Ti e Ta, circundado por fase hidratada; ambos em um agregado misto com fosfatos secundários (alumino-fosfato de bário).



FOTOMICROGRAFIA Nº 11B - AGREGADO ARGILO-LIMONÍTICO COM PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, imagem de elétrons retroespalhados.

Descrição: Grão de Ba-pirocloro contendo Ti e Ta, com forma octaédrica reliquiar em típico agregado argilo-limonítico.



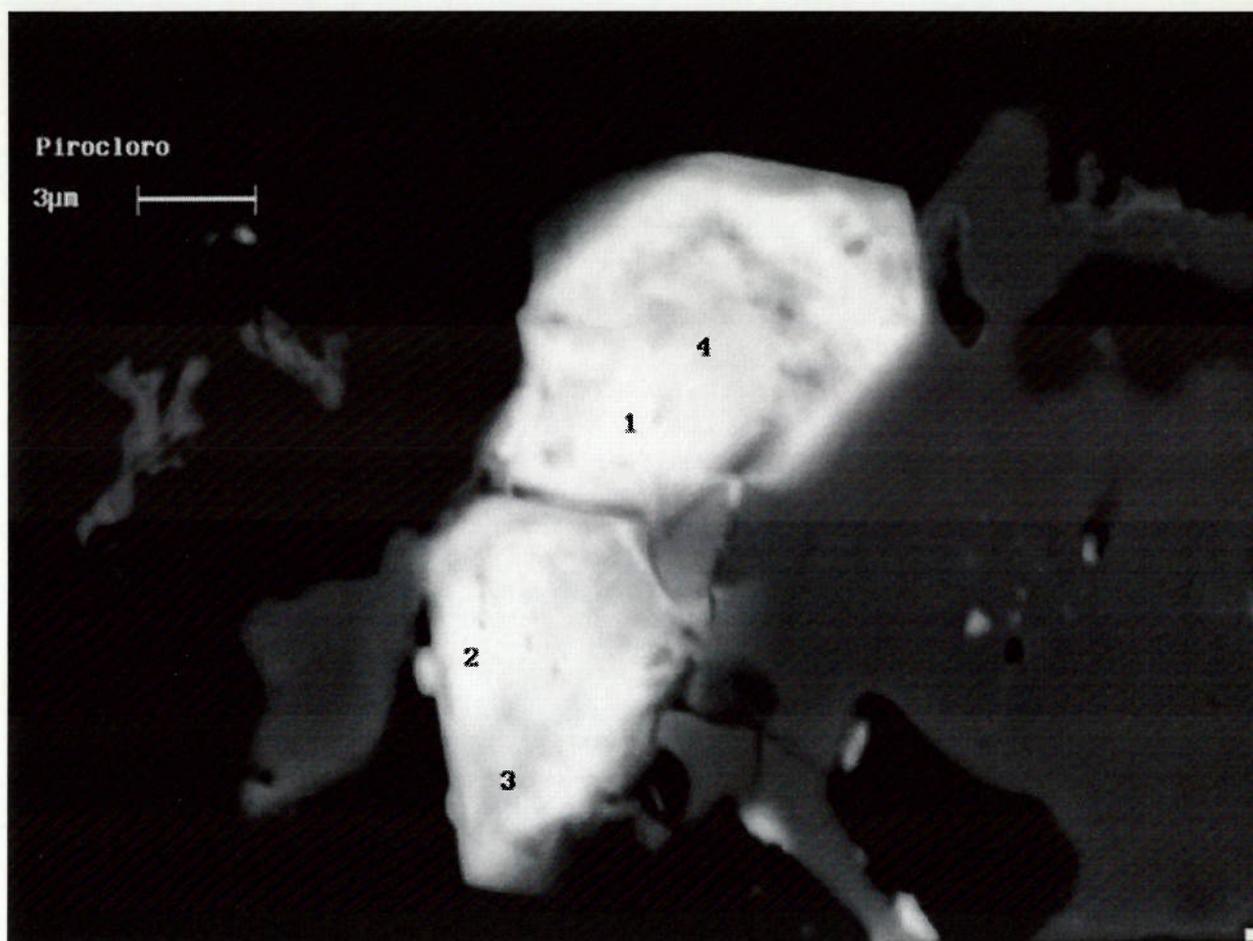
FOTOMICROGRAFIA Nº 12 - BA-PIROCLORO EM GRÃO MISTO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Agregados de Ba-pirocloro contendo Ti, Ta e Pb, com forma octaédrica reliquiar em grão misto de ilmenita com apatita. Notar variabilidade de composição refletida pela variação de tonalidades de cinza e pelos pontos analisados, e presença de partes mais escuras de inclusões de apatita e vazios.

FOTOMICROGRAFIA Nº 12 - Análises químicas semiquantitativas por EDS (teores em %)

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
BaO	13,09	13,13	13,44
CaO	0,80	1,08	0,77
SrO	1,91	1,59	1,51
Na ₂ O	0,18	-	0,13
Nb ₂ O ₅	64,26	60,36	65,72
Ta ₂ O ₅	2,69	2,24	2,78
TiO ₂	4,41	3,75	3,86
ZrO ₂	2,12	2,71	1,09
PbO	2,07	4,54	2,91
Al ₂ O ₃	0,40	-	-
SO ₂	-	1,19	-
ThO ₂	-	2,36	0,26



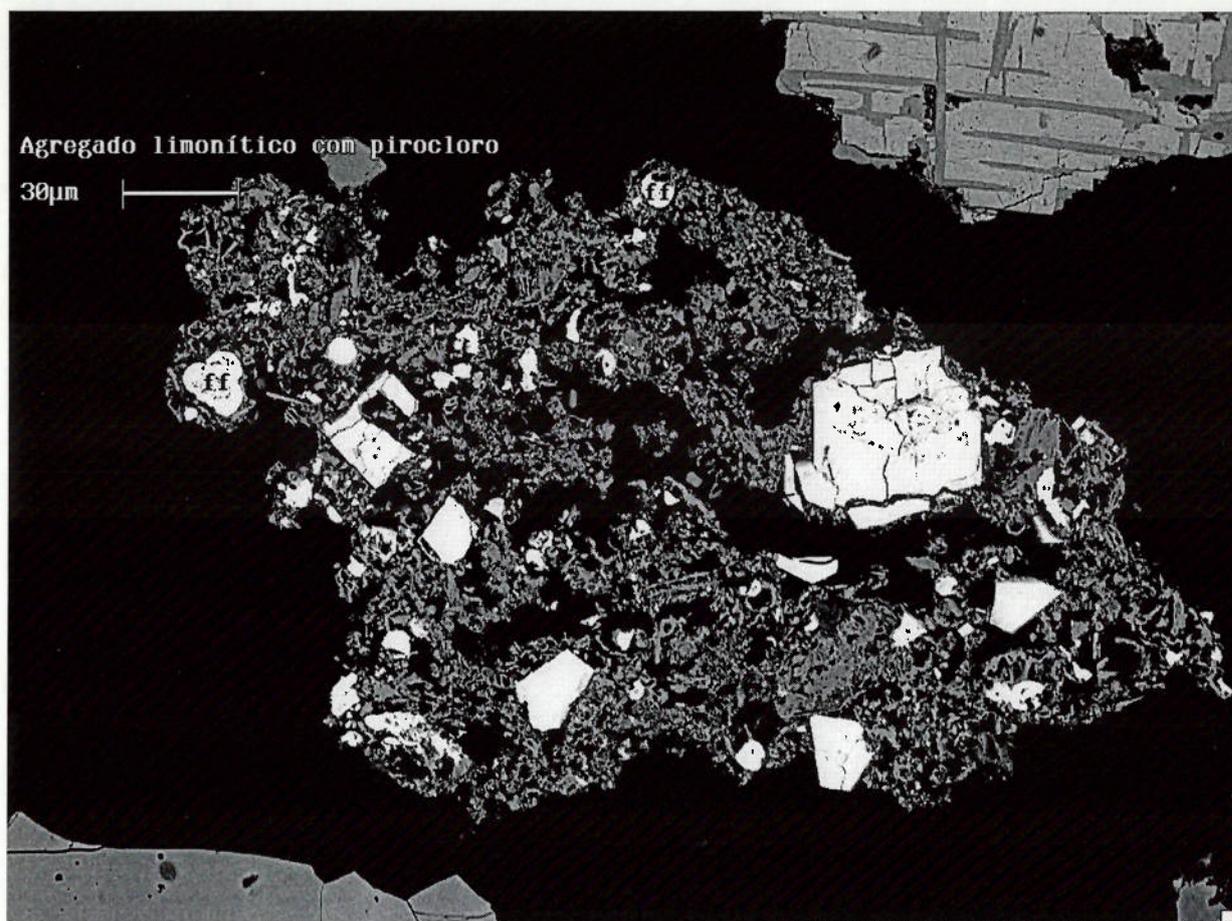
FOTOMICROGRAFIA N° 13 - BA-PIROCLORO EM GRÃO MISTO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Grão misto de micáceo com agregados Ba-pirocloro contendo Ti, Ta, Zr e Pb, com forma octaédrica reliquiar, mostrando variação de composição refletida pelas diferentes tonalidades de cinza, como evidenciado nos pontos analisados.

FOTOMICROGRAFIA N° 13-Análises químicas semiquantitativas por EDS (teores em %)

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
BaO	9,65	11,79	11,67	14,17
CaO	0,58	0,93	0,81	0,83
SrO	1,68	0,08	2,67	4,16
Na ₂ O	0,05	0,15	0,15	0,08
Nb ₂ O ₅	51,51	53,00	51,95	51,14
Ta ₂ O ₅	4,83	2,53	2,84	3,51
TiO ₂	9,50	10,66	9,14	6,04
ZrO ₂	5,27	3,99	2,34	7,18
PbO	2,78	2,63	4,18	2,17
Fe ₂ O ₃	4,40	5,73	3,65	4,06
Al ₂ O ₃	0,36	0,98	0,89	0,59
MnO	0,14	0,17	0,53	0,05
P ₂ O ₅	-	-	1,10	-
SO ₂	0,76	0,41	0,50	-
ThO ₂	4,27	4,19	3,74	4,58



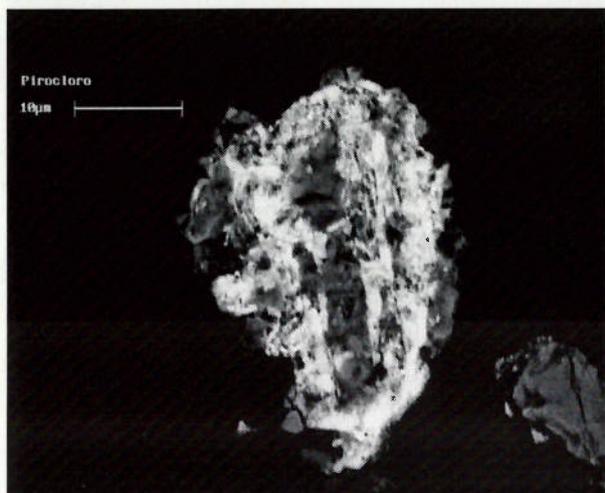
FOTOMICROGRAFIA Nº 14 - AGREGADO ARGILO-LIMONÍTICO COM PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

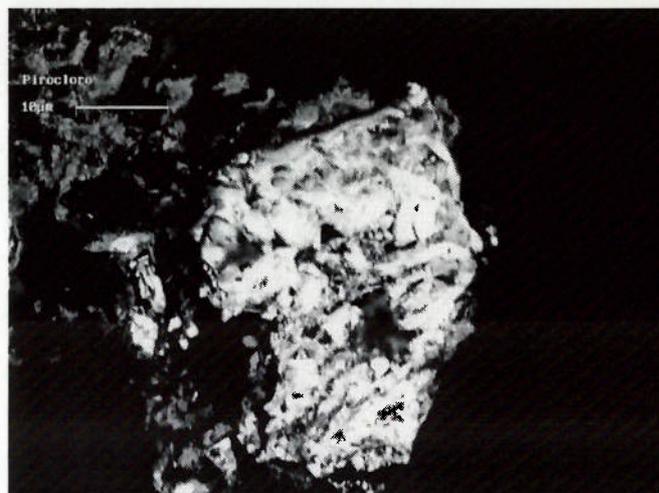
Descrição : Agregado argilo-limonítico, poroso, contendo grãos de fosfatos secundários (ff), de óxidos de ferro, e de Ba-pirocloro tendendo a formas reliquiárias regulares, e com extrema variação de composição, como evidenciado pelas análises de diversos grãos, abaixo expostas.

FOTOMICROGRAFIA Nº 14 - Análises químicas semiquantitativas por EDS (teores em %)

Óxido	AM13	AM14	AM15	AM16	AM19	AM18	AM17	AM20
BaO	12,05	10,75	10,96	11,33	10,66	10,33	10,46	11,41
CaO	0,11	0,06	0,11	0,15	0,05	0,04	-	0,02
SrO	1,31	1,49	1,47	1,07	-	0,83	-	2,44
Na ₂ O	0,32	0,18	0,05	0,05	0,15	-	0,16	0,13
Nb ₂ O ₅	64,74	60,09	59,41	62,10	59,91	60,72	61,10	63,25
Ta ₂ O ₅	-	0,46	0,08	-	0,62	0,36	0,61	0,33
TiO ₂	4,04	3,18	3,34	3,58	4,35	3,53	4,00	3,46
ZrO ₂	3,39	-	2,03	2,03	1,93	2,09	1,76	1,55
PbO	5,41	1,84	12,24	8,53	12,56	11,84	11,76	8,59
Fe ₂ O ₃	2,24	1,70	2,47	1,77	1,67	1,88	2,17	1,00
MnO	-	14,34	-	0,03	-	0,01	0,16	0,05
SO ₂	1,59	2,40	2,78	2,17	2,14	2,57	1,76	1,38



FOTOMICROGRAFIA N° 15A



FOTOMICROGRAFIA N° 15B

AGREGADOS DE FOSFATOS COM PIROCLORO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Agregados de fosfatos secundários (mais escuros) com Ba-pirocloro de composição variada, como evidenciado pelas microanálises abaixo expostas.

FOTOMICROGRAFIA N° 15 - Análises químicas semiquantitativas por EDS (teores em %)

Óxido	AM22	AM23	AM24
	Fotomicrografia 15A	Fotomicrografia 15B	Fotomicrografia 15B
BaO	11,41	10,93	11,91
CaO	0,49	0,40	1,47
SrO	0,17	2,60	-
Na ₂ O	0,50	0,28	0,09
Nb ₂ O ₅	55,94	58,97	56,97
Ta ₂ O ₅	1,00	1,98	3,37
TiO ₂	4,12	4,33	6,31
ZrO ₂	2,43	2,65	2,58
PbO	0,31	2,03	4,10
Fe ₂ O ₃	2,70	3,08	3,91
Al ₂ O ₃	1,64	0,65	2,63
MnO	0,10	0,15	0,34
P ₂ O ₅	-	-	1,14
SO ₂	-	0,87	1,33

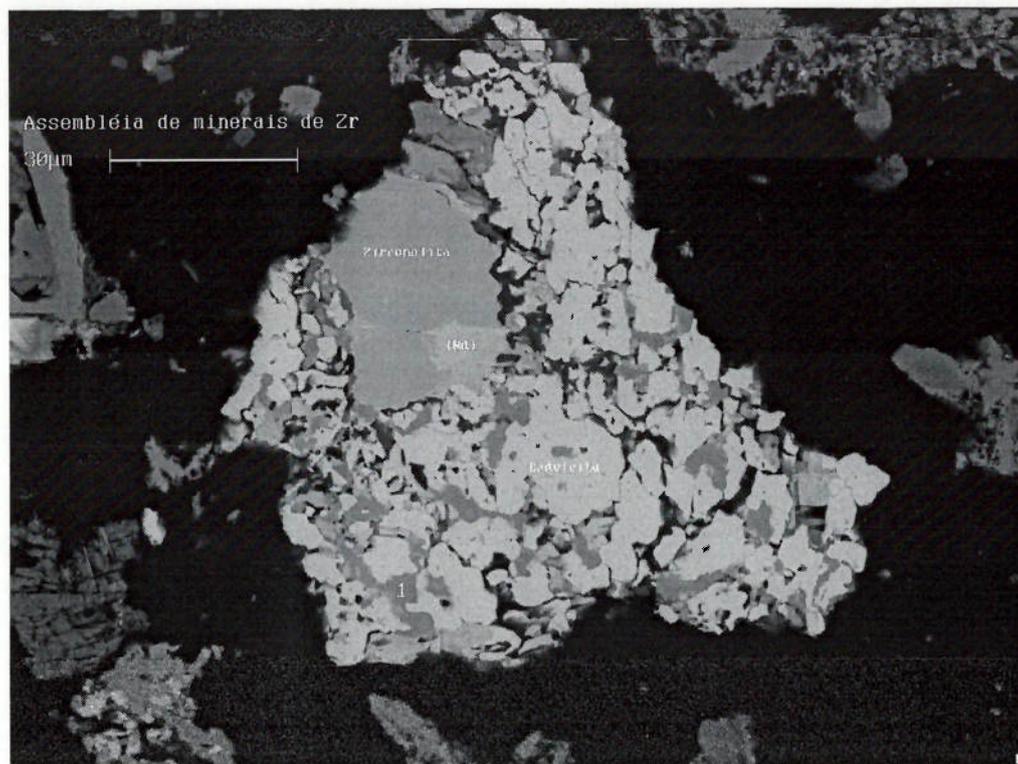
Outros

Como mineral de importância neste grupo, pela sua quantidade associada a alguns dos tipos de minério, destaca-se a barita (BaSO₄), em forma de cristais límpidos, transparentes a leve tom esverdeado, quando em granulometrias mais grossas.

Carbonatos foram identificados apenas na amostras de ROCHA DECOMPOSTA, sendo exclusivamente constituídos por dolomita (CaMgCO₃). Neste material detectou-se também a presença de algum sulfeto (pirita).

Minerais de zircônio constituem-se em acessórios amplamente distribuídos no minério, em quantidades de traços (fotomicrografia nº 16), e foram identificados como:

- zircão	$ZrSiO_4$
- badeleita	ZrO_2
- calzirtita	$Ca(Ti,Fe)Zr_3O_9$
- zirconolita	$(Ti,Fe)Zr_3O_9$



FOTOMICROGRAFIA Nº 16 - AGREGADO DE MINERAIS DE ZIRCÔNIO

Condições: microscópio eletrônico de varredura, detetores de elétrons retroespalhados, microanálise por EDS.

Descrição: Típica forma de ocorrência de minerais de zircônio; associação de fases: óxido (badleita), e titanatos (calzirtita / zirconolita). Deastaca-se que ocasionalmente ocorre algum nióbio associado à estrutura de zirconolita, como indicado nas microanálises abaixo.

FOTOMICROGRAFIA Nº 16 - Análises químicas semiquantitativas por EDS (teores em %)

Óxido	Nb-zirconolita	Zirconolita		
BaO	2,86	-	-	-
CaO	1,32	8,11	7,53	7,88
SrO	1,08	-	-	-
Na ₂ O	0,47	-	-	-
Nb ₂ O ₅	2,53	-	-	-
TiO ₂	28,44	24,58	24,82	25,42
ZrO ₂	31,37	36,20	35,03	33,02
Fe ₂ O ₃	11,27	8,86	9,54	9,58
P ₂ O ₅	0,08	-	-	-
ThO ₂	1,38	4,10	2,50	2,01
CeO ₂	-	5,29	6,74	6,26

7.5.4 - Definição dos Tipos Mineralógicos de Minério

Visando obter uma determinação das proporções minerais que possibilitasse a estimativa da composição modal do produto DESLAMADO para cada uma das amostras estudadas, foi realizada coleta sistemática de dados por microscopia óptica de polarização com apoio de análises químicas nos produtos de separações minerais, estando os resultados obtidos expostos na tabela 7.5.10.

A ROCHA DECOMPOSTA tem como constituintes essenciais magnetita, apatita e uma mica de natureza flogopítica, contendo cerca de 10 % em peso de dolomita, ao lado de alguma presença de óxidos de ferro não magnéticos. O pirocloro presente nesta litologia é cristalino, de coloração castanha a amarela, tendo sido identificado como o Ca-pirocloro.

TABELA 7.5.10
Composição Mineralógica das Amostras Estudadas - Produto Deslamado

MINERAIS	AMOSTRAS											
	CA	BA-1	BA-2	CG	MB-3	MG-1	MG-2	MMB-1	MMB-2	MMG-1	MMG-2	CM
Magnetita				11	3	4	18	48	24	36	26	45
Hematita				13	7	14	25	8	6	10	14	10
Goethita	8	9	7	23	11	15	18	4	5	6	19	5
Ilmenita	6	8	11	9	12	4	4	2	4	6	4	3
Anatásio	12	15	17	9	1	1	1	pp	1	1	pp	1
Titanita					pp	pp						pp
Apatita	2	5	7	1	16	18	10	14	21	19	9	16
Fosfato Secundário	16	12	10	2	6	5	3	1	1	2	4	
Barita				8	18	7	4	10	15	4	4	3
Pirocloro	2,8	1,9	0,8	3,6	1,6	2,7	1,9	3,1	1,0	2,3	1,8	3
Quartzo	42	39	30	19	24	29	15	5	15	11	18	3
Argilo-minerais /micáceos	12	10	17	pp	3	pp	pp	3	6	pp	pp	5
Zircão / Badleleita				pp		pp	pp	pp	pp	pp	pp	pp
Carbonatos												6
Outros												pp

tr = traços (proporções na amostra < 5% em peso) pp = presentes (proporções na amostra < 1% em peso)

As litologias com magnetita, com quantidade de magnéticos superior a 20% em peso, têm porcentagem de óxidos de ferro não magnéticos similar ao mostrado pela ROCHA DECOMPOSTA, contém importantes quantidades de apatita e quartzo, com pequena presença de micas flogopíticas, e não apresentam carbonatos. Barita e óxidos de ferro não magnéticos se equilibram mutuamente em proporções relativas nos tipos com / sem barita, tendo sido considerados teores delimitantes entre eles 10 % em peso de barita.

Foram reconhecidas as duas variedades de pirocloro, o pirocloro com as mesmas características do observado para a ROCHA DECOMPOSTA, e outra o Ba-pirocloro, sob forma de agregados microscristalinos; o pirocloro pode ocorrer em quantidades similares ao Ba-pirocloro, em função da profundidade da amostra.

Os tipos litológicos ferrosos, sem magnetita, mostram importantes quantidades de óxidos de ferro (hematita, goethita, limonita), quartzo e apatita. A variedade de pirocloro largamente predominante é o Ba-pirocloro.

Nos materiais mais superficiais ocorre composição mineral semelhante à identificada nos ferrosos, com a apatita substituída por fosfatos secundários. Destaca-se nestas litologias abundante presença de minerais de titânio, a ilmenita e o anatásio, sendo que este último só ocorre em proporções significativas nas amostras de MATERIAL ARGILOSO.

Do ponto de vista mineralógico, pode-se. então separar os tipos de minério em três grandes grupos, conforme ilustrado na tabela 7.5.11:

- o primeiro constituído pelos materiais com predominância de fosfatos não apatíticos, associados aos níveis mais superficiais do solo - tipo A;
- o segundo reunindo os tipos de materiais cujo fosfato principal é apatítico, contendo subgrupos de materiais com magnetita e com barita - tipo B;
- o terceiro grupo agrega os tipos de minério com presença de carbonatos, além do fosfato apatítico - tipo C.

O primeiro grupo tem importante quantidade de minerais de titânio associada, sendo o mineral de nióbio exclusivamente o Ba-pirocloro. Incluem-se aqui o tipo MATERIAL ARGILOSO, com elevada proporção de quartzo, e o tipo CANGA, com elevada proporção de óxidos de ferro, caracterizando dois sub-tipos com extrema diferença quanto aos óxidos de ferro associados.

TABELA 7.5.11
Resumo da Tipologia Mineralógica do Minério

Tipo Litológico	Mineralogia Típica						Tipo Mineralógico
	carbonato	fosfato predominante	minerais de titânio	óxidos de ferro	magnetita	barita	
Material Argiloso	<10%	não apatítico	> 10 %	< 10 %	< 20 %	< 10 %	A1
Canga				> 10 %			A2
Minério Ferroso		apatítico	< 10 %				B1
Min. Ferroso com Barita						> 10 %	
Min. com Magnetita / Barita				< 10 %	>20 %		B2
Minério com Magnetita						< 10 %	
Rocha Decomposta	> 10 %						C

O segundo grupo caracteriza-se pela presença pouco significativa de minerais de titânio, e, na área estudada, associa-se invariavelmente à quantidades importantes de óxidos de ferro. O pirocloro é o mineral essencial de nióbio, havendo predominância de Ba-pirocloro, com a variedade cálcica sempre subordinada, em proporções de traços a quantidades significativas. Estão neste grupo os tipos de MINÉRIO FERROSO e MINÉRIO COM MAGNETITA, definindo dois sub-tipos mineralógicos, sendo que os com barita representam variedades em que a presença de barita faz reduzir a proporção relativa de óxidos de ferro.

Finalmente, o terceiro grupo é o da ROCHA DECOMPOSTA, que foi representado apenas por uma amostra no presente estudo. Apresenta carbonatos, micas e sulfetos, é um material pouco alterado, onde a espécie de pirocloro é exclusivamente a variedade cálcica.

Os tipos mineralógicos de minério mostraram-se relacionados àqueles definidos na avaliação macroscópica preliminar, ou os sete tipos litológicos previamente definidos, pois a descrição litológica interpretativa teve também como critério aspectos da mineralogia identificável com os recursos de observação utilizados, inclusive microscópio estereoscópico.

Destacam-se aqui as duas variedades de pirocloro associadas aos tipos mineralógicos, significando minerais com características distintas de composição e de cristalinidade, as quais redundam em propriedades físicas e químicas de superfície de grãos peculiares. Este aspecto traz comportamento tecnológico diferenciado no processo de concentração por flotação.

7.6 - ENSAIOS DE CONCENTRAÇÃO

Os ensaios de concentração realizados tiveram por finalidade a obtenção de subsídios para a caracterização do minério, bem como verificar as possibilidades e condições para concentrar os diversos tipos litológicos de minério identificados na jazida. Esta prática, de complementar os estudos de caracterização pela realização de ensaios de flotação padronizados é corrente para controle da exploração da jazida, nas minas que operam minério de nióbio associado às alcalinas.

A relevância para o presente trabalho é a integração destes resultados com a caracterização realizada, e suas consequências na avaliação da qualidade do minério e da jazida como um todo. Toda a análise dos dados da caracterização e seleção de amostra para os teste de flotação foi feita de forma interativa, fato que também ocorreu com a interpretação dos resultados face à tipologia previamente definida e a definição dos tipos tecnológicos de minério. A definição de rotas e procedimentos, bem como os testes propriamente ditos, foi feita interativamente com a equipe de processos e são aqui apresentados em caráter ilustrativo, tendo sido compilados dos dados do projeto ^{125,126,127}.

Foram realizados, então, ensaios de concentração em bancada para estabelecer expectativas tecnológicas, isto é, teores e recuperações esperáveis para cada tipo de minério. O roteiro experimental foi estabelecido de acordo com rotas de processamento correntemente aplicadas no beneficiamento de minérios de pirocloro, tendo-se adotado um procedimento padrão, dentro do mais avançado estágio possível de conhecimento do problema em questão.

Assim, pode ser aquilatada a possibilidade de concentrar o pirocloro destes tipos de minério, as recuperações potenciais e os problemas existentes, sem a realização de estudos pormenorizados e/ou sistemáticos para a otimização das condições aplicadas.

7.6.1 - Critério de Seleção de Amostras

Para realização dos ensaios de flotação, procedeu-se à seleção de algumas das amostras estudadas representativas dos cinco tipos mineralógicos de minério definidos no capítulo 7.5, a partir da avaliação de suas características.

Como critério básico, optou-se por não compor amostras, prática que poderia gerar tipos híbridos descaracterizando o comportamento nos ensaios.

A maior parte das amostras em estudos foi considerada adequada, por serem bem típicas das variedades de minério observadas na jazida, algumas, porém, mostraram-se inadequadas para realização dos ensaios de flotação, por não estarem enquadradas nos critérios supra referidos ou motivos diversos, como discutido na seqüência.

Dentre as amostras do tipo mineralógico A1, face à melhor representatividade da amostragem efetuada e maior quantidade de amostra disponível para estudos, selecionou-se para os ensaios de flotação a amostra BA-2, que foi coletada em um poço de pesquisa.

Das duas amostras do tipo B2, notou-se que a MMB-1 apresenta conteúdo relativamente baixo teor de barita, provavelmente significando um tipo híbrido entre as variedades com e sem barita. Assim, dentro dos critérios de seleção de amostras adotados, deu-se continuidade de ensaios apenas com a amostra MMB-2.

Assim, do número inicial de 14 amostras, foram realizados ensaios de flotação em apenas nove, representando os três tipos mineralógicos de minério, com respectivos sub-tipos, e variedades com e sem barita, conforme indicado na tabela 7.6.1.

TABELA 7.6.1
Características da Alimentação da Flotação para os Diversas Amostras

AMOSTRA	Tipo Mineralógico	Teor no Minério % Nb ₂ O ₅	peso (%) na amostra	teores (%)			partição (%)		
				Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
BA-2	A1	0,56	61	0,65	11,60	3,49	63	71	50
CG	A2	2,74	53	2,30	42,20	5,50	53	48	56
MB-3	B1 com barita	0,86	70	0,91	20,70	12,20	73	56	73
MG-1	B1	1,93	70	1,82	31,10	6,80	68	61	68
MG-2	B1	1,53	61	1,50	42,10	3,60	62	55	57
MMB-2	B2 com barita	0,80	54	0,77	14,90	15,00	57	25	63
MMG-1	B2	1,83	49	2,34	24,10	4,00	60	23	60
MMG-2	B2	1,41	56	1,70	37,40	6,20	59	42	60
CM	C	1,74	42	2,60	17,90	5,50	68	15	60

A preparação das amostras para os ensaios de flotação foi a mesma adotada na caracterização, sendo, então, a alimentação da flotação o produto deslamado e desmagnetizado, cujas características de teores e recuperações estão sumarizadas na tabela 7.6.1, e de mineralogia na tabela 7.6.2.

Os teores que alimentaram os ensaios variaram de 0,7 a 2,6 % Nb_2O_5 , sendo os maiores valores relativos ao tipo mineralógico A2, a uma das amostras do tipo B2 e à amostra do tipo C. Destaca-se o elevado conteúdo de ferro em todas as amostras.

Como característica do minério notada para todos os tipos em estudo, a alimentação da flotação apresenta quantidades acima de 20% em peso de quartzo, exceção feita ao tipo C onde diminui o conteúdo de quartzo e aparece o carbonato.

Fosfatos, sejam na forma de fosfatos não apatíticos ou na forma de apatita, estão presentes como importantes componentes do minério, e, finalmente, óxidos de ferro na forma de hematita / goethita são também maiores constituintes da alimentação da flotação, menos no tipo mineralógico A1.

TABELA 7.6.2
Composição Mineralógica das Amostras de Alimentação da Flotação

AMOSTRA	BA	CG	MB-3	MG-1	MG-2	MMB-2	MMG-1	MMG-2	CM
Tipo Mineralógico	A1	A2	B1 com barita	B1	B1	B2 com barita	B2	B2	C
MINERAIS	% em		Peso		Estimada				
Hematita		15	7	15	27	30	8	12	5
Goethita	7	26	11	16	22	7	7	26	9
Ilmenita	11	10	12	4	5	6	9	5	6
Anatásio	17	10	1	1	1	1	1	pp	1
Titanita			pp	pp					pp
Apatita	7	1	16	19	13	28	30	13	30
Fosfato Secundário	10	2	6	5	4	2	4	6	5
Barita		13	17	7,5	5	20	9	7	5
Pandaíta / Pirocloro	0,8	9,3	1,7	2,7	2,4	1,2	3,4	2,3	2,8
Quartzo	30	22	25	30	20	24	24	28	8
Micáceos	17		3	pp	pp	5	pp	pp	21
Zircão / Badleleita		pp		pp	pp	pp			pp
Carbonatos									8
Outros									pp

pp = provável presença (proporções na amostra < 1 % em peso)

7.6.2 - Resultados Obtidos no Roteiro Padronizado de Concentração

Para cada amostra foi realizado um roteiro padronizado de flotação, constituído por uma seqüência de operações em escala de bancada, segundo um roteiro que constou da retirada prévia da barita e flotação da pandaíta, conforme detalhado no item 7.3.4. A retirada prévia da barita foi adotada para evitar eventuais mascaramentos de resultados devido à baixa seletividade da pandaíta em relação à barita na flotação direta.

A partir dos resultados obtidos no testes, expostos em tabelas completas para cada amostra contidas no anexo, e sumarizados na tabela 7.6.3, verificou-se que apenas alguns tipos mineralógicos mostraram-se passíveis de concentração pelos processos conhecidos.

Foi possível obter concentrados de pandaíta, a partir dos materiais que ocorrem nos níveis intermediários do perfil do solo. Nem o tipo A1, nem tampouco o C, foram suscetíveis de concentração pelo processo de flotação aplicado, os demais tipos mineralógicos de minério mostraram comportamento bem distinto.

TABELA 7.6.3
Sumário dos Resultados dos Ensaios de Flotação

AMOSTRA	Tipo Mineralógico de Minério	% Recuperação de Nb ₂ O ₅ na Flotação	Teores (%)			
			Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	TiO ₂
BA	A1	60 a 70	15,4	6,86	6,06	13,60
CG	A2	30 a 40	52,7	5,11	13,70	2,57
MB-3	B1 com barita	80 a 90	31,2	9,43	9,88	13,30
MG-1 / MG-2	B1	40 a 50	47,2	9,72	10,60	5,31
MMB-2	B2 com barita	80 a 90	51,4	3,71	11,20	2,83
MMG-1 / MMG-2	B2	80 a 90	49,2	4,83	10,80	2,86
CM	C	sem recuperação	não concentra			

O tipo A1 não gerou concentrado de nióbio com teores interessantes, apesar de ter mostrado boa recuperação. Os principais diluentes são minerais de titânio (ilmenita e anatásio), que são coletados junto com o Ba-pirocloro, vide tabela 7.6.4.

A partir do tipo C não houve produção de concentrado, o mineral de nióbio deste tipo mineralógico é essencialmente o pirocloro cálcico com características diferentes do Ba-pirocloro, variedade mineralógica que não respondeu ao processo de flotação para a pandaíta.

Os tipos de minério A2 e B1 geraram concentrados com teores acima de 50% Nb₂O₅, com recuperações da ordem de 40 a 50% do nióbio de alimentação da flotação, portanto, com comportamento bastante similar. Os contaminantes do concentrado final de pirocloro são principalmente óxidos de ferro e fosfatos não apatíticos, com pequena proporção de anatásio.

Já o minério B1 variedade com barita, embora tenha apresentado bons níveis de recuperação na flotação (80 a 90%), não logrou atingir concentrados com níveis interessantes de nióbio, também pela presença elevada de minerais de titânio (ilmenita) e fosfatos secundários associados.

Os tipos de minério B2, nas duas variedades com e sem barita, mostraram comportamento semelhante, gerando concentrados com cerca de 50% de Nb₂O₅ e recuperações da ordem de 80 a 90% do nióbio contido na alimentação da flotação. Os minerais que se associam ao Ba-pirocloro no concentrado são óxidos de ferro e quartzo, com menor quantidade de ilmenita.

TABELA 7.6.4

Composição Mineralógica Estimativa dos Concentrados de Flotação

AMOSTRA	BA	CG	MB-3	MG-1	MG-2	MMB-2	MMG-1	MMG-2	CM
Tipo Mineralógico	A1	A2	B1 com barita	B1	B1	B2 com barita	B2	B2	C
MINERAIS	% em Peso Estimativa dos Minerais								
Óxidos Ferro	17	tr	14	15	21	tr	7	27	62
Ilmenita	15	5	12	tr	tr	6	9	tr	6
Anatásio	10	pp	pp	tr	pp	pp	pp	pp	pp
Fosfato Não Apatítico	9	10	12	5	6	tr	tr	9	--
Pandaíta	24	82	49	74	57	80	77	48	tr
Pirocloro	--	--	--	--	pp	pp	pp	pp	pp
Quartzo	25	pp	12	tr	10	9	10	10	16
Carbonatos	--	--	--	--	--	--	--	--	20

tr = traços (proporções na amostra < 5% em peso)

pp = presentes (proporções na amostra < 1% em peso)

Verifica-se, portanto, que existe uma influência direta entre o comportamento do minério na flotação e as espécies minerais portadoras de titânio associadas ao minério. Minerais como o anatásio e, principalmente, a ilmenita tendem a serem coletados junto com o Ba-pirocloro diluindo os concentrados, sendo que inclusive chegam a competir com o pirocloro, inibindo a concentração deste, quando em proporções mais significativas na alimentação da flotação.

A presença de ilmenita no circuito de flotação pode ser controlada no processo pela inclusão de uma etapa de separação magnética à média intensidade prévia a este, sendo que a presença de anatásio tem que ser equacionada na própria flotação. O número de amostras estudadas não foi, entretanto, suficiente para possibilitar o estabelecimento de limites de proporções destes minerais no minério e/ou na alimentação da flotação, críticos para interferirem na flotação.

É de fundamental importância, para a concentração do minério pelos processos correntes, que a espécie mineral útil seja o Ba-pirocloro, desde que as outras espécies de pirocloro identificadas no minério não responderam positivamente ao processo.

A proporção do mineral barita no minério, utilizada como parâmetro na definição de variedades dos tipos mineralógicos de minério, mostrou-se como fator de relevância na diferenciação de comportamento tecnológico apenas no minério ferroso, não por este mineral em si, mas sim pela presença de minerais de titânio associados. Já nos tipos B2, minérios com magnetita, não mostrou-se importante como critério de definição de tipos tecnológicos de minério.

7.7 - DEFINIÇÃO DOS TIPOS TECNOLÓGICOS DE MINÉRIO

Os estudos efetuados mostraram que dois dos tipos mineralógicos reconhecidos na jazida não são passíveis de concentração pelos processos conhecidos, não podendo, à luz da tecnologia atual, serem considerados como minério, independentemente dos elevados teores de nióbio. São eles o tipo A1 que é um material argiloso superficial, de ocorrência na área de influência da Lagoa Seca, e o tipo C que corresponde à rocha decomposta.

O tipo A1 contém marcante presença de anatásio e ilmenita, minerais que, na flotação, acompanham o Ba-pirocloro, diluindo e comprometendo a qualidade do produto final.

O tipo C não contém Ba-pirocloro, variedade mineral para a qual os processos de flotação correntes foram desenvolvidos; a espécie de pirocloro cálcico, que contém a quase totalidade do nióbio deste tipo de material, não responde ao processo de concentração testado.

Dessa forma, verifica-se que existe um corpo mineralizado composto por vários tipos de mineralógicos de minério, dos quais apenas alguns, pela aplicação da tecnologia corrente de concentração de pandaítas, podem gerar concentrados de Ba-pirocloro a níveis de teores consideráveis na matéria prima para a metalurgia e/ou planta química, e estão indicados na tabela 7.7.1.

TABELA 7.7.1

Tipos Mineralógicos de Minério Passíveis de Concentração nos Ensaios Realizados

Tipo / Sub-tipo	Variedade
A2	
B1	com Barita sem barita
B2	com barita sem barita

Os resultados obtidos na flotação em escala de bancada indicam comportamento bastante peculiar para cada um destes tipos / sub-tipos / variedades de minério, tendo-se, entretanto, verificado correlações entre os resultados apresentados por alguns deles, as quais possibilitaram a redefinição da tipologia com o estabelecimento de três tipos tecnológicos básicos de minério, como indicado na tabela 7.7.2.

TABELA 7.7.2
Sumário dos Parâmetros de Processo dos Tipos Tecnológicos de Minério

Tipo Tecnológico	Tipo Mineralógico	% Recuperação de Nb ₂ O ₅			% Nb ₂ O ₅ no Concentrado
		alimentação da flotação	na flotação	global	
I	A2 + B1	55 a 65	40 a 50	25 a 35	50
II	B1 com barita	70	80 a 90	55 a 65	30
III	B2	55 a 60	80 a 90	45 a 55	50

O tipo I mostra recuperação baixa na flotação, com conseqüente recuperação global pequena, o que pode comprometer o seu aproveitamento econômico.

O II é o que apresenta os melhores índices de recuperação, tanto nos processos de preparação (deslamagem e desmagnetização), como na flotação, este último porém vinculado a um baixo teor do concentrado.

Os dois materiais referidos devem ser objeto de maiores investigações no sentido de otimizar ou adequar o processo de flotação, pois os parâmetros apresentados não foram satisfatórios.

Apenas o minério dos tipos com magnetita (III) mostram resultados interessantes e compatíveis com os dados de operação industrial da Mineração Catalão, que explora a continuidade do corpo de minério em estudo.

Como alternativa de beneficiamento para eliminação da ilmenita associada ao minério, poderia ser incluída, na preparação do material prévia à flotação, uma etapa de separação magnética a média intensidade. Entretanto, nota-se que ocorre elevada perda de nióbio junto aos magnéticos à média intensidade, como indicado nas separações minerais efetuadas em aparelho Frantz (ver item 7.5.2) e sumarizados na tabela 7.7.3.

Para todos os tipos de minério nota-se enriquecimento em nióbio após a retirada dos magnéticos a média intensidade, bem como importante redução dos teores de ferro, principalmente nos tipos III que têm importante quantidade de magnetita.

As perdas de nióbio nos magnéticos atingem valores de 10 a 20 % do total contido no minério, reduzindo a níveis indesejáveis o nióbio disponível para o processo de flotação, fato que torna desaconselhável a aplicação desta separação prévia à flotação, com o minério moído na granulometria adotada para os ensaios (-0,208 mm).

Esta linha de processo, entretanto, não foi investigada em maior profundidade, podendo, eventualmente, se constituir em alternativa interessante, se tal perda de nióbio for compensada pela recuperação alcançada na etapa posterior de flotação.

TABELA 7.7.3
Comparação de Dados da Alimentação da Flotação e de Produto das Separações Magnéticas a Média Intensidade (FRANTZ 0,5A)

AMOSTRA (tipo)	PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			% partição na amostra		
			Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
CG (A2 / I)	Alimentação da Flotação	52,62	2,61	36,73	6,86	53,22	48,17	56,14
	Não Magnético Média Intensidade	36,29	3,34	27,70	8,91	46,91	25,05	50,30
MG-1 (B1 / I)	Alimentação da Flotação	70,10	1,94	31,19	6,44	68,59	60,59	67,72
	Não Magnético Média Intensidade	44,19	2,41	10,20	9,18	53,59	12,49	60,85
MG-2 (B1 / I)	Alimentação da Flotação	60,54	1,52	48,74	3,57	61,93	54,76	57,29
	Não Magnético Média Intensidade	26,16	2,03	18,70	6,61	35,76	9,08	45,88
MB-3 (B1 / II)	Alimentação da Flotação	69,50	1,13	22,63	12,63	73,40	56,38	73,40
	Não Magnético Média Intensidade	52,29	1,32	10,60	16,10	64,69	19,87	70,40
MMB-1 (B2 / III)	Alimentação da Flotação	38,46	3,72	14,54	13,44	60,20	12,41	56,53
	Não Magnético Média Intensidade	28,37	4,16	4,20	16,40	49,67	2,64	50,90
MMB-2 (B2 / III)	Alimentação da Flotação	54,47	0,78	14,44	13,04	57,02	24,93	62,48
	Não Magnético Média Intensidade	44,05	0,80	5,11	15,50	47,36	7,13	60,04
MMG-1 (B2 / III)	Alimentação da Flotação	49,19	2,23	20,21	5,70	59,81	22,90	59,61
	Não Magnético Média Intensidade	33,18	2,45	6,27	7,39	44,35	4,79	52,09
MMG-2 (B2 / III)	Alimentação da Flotação	56,33	1,49	37,95	4,66	59,22	42,18	59,80
	Não Magnético Média Intensidade	28,28	1,76	13,20	7,06	35,21	7,37	45,49

7.8 - DEFINIÇÃO DAS RESERVAS TECNOLÓGICAS

Conforme já reportado no capítulo 7.4, relativo à amostragem para os estudos de caracterização, a área de interesse está compreendida entre as coordenadas geográficas 204.000 a 204.500 E e 7.992.300 a 7.992.900 N, onde ocorre maior incidência de teores acima de 0,4% de Nb₂O₅.

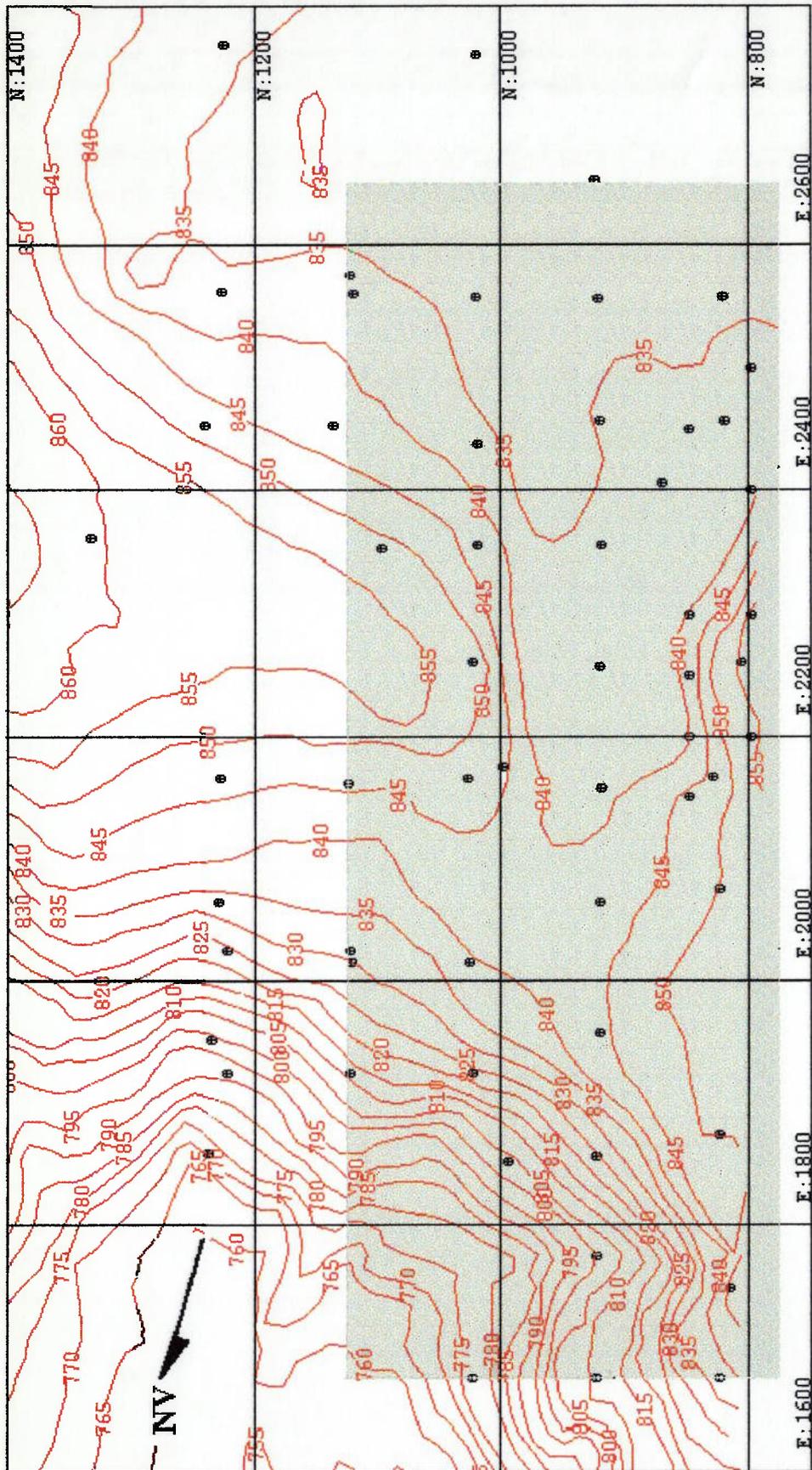
A região foi pesquisada essencialmente por meio de sondagens rotativas, segundo malha quadrática com espaçamento de 100 m, localmente de 50 m. No conjunto são disponíveis dados de 115 furos, dos quais 69 se referem à porção de maior concentração de nióbio. Os trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos segundo coordenadas locais, em malha orientada com azimute aproximado de 75° 30', portanto com eixo NS praticamente inclinado de 90° em relação ao Norte Verdadeiro^{128,129}.

Os furos, em sua maioria foram conduzidos até 50 m de profundidade, sendo que alguns mais profundos alcançaram o nível de rocha fresca, mas não penetraram mais que 1m na rocha¹²⁸.

Apenas uma parcela dos testemunhos, amostrados em intervalos de 2 m e submetidos a análises químicas mais ou menos completas, foram analisados para Nb₂O₅, conforme indicado no mapa da figura 7.8.1.

As reservas geológicas foram definidas com aplicação do teor de corte do projeto (0,4% Nb₂O₅), sendo disponíveis os valores das reservas segundo critérios adotados na fase de pesquisa geológica considerando toda a área com mineralização de nióbio. No presente trabalho foi considerada uma área restrita, indicada no mapa da figura 7.8.1, e para o cálculo das reservas utilizou-se modelamento por métodos computacionais.

Para definição das reservas tecnológicas fez-se a interação do modelo de teores com o modelo de tipos tecnológicos de minério, delineando-se o minério tecnologicamente aproveitável, no que tange aos aspectos relativos ao seu beneficiamento. Tais reservas constituem, então, o corpo de minério a ser considerado para planejamento de lavra.



- LEGENDA**
- 850- curva de nível
 - N: 800 coordenadas locais do projeto
 - furo de sondagem com teores de Nb₂O₅
 - área de cubagem

FIGURA 7.8.1
MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FURROS DE SONDAGEM COM TEORES DE NÍOBIO

7.8.1 - Delineamento do Corpo de Minério

Na seqüência da tese para maior fluência de explanação, adota-se o termo de **minério potencial** para todo o material do corpo mineralizado com nióbio acima do teor de corte. O delineamento do corpo de minério potencial foi baseado essencialmente no conteúdo de nióbio.

7.8.1.1 - Avaliação de Reservas na Fase de Pesquisa Geológica

São aqui descritos de forma sumária, apenas para fins de balizamento do presente trabalho, os cálculos segundo métodos clássicos realizados na fase de pesquisa geológica pela METAGO^{91,93}.

O cálculo das reservas foi feito pelo método dos polígonos, utilizando-se blocos de lavra segundo níveis horizontais de 10 m de espessura, tomando-se o plano de base projetado para cima. Foram usados os dados dos furos de sonda, sendo aplicados teores compostos de 10 m da fatia de minério, a área de influência na horizontal foi a metade da distância entre furos adjacentes, distância que variou de 25 a 100 m em função da malha de amostragem. O corpo de minério foi, então, discretizado em prismas de furo centrado com 10m de altura. Para furos isolados, nos limites da área mineralizada ou em regiões onde não houve amostragem sistemática, foi usada área de influência quadrática de 200 m.

A densidade do minério potencial foi obtida pelo método de medida de densidade aparente de solo com cilindro bisetado, aplicado nos vários tipos litológicos identificados nos trabalhos de campo, tendo-se adotado o valor de 2,3 g/cm³, média de 15 determinações, para a quantificação das reservas.

A reserva calculada foi classificada em *medida*, para blocos contendo furo de sonda, *indicada* para blocos com pelo menos duas faces comuns com blocos medidos vizinhos, e, *inferida* para aqueles com apenas uma face. Na vertical a reserva de minério potencial compreendida entre a base dos furos topograficamente mais alta e mais baixa foi considerada como inferida, sempre segundo os blocos ou prismas supra referidos. Os valores obtidos encontram-se sumarizados na tabela 7.8.1.

Tabela 7.8.1
Reservas Geológicas de Minério de Nióbio da Goiásfértil (extraído de ⁹¹)

Teor de Nb ₂ O ₅	Reservas de Minério em Toneladas			
	MEDIDA	INDICADA	INFERIDA	TOTAL
acima de 0,3 %	64.878.550	63.113.246	16.667.270	144.659.066
acima de 0,5 %	3.843.202	6.027.426	2.512.921	12.383.549
acima de 0,7 %	2.344.093	2.666.192	1.385.956	6.396.241
acima de 1,0 %	1.554.885	1.204.502	989.908	3.749.295

7.8.1.2 - Cálculo de Reservas através de Método de Computação

Foi feita uma avaliação inicial da consistência dos dados disponíveis do ponto de vista estatístico, pela observação da distribuição de freqüências dos teores de nióbio para o universo de todas as amostras dos furos de sondagem contidos na área de interesse.

Os teores de Nb₂O₅ mostraram distribuição de freqüências log-normal bimodal, com uma população principal representando 93 % do universo, com média de 0,36% e desvio padrão 0,27%, e outra população com grande variação de valores, compreendendo basicamente teores acima de 1%, com média de 2,22% e desvio padrão 2,37% (figura 7.8.2).

Quando o universo de amostras foi restringido àquelas com teores iguais ou maiores que 0,4% Nb₂O₅, observou-se partição igual de amostras entre duas populações algo distintas das anteriormente detectadas, respectivamente com teores acima e abaixo de 1,0%. A primeira população apresentou média de 0,49% com desvio padrão de 0,1%, e a segunda, melhor definida e com maior importância, mostrou média de 1,45% e desvio de 0,6 %.

Foi esboçada, então, uma avaliação geoestatística utilizando-se teores de Nb₂O₅ transformados para logaritmos, considerado amostras originais, sem composições de intervalos de amostragem. Diversos semivariogramas experimentais foram elaborados para análise do comportamento dos teores na horizontal, tanto por modelos isotrópicos, com todas as direções no espaço, como "análises estruturais" em várias direções e espaçamentos.

Todos os testes realizados indicaram variações aleatórias de valores, não se tendo logrado obter definição de variograma. Alguns dos semivariogramas experimentais testados estão expostos nas figuras 7.8.3 e 7.8.4.

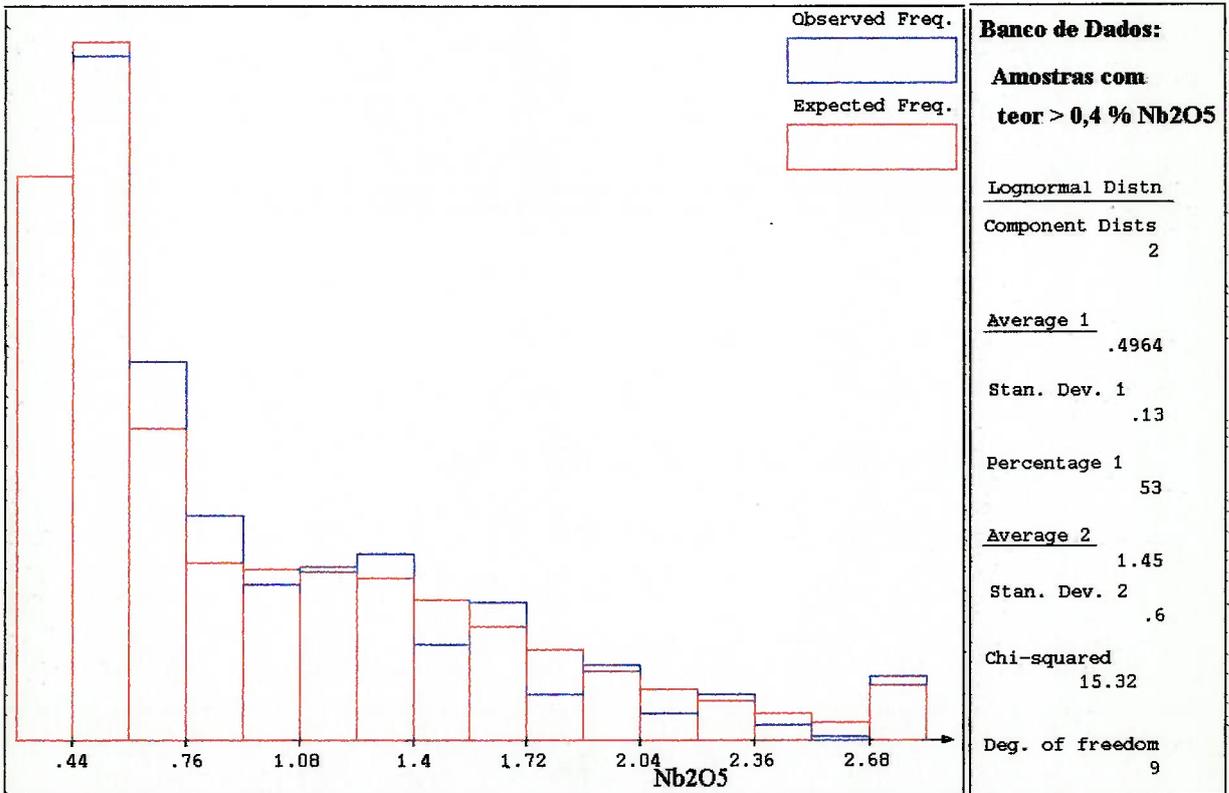
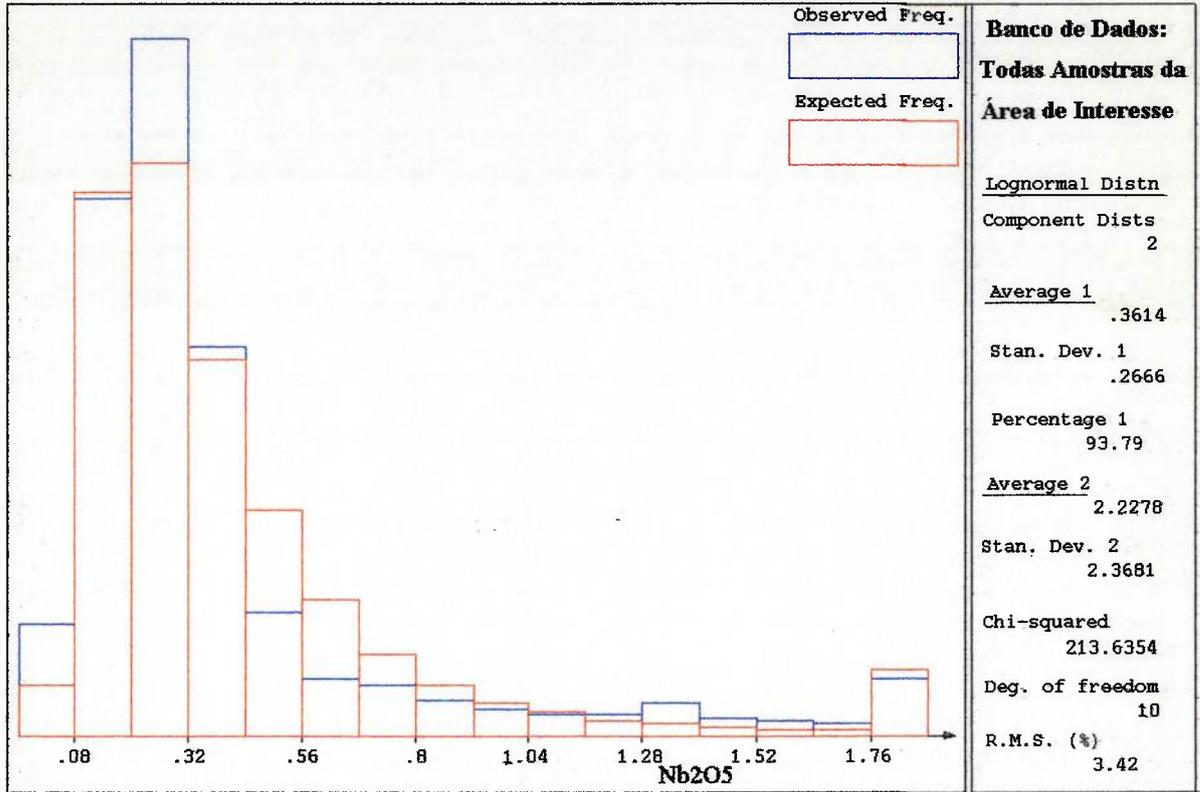


FIGURA 7.8.2
DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE NÍÓBIO NO MINÉRIO POTENCIAL

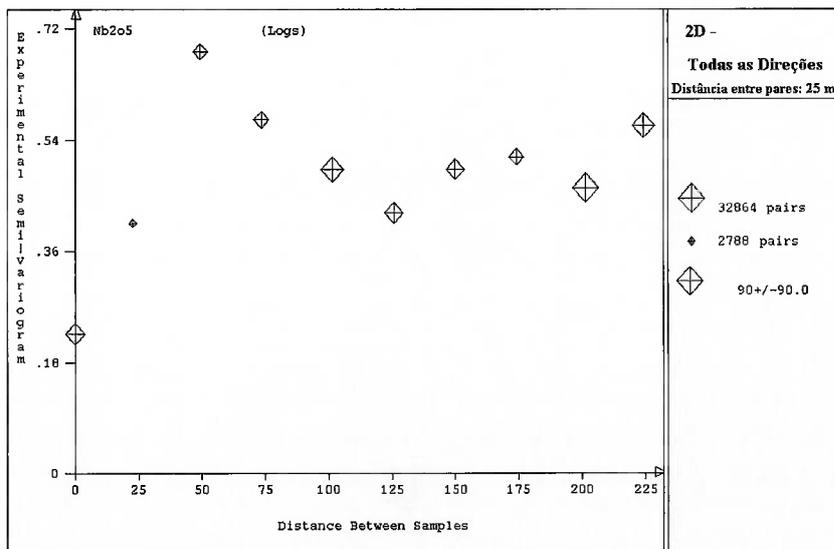
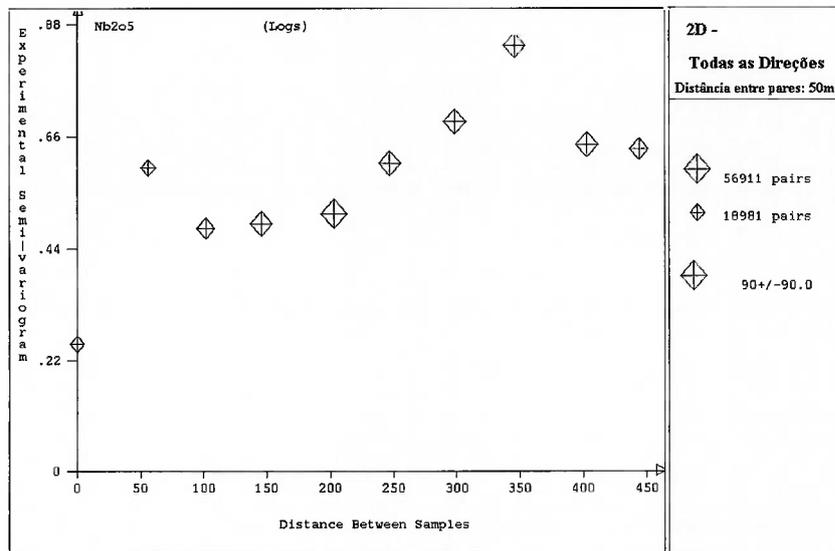
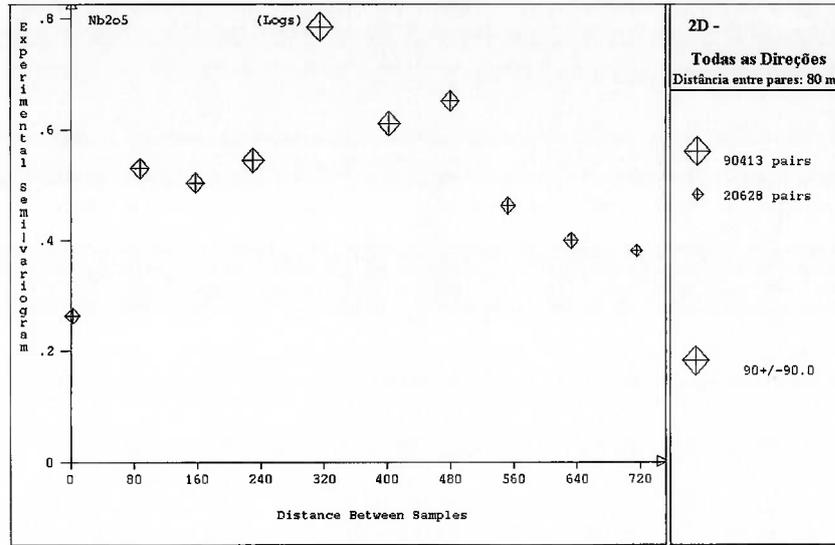


FIGURA 7.8.3
SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DOS TEORES DE Nb₂O₅ - 2D

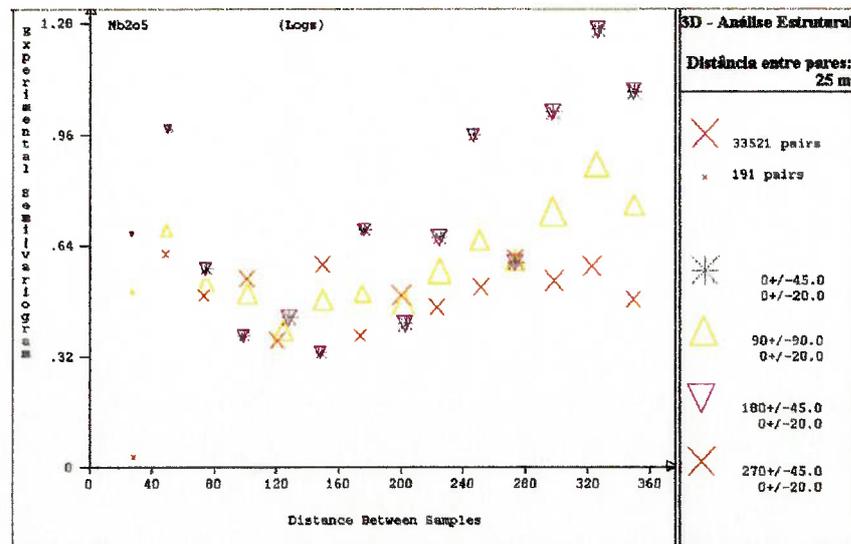
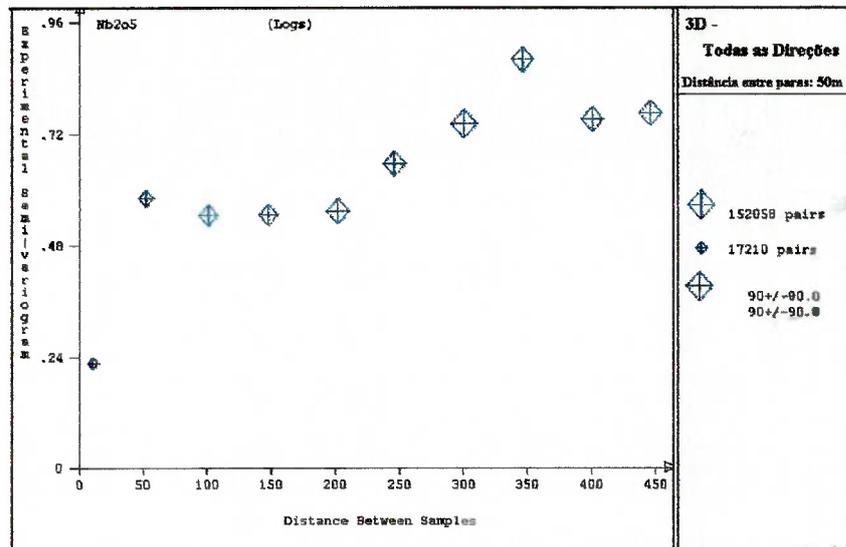
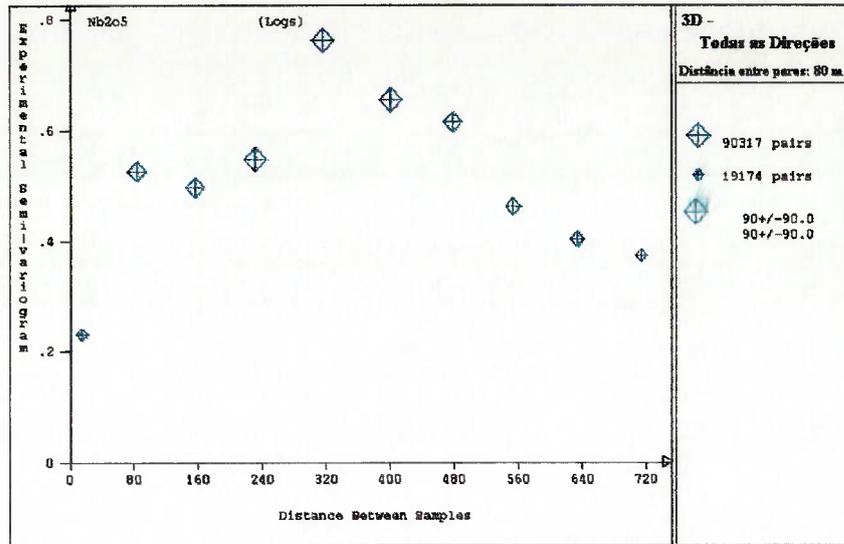


FIGURA 7.8.4
SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DOS TEORES DE Nb₂O₅ - 3D

Tal comportamento mostra que o espaçamento de amostragem na horizontal, ou a distância entre os furos de sondagem praticada na pesquisa, foi muito grande face à variabilidade dos teores do minério, já reportada na literatura ^{93,119}, tendo se mostrado inadequada para aplicação de métodos geoestatísticos na interpolação de valores com vistas à quantificação das reservas.

Apenas na direção de mergulho vertical, ângulo de 90° com tolerância de 15°, logrou-se obter um semivariograma de modelo esférico, bem ajustado, com amplitude de 12 m e variância espacial de 0,07, como ilustrado na figura 7.8.5. Portanto, ao longo dos furos de sondagem a variação de teores mostra dependência entre amostras até a amplitude de 12 m, que representa o intervalo máximo de amostragem sem comprometimento da qualidade da informação.

Face aos resultados obtidos, optou-se por adotar a interpolação de teores pelo método do inverso do quadrado da distância, para a construção de um modelo de teores do corpo mineralizado.

Foi criado um modelo ou uma grade ("grid"), com blocos de 50 x 50 x 10 m, que cobriu a área de coordenadas locais: 775 a 1125 N, 1675 a 2650 E, e cota de 760 a 860 m, como indicado na figura 7.8.1. A interpolação de teores foi realizada a partir da modelagem por blocos centrados, utilizando-se elipsóide de busca com seção horizontal circular, de diâmetro 100 m, e 5 m na direção de mergulho vertical.

O cálculo das reservas totais de minério potencial, com base no modelo de teores criado, utilizando-se os valores de densidade advindos da pesquisa geológica ⁹³, encontra-se no quadro da tabela 7.8.2.

Tabela 7.8.2
Reservas de Minério Potencial de Nióbio da GOIASFÉRTIL

Teor de Nb ₂ O ₅	Área de Interesse do Projeto			Dados da Pesquisa
	teor médio	Reservas de Minério		Geológica ⁹³
	% Nb ₂ O ₅	VOLUME (m ³)	MASSA (t)	Reservas de Minério (t)
acima de 0,3 %	0,59	15.350.000	35.305.000	144.659.066
acima de 0,4 %	0,76	7.628.000	17.546.000	nd
acima de 0,5 %	0,90	5.975.000	13.743.000	12.383.549
acima de 1,0 %	1,57	1.450.000	3.335.000	3.749.295

nd - dado não disponível

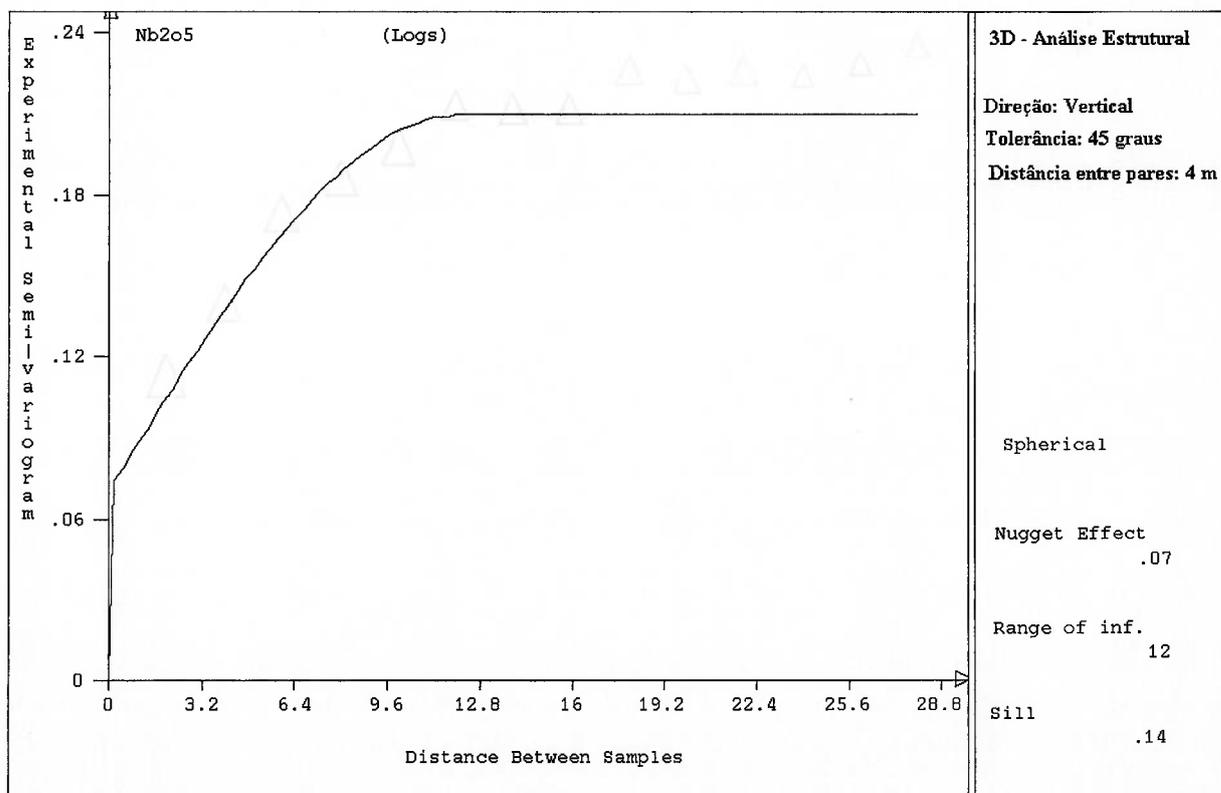
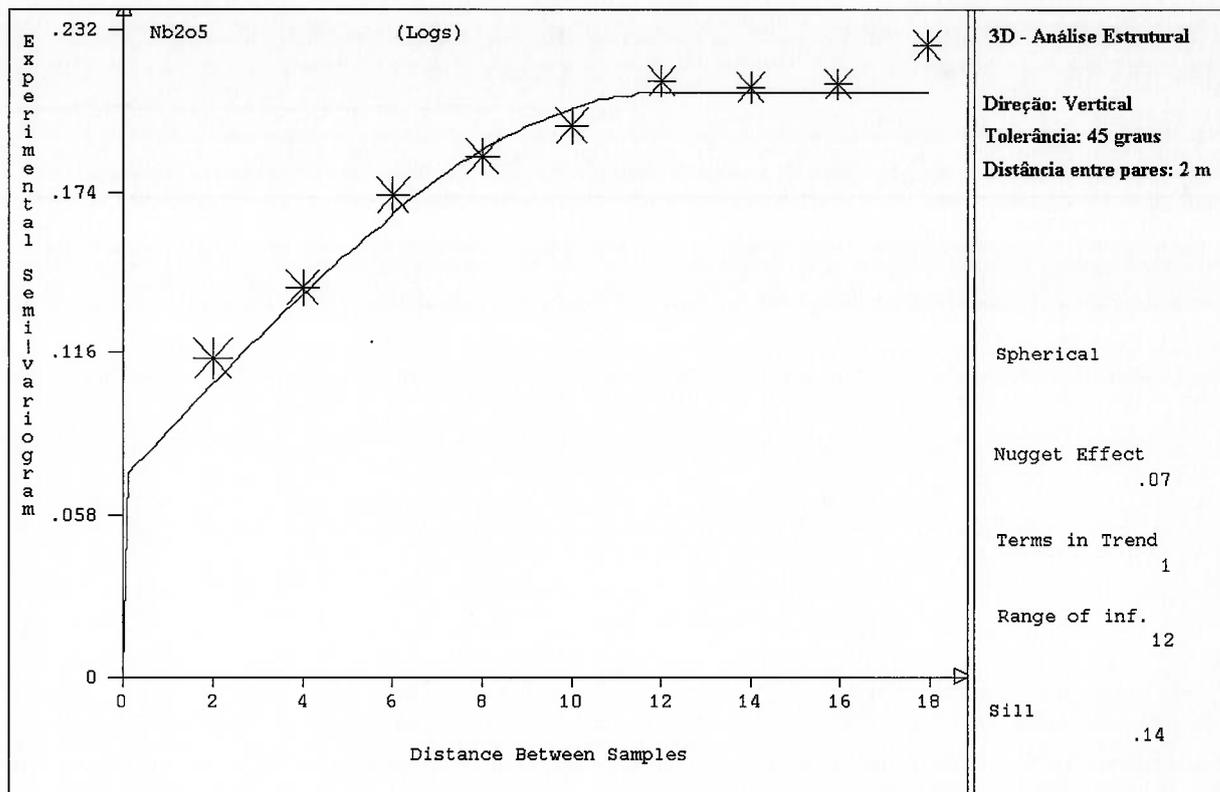


FIGURA 7.8.5
SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS SEGUNDO A DIREÇÃO VERTICAL

Os valores de reservas ora obtidos comparativamente àqueles gerados na fase de pesquisa mostram que a área de interesse do projeto, com a delimitação supra referida, se refere essencialmente à porção do corpo mineralizado que contém os teores mais elevados de nióbio, a qual significa uma parte da área total mineralizada. No quadro comparativo isto se evidencia pela discrepância de reservas para teor de corte de 0,3 % Nb₂O₅, com valores muito maiores calculados na fase de pesquisa, e resultados semelhantes para teores de corte mais elevados.

7.8.2 - Modelamento da Tipologia do Minério

O modelamento do corpo mineralizado segundo a tipologia do minério considerando todos os tipos de materiais existentes na jazida, foi realizado com base nos critérios expostos na seqüência.

A revisão dos resultados dos estudos de caracterização e da tipologia de minérios estabelecida nas diversas etapas do estudo de caracterização, conduz ao quadro síntese da tabela 7.8.3.

Tabela 7.8.3

Sumário das Correlações Tipos de Minérios Litológicos / Mineralógicos / Tecnológicos

Tipo Litológico	Tipo Mineralógico	Tipo Tecnológico
Material Argiloso	A1	não é minério
Canga	A2	I
Minério Ferroso	B1	II
Min. Ferroso com Barita		
Min. com Magnetita / Barita	B2	III
Minério com Magnetita		
Rocha Decomposta	C	não é minério

Os parâmetros de reconhecimento dos tipos tecnológicos de minério ao longo do corpo mineralizado, se reportam a:

- descrições interpretativas na distinção entre os sub-tipos mineralógicos A1 e A2;
- porcentagem de magnetita na distinção dos sub-tipos B1 e B2;
- porcentagem de barita, na distinção das variedades dos sub-tipos B1 e B2;
- descrições interpretativas na distinção do tipo C.

Buscando-se agregar outros parâmetros auxiliares para reconhecimento dos tipos de minério, promoveu-se detalhada avaliação de correlações entre composição química do minério e sua tipologia, sempre em procedimento de aproximações sucessivas. Inicialmente foram investigadas correlações essencialmente apoiadas em critérios químicos, posteriormente, verificou-se a significância de algumas destas correlações ou índices químicos pré-estabelecidos, considerando-se os tipos de minério distintos pelo todo dos parâmetros de reconhecimento mencionados.

Os índices químicos obtidos mostraram-se de grande valia na delimitação dos tipos mineralógicos principais do minério, mas mostraram-se insuficientes para discriminação de sub-tipos, até pela pequena disponibilidade de análises completas nos testemunhos de sondagem.

O inventário dos parâmetros disponíveis sobre o corpo mineralizado que possibilitem a sua separação entre os diversos tipos tecnológicos, mostra que, para toda a área do projeto, existem informações suficientes para a separação entre os tipos viáveis de concentração e aqueles que não são minério, ou não são concentráveis à luz dos estudos realizados.

Já a distinção entre os tipos tecnológicos de minério concentráveis se apoia em parâmetros que não foram sistematicamente levantados nos furos de sondagem, e, portanto sua distribuição ao longo do corpo mineralizado ficou prejudicada. Apenas algumas indicações sobre a partição das reservas segundo tais tipos puderam ser realizadas, com base em extrapolações.

7.8.2.1. Correlação Tipos Mineralógicos e Composição Química do Minério

Algumas das correlações tipologia-composição química do minério observadas, são genéricas e típicas do perfil de alteração intempérica de complexos alcalinos carbonatíticos, destacando-se dentre elas, como de relevância para o presente estudo, as seguintes feições¹³⁰: o enriquecimento de Nb, Ti, Fe e Ba no nível de fosfato não apatítico; alto Fe₂O₃ e enriquecimento em P₂O₅ no nível "oxidado".

Outras correlações foram anteriormente estabelecidas para o complexo de Catalão, relativas à região mineralizada a fosfato^{131,132,133,134}, a partir de estudos sistemáticos em furos de sondagem. Em tais investigações verificou-se que o zoneamento vertical do minério, ou o perfil do solo, é retratado por uma conjugação de teores e índices químicos, destacando-se como relevante para a área em estudo a razão CaO:P₂O₅, a qual reflete o P₂O₅ apatítico, sendo a relação teórica $1,32 \pm 0,01$. Tal relação mostrou-se também aplicável à área mineralizada a nióbio e fosfato, onde os teores de fósforo associados são expressivos e compatíveis com aqueles do minério exclusivamente fosfatado.

Finalmente, verificou-se algumas correlações teores-litologia que tem significado apenas para a área ora estudada, não sendo disponíveis dados sobre a área vizinha, em exploração pela Mineração Catalão, que pudessem confirmar as correlações estabelecidas para todo o contexto da mineralização de nióbio do complexo alcalino.

Os índices químicos obtidos e sua correlação com os tipos de minério são reportados na seqüência, com uma avaliação crítica da representatividade, em termos de composição química, das amostras utilizadas na caracterização tecnológica do minério.

a) Índice Relação CaO:P₂O₅

O critério químico do conteúdo de CaO e sua relação com o P₂O₅, se mostrou importante no reconhecimento de tipos de minério de nióbio, à semelhança do observado para o fosfato, possibilitando a separação dos três tipos mineralógicos básicos identificados.

Relações baixas caracterizam a zona de depleção do cálcio, que reflete o nível mais superficial do manto de intemperismo, e de maior lixiviação por agentes supérgenos, no qual são estáveis apenas fosfatos secundários ou neoformados.

O horizonte de solo imediatamente inferior, com limite definido pelo nível do lençol freático ¹²¹, representa o nível de deposição ou precipitações a partir das soluções percolantes, tipicamente de estabilidade de fosfato apatítico. Do ponto de vista da composição química do minério, isto se reflete pelo aumento da relação CaO:P₂O₅, indicando predominância de fosfato apatítico, sendo que esta passagem é normalmente brusca.

Os valores desta relação também auxiliam na definição dos limites da ROCHA ALTERADA, quando esta é de composição carbonatítica. Sendo um horizonte de estabilidade de carbonatos, mostra excesso de cálcio em relação ao fósforo, com índices geralmente acima de 1,5; por vezes há passagem abrupta deste nível para o imediatamente superior.

A avaliação da frequência de distribuição tanto dos teores de cálcio e fósforo, como da relação entre eles, nas amostras dos testemunhos de sondagem contidos na área do projeto, permitiu distinguir as populações relativas aos tipos mineralógicos de minério.

Os teores de cálcio e de fósforo para toda a população de testemunhos de sondagem, conforme ilustrado nos gráficos da figura 7.8.6, mostram estreita correlação para grande parte das amostras analisadas, definindo quase uma reta, a qual expressa a população de amostras com fosfato apatítico predominante, e que são correspondentes ao tipo mineralógico B.

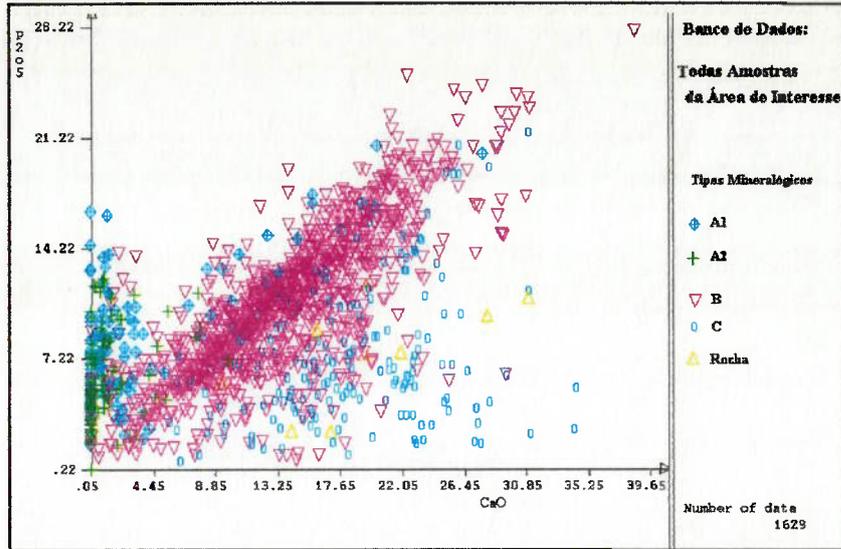
Observa-se uma nuvem de pontos para teores baixos de CaO, onde se localizam as amostras do tipo A, e dispersão de valores abaixo da reta, para materiais com excesso de cálcio, correspondendo ao tipo mineralógico C carbonatítico.

Tal quadro se torna mais definido para a população de amostras com nióbio acima do teor de corte (figura 7.8.6b), na qual ocorre expressiva diminuição das amostras com elevado teor de cálcio.

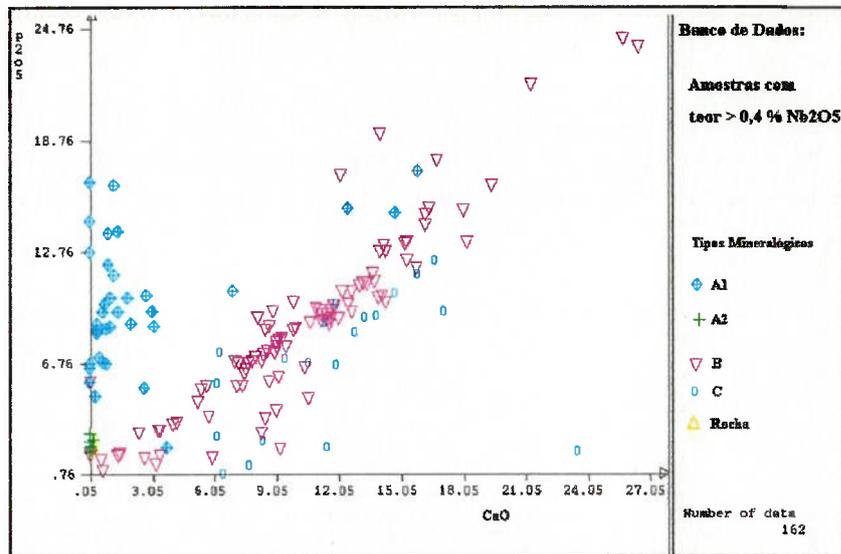
As amostras caracterizadas (figura 7.8.6c) mantiveram-se na tendência principal de distribuição dos teores de cálcio e fósforo, tendo coberto também os materiais com fósforo expressivo e baixo cálcio. Não incluíram porém aqueles com baixo conteúdo de fósforo e alto teor de cálcio.

A distribuição dos valores da relação CaO:P₂O₅, ilustrada nos gráficos da figura 7.8.7 e 7.8.8, indicam de forma bem marcante e distinta, pelo menos três populações.

a)



b)



c)

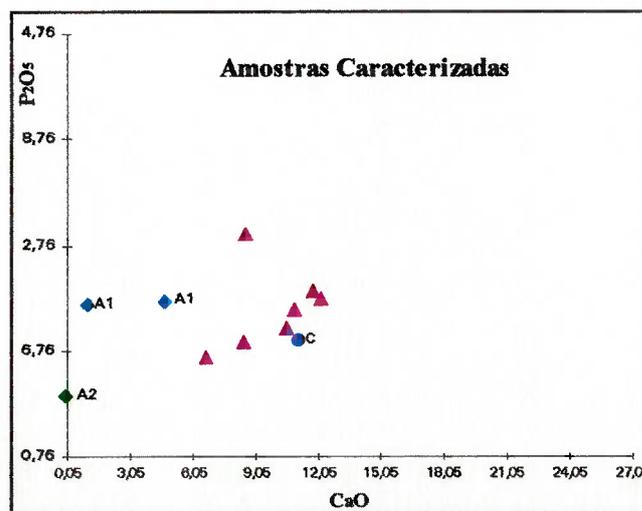


FIGURA 7.8.6

GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE CÁLCIO E FÓSFORO NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

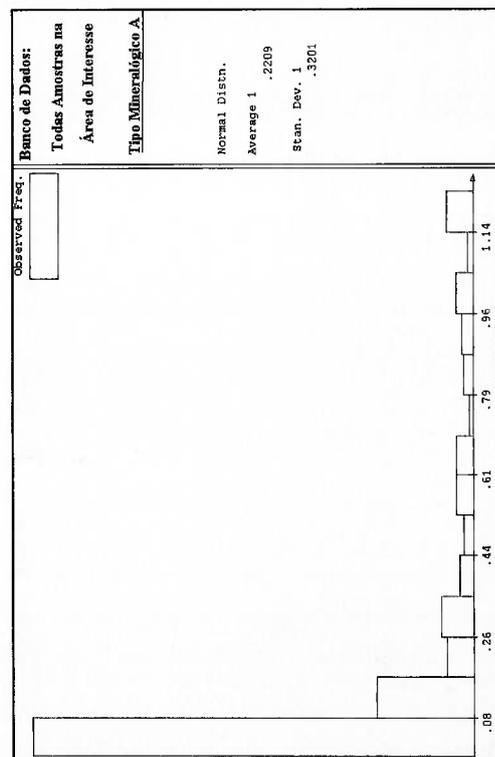
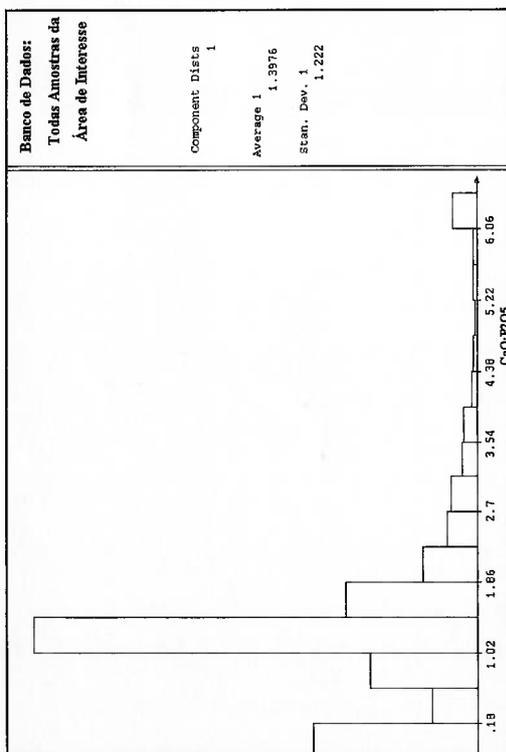
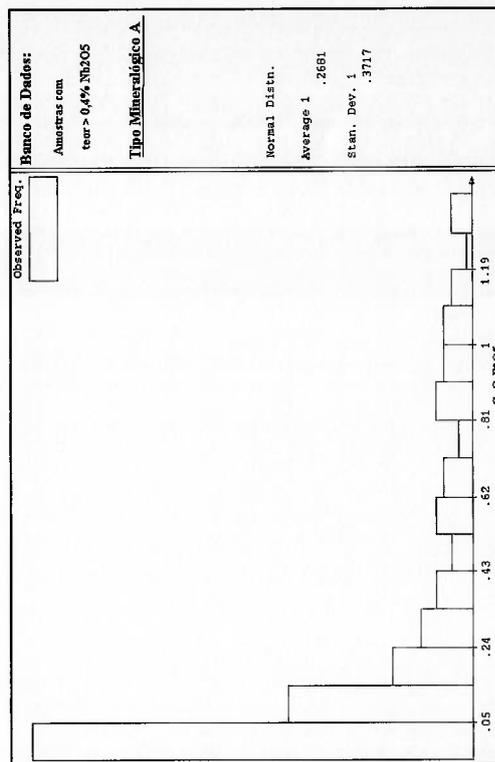
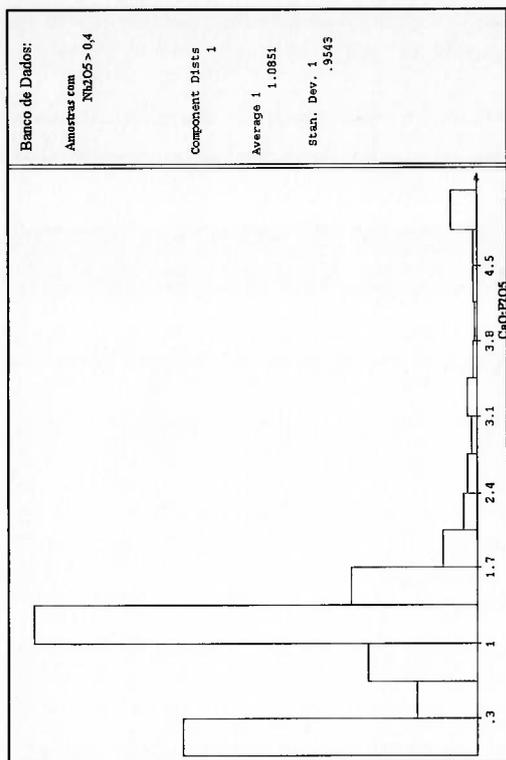


FIGURA 7.8.7
DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO CaO: P2O5 NO MINÉRIO TOTAL E NO TIPO MINERALÓGICO A

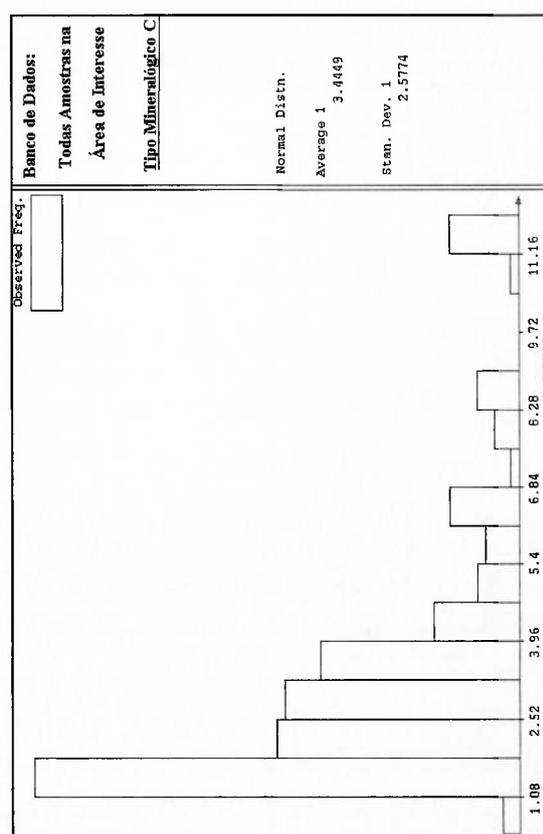
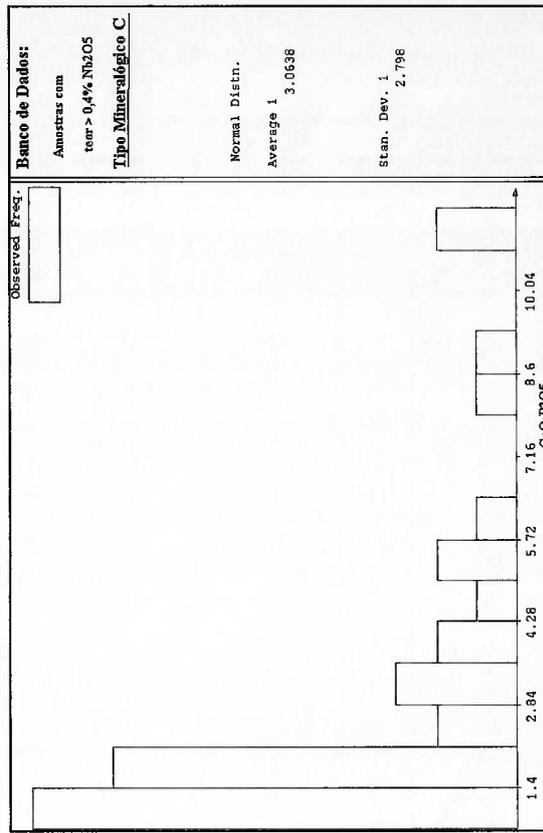
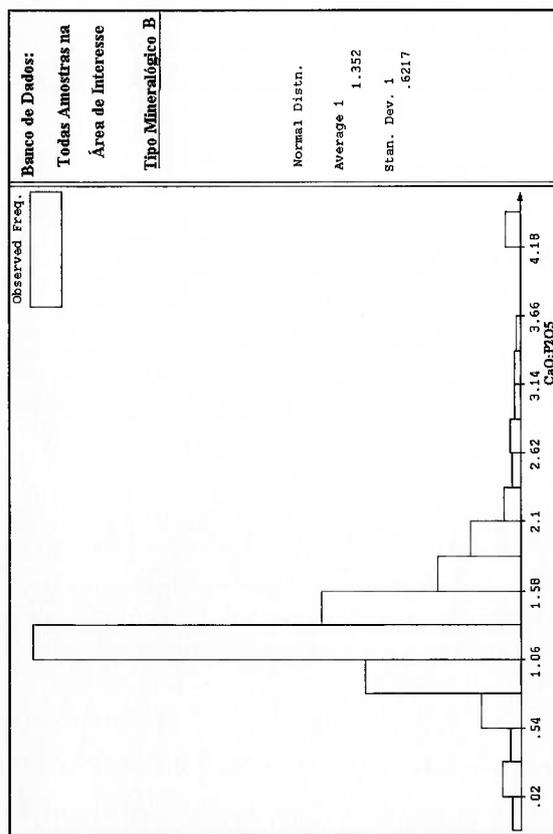
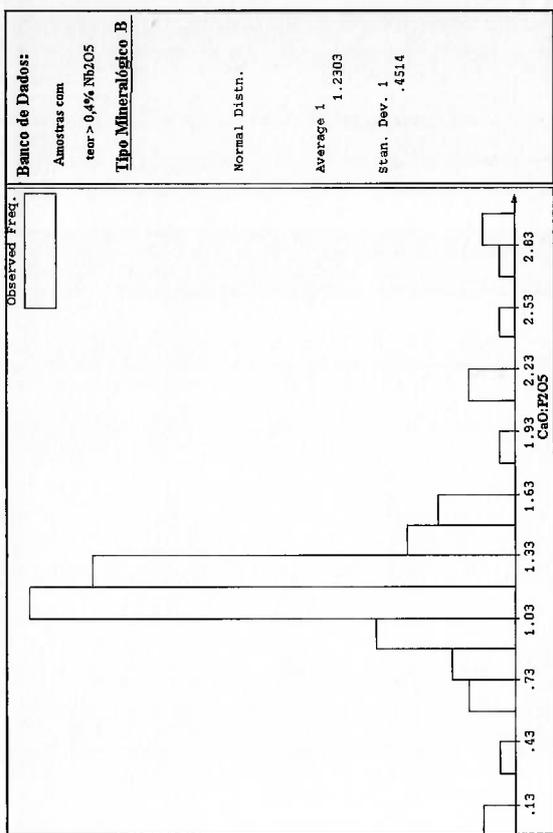


FIGURA 7.8.8
 DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO CaO:P2O5 NOS TIPOS MINERALÓGICOS B E C

A primeira delas é relativa aos valores baixos, tem limite superior aproximado de 0,5, com moda da distribuição entre 0,01 e 0,02. Inclui cerca de 20 % da população analisada, valor que passa a 33 % ao se restringir o universo para amostras com teores acima de 0,4% Nb_2O_5 . Estão dentro deste grupo as amostras do tipo mineralógico A, podendo-se adotar como guia aproximado o limite de corte em torno de $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5 = 0,5$ (menos de 40% de fósforo na forma de apatita).

A segunda população está compreendida entre os valores aproximados de 0,5 e 1,5, e tem média de 1,22, e engloba o tipo mineralógico B e parte do C, onde predomina o fosfato apatítico. Representa cerca de 65% das amostras de testemunhos contidos na área de interesse, sendo que ao se limitar a população às amostras de minério potencial, esta proporção reduz-se para 53%.

O último grupo de amostras, significando 15% da população global e mesma proporção do minério potencial ($> 0,4 \% \text{Nb}_2\text{O}_5$), em realidade mostra mais de uma população de teores, mas por questões de significância no universo amostral, e coerência com a tipologia estabelecida a para o minério, decidiu-se por mantê-las juntas. Representam parte das amostras do tipo mineralógico C, com excesso de cálcio em relação ao contido na apatita, devido à presença de carbonatos.

A correlação dos teores de nióbio com a relação $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$, fornece um panorama preliminar da significância dos tipos mineralógicos nas reservas de nióbio, como exposto nos gráficos da figura 7.8.9.

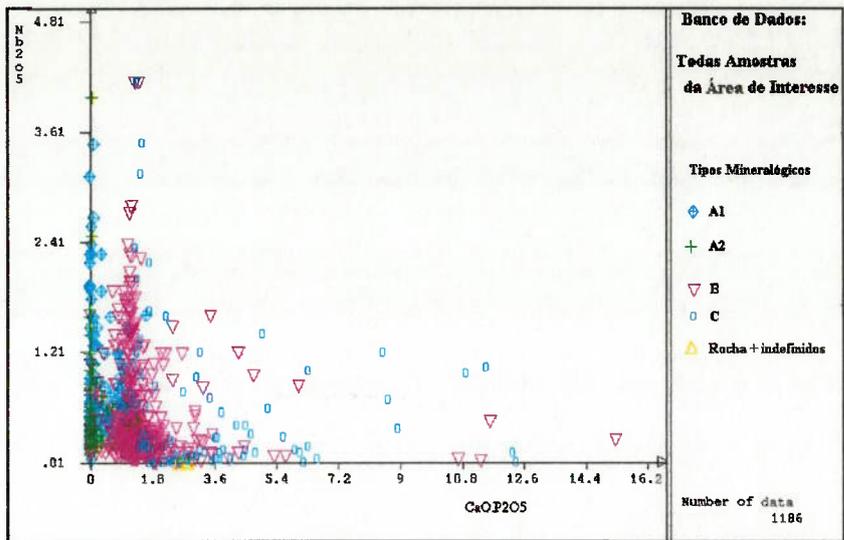
Nota-se que o tipo C carbonático mostra tendência a teores baixos, inferiores a 1,5% Nb_2O_5 , em toda a população de amostras analisadas. Os tipos A e B, em duas populações bem distintas nos gráficos, em termos práticos alinhadas paralelamente ao eixo de teores de nióbio, apresentam teores desde marginais até 4,2 % Nb_2O_5 .

Dentre as amostras caracterizadas, não foram incluídos teores muito elevados de nióbio, os quais tem pouca significância no universo do minério potencial.

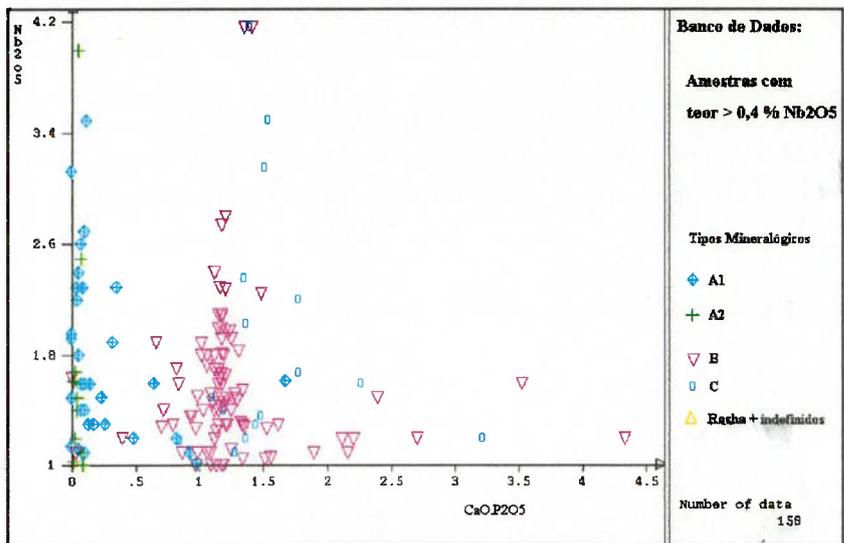
b) Índice Relação $\text{BaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$

Interessante e significativa correlação foi detectada entre os teores de bário e alumínio, como indicado nos gráficos da figura 7.8.10.

a)



b)



c)

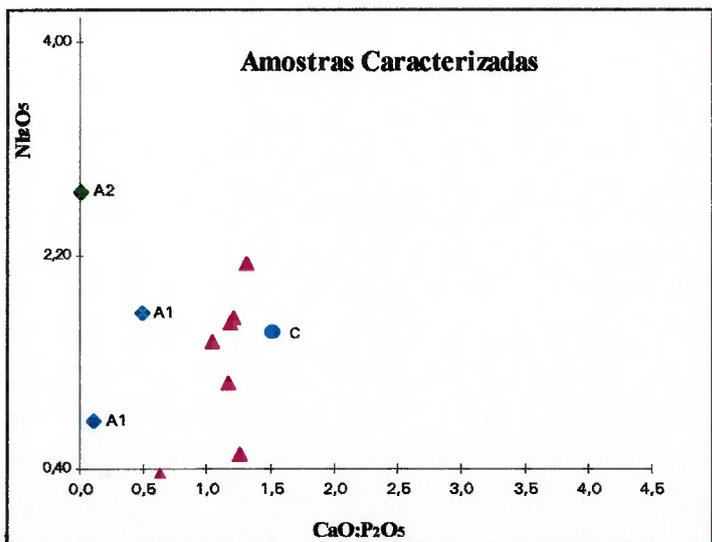
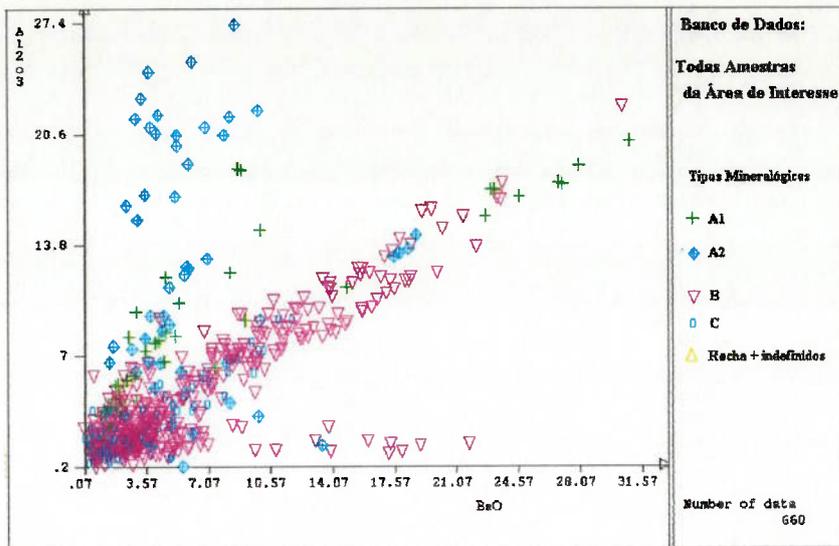
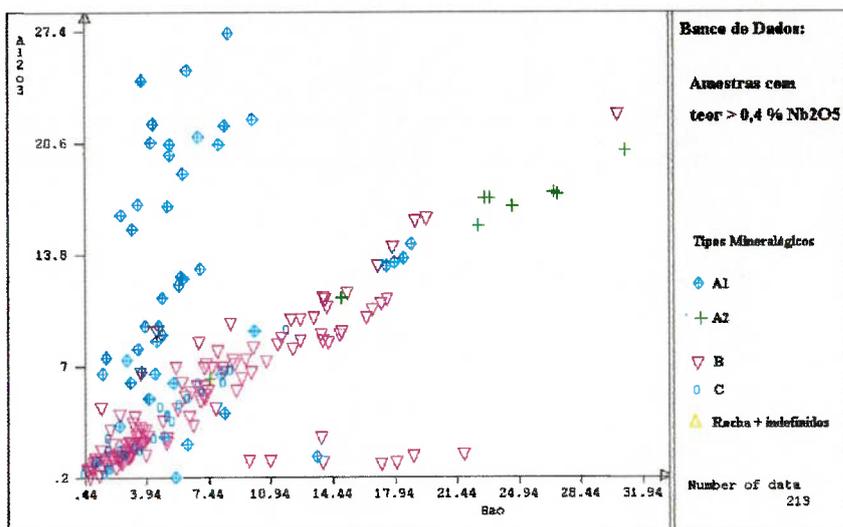


FIGURA 7.8.9
GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO CaO:P₂O₅ & Nb₂O₅ NOS FUROS DE SONDAGEM

a)



b)



c)

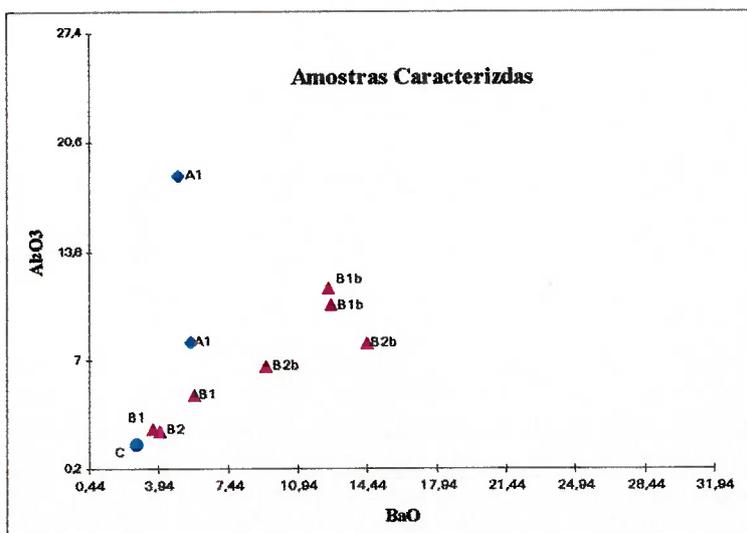
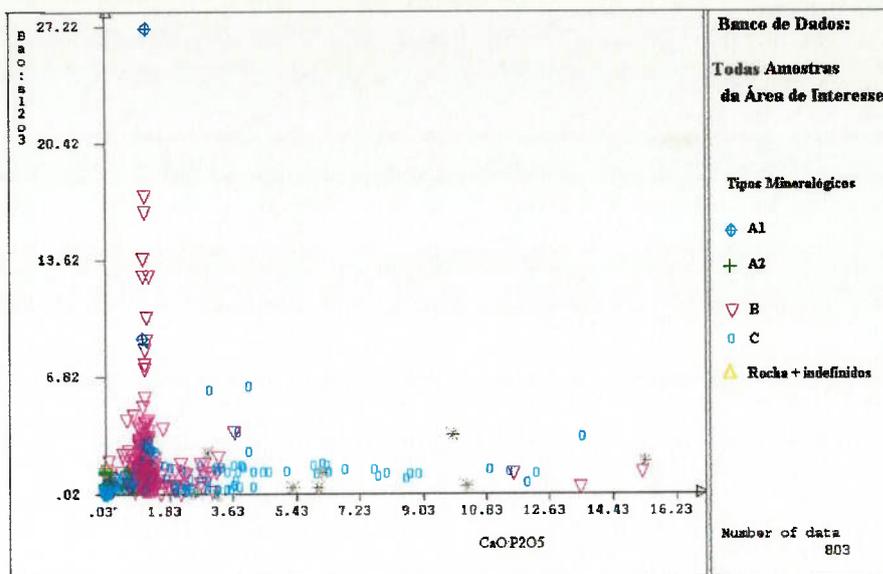
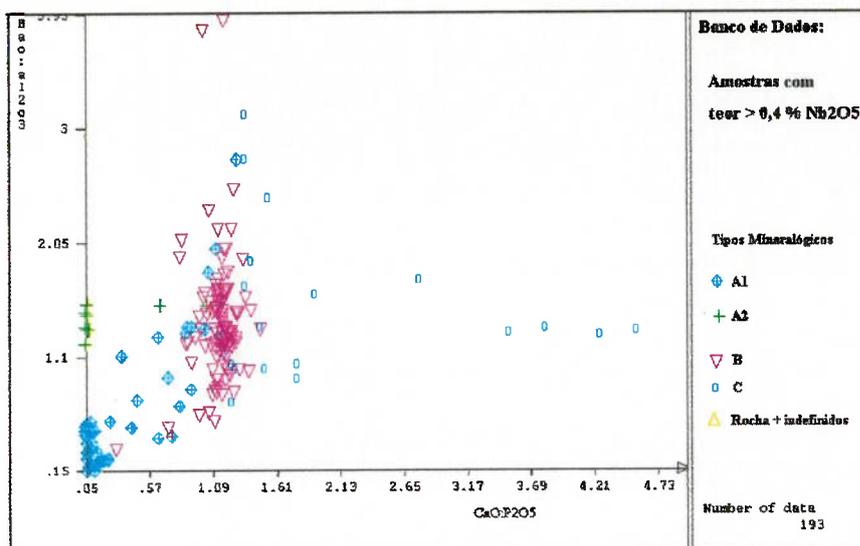


FIGURA 7.8.10
GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO BaO & Al₂O₃

a)



b)



c)

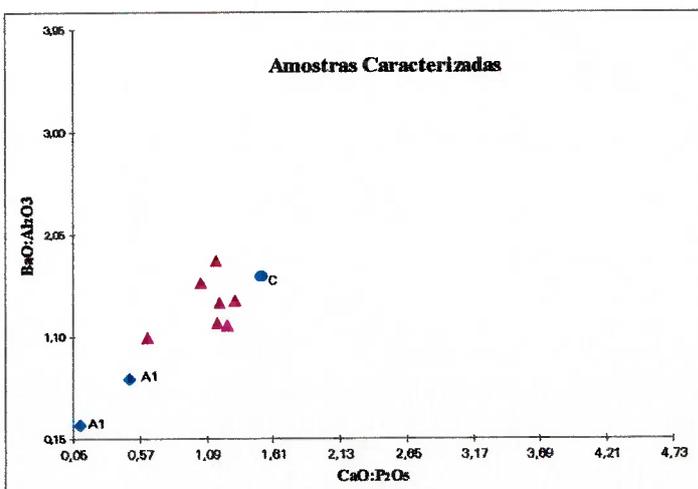


FIGURA 7.8.11
GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO CaO:P₂O₅ & BaO:Al₂O₃

São distinguíveis três tendências diretas: uma relativa a teores baixos de alumínio, mal definida; outra bem nítida, com bário em quantidade cerca de 1,5 vezes o conteúdo de alumínio; e, uma última, na forma de uma nuvem de tendência dispersa, correspondendo a teores de alumínio bem maiores que os de bário. Se forem consideradas apenas as amostras de minério potencial (figura 7.8.10b), ocorre quase que o desaparecimento da população que definia a tendência com baixo conteúdo de alumínio, ressaltando as demais.

Notar que a nuvem de tendência com teores de alumínio maiores que os de bário, corresponde basicamente ao tipo mineralógico A. O tipo B engloba tanto a tendência de baixos teores de alumínio com a população com relação $BaO = 1,5 Al_2O_3$. O tipo C, carbonático, mantém a relação principal observada, mas apresenta também um grupo significativo de amostras com teores de alumínio e bário similares.

No material em estudo foi identificada apenas uma espécie mineral portadora de bário e alumínio, a gorceixita que é um alumino-fosfato com relação $BaO: Al_2O_3 \equiv 0,9$. Este mineral ocorre essencialmente no minério tipo A, sendo inexpressivo a inexistente nos demais. As correlações observadas se referem a uma assembléia mineral de maiores constituintes, caracterizada pela presença de barita e micáceos.

As amostras estudadas na caracterização (figura 7.8.10c) pertencem em sua maioria à população com relações $BaO:Al_2O_3$ próximas de 1,5, exceção feita aos tipos mineralógicos A, que pertencem à nuvem dispersa com teores de alumínio maiores que os de bário.

Nos gráficos percebe-se que, à semelhança do observado para o material com excesso de cálcio, existe uma população com alto bário, a qual não foi amostrada para a caracterização. Esta população de alto bário e baixo alumínio mostra baixos teores de nióbio.

Uma análise da correlação dos dois índices, $CaO:P_2O_5$ versus $BaO:Al_2O_3$, ilustrada nos gráficos da figura 7.8.11, ressalta a distinção e mostra a baixa representatividade das populações com excesso de bário em relação ao alumínio e de cálcio em relação ao fósforo.

c) Outras Correlações

A análise da correlação dos demais óxidos maiores constituintes do minério potencial com os teores de Nb_2O_5 , segundo os tipos mineralógicos de minério, fornece uma visão geral das suas características químicas / mineralógicas, como pode ser observado nos gráficos das figuras 7.8.12 a 7.8.17.

Os teores de ferro variam de 2,5 a 62 % Fe_2O_3 nos tipos mineralógicos A e B, enquanto no tipo C carbonático tendem a teores mais baixos. É notável, no tipo A, a presença de duas populações com baixo (<20%) e alto (> 25%) ferro, indicando os sub-tipos A1 e A2.

As amostras caracterizadas cobriram os sub-tipos do minério potencial A, um amplo espectro do tipo B, não tendo incluído, porém, materiais com teores baixos de ferro (< 15%), que tem significativa representatividade no universo amostral. No gráfico Fe_2O_3 & Nb_2O_5 (figura 7.8.12), percebe-se que os materiais com baixo teor de ferro não estudados, referem-se a teores de nióbio baixos a marginais.

Quanto ao titânio, as amostras estudadas na caracterização cobriram as populações de maior representatividade, exceção feita ao tipo B com teores mais elevados de titânio, a qual contém teores tanto marginais como expressivos de nióbio (figura 7.8.13).

Finalmente, quanto à sílica, as amostras estudadas mostram boa representatividade, embora não tenham incluído materiais do tipo B com elevada sílica (figura 7.8.14).

Óxidos de ferro, titânio e silício mostram comportamento similar no perfil do solo, no nível de depleção de cálcio ocorre significativo enriquecimento residual, sendo que nos demais horizontes não se observa qualquer comportamento diferencial de relevância.

Altos teores de nióbio podem estar associados a elevado conteúdo de ferro, e pressupõem intermediários a baixos de bário, titânio e sílica (figuras 7.8.15 a 7.8.17).

d) Critérios Químicos como Guias no Reconhecimento de Tipos Mineralógicos de Minério

Em resumo, a correlação tipo mineralógico e relação $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ estabelecida foi:

- Tipo A - apresenta $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5 < 0,5$, correspondendo ao material cujo fosfato é predominantemente não apatítico;
- Tipo B - tendem a mostrar $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ entre 0,5 e 1,5, relativo à predominância de fosfato apatítico, e incluindo amostras com baixo conteúdo de carbonatos;
- Tipo C - carbonático tem $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5 > 1,5$, indicando presença expressiva de carbonatos.

No tipo A distingue-se o sub-tipo A2 por teores mais elevados de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 20\%$), e, conseqüentemente, menores de sílica, relativos à maior presença de óxidos de ferro (hematita / goetita / magnetita). O sub-tipo A1 está associado a teores elevados de titânio ($\text{TiO}_2 > 10\%$), com baixo ferro e alta sílica.

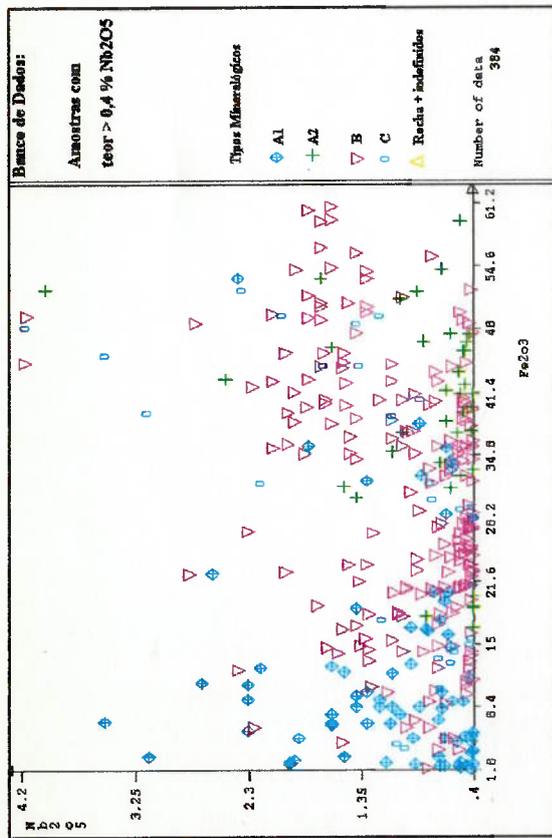


FIGURA 7.8.12
 CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & Fe₂O₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

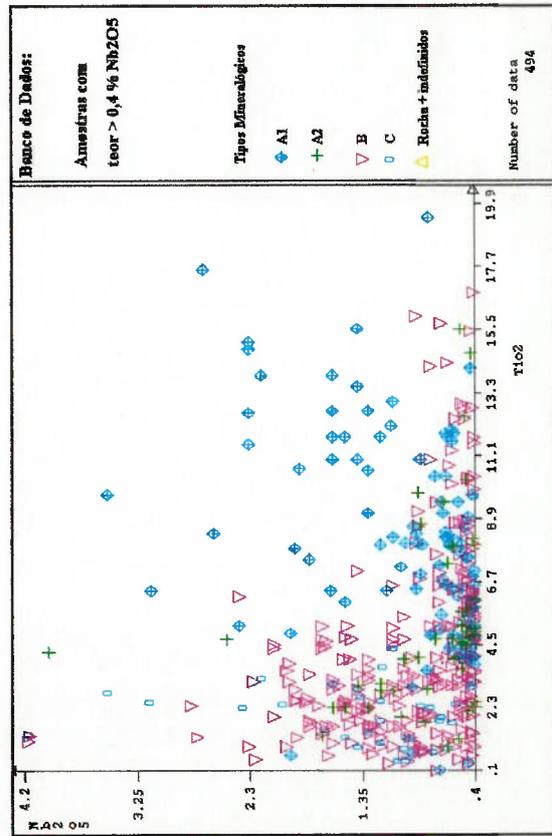
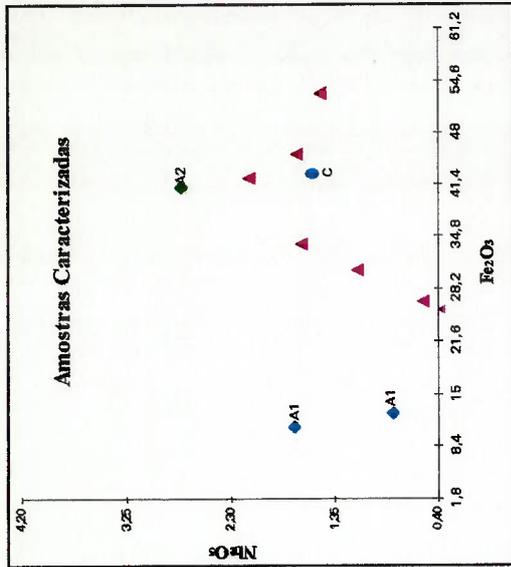
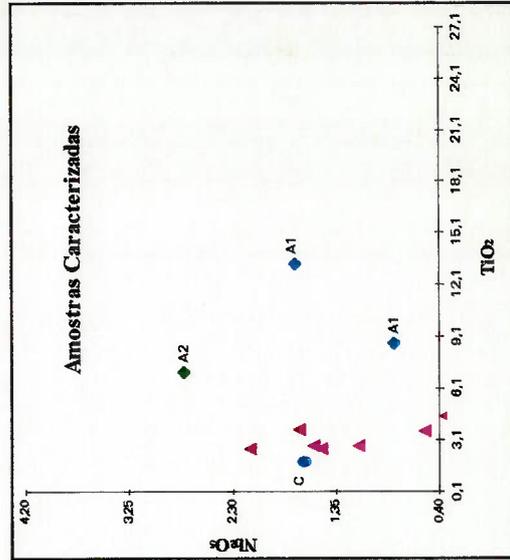


FIGURA 7.8.13
 CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & TiO₂ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM



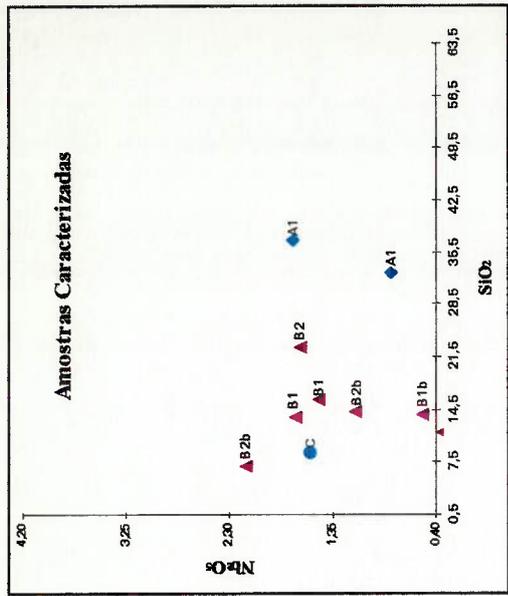
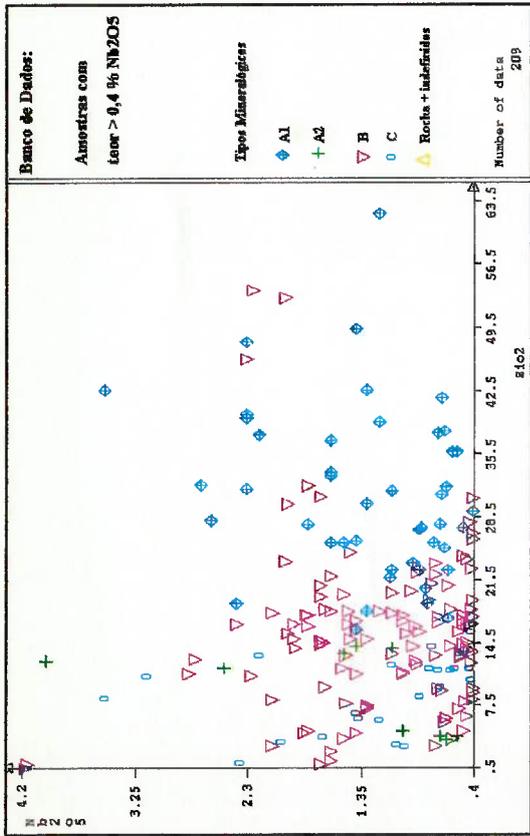


FIGURA 7.8.14 GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & SiO₂ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

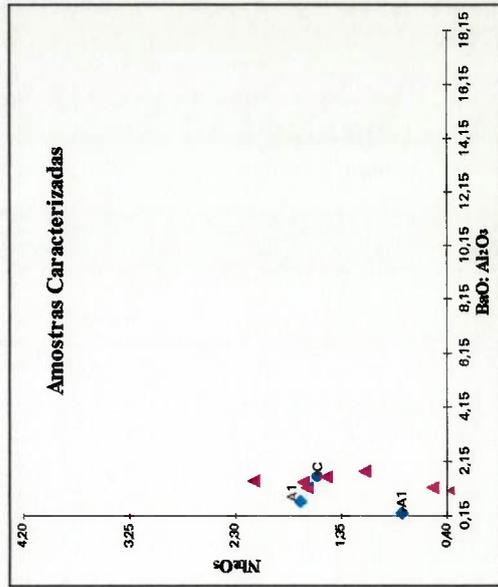
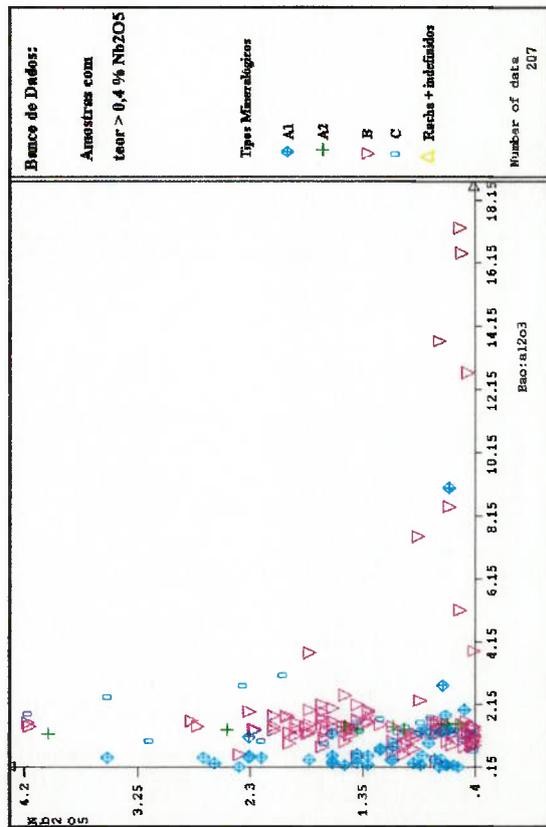


FIGURA 7.8.15 GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & BaO:Al₂O₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

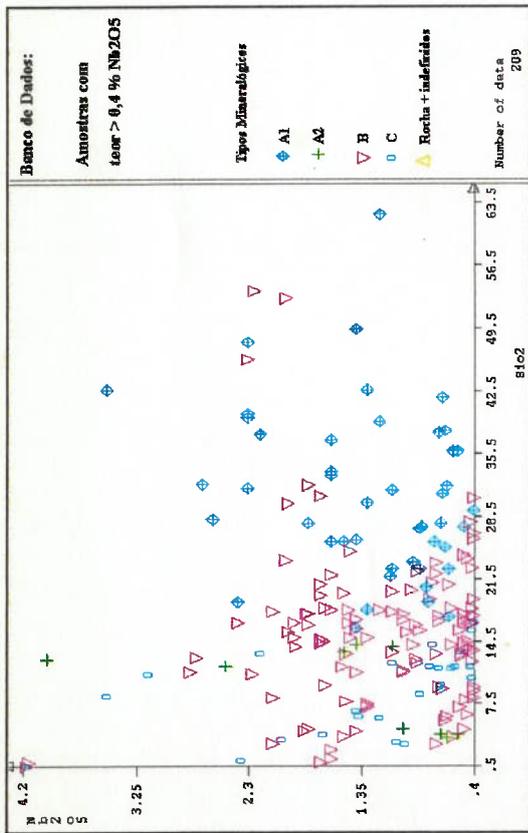


FIGURA 7.8.14
GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & SiO₂ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

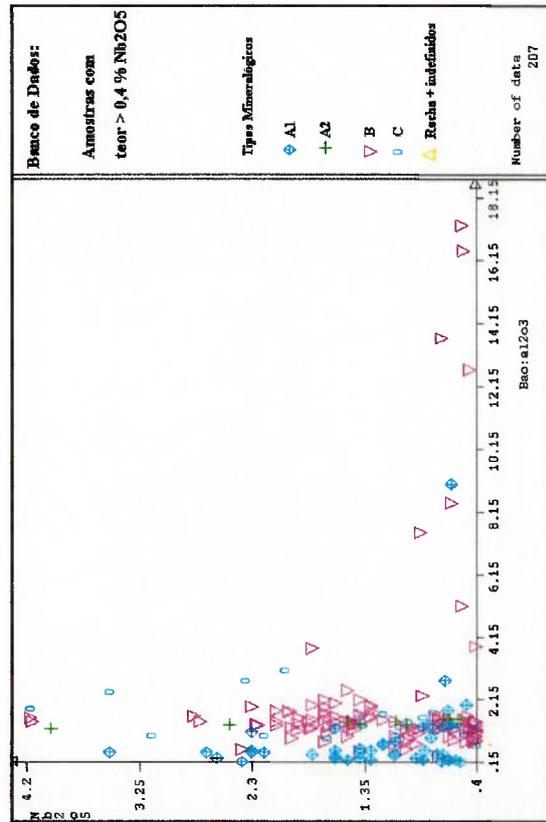
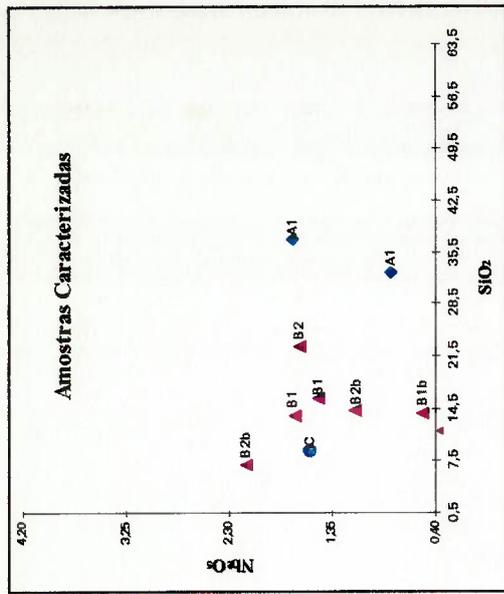
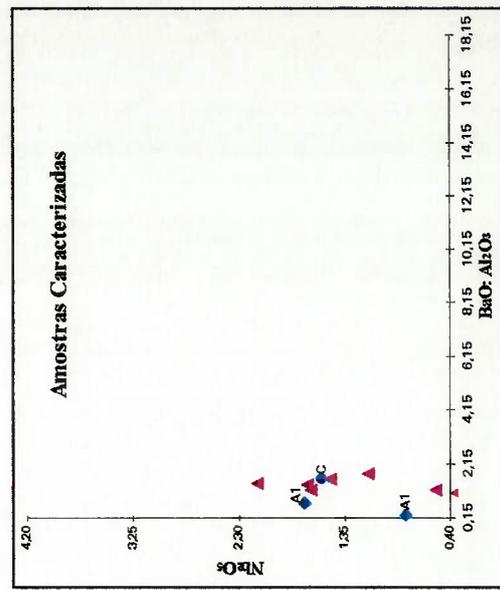


FIGURA 7.8.15
GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO Nb₂O₅ & BaO:Al₂O₃ NOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM



Para o tipo B, não há como diferenciar os dois sub-tipos B1 e B2 por critérios químicos, desde que as proporções de magnetita não podem ser assim avaliadas. Apenas as variedades com / sem barita, em qualquer dos sub-tipos, podem ser reconhecidas pelo teor de bário.

7.8.2.2. Distribuição dos Tipos Tecnológicos de Minério no Corpo Mineralizado

A modelagem foi realizada por aproximações sucessivas, visando ajuste geométrico adequado face a peculiaridades dos recursos do programa de computação utilizado.

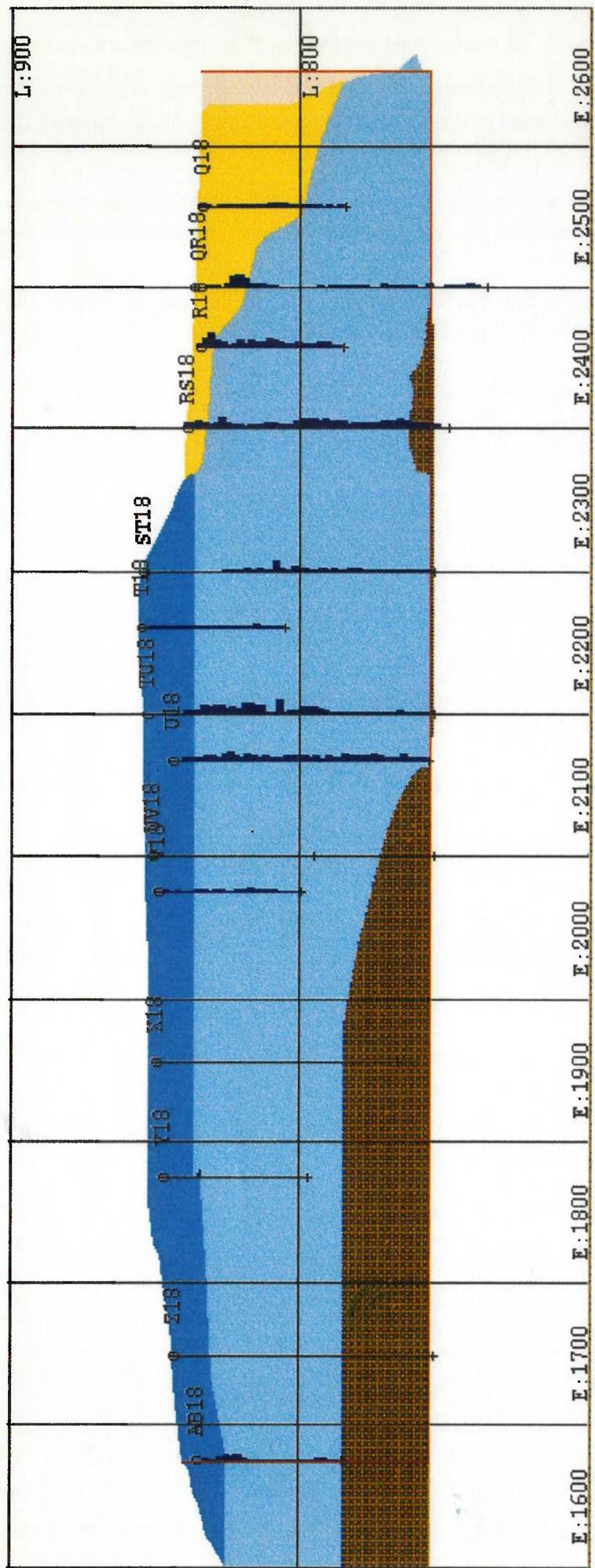
A partir das informações dos furos de sondagem, foram traçadas seções verticais de direção EW nas coordenadas locais (N 75°30' nas coordenadas geográficas), com espaçamento entre elas determinado pela localização dos furos. Foram feitas seções 800 N, 825 N, 850 N, 900 N, 1.000 N e 1.100 N, nas quais delimitou-se os tipos mineralógicos de minério A1, A2, B e C, como ilustrado em perfis típicos das figuras 7.8.18 a 7.8.20.

Cada seção teve como área de influência, e projeção de informações, a metade da distância entre elas, que variou de 12,5 a 50 m, e os recursos de modelamento do programa de computação possibilitaram o ajuste geométrico na terceira dimensão.

No modelo traçado a partir das seções verticais, foram feitos cortes em planos horizontais, onde ajustou-se a delimitação dos tipos de minério em níveis. Estes planos, ilustrados nas figuras 7.8.21 a 7.8.34, foram espaçados de dez metros para níveis abaixo de 830 m, e de 4 m acima desta cota, tendo se constituído na base para traçado do modelo final das tipologias.

Tal procedimento visou aprimorar os limites de litologias nas interpolações, o que se obtém com os recursos do programa de computação, com fatias finas ao longo do modelo.

Por outro lado, o corpo mineralizado apresenta interação e alguma correlação com a topografia na distribuição de litologias mais superficiais, em traçados geométricos complexos cuja interpretação em cortes horizontais, com fatias estreitas, mostrou-se melhor ajustada.



LEGENDA

Tipos Tecnológicos de Minério
 I (A2)
 I + II + III (B)

Materiais Não Concentráveis
 A1
 C
 Indefinido

— Limite de Cubagem

— N: 1000 Coordenadas Locais

Furo de Sondagem (projecção ±50 m NS)

RS18
 \ histograma dos teores de Nb₂O₅

FIGURA 7.8.18
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 800 N

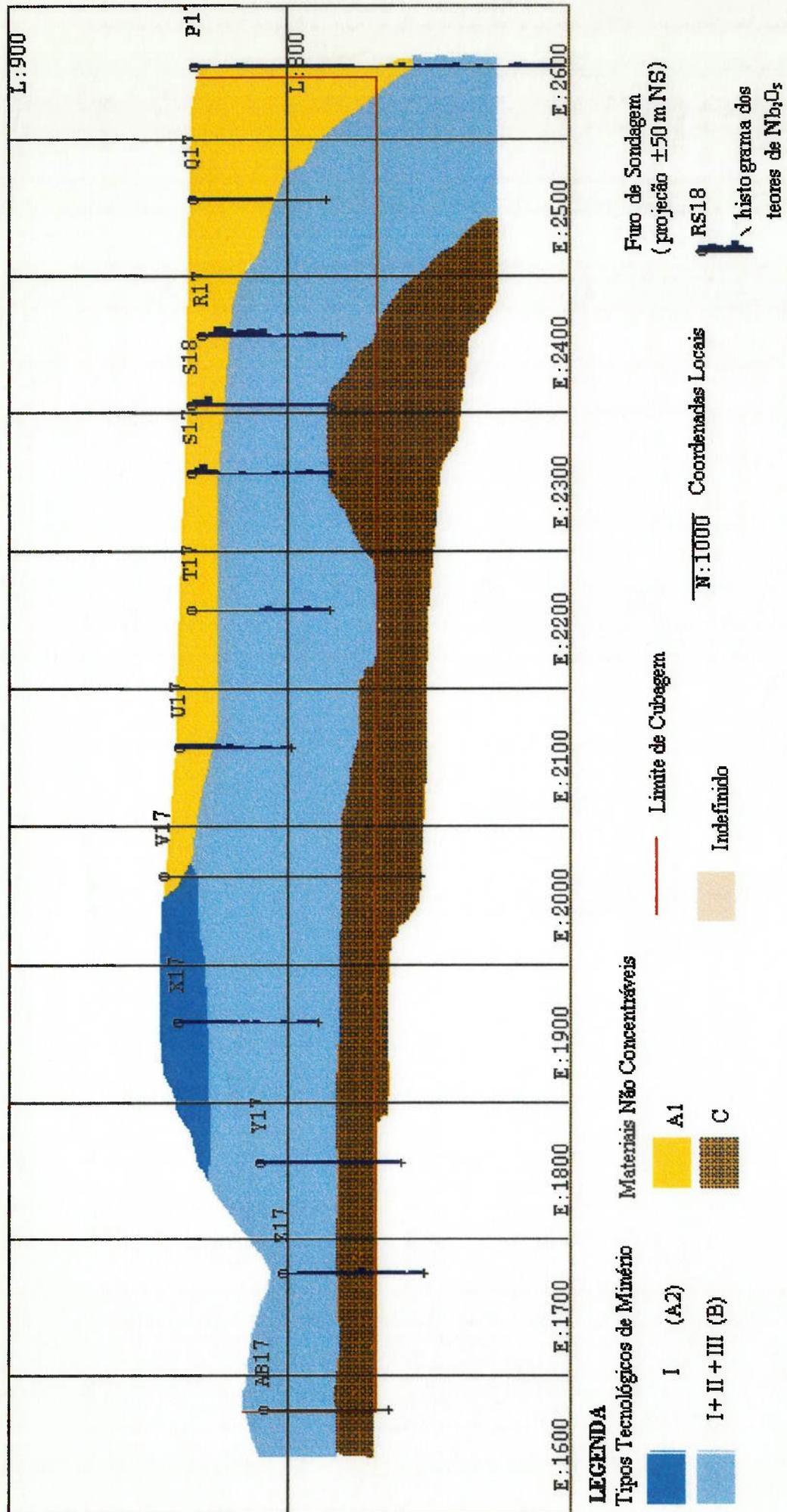


FIGURA 7.8.19
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 900 N

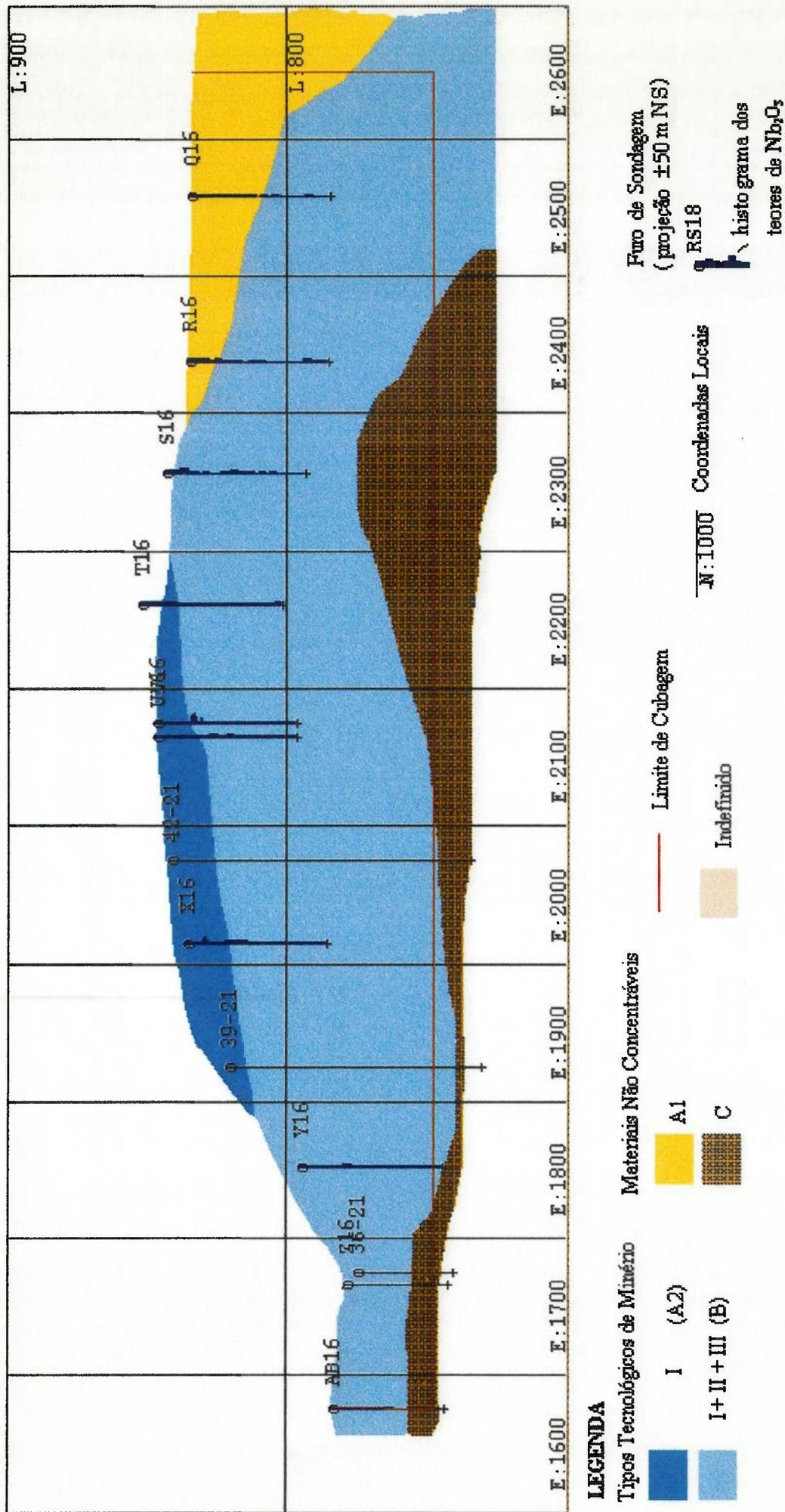


FIGURA 7.8.20
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO - SEÇÃO 1.000 N

Para traçado do limite da rocha na base do corpo mineralizado em estudo, a interpretação mostrou-se complexa pela extrema variação de cota do topo da rocha em pequenas distâncias, aliada a escassas informações. Este fato pode estar relacionado com a presença de falhamentos geológicos nesta área, inclusive como mapeado mesmo em superfície, ou também ser resultado de relevos cárlicos associados ou não ao sistema de falhamentos. Uma terceira alternativa que mereceria investigação mais profunda, se reportaria à presença de blocos ou mesmo fragmentos maiores de rocha residuais na base do manto de alteração, interpretados como rocha fresca na operação de sondagem.

7.8.3 - Definição das Reservas Tecnológicas

A interpolação do modelo de teores com o modelo de tipologia forneceu o quadro de partição de reservas da tabela 7.8.4. Os tipos A tem ocorrência apenas acima da cota 800 e tendem a apresentar teores menores de nióbio, o tipo B entre as cotas 760 e 838, e o tipo C somente ocorre abaixo do nível 800, sendo que a ele se associam os maiores teores de Nb₂O₅.

Tabela 7.8.4
Cálculo das Reservas de Minério Potencial Segundo os Tipos Mineralógicos de Minério

Nível	Tipo A1		Tipo A2		Tipo B		Tipo C		Total	
	massa (1.000 t)	% Nb ₂ O ₅								
760					61	0,61	744	1,23	985	1,14
770					721	0,83	753	1,27	1.474	1,05
780					1.277	0,80	479	1,03	1.756	0,87
790					1.260	0,75	86	0,71	1.346	0,75
800	101	0,45			1.126	0,78			1.227	0,76
810	592	0,47	67	0,41	1.452	0,66			2.111	0,60
820	1.120	0,56	312	0,44	1.994	0,64			3.426	0,60
830	1.303	0,68	390	0,51	827	0,74			2.520	0,67
834	846	0,84	235	0,78	217	0,67			1.298	0,80
838	327	1,17	282	0,78	87	0,51			696	0,93
842	60	0,88	322	0,63					382	0,67
846	19	0,83	282	0,63					301	0,64
850			153	0,86					153	0,86
854			51	1,53					51	1,53
TOTAL	4.368	0,69	2.094	0,65	9.022	0,72	2.062	1,17	17.853	0,76

obs: teor de corte 0,4 % Nb₂O₅

Quanto à partição das reservas totais segundo os tipos de minério, chega-se ao quadro da tabela 7.8.5, onde observa-se que os materiais não concentráveis, tipos A1 e C, constituem parte importante das reservas de minério e do nióbio total do corpo mineralizado.

O minério concentrável representa 63 % do volume de minério potencial, e contém apenas 60% do nióbio contido na área em estudo, significando expressiva redução das reservas preconizadas. Nesta tabela é também indicado o conteúdo de nióbio recuperável nas reservas de minério concentrável, considerando-se os dados de recuperação global do processo segundo apresentado no capítulo 7.7.

Tabela 7.8.5
Partição das Reservas de Minério Potencial Segundo os Tipos Tecnológicos de Minério

Tipo de Minério	Minério		Conteúdo de Nb ₂ O ₅		Conteúdo de Nb ₂ O ₅ recuperável	
	1.000 t	% na reserva	1.000 t	% na reserva	1.000 t	teor Nb ₂ O ₅
Não concentrável (A1)	4.368	25	2.994	22	--	--
I (A2)	2.094	13	1.357	10	407	0,20
I+ II + III (B)	9.022	50	6.754	50	3.377	0,37
Não concentrável (C)	2.062	12	2.420	18	--	--
Total	17.853	100	13.525	100	3.784	0,34

obs: teor de corte 0,4 % Nb₂O₅

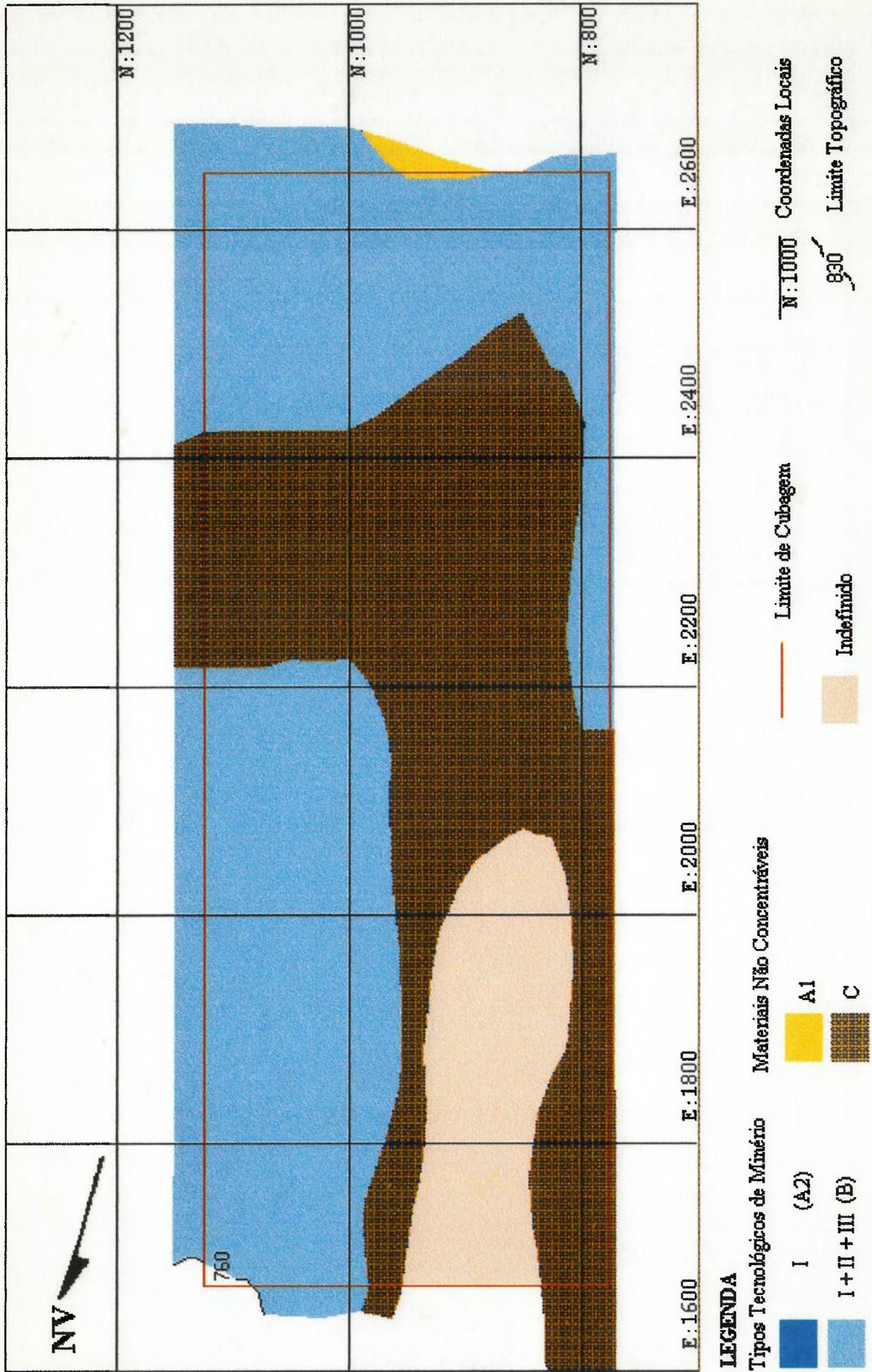


FIGURA 7.8.21
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 760

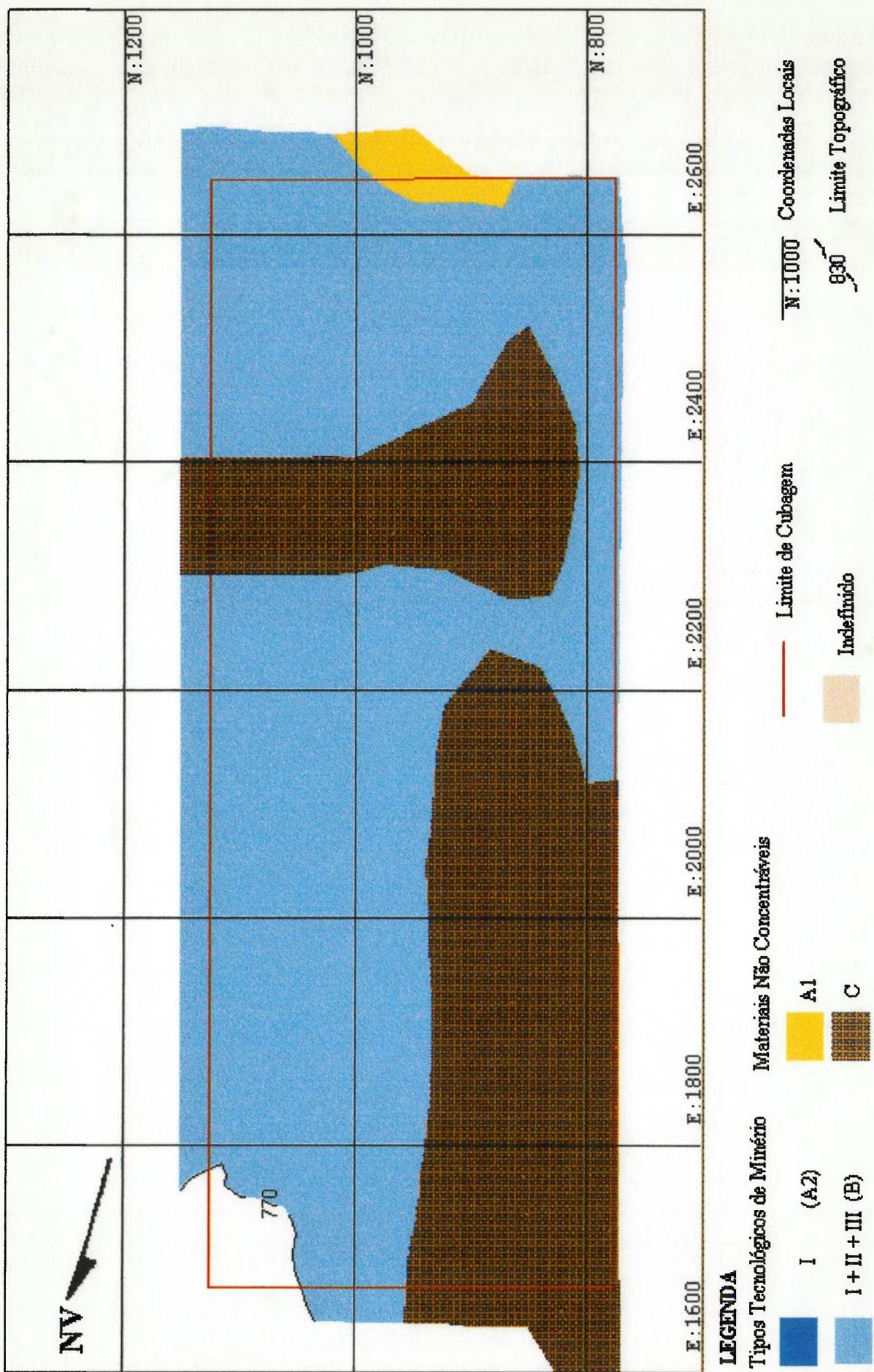


FIGURA 7.8.22
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 770

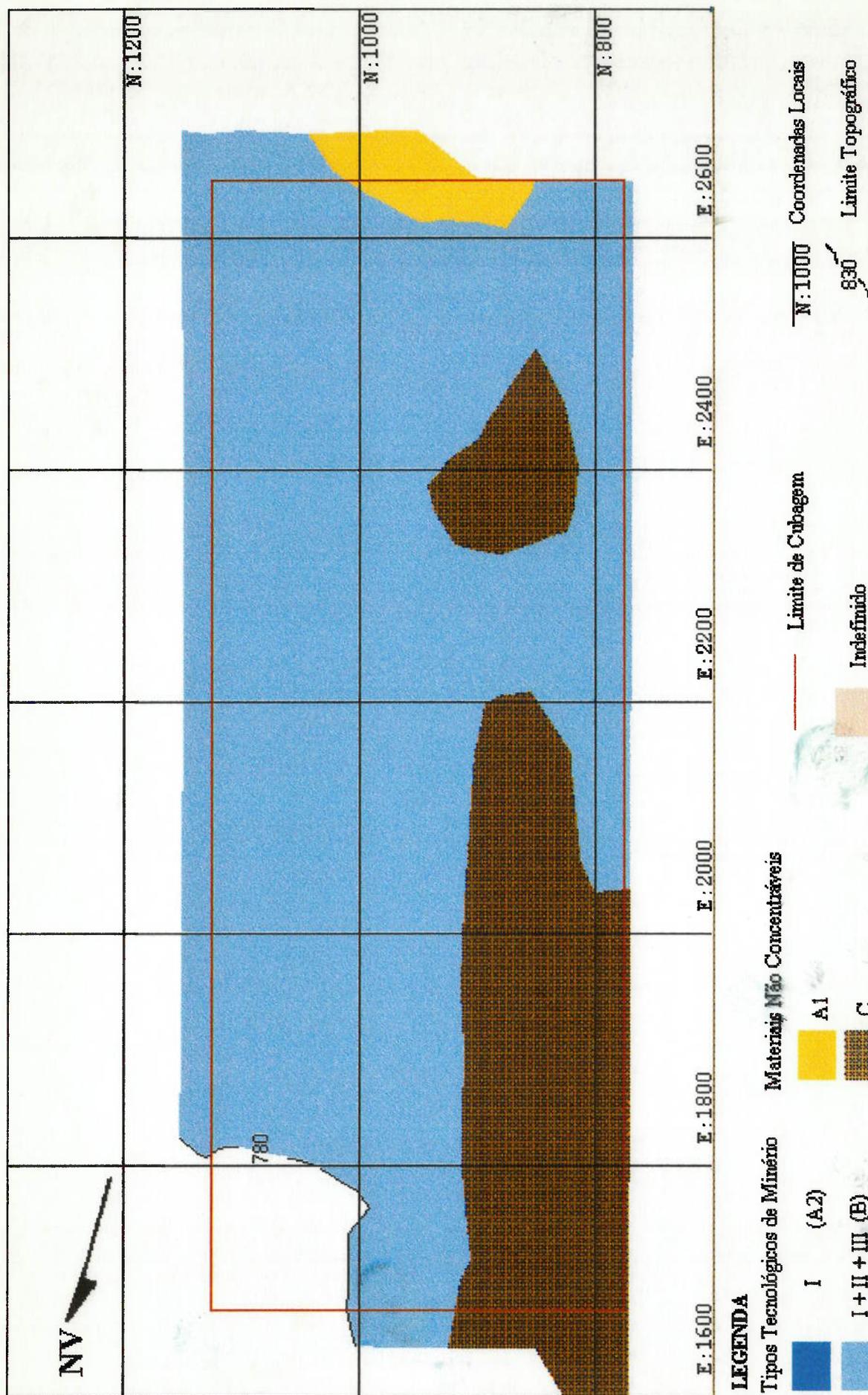


FIGURA 7.8.23
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 780

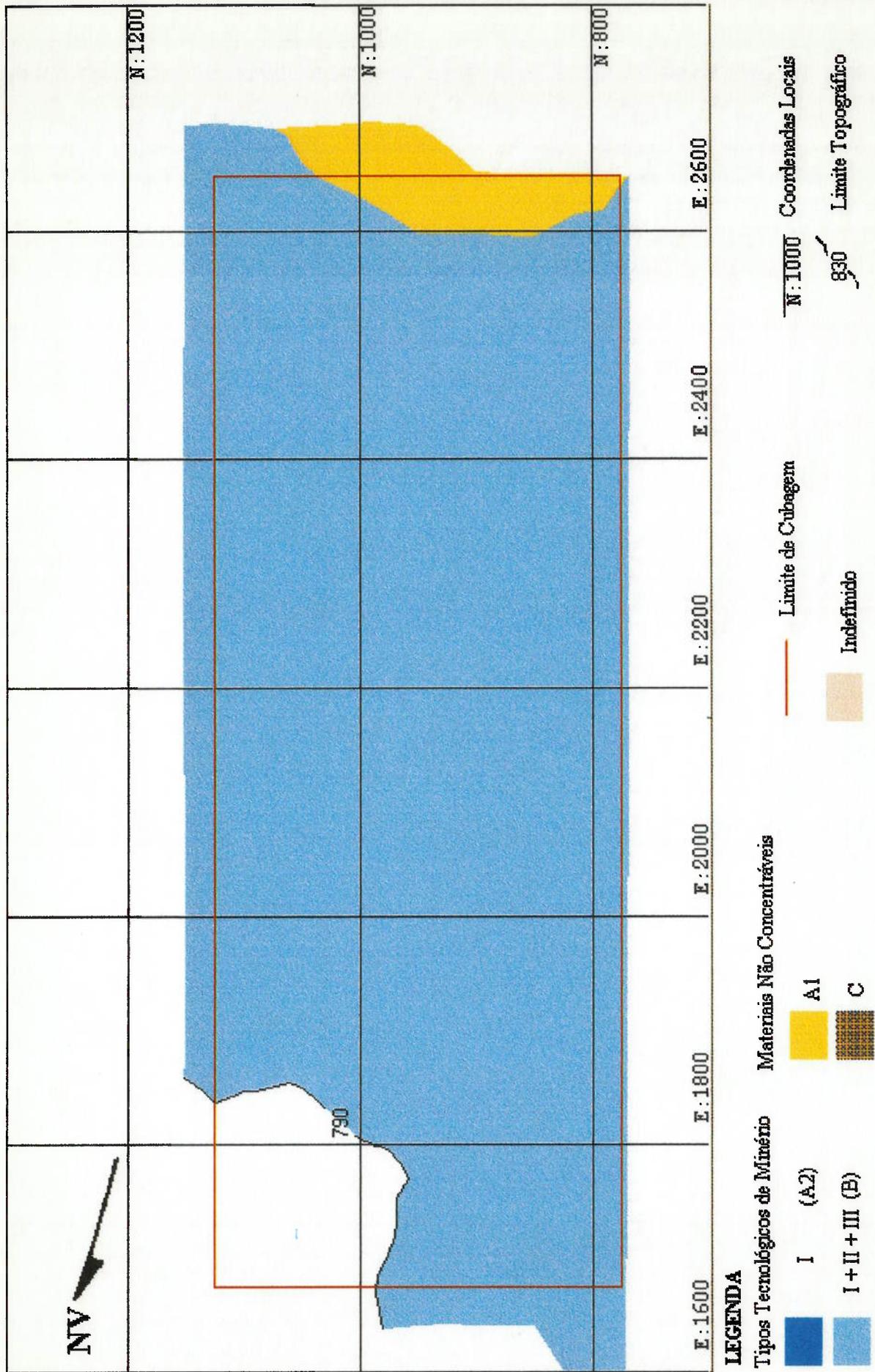


FIGURA 7.8.24
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 790

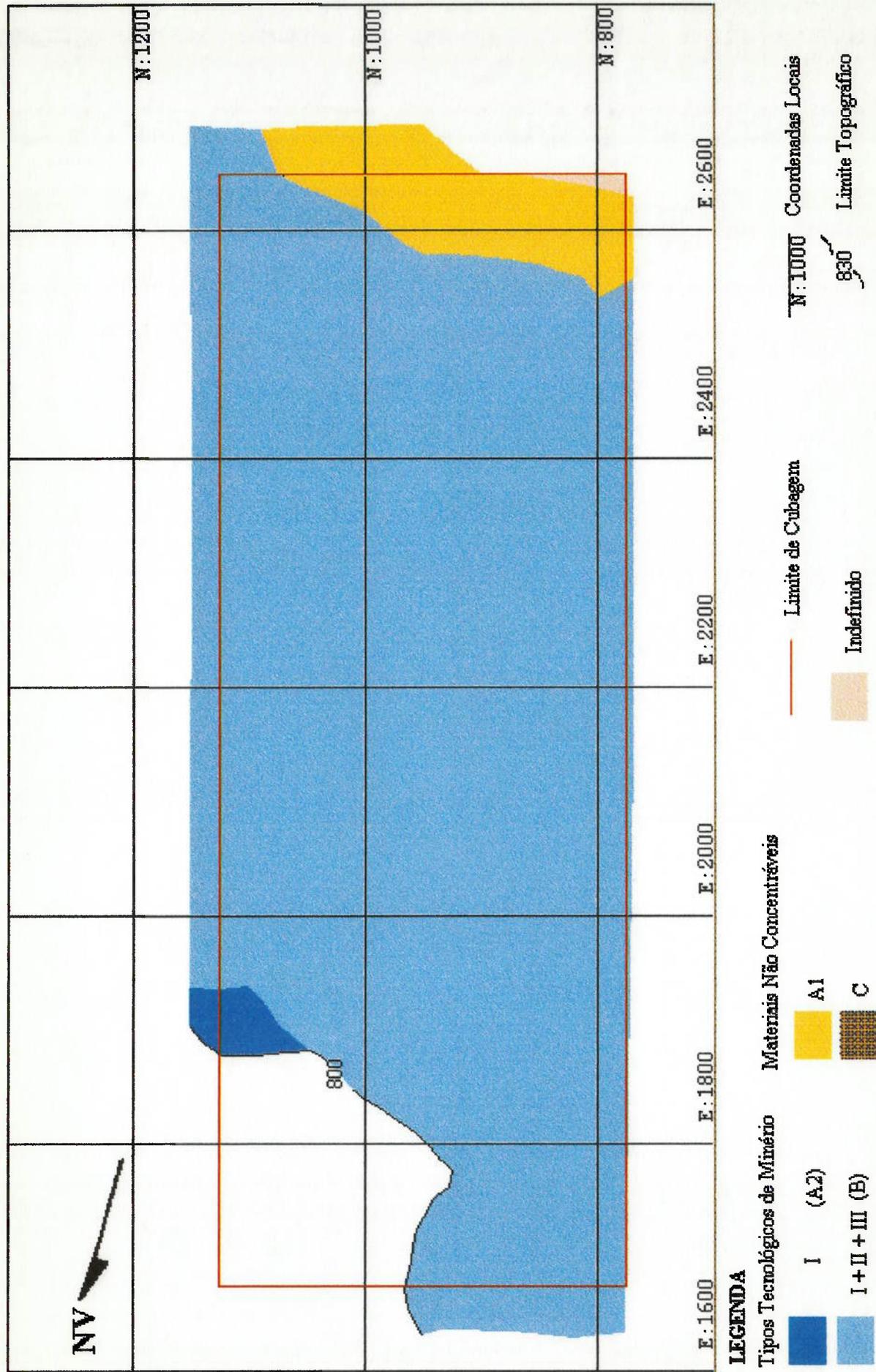


FIGURA 7.8.25
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 800

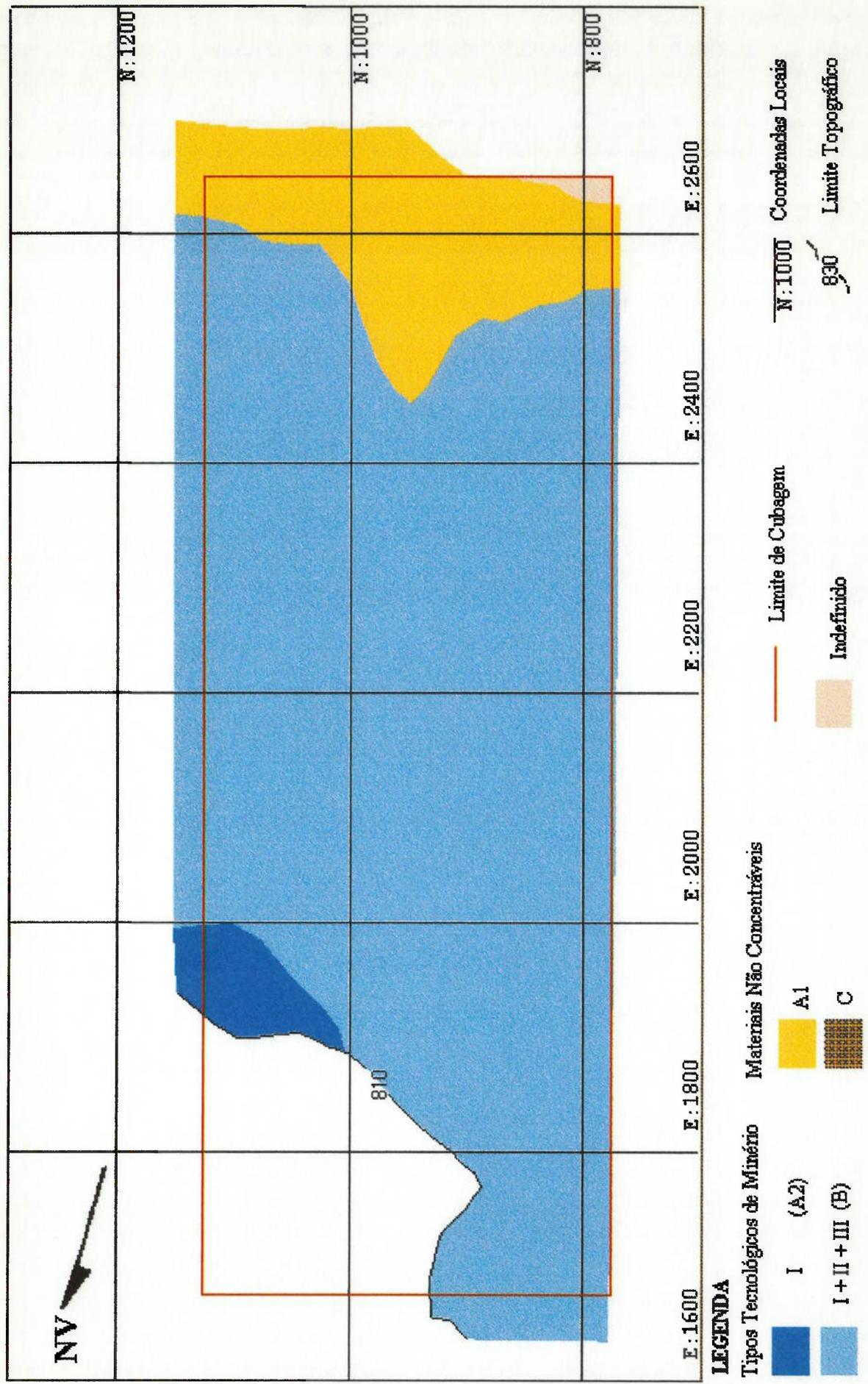


FIGURA 7.9.26
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 810

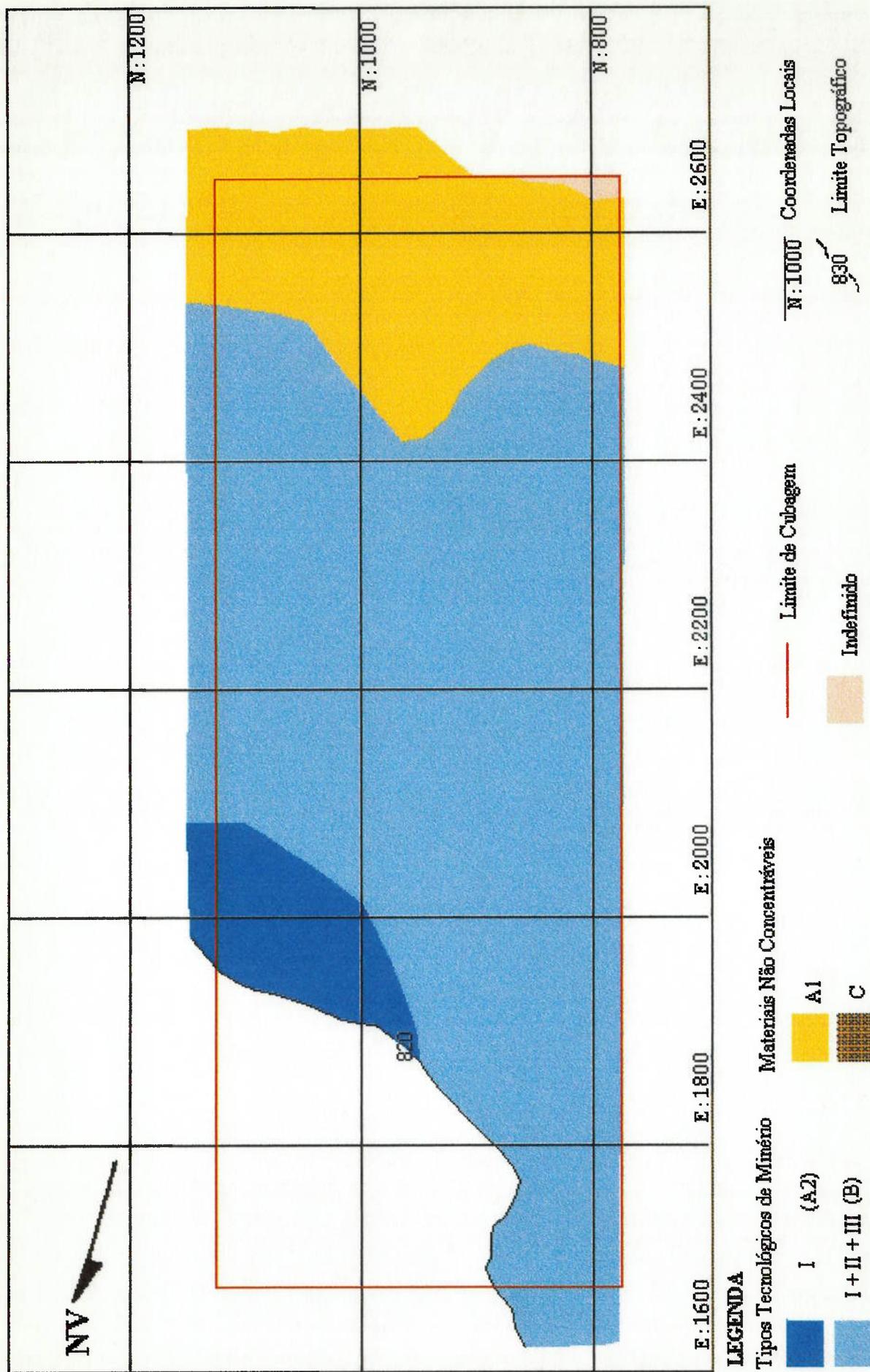


FIGURA 7.8.27
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 820

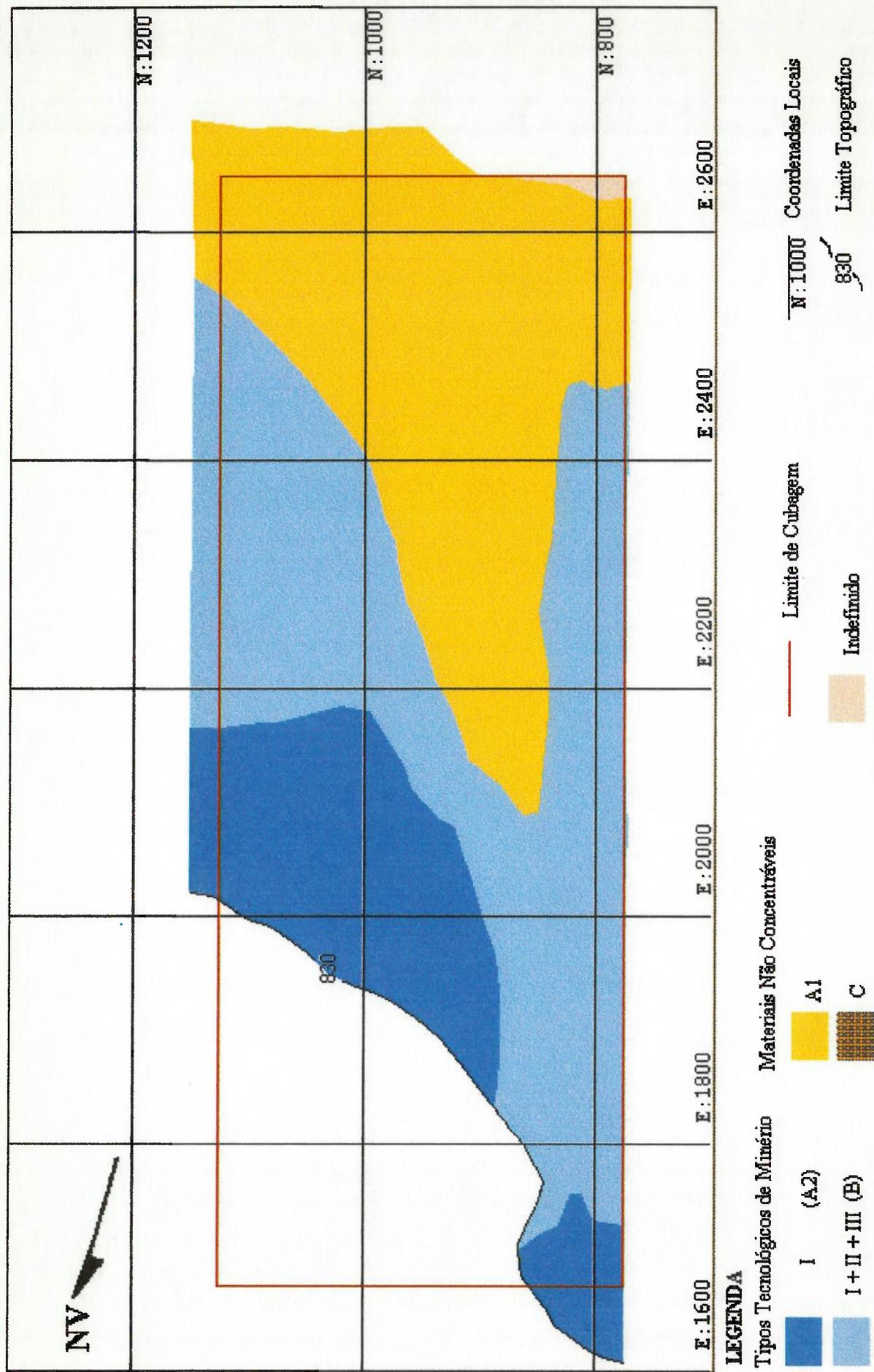


FIGURA 7.8.28
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 830

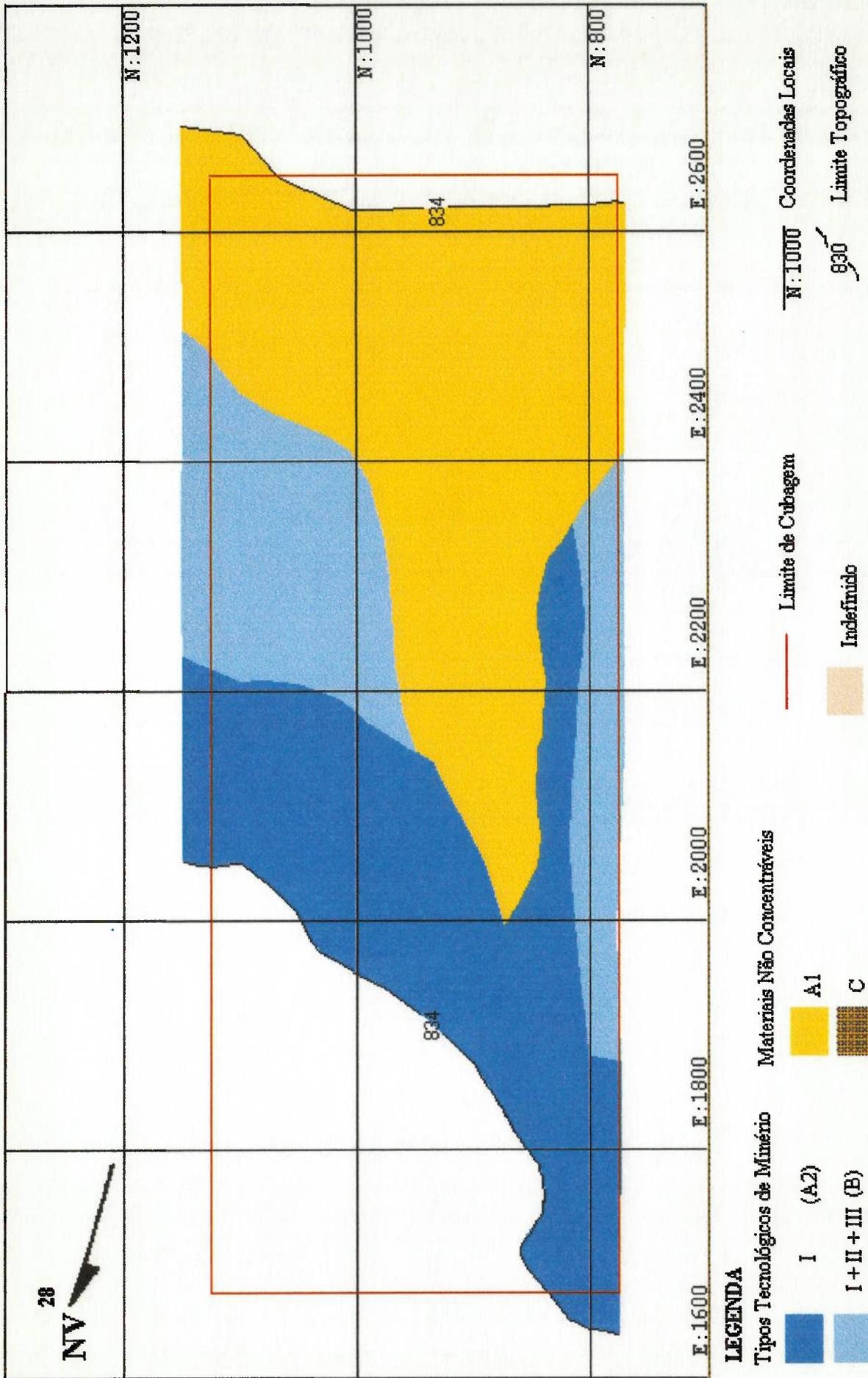


FIGURA 7.8.29
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 834

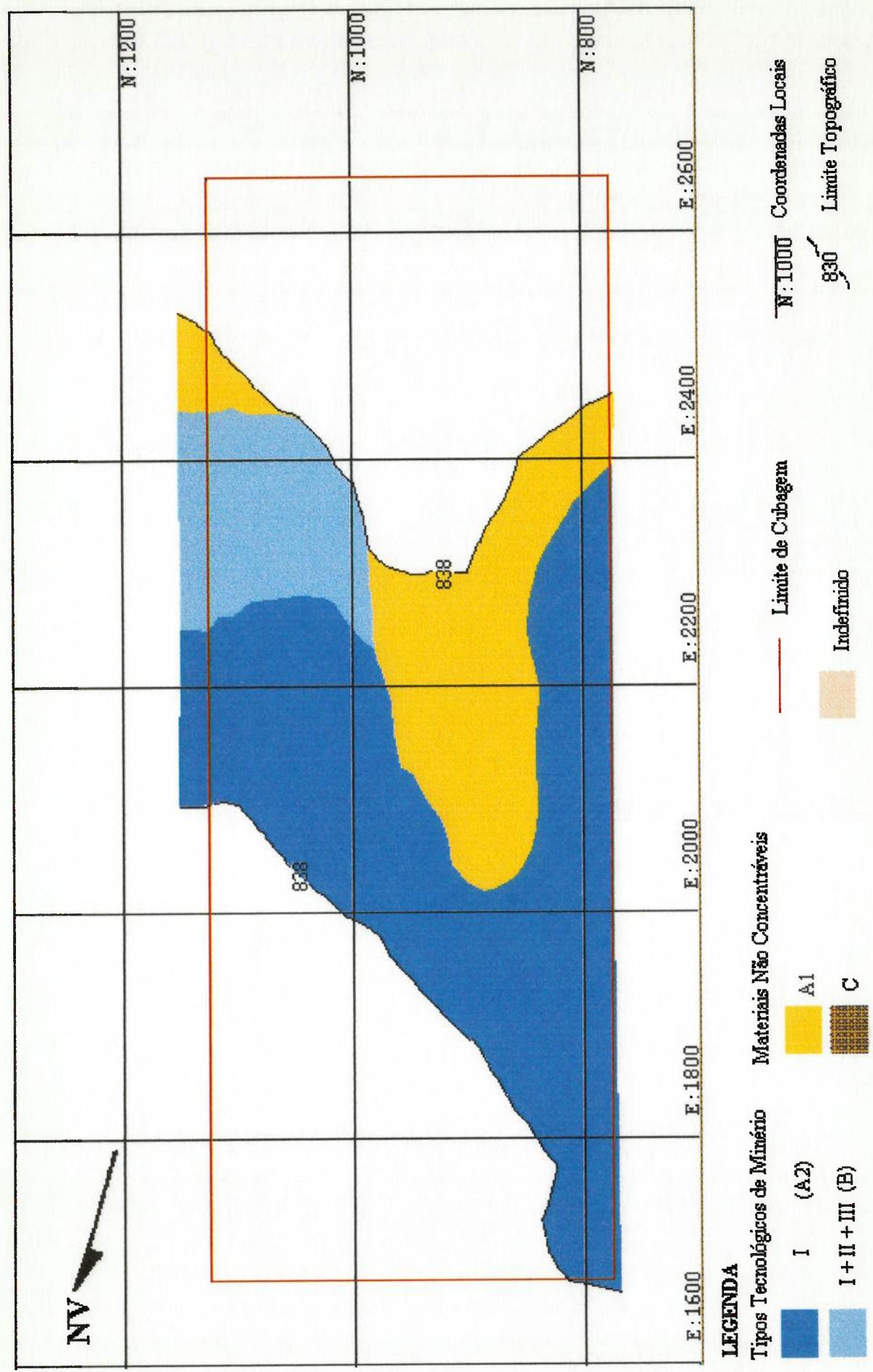
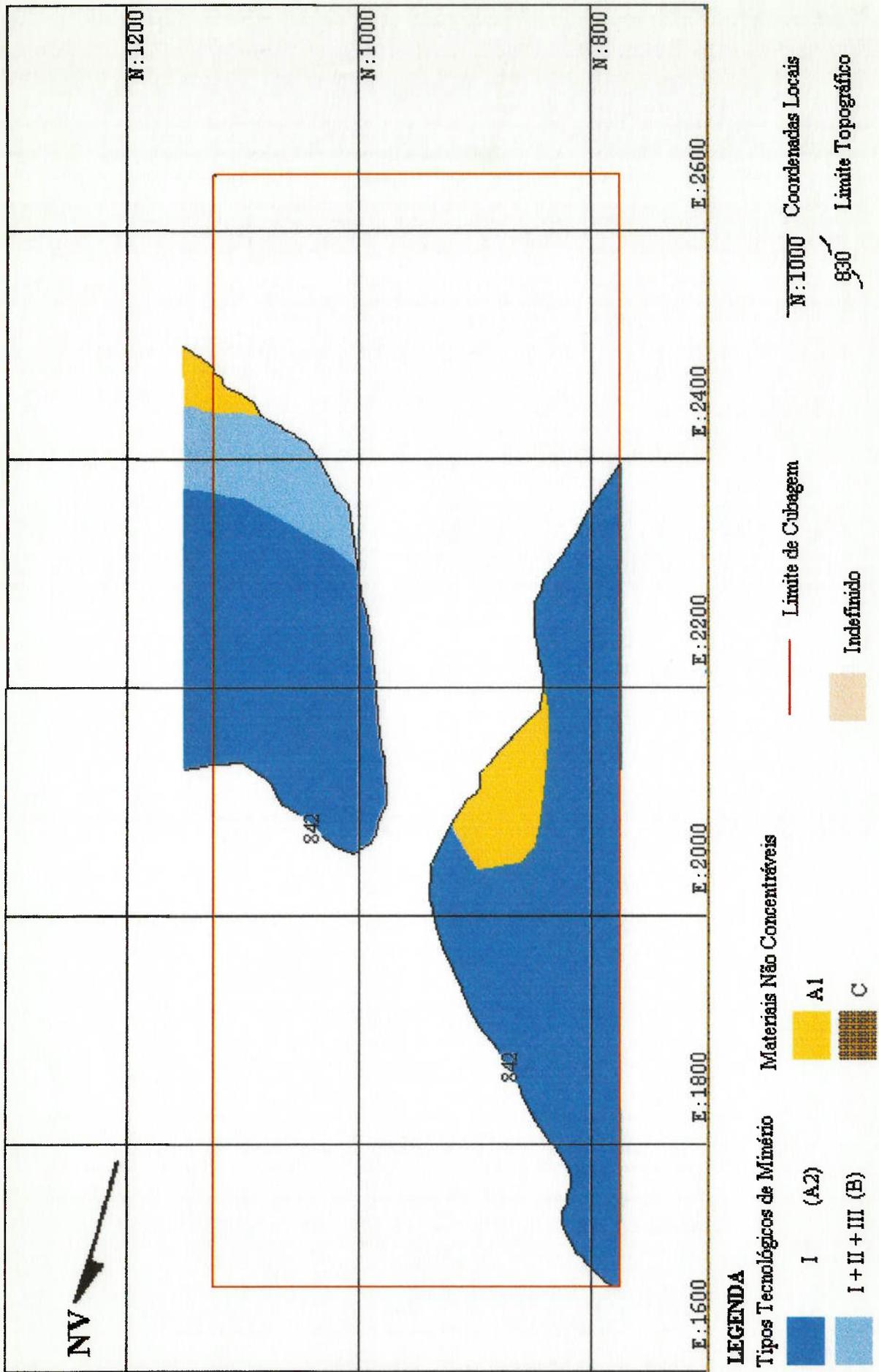


FIGURA 7.8.30
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 838



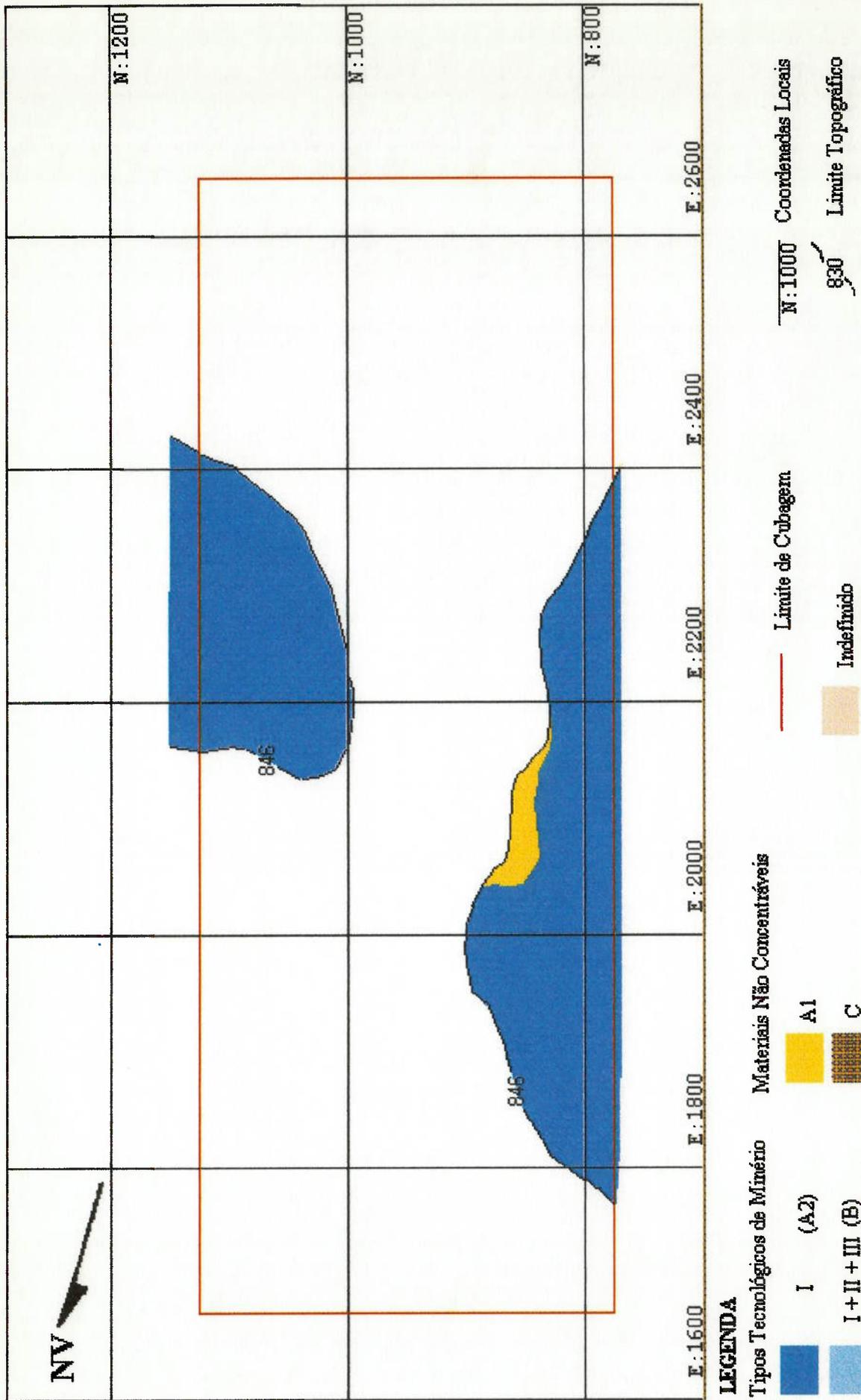
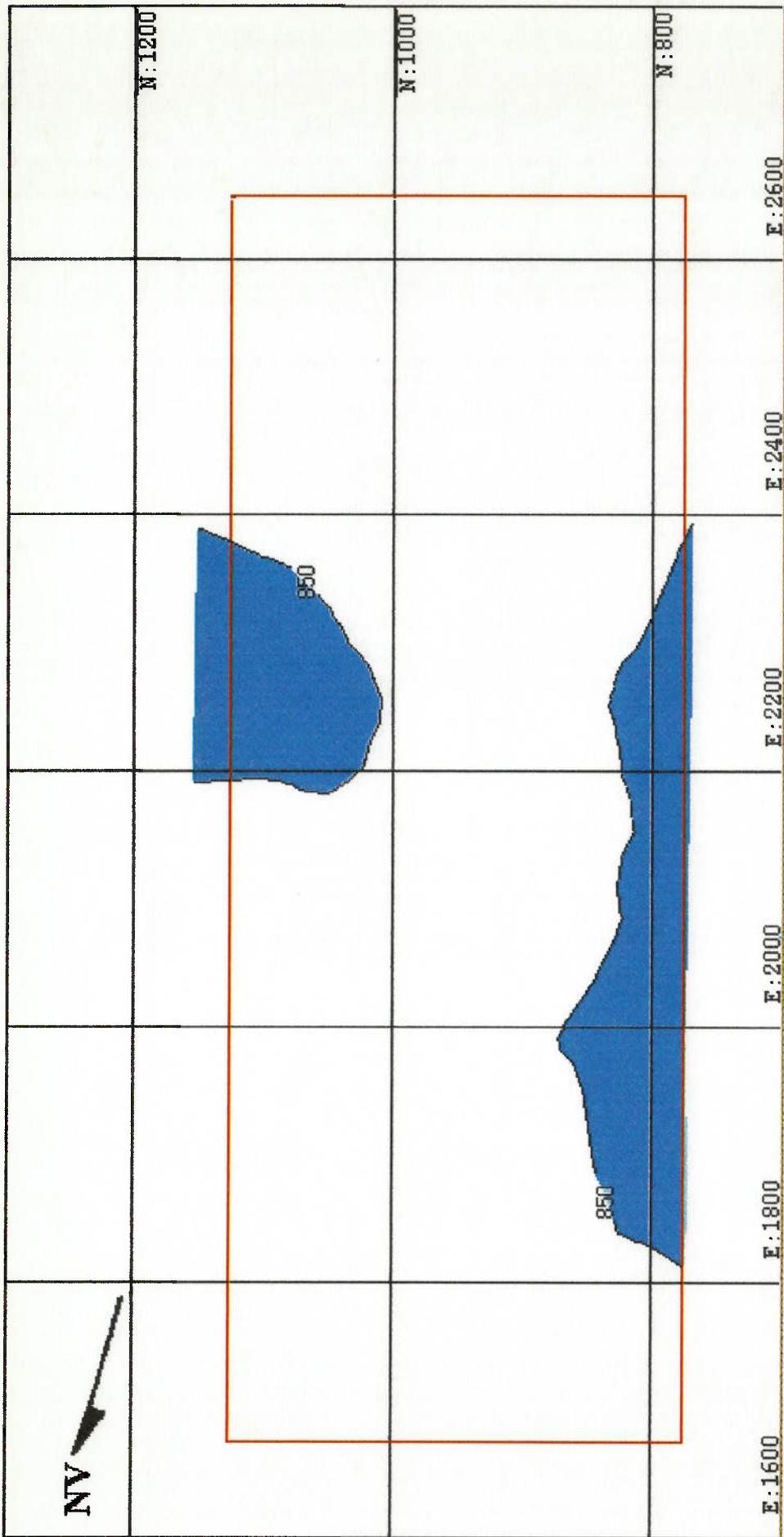


FIGURA 7.8.32
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 846



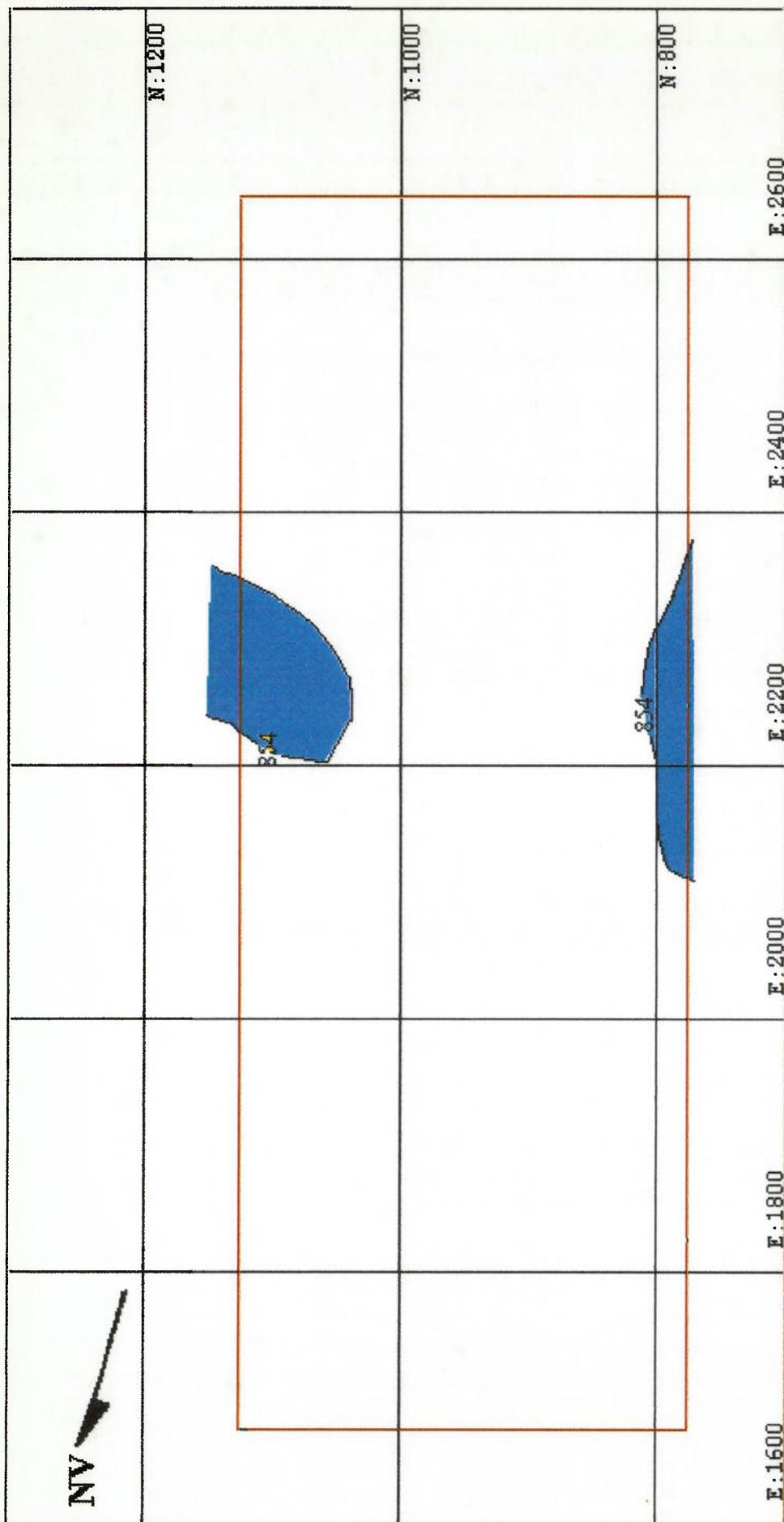
LEGENDA

- Tipos Tecnológicos de Minério
- I (A2)
- I + II + III (B)
- Materiais Não Concentráveis
- A1
- C

- Limite de Cubagem
- Indefinido

- N:1000 Coordenadas Locais
- 830 Limite Topográfico

FIGURA 7.8.33
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 850



LEGENDA

- Tipos Tecnológicos de Minério
- I (A2)
 - I + II + III (B)

- Matérias Não Concentráveis
- A1
 - C

— Limite de Cubagem

Indefinido

N:1000

930

Coordenadas Locais

Limite Topográfico

FIGURA 7.8.34
DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE MINÉRIO NO NÍVEL 854

7.9 - CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO

A caracterização tecnológica conduzida por procedimentos tradicionais de separações minerais e mineralogia por microscopia óptica com algum apoio de análises instrumentais, essencialmente difração de raios-X, mostrou-se adequada e suficiente na definição dos parâmetros do minério críticos para seu processamento. Foi fundamental a aplicação de ensaios de concentração em complementação aos estudos mineralógicos, para averiguação do comportamento do minério na flotação.

A utilização de ferramentas mais sofisticadas, no caso microscopia eletrônica de varredura com sistema de microanálise, esclareceu sobre aspectos dos grãos minerais e associações químicas, tendo auxiliado no entendimento da problemática do minério e sua implicação na qualidade de concentrados de Ba-pirocloro. Tais aspectos, entretanto, na fase de estudo de viabilidade de realização dos estudos, não se mostraram críticos para a definição de alternativas de beneficiamento.

O estudo de amostras típicas de diversos materiais reconhecidos no corpo de minério à luz de descrições interpretativas e de análises químicas, habilitou à definição de vários tipos de minério com características e comportamento tecnológico diferenciados, os quais fornecem concentrados e índices de recuperação no beneficiamento muito distintos. O comportamento do minério no processo não apresenta qualquer relação com os teores de nióbio do minério, se prendendo essencialmente ao grau de cristalinidade e mineralogia, tanto dos minerais de ganga como das espécies de pirocloro portadoras de nióbio.

A caracterização realizada sugeriu a possibilidade de reconhecimento do tipo de minério, com conseqüente indicação de seu comportamento no processo, através dos parâmetros obtidos em descrições litológicas interpretativas, análises químicas completas e determinação da porcentagem de magnéticos. Tal indicação deveria ser investigada com detalhe, pois substituiria parcialmente a prática de caracterização através de ensaios padronizados de flotação em apoio à exploração da mina, reduzindo-a a aferições esporádicas da qualidade do minério.

Os tipos de minério podem ser classificados em três grandes categorias: aqueles que não responderam favoravelmente ao processo conhecido, sendo, no atual estado da arte, considerados como estéreis; os que evidenciaram dificuldades na separação do Ba-pirocloro, gerando produtos de baixo teor; e os que foram passíveis de concentração a níveis aceitáveis.

A interpretação dos dados da tipologia de minério associados com as descrições e análise químicas dos testemunhos de sondagem, possibilitou determinar a distribuição dos materiais no corpo mineralizado, segundo as categorias de materiais não concentráveis (estéreis) e minério. Já a partição das reservas segundo os tipos tecnológicos de minério que respondem ao processo de concentração, teve caráter estimativo, pois para distinção entre eles seriam necessários parâmetros do minério não disponíveis para todo o corpo mineralizado.

Constatou-se que parcela significativa das reservas geológicas, se refere a materiais estéreis, que embora apresentem teores interessantes de nióbio, não respondem adequadamente do ponto de vista tecnológico.

Os tipos de minério que geraram concentrados de baixo teor, passíveis de purificação por tratamento químico, devido a sua localização relativa na jazida e expressão nas reservas, devem ser considerados como minério, embora se façam necessárias investigações tecnológicas adicionais.

Apenas parte da reserva geológica se refere a minério de boa qualidade, que mostrou comportamento adequado no processo corrente de beneficiamento de Ba-pirocloro, gerando concentrado dentro da qualidade esperada.

Os estudos de caracterização mostraram-se fundamentais na definição do corpo de minério passível de exploração econômica, evidenciando que apenas 60 % das reservas geológicas de nióbio contidas na área do projeto, definidas com base nos teores de nióbio, responderam positivamente ao processo de concentração. Evitou-se, assim, o estabelecimento de um empreendimento sobre premissas falsas de reservas de minério, que conduziria a uma empreitada de fracasso.

O projeto do empreendimento apoiou-se, então, numa reserva de minério bem menos expressiva que a projetada pela pesquisa geológica, fato que contribuiu significativamente no comprometimento da viabilidade econômica de exploração do depósito mineral^{127,128}.

Além das questões tecnológicas envolvidas no aproveitamento deste minério, que puderam ser equacionadas a um nível adequado de confiança, esta jazida apresenta uma limitação para seu planejamento de lavra, face a seu posicionamento na borda da área da GOIASFÉRTIL, limite com a MINERAÇÃO CATALÃO.

A sua extração por uma cava individualizada pressuporia expressiva redução de reservas que permaneceriam no terreno por questões geotécnicas. Nesta alternativa o porte da jazida reduziu-se substancialmente, e o empreendimento mostrou-se não atrativo do ponto de vista econômico ^{82,83}.

A outra alternativa, que se constituiu na opção adotada pela GOIASFÉRTIL, envolveria acordos com a MINERAÇÃO CATALÃO visando ampliar a cava estendendo-a na área vizinha, de forma a aproveitar toda a reserva de minério.

8. CONCLUSÕES

A caracterização tecnológica se insere no escopo dos estudos para aproveitamento econômico do minério, fazendo a conexão entre as suas características e sua aplicação industrial.

Trata-se de uma especialização relativamente recente, que vem se aprimorando em seus conceito / objetivo / técnicas, e se consolidando como um segmento da mineralogia aplicada, porém com uma abrangência bem mais ampla.

Embora apoiada em conhecimento básico e recorrendo a técnicas da mineralogia clássica, extrapola a mesma por lidar com fundamentos de áreas de aplicação tanto em geociências como em engenharia de minas, tais como pesquisa, avaliação de jazidas, amostragem e beneficiamento .

Sua importância e aplicabilidade estão diretamente correlacionadas com o grau de interação com os segmentos de interface com que é realizada. Estudos de caracterização desvinculados dos objetivos de beneficiamento e do contexto de exploração mineira, se resumem a informações mineralógicas de aplicação restrita.

A caracterização do corpo mineralizado, pressupõe idênticas premissas do estudo do minério, além de maior envolvimento com aspectos de pesquisa e avaliação de jazidas, permanecendo estreitamente vinculada com conceitos de minério técnico e economicamente aproveitável.

O estudo de caso apresentado nesta tese trata-se de um minério complexo, tanto no que se refere ao contexto da mineralização quanto do beneficiamento, e exemplifica de uma forma bastante completa, todo o envolvimento da caracterização de um depósito mineral com as diversas áreas de interface. Ressalta, também, de maneira clara e marcante, a sua importância na avaliação das possibilidades e condições para aproveitamento econômico da jazida e do minério, desde que realizada interativamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HENLEY, K.J. Ore-dressing mineralogy: a review of techniques, applications and recent developments. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, Johannesburg, 1981. ICAM'81: proceedings, Johannesburg, Geological Society of South Africa, 1983. p.175-200. (Special Publication, 7)
- 2 ISOITKO, V.M. Statistical methods in technological mineralogy. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY 9, Las Vegas, 1989. Process Mineralogy IX: proceedings. Warrendale, TMS, 1990. p.201-204.
- 3 BLAZY, P. et BODU, R. La minéralurgie, aujourd'hui et demain , 2^e partie. Industrie Minérale / Mines et Carrières, p.357-363, juin, 1986.
- 4 AMSTUTZ, G.C. Mineralogy and Petrology applied to exploration. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, Johannesburg, 1981. ICAM'81: proceedings, Johannesburg, Geological Society of South Africa, 1983. p.1-4. (Special Publication,7)
- 5 Etapas de um empreendimento mineiro. Construção Pesada, v.10, n.123, p.42-47, abril, 1981.
- 6 SCHAPIRO, N.; MALLIO, W.J.; PARK, W.C. Process mineralogy in Ore deposits development. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY, Chicago, 1981. in Process Mineralogy : proceedings. New York, Metallurgical Society of AIME, 1981. p.25-30.
- 7 SILVEIRA, B.V et al. Projeto de mineração: Uma abordagem geometalúrgica. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, São Paulo, SP, 1990. Anais, São Paulo, EPUSP, 1990. p.45-58.
- 8 ZIESEMER, L.; HARTMANN, J.R.; TORRES, W.F. Caracterização e Pesquisa do jazimento de fosfato de Anitápolis, SC . In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE TÉCNICAS EXPLORATÓRIAS EM GEOLOGIA, 2, Gravatal, 1980. Anais. Florianópolis, SBG, 1980. p.97-108.
- 9 ZIESEMER, L e KAHN, H. O minério Residual da jazida de Anitápolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Balneário de Camboriú, 1980. Anais. São Paulo, SBG, 1980. v.4, p.2376.
- 10 TASSINARI, M.M.M.L; KAHN, H. Caracterização tecnológica de minérios auríferos: um estudo de caso: O minério primário da mina de Salamangone, AP. São Paulo, EPUSP, 1996. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamernto de Engenharia de Minas, BT/PMI/051).
- 11 HAGNI, R.D. Recent progress in the field of process mineralogy. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY 6, New Orleans, 1986. Process Mineralogy VI: proceedings. Warrendale, Metallurgy Society of AIME, 1986. p.27-34.
- 12 JONES, M.P. Applied mineralogy: a quantitative approach. London, Graham and Trotman, 1987.

- 13 GY, P.M. The sampling of particulate materials: a general theory. International Journal of Mineral Processing, v.3, p.289-312, 1976.
- 14 PITARD, F.F. Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice. Boca Raton, CRC Press, 1992. Vol. I.
- 15 GY, P.M. Gy's Sampling Slide Rule. Canadian Min. Journal, v.87, n.7, p.58-62, 1965.
- 16 RATTI, G. Análises Químicas na Engenharia Mineral. São Paulo, 1994, 83ps..Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 17 CÁNENA, C.; BERNUY, O. Mineral beneficiation and ore microscopy: some relevant methodological aspects. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY, Chicago, 1981. Process Mineralogy: proceedings, New York, Metallurgical Society of AIME, 1981. p.191-9.
- 18 FERRARA, G.; PRETI, U.; MELOY, T.P. Inclusion shape, mineral texture and liberation. International Journal of Mineral Processing, v.27, p.295-308, 1989.
- 19 ARMSTRONG, D.G. Open and closed circuit grinding on a laboratory scale. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 5, London,1960. Proceedings, London, Institution of Mining and Metallurgy, 1960. p.67-78.
- 20 COLEMAN, R.L. Metallurgical testing procedures. In: MULAR,A.L.; BHAPPU,R.B. eds. Mineral Processing Plant Design, Society of Mining Engineers of AIME, 1980. Cap.9, p.144-82.
- 21 FINCH, J.A.; KITCHING, R.; ROBERTSON, K.S. Laboratory Simulation of a closed circuit grind for heterogeneous Ore. C.I.M. Bull., vol.72, p.198-200, 1979.
- 22 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PERNAMBUCO Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia: in memorian Professor Paulo Abib Andery, Recife, ITEP, 1980.
- 23 KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Introduction to Mineral Processing. John Wiley, 1982.
- 24 ALLEN, T. Particle Size Measurement. 4th ed London, Chapman and Hall, 1990. (Powder Technology Series).
- 25 BARTH, H.G.; SUN, S.T. Particle size analysis. Analytical Chemistry, v.57, p.151-75R, 1985.
- 26 BARTH, H.G.; SUN, S.T.; NICKOL, R.M. Particle size analysis. Analytical Chemistry, v.59, p.142-62R, 1987.
- 27 CIMAQ S.A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO. Cicloclassificador: manual de operação. s.l.,1990.
- 28 RAFFINOT. P. Le microciclone de laboratoire. Revue de l'Industrie Minérale, Section C, v.34, n.602, p.1016-1023, 1953.
- 29 ALFANO, G.; CARBINI, P. ; DEL FÀ, C. I MASSACCI, P. Contributo alla conoscenza, progettazione e impiego del microciclone classificatore. L'Industria Mineraria,v.19, p.495-502, set., 1968.
- 30 RAWLE, A. The basic principles of particle size analysis. Malvern Instruments Ltd, 1993 / Malvern Special Publication /.

- 31 KAYE, B.H. Direct characterization of fine particles. New York, John Wiley, 1981. (Chemical analysis: a series of monographs on Analytical Chemistry and its Applications, 61).
- 32 PARFENOFF, A.; POMEROL, C. et TOURENG, J. Les minéraux en grain. Paris, Masson, 1970.
- 33 ZUSSMAN, J. Physical methods in determinative mineralogy. Academic Press, London, 1977.
- 34 HUTCHISON, C.H. Laboratory handbook of petrographic techniques. New York, John Wiley, 1974.
- 35 CHEN, T.T.; DUTRIZAC, J.E Practical mineralogical techniques of hidrometallurgical products. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY 9, Las Vegas, 1989. Process Mineralogy IX: proceedings, Warrendale, TMS, 1990. p.289-309.
- 36 BROWNING, J.S. Heavy liquids and procedures for laboratory separation of minerals. Washington, U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1961 (U.S.B.M. Information Circular 8007).
- 37 MARSHALL, J.E.F. Laboratory techniques used in the separation of minerals in tetrabromoethane. s.l., s.ed., 1961.
- 38 MASINI, E.A.; SANT'AGOSTINO, L.M. ; KAHN, H. Separação de minerais via método magneto-densitário. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2, São Paulo, 1993. Anais. Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP / Dipartimento di Ingegneria Mineraria. Università di Cagliari, 1993. v.2, p.809-241.
- 39 ANDRES, U.T. Magnetohydrodynamic and magnetohydrostatic separation : A new prospect for mineral separation in the magnetic field. Minerals Science Engineering., vol.7, p.99-107, 1975.
- 40 LOMBAARD, T.; HIEMSTRA, S.A. Development of an apparatus for the magnetohydrostatic separation of minerals. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, 1981. Proceedings. Johannesburg, Geological Society of South Africa, 1983. p.485-9 (Geological Society of South Africa Special Publication,7).
- 41 RICHARD MOZLEY LTD Mozley: operating manual for laboratory separator, s.l., 1984.
- 42 MCANDREW, J. Calibration of a Frantz isodynamic separator and its application to mineral separation. Proceedings. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, n.181, p.58-73, 1957.
- 43 ZIMMELS, Y.; LIN, I.J. Advances in magnetic separation techniques for mineralogical studies. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, 1981, Proceedings: Johannesburg, Geological Society of South Africa, 1983. p.491-8. (Geological Society of South Africa Special Publication, 7).

- 44 DELBONI JR., H. Metodologia para a determinação de parâmetros magnéticos dos minerais. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 3 / ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E HIDROMETALURGIA, 15, São Lourenço, 1992. Tecnologia Mineral I: anais. Belo Horizonte, ABTM, 1992. vol.1, p. A, p.47-61.
- 45 NESSET, J.E.; FINCH, J.A. Determination of magnetic parameters for field-dependent susceptibility minerals by Frantz isodynamic separator. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy. Section C, v.89, C161-166, Dec. 1980.
- 46 SVOBODA, J.; ROOS, V.E. Particle capture in the matrix of a magnetic separator. International Journal of Mineral Processing, 27, p.75-94, 1989.
- 47 FINCH, J.A.; LEROUX, M. Selecting test conditions for high gradient magnetic separation. International Journal of Mineral Processing, v. 9, p.329-341, 1982.
- 48 RANC, C. Conception d'un nouveau séparateur magnétique à haute intensité à aimants permanents. Industrie Minérale. Serie Les Techniques, p.82-6, aout/sept. 1989.
- 49 FREVEL, L.K. Quantitative matching of powder diffraction Patterns. Advances in X-ray Analysis, v.20, p.15-25, 1977.
- 50 HOOTEN, D.H.; GIORGETTA, N.E. Quantitative X-ray analysis by a direct calculation method. X-ray Spectrometry, v.6, p.2-5, 1977.
- 51 CULLITY, B.D. Elements of X-ray diffraction. 2º edition Reading, Addison-Wesley 1978 , (Addison-Wesley Series in Metallurgy and Materials).
- 52 VILLIERS, J.P.R. Applications of X-ray diffraction analysis in the exploration, mining and processing of materials. In: BUTLER, L.R.P., ED. Analytical chemistry in the exploration, mining and processing of materials. Oxford, Blackwell, 1986. P.243-54.
- 53 BISH, D.L. et al. Modern powder diffraction. Reviews in mine and others: modern powder diffraction. Reviews in Mineralogy, v.20, 1989.
- 54 LYMAN, C.E. Scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and analytical electron microscopy: a laboratory Workbook. New York, Plenum, 1990.
- 55 GOLDSTEIN, J.L et al. Scanning electron microscopy and X-ray analysis, 2ª ed., New York, Plenum, 1992.
- 56 REED, S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. Cambridge University Press, 1996.
- 57 WILLIS, J.P. Applications of X-ray fluorescence Spectrometry and the electron microprobe in the exploration, mining and Processing of materials. Geochemistry Department, University of Cape Town, RSA, p.45-56, 1986.
- 58 CHAUVIN, W.J. Quantitative energy dispersive X-ray microanalysis. In: Short course in applications of electron microscopy in the earth sciences, s.l. Mineralogical Association of Canada, 1985. p.189-213.
- 59 MACKENZIE, R.C. Differential thermal analysis. London, Academic Press, 1972. 2v.
- 60 BISH, D.L.; DUFFY, C.J. Thermogravimetric analysis of minerals. In: STUCKI, J.W.; BISH, D.L., eds. Thermal Analysis in Clay Science. Boulder, The Clay Minerals Society, 1990. P.95-157. (CMS Workshops Lectures, 3).

- 61 ADAMS, M.D. Quantitative mineralogical analysis using Fourier-transform infrared spectrophotometry. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 3. Pretoria, 1991. Papers. s.l., s.n., 1991. v.1, Paper 1.
- 62 MCMILLAN, P.F.; HOFMEISTER, A.M. Infrared and Raman spectroscopy. In: Reviews in Mineralogy, v.18, p.99-150, 1988.
- 63 MARIANO, A.N. Cathodoluminescence emission spectra of rare earth element activators in minerals. Reviews in Mineralogy, v.21, p.339-348, 1989.
- 64 WAYCHUNAS, G.A. Luminescence, X-ray emission and new spectroscopies. Reviews in Mineralogy, v.18, 1988.
- 65 HEALD-WETLAUTER, P.; FOLEY, N.K.; HAYBA, D.O. Applications of doubly polished sections to the study of ore deposits. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY 2, 1982. / Proceedings /. s.l., s. de., 1982. p.451-468.
- 66 HAGNI, R.D. The application of darkfield reflected-light microscopy in the study of polished and thin sections. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 3. Pretoria, 1991. Papers. s.l., s.n., 1991. v.1, Paper 22.
- 67 KING, R.P. Stereological methods for the prediction and measurement of mineral liberation. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, 1981, Proceedings: Johannesburg, Geological Society of South Africa, 1983. p.443-7. (Geological Society of South Africa Special Publication, 7).
- 68 NEILSON, M.J.; BROCKMAN, G.F. The error associated with point counter. American Mineralogist, v.62, p.1238-44, 1977.
- 69 FRANGIPANE, M.; SCHIMD, R. Point-count and it's errors: a review. Schweizerische Mineralogische Petrographische Mitteilungen, v.54, p.19-31, 1974.
- 70 PETRUK, W. Measurements of mineral liberation in connection with mineral beneficiation. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON PROCESS MINERALOGY, 9, Las Vegas, 1989. Process Mineralogy IX: proceedings. Warrendale, TMS, 1990, p.31-6.
- 71 KING, R.P. Quantitative characterization of mineralogical texture by image analysis. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 3. Pretoria, 1991. Papers. s.l., s.n., 1991. v.1, Paper 28.
- 72 LLOYD, G.E. Review of instrumentation, techniques and applications of SEM in mineralogy. In: Short course in applications of electron microscopy in the earth sciences, s.l. Mineralogical Association of Canada, 1985. p.151-188.
- 73 SAKTHIVEL, A.; YOUNG, R.A. User's guide to programs DBWS-9006 and DBWS-9006PC for Rietveld analysis of X-ray and neutron powder diffraction patterns. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 1992.
- 74 YOUNG, R.A. Using the Rietveld method at RSS-92. 1992. (CPB Publication 129).
- 75 BISH, D.L.; POST, J.E. Quantitative mineralogical analysis using the Rietveld full-pattern fitting method. American Mineralogist, v.78, p.932-40, 1993.

- 76 CLARK, I.; HOULDING, S.; STOAKES, M. Direct geostatistical estimation of irregular 3D volumes. / Apresentado ao 22º International Symposium on the Application of Computers and Operational Research in the Mineral Industry, Berlim, 1990 /
- 77 CLARK, I. Practical kriging in three dimensions. Computers and Geosciences, v.3, 1977
- 78 HOULDING, S.W. Computer Modeling Limitations and New Directions. S.I., Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1990.
- 79 HOULDING, S.W. 3-D computer modeling. Engineering and Mining Journal, v.189, n.8, p.45-7, Aug. 1988.
- 80 HOULDING, W.S. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization. Berlin, Springer, 1994.
- 81 ROSS, M. The implementation of appropriate technology in computer aided mine planning. / Apresentado ao Executive Education Seminar Impact of Computers on Mining Productivity, Vancouver, 1990/
- 82 GIBBS, B. Mineral industry software. Mining Annual Review, p.219-35, june 1990.
- 83 GIBBS, B. Mineral industry software. Mining Annual Review, p.197-205, june 1991.
- 84 GIBBS, B. Mineral industry software. Mining Annual Review, p.191-199, june 1992.
- 85 CUNNINGHAM, L.D. Columbium. In: U.S.BUREAU OF MINES. Minerals Facts and Problems. Washington, U.S.Government Printing Office, 1985. p.185-96 (Bureau of Mines Bulletin,675).
- 86 KORINEK, G.J. Niobium. Metals and Minerals Annual Review, v.2, p.62-3, 1995.
- 87 PENA, F.E. Perfil analítico do pirocloro (nióbio). 2.ed.rev.atual.Brasília, DNPM, 1989. (Boletim, 18).
- 88 SILVA, A.B. e ISSA FILHO, A. Recursos mundiais de nióbio. São Paulo, CBMM, s.d. (Nióbio em Perspectiva, 3/88).
- 89 US BUREAU OF MINES. Niobium: Minerals Facts and Problems. United States Department of the Interior, bulletin . 1991 .
- 90 CUNNINGHAM, L. D. Columbium (niobium). In: U.S. BUREAU OF MINES. Mineral Commodity Summaries, 1993. Washington, U.S. Government Printing Office, 1993. p.52-3.
- 91 CARVALHO, W.T. Recursos minerais do complexo Ultramáfico- alcalino de Catalão I, Go. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA,28, Porto Alegre, 1974. Anais. São Paulo, SBG, 1974. v.6, p.165-84.
- 92 PINKUSS, M.L.; GUIMARÃES, H. Mining, Ore Preparation and ferro-niobium Production at Mineração Catalão. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NIOBIUM, 81, San Francisco, 1981. Niobium: proceedings, ed. by H.Stuart. Warrendale, The Metallurgical Society, 1984. p.97-111.
- 93 CARVALHO, W.T. Trabalhos de Pesquisa mineral desenvolvidos no complexo Ultramáfico-alcalino de Catalão I,Go. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 8, Porto Alegre, 1974. Anais, São Paulo, SBG, 1974. v.5, p.251-72.

- 94 DYER, R.C. Os domos Ultrabásico-alcalinos dos arredores de Catalão: Geologia Regional. Revista da Escola de Minas, v.27, n.4, p.170-6, out., 1969.
- 95 BIONDI, J.C. Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática. São Paulo, CBMM / T.A.Queiroz, 1986.
- 96 GERASIMOVSKY, V.I. Geochemistry of the carbonatites of the East Africa Rift Zones. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CARBONATITOS, 1, Poços de Caldas, 1976. Anais. Brasília, DNPM, 1978. p.207-21.
- 97 DEANS, T. Economic mineralogy of african carbonatites. In: TUTTLES, O.F.; GITTINS, J., eds. Carbonatites New York, John Wiley, 1966. p.385-413.
- 98 GITTINS, J. Summaries and bibliographies of carbonatite complexes. In: TUTTLE, O.F., GITTINS J., eds. Carbonatites. New York, John Wiley, 1966. p.417-540.
- 99 PERRAULT, G.; MANKER, E.A. Geology and mineralogy of niobium deposits. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NIOBIUM'81, San Francisco, 1981. Niobium: proceedings; ed. by Stuart Warrendale, The Metallurgical Society, 1984. p.3-78.
- 100 ARAXA niobium mine. Mining Magazine, v.146, n.2, p.135-47, Feb. 1982.
- 101 DEANS, T. Mineral Production from carbonatite complexes: a world review. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CARBONATITOS 1, Poços de Caldas, 1976. Anais. Brasília, DNPM, 1978. p.123-33.
- 102 GENDRON, L.; BISS, R.; RODRIGUES, M.- Underground mining and pyrochlore ore processing at Niobec mine, Quebec, Canada. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF NIOBIUM ' 81, San Francisco, 1981. Niobium: proceedings; ed. by H.Stuart Warrendale, The Metallurgical Society, 1984. p.79-96.
- 103 NORTHOLD, A.J.G.; HIGHLEY, D.E.; DEANS, T.- Economic minerals in carbonatites and associated alkaline igneous rocks. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. section B, v.99, p.B-59-80, May/Aug. 1990.
- 104 HARRIS, P.M. Pandaite from the Mrima Hill niobium deposit (Kenya). Mineralogical Magazine, v.35, p.277-290, June, 1965.
- 105 MARAVIC, H.; MARTEANI, G.; ROETHE, G.A. Die niobreichen verwitterungserze des karbonatits von Lueshe, Zaire. Erzmetall, v.36, n.1, p.29-35, Jan. 1983.
- 106 JAGER, E.; NIGLLI, E.; VAN DER VEEIN, A.H. A hidratated barium-strontium pyrochlore in a biotite rock from Panda Hill, Tanganyika. Mineralogical Magazine, v.32, p.10-25, mar. 1959.
- 107 SAFIANNIKOFF, A. Gisement de pyrochlorre de Lueshe. Annales de La. Société Géologique de Belgique, v.90, n.4, p.B461-86, 1967.
- 108 HARRIS, P.M.; JACKSON, D.V. Investigations into the recovery of niobium from the Mrima Hill deposit. Transactions of the Institute of Mining and Metalurgy, sec.C, vol.76, p. C95-C11, 1966.
- 109 COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia. São Paulo, 1984.

- 110 LEONARDOS, O.H. Carbonatitos com apatita e Pirocloro. Avulso. DNPM. Divisão de Fomento da Produção Mineral, DNPM, v.80, 1956.
- 111 PARAISO, O.S.; FUCCIO, R. Mining, ore preparation and ferroniobium production at CBMM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NIOBIUM'81, San Francisco, 1981. Niobium: proceedings; ed.by Stuart Warrendale, The Metallurgical Society, 1984. p.113-32.
- 112 ARAUJO, P.L. Projeto Catalão. Geologia e Metalurgia, n.36, p.257-68, 1975.
- 113 CARVALHO, W.T. e ARAUJO, P.L. Perspectivas de aproveitamento econômico dos depósitos minerais associados ao complexo ultramáfico-alcálico de Catalão I, Go. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais. São Paulo, SBG, v.6, 1974. p.131-41.
- 114 GUIMARÃES, D. Relatório sobre a jazida de pirocloro de Barreiro, Araxá, MG. s.l., DNPM, 1957. (Boletim DNPM 103).
- 115 DA SILVA, A.B. Araxá, uma reserva inesgotável de nióbio. Em: Contribuições à Geologia e à Petrologia, SBG, 1985. p.175-9. (Boletim Especial do Núcleo de Minas Gerais)
- 116 VLASOV, K.A, ed. Mineralogy of Rare Elements. New York, Daniel Davey & Co, s.d., Sec.8, v.2, p.249-328: Minerals of cerium earths.
- 117 HOGARTH, D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. American Mineralogist, vol.62, p.403-10, 1977.
- 118 GIERTH, E.; LEONARDOS JR, O.H.; BAECKER, M.L. Some mineralogical characteristics of the main constituents of the unweathered section of the carbonatite complex Catalão I, Goiás, Brazil. In: Contribuições à Geologia e Petrologia, s.l., SBG, 1985
- 119 BAECKER, M.L. A mineralização de nióbio no solo laterítico e a petrografia das rochas ultramáficas-alcálicas do domo de Catalão I, Goiás. Brasília, 1983, 114 ps.. Dissertação (Mestrado) n.23. Departamento de Geociências, Universidade de Brasília,.
- 120 CARVALHO, W.T. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico-alcálico de Catalão I, Go. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais, São Paulo, SBG, v.5, 1974. p.107-23.
- 121 JAGER, C.L.; FEITOSA, J.A. O projeto fosfago. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais. São Paulo, SBG, 1978, v.6, p.2673-81.
- 122 VALARELLI, J.V. O minério de nióbio, titânio e terras raras de Catalão, Go. São Paulo, 1971. 104p., Tese (Livre Docência) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- 123 BETZ, E. Nióbio CBMM amplia capacidade. Entrevista para a revista Minérios, Extração e Processamento, ano 5, agosto, nº66. 1982.
- 124 BISS, R. Pyrochlore ore beneficiation at les services TMG Inc (Niobec) concentrator. Canadian Mining Journal, v.103, n.8, p.17-25, Aug., 1982.

- 125# ALMEIDA, C.H.- Pesquisa de processo de concentração para o minério de nióbio da mina da Goiás-Nióbio S.A., Catalão, GO. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1983. (Relatório Interno. Doc. 311-01-00-131-004, 1983
- 126# SANT'AGOSTINO, L.M. Tipologia do minério de nióbio da jazida de Catalão, Goiás . Relatório Técnico, PAULO ABIB ENGENHARIA. São Paulo, doc.311-01-00-101-001, 40 ps., 1983 (inédito).
- 127# ALMEIDA, C.H.- Estudo de Viabilidade econômica de Produção de ferro-nióbio. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1987. (Relatório Interno Doc. 651-01-00-721-001/2 , 2v.).
- 128# CUBA, E.A., PEREIRA, R.C. e NETO, Y.F.- Dados complementares de Pesquisa e estudos de caracterização tecnológica. Relatório METAGO, Adendo ao Relatório Final de Pesquisa das Áreas 1 e 2 do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Catalão I, apresentado ao DNPM. Goiânia, 93 ps., 1983 (inédito).
- 129# METAGO Documentos avulsos: 27 perfis de sondagem, emitidos em 1982; mapas de localização das sondagens na Área 1 "Rica", 2 folhas (Gf-110-70-6009 e GF-100-70-6010).(inédito)
- 130 BÖRN, H. e KAHN, H. Caracterização geológica e mineralógica voltada ao aproveitamento de jazimentos fosfáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5, São Paulo, 1990. São Paulo, IBRAFOS, 1992. p.213-33.
- 131# ZIESEMER, L., KAHN, H. Caracterização de minérios de fosfato e titânio da jazida de Catalão I, GO. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1982. (Relatório Interno Doc. 329-001-000-014-2001).
- 132# KAHN, H. Sub-projeto de investigação dos testemunhos de sondagem: minério de fosfato de Catalão. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1987. (Relatório Interno Doc. 699-01-000-101-003).
- 133# ZIESEMER, L. e TASSINARI, M.M.M.L. Levantamento de dados para caracterização (fosfato de Catalão). São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1980. (Relatório Interno Doc.120-01-00-12-20010).
- 134# ZIESEMER, L. e TASSINARI, M.M.M.L. Caracterização de minério micáceo: furo SC1-17 da jazida de fosfato de Catalão,GO. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1981. (Relatório Interno Doc.120-01-12-2002).
- 135# SANT'AGOSTINO, L.M.,KAHN, H. Caracterização tecnológica em minério de nióbio associado ao capeamento da jazida de fosfato da Goiasfértil, GO. São Paulo, Paulo Abib Engenharia, 1983. (Relatório Interno Doc. 403-01-000-101-101).

Informação acessada por autorização de Companhia, de caracter oficial.

ANEXOS

LISTA DAS TABELAS

TABELA 1 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: CA Tipo Litológico: Material Argiloso
AMOSTRA: BA-1 Tipo Litológico: Material Argiloso

TABELA 2 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: BA-2 Tipo Litológico: Material Argiloso
AMOSTRA: CG Tipo Litológico: Canga

TABELA 3 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: MB-1 Tipo Litológico: Minério com Barita
AMOSTRA: MB-2 Tipo Litológico: Minério com Barita

TABELA 4 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: MB-3 Tipo Litológico: Minério com Barita
AMOSTRA: MG-1 Tipo Litológico: Minério Ferroso

TABELA 5 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: MG-2 Tipo Litológico: Minério Ferroso
AMOSTRA: MMB-1 Tipo Litológico: Minério com Magnetita e Barita

TABELA 6 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: MMB-2 Tipo Litológico: Minério com Magnetita e Barita
AMOSTRA: MMG-1 Tipo Litológico: Minério com Magnetita

TABELA 7 - Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerai

AMOSTRA: MMG-2 Tipo Litológico: Minério com Magnetita
AMOSTRA: CM Tipo Litológico: Rocha Alterada

TABELA 8 - Balanço de Massas e Metalúrgico dos Ensaios de Flotação

AMOSTRA: BA Tipo Mineralógico: A1
AMOSTRA: CG Tipo Mineralógico: A2
AMOSTRA: MG-1 Tipo Mineralógico: B1

TABELA 9 - Balanço de Massas e Metalúrgico dos Ensaio de Flotação

AMOSTRA: MG-2 Tipo Mineralógico: B1

AMOSTRA: MMG-1 Tipo Mineralógico: B2

AMOSTRA: MMG-2 Tipo Mineralógico: B2

TABELA 10 - Balanço de Massas e Metalúrgico dos Ensaio de Flotação

AMOSTRA: MB Tipo Mineralógico: B1b

AMOSTRA: MMB Tipo Mineralógico: B2b

AMOSTRA: CM Tipo Mineralógico: C

TABELA 11 - Relação dos Furos de Sondagem Utilizados na Modelagem (pelo programa LYNX)

TABELA 12 - Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico A1 (pelo programa LYNX)

TABELA 13 - Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico A2 (pelo programa LYNX)

TABELA 14 - Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico B (pelo programa LYNX)

TABELA 15 - Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico C (pelo programa LYNX)

TABELA 1
Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerais

AMOSTRA: CA

Tipo Litológico: Material Argiloso

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	24,74	0,71	7,60	5,32	9,64	22,63	21,69
Passante 0,208 mm (65 #)	75,26	2,19	8,54	6,31	90,36	77,37	78,31
Minério Total	100,00	1,82	8,31	6,07	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	4,96	0,72	9,23	6,18	1,96	5,51	5,05
Lamas Naturais (TQ)	41,70	1,55	7,55	7,17	35,47	37,90	49,27
Total Lamas (TQ+PM)	46,66	1,46	7,73	7,06	35,47		
Magnéticos Moagem (PM)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Moagem (PM)	19,78	0,71	7,19	5,10	7,71	17,12	16,62
Deslamado Moagem (PM)	19,78	0,71	7,19	5,10	7,71	17,12	16,62
Magnéticos Naturais (TQ)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Naturais (TQ)	33,56	2,98	9,77	5,25	54,89	39,47	29,04
Deslamado Natural (TQ)	33,56	2,98	9,77	5,25	54,89	39,47	29,04
Total Magnéticos (TQ+PM)	tr				tr	tr	tr
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	53,34	2,14	8,81	5,19	62,59	56,59	45,66
Total Deslamado (TQ+PM)	53,34	2,14	8,81	5,19	62,59	56,59	45,66

AMOSTRA: BA-1

Tipo Litológico: Material Argiloso

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	24,66	0,34	5,94	2,72	6,49	15,49	14,03
Passante 0,208 mm (65 #)	75,34	1,60	10,61	5,46	93,51	84,51	85,97
Minério Total	100,00	1,29	9,45	4,78	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	5,76	0,38	5,87	3,12	1,69	3,58	3,76
Lamas Naturais (TQ)	33,36	1,38	7,34	6,67	35,65	25,90	46,54
Total Lamas (TQ+PM)	39,12	1,23	7,12	6,15	35,65		
Magnéticos Moagem (PM)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Moagem (PM)	18,90	0,33	5,96	2,60	4,83	11,91	10,28
Deslamado Moagem (PM)	18,90	0,33	5,96	2,60	4,83	11,91	10,28
Magnéticos Naturais (TQ)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Naturais (TQ)	41,98	1,78	13,20	4,49	57,86	58,61	39,43
Deslamado Natural (TQ)	41,98	1,78	13,20	4,49	57,86	58,61	39,43
Total Magnéticos (TQ+PM)	tr				tr	tr	tr
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	60,88	1,33	10,95	3,90	62,69	70,52	49,71
Total Deslamado (TQ+PM)	60,88	1,33	10,95	3,90	62,69	70,52	49,71

TABELA 2
Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Minerais

AMOSTRA: BA-2

Tipo Litológico: Material Argiloso

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	29,62	0,81	11,74	5,42	49,26	38,33	44,79
Passante 0,208 mm (65 #)	70,38	0,35	7,95	2,81	50,74	61,67	55,21
Minério Total	100,00	0,49	9,07	3,58	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	10,05	0,77	7,33	8,04	15,89	8,12	22,54
Lamas Naturais (TQ)	29,00	0,31	6,51	3,20	18,46	20,81	25,89
Total Lamas (TQ+PM)	39,05	0,43	6,72	4,45	18,46		
Magnéticos Moagem (PM)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Moagem (PM)	19,57	0,83	14,00	4,08	33,35	30,20	22,28
Deslamado Moagem (PM)	19,57	0,83	14,00	4,08	33,35	30,20	22,28
Magnéticos Naturais (TQ)	tr				tr	tr	tr
Não Magnéticos Naturais (TQ)	41,37	0,38	8,96	2,54	32,28	40,86	29,32
Deslamado Natural (TQ)	41,37	0,38	8,96	2,54	32,28	40,86	29,32
Total Magnéticos (TQ+PM)	tr				tr	tr	tr
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	60,94	0,52	10,58	3,03	65,63	71,06	51,59
Total Deslamado (TQ+PM)	60,94	0,52	10,58	3,03	65,63	71,06	51,59

AMOSTRA: CG

Tipo Litológico: Canga

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	49,48	1,94	49,38	7,29	34,98	59,66	53,50
Passante 0,208 mm (65 #)	50,52	3,53	32,70	6,20	65,02	40,34	46,50
Minério Total	100,00	2,74	40,95	6,74	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	17,36	2,36	44,80	8,02	14,93	18,99	20,65
Lamas Naturais (TQ)	23,18	3,64	32,40	6,60	30,75	18,34	22,69
Total Lamas (TQ+PM)	40,54	3,09	37,71	7,21	45,68	37,33	43,34
Magnéticos Moagem (PM)	5,03	0,32	87,70	0,43	0,59	10,77	0,32
Não Magnéticos Moagem (PM)	27,09	1,98	45,20	8,10	19,55	29,90	32,55
Deslamado Moagem (PM)	32,12	1,72	51,86	6,90	20,13	40,67	32,87
Magnéticos Naturais (TQ)	1,81	0,93	84,40	0,73	0,61	3,73	0,20
Não Magnéticos Naturais (TQ)	25,53	3,62	29,30	6,23	33,68	18,27	23,59
Deslamado Natural (TQ)	27,34	3,44	32,95	5,87	34,29	22,00	23,79
Total Magnéticos (TQ+PM)	6,84	0,48	86,83	0,51	1,20	14,50	0,52
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	52,62	2,78	37,49	7,19	53,22	48,17	56,14
Total Deslamado (TQ+PM)	59,46	2,51	43,16	6,42	54,42	62,67	56,66

TABELA 3

Resultados Integrados dos Ensaio de Separações Mineraias

AMOSTRA: MB-1

Tipo Litológico: Minério com Barita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	51,90	0,16	24,00	11,00	33,47	57,85	52,36
Passante 0,208 mm (65 #)	48,10	0,34	18,87	10,80	66,53	42,15	47,64
Minério Total	100,00	0,25	21,53	10,90	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	16,48	0,27	40,30	7,43	17,93	30,85	11,23
Lamas Naturais (TQ)	9,69	0,17	26,60	14,70	6,64	11,97	13,07
Total Lamas (TQ+PM)	26,17	0,23	35,23	10,12	24,57	42,82	24,30
Magnéticos Moagem (PM)	6,62	0,10	80,90	0,72	2,67	24,87	0,44
Não Magnéticos Moagem (PM)	35,59	0,17	12,70	11,90	24,38	20,99	38,85
Deslamado Moagem (PM)	42,21	0,16	23,40	10,15	27,05	45,87	39,28
Magnéticos Naturais (TQ)	2,67	0,10	80,70	1,27	1,08	10,01	0,31
Não Magnéticos Naturais (TQ)	28,95	0,5	15,00	12,90	58,34	20,17	34,25
Deslamado Natural (TQ)	31,62	0,47	20,55	11,92	59,41	30,18	34,56
Total Magnéticos (TQ+PM)	9,29	0,10	80,84	0,88	3,74	34,88	0,75
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	64,54	0,32	13,73	12,35	82,72	41,16	73,10
Total Deslamado (TQ+PM)	73,83	0,29	22,18	10,91	86,46	76,04	73,85

AMOSTRA: MB-2

Tipo Litológico: Minério com Barita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	62,90	0,11	24,21	12,45	18,97	57,22	59,44
Passante 0,208 mm (65 #)	37,10	0,80	30,69	14,40	81,03	42,78	40,56
Minério Total	100,00	0,36	26,61	13,17	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	15,26	0,13	22,80	15,00	5,44	13,07	17,38
Lamas Naturais (TQ)	15,19	0,72	38,80	11,20	29,98	22,15	12,91
Total Lamas (TQ+PM)	30,45	0,42	30,78	13,10	35,42	35,22	30,29
Magnéticos Moagem (PM)	5,48	0,10	86,00	0,49	1,50	17,71	0,20
Não Magnéticos Moagem (PM)	41,16	0,1	15,00	13,40	11,28	23,20	41,87
Deslamado Moagem (PM)	46,64	0,10	23,34	11,88	12,79	40,91	42,07
Magnéticos Naturais (TQ)	1,72	0,10	85,60	0,43	0,47	5,53	0,06
Não Magnéticos Naturais (TQ)	20,19	0,92	19,90	18,00	50,92	15,10	27,59
Deslamado Natural (TQ)	21,91	0,86	25,06	16,62	51,39	20,63	27,64
Total Magnéticos (TQ+PM)	7,20	0,10	85,90	0,48	1,97	23,24	0,26
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	61,35	0,37	16,61	14,91	62,20	38,30	69,45
Total Deslamado (TQ+PM)	68,55	0,34	23,89	13,40	64,18	61,54	69,71

TABELA 4

Resultados Integrados dos Ensaio de Separações Minerai

AMOSTRA: MB-3

Tipo Litológico: Minério com Barita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	47,69	0,71	25,70	11,00	31,95	46,90	42,63
Passante 0,208 mm (65 #)	52,31	1,38	26,53	13,49	68,05	53,10	57,37
Minério Total	100,00	1,06	26,13	12,31	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	11,39	0,66	30,20	11,90	7,09	13,16	11,02
Lamas Naturais (TQ)	16,96	1,23	36,80	11,40	19,68	23,88	15,71
Total Lamas (TQ+PM)	28,35	1,00	34,15	11,60	26,78	37,05	26,73
Magnéticos Moagem (PM)	1,48	0,10	81,80	0,66	0,14	4,63	0,08
Não Magnéticos Moagem (PM)	34,82	0,76	21,90	11,20	24,97	29,18	31,69
Deslamado Moagem (PM)	36,30	0,73	24,34	10,77	25,11	33,81	31,77
Magnéticos Naturais (TQ)	0,67	0,10	76,50	0,68	0,06	1,96	0,04
Não Magnéticos Naturais (TQ)	34,68	1,48	20,50	14,80	48,43	27,20	41,71
Deslamado Natural (TQ)	35,35	1,45	21,56	14,53	48,49	29,17	41,75
Total Magnéticos (TQ+PM)	2,15	0,10	80,15	0,67	0,20	6,59	0,12
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	69,50	1,12	21,20	13,00	73,40	56,38	73,40
Total Deslamado (TQ+PM)	71,65	1,09	22,97	12,63	73,60	62,98	73,52

AMOSTRA: MG-1

Tipo Litológico: Minério Ferroso

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	52,64	1,51	32,34	6,29	41,25	50,34	47,55
Passante 0,208 mm (65 #)	47,36	2,39	35,45	7,71	58,75	49,66	52,45
Minério Total	100,00	1,93	33,81	6,96	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	11,95	1,80	37,50	8,77	11,16	13,25	15,05
Lamas Naturais (TQ)	14,71	2,37	41,70	8,07	18,09	18,14	17,05
Total Lamas (TQ+PM)	26,66	2,11	39,82	8,38	29,25	31,39	32,10
Magnéticos Moagem (PM)	1,55	2,00	84,70	0,30	1,61	3,88	0,07
Não Magnéticos Moagem (PM)	39,14	1,4	28,70	5,77	28,43	33,22	32,43
Deslamado Moagem (PM)	40,69	1,42	30,83	5,56	30,04	37,10	32,50
Magnéticos Naturais (TQ)	1,70	0,63	82,60	0,39	0,56	4,15	0,10
Não Magnéticos Naturais (TQ)	30,95	2,5	29,90	7,94	40,15	27,37	35,29
Deslamado Natural (TQ)	32,65	2,40	32,64	7,55	40,71	31,52	35,39
Total Magnéticos (TQ+PM)	3,25	1,28	83,60	0,35	2,16	8,04	0,16
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	70,09	1,89	29,23	6,73	68,59	60,59	67,72
Total Deslamado (TQ+PM)	73,34	1,86	31,64	6,45	70,75	68,62	67,89

TABELA 5

Resultados Integrados dos Ensaio de Separações Mineraias

AMOSTRA: MG-2

Tipo Litológico: Minério Ferroso

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	81,45	1,61	53,37	3,34	85,91	84,30	67,21
Passante 0,208 mm (65 #)	18,55	1,16	43,66	7,15	14,09	15,70	32,79
Minério Total	100,00	1,53	51,57	4,05	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	20,14	2,27	45,40	6,59	29,95	17,73	32,79
Lamas Naturais (TQ)	4,74	1,10	47,40	7,34	3,42	4,36	8,60
Total Lamas (TQ+PM)	24,88	2,05	45,78	6,73	33,37	22,09	41,39
Magnéticos Moagem (PM)	12,25	0,45	82,80	0,38	3,61	19,67	1,15
Não Magnéticos Moagem (PM)	49,06	1,62	49,30	2,76	52,07	46,90	33,45
Deslamado Moagem (PM)	61,31	1,39	55,99	2,28	55,68	66,57	34,60
Magnéticos Naturais (TQ)	2,23	0,58	82,90	0,66	0,85	3,58	0,36
Não Magnéticos Naturais (TQ)	11,58	1,3	35,00	8,33	9,86	7,86	23,83
Deslamado Natural (TQ)	13,81	1,18	42,73	7,09	10,71	11,44	24,20
Total Magnéticos (TQ+PM)	14,48	0,47	82,82	0,42	4,46	23,25	1,51
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	60,64	1,56	46,57	3,82	61,93	54,76	57,29
Total Deslamado (TQ+PM)	75,12	1,35	53,56	3,17	66,39	78,02	58,80

AMOSTRA: MMB-1

Tipo Litológico: Minério com Magnetita e Barita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	56,52	1,37	43,63	9,95	32,83	56,35	59,22
Passante 0,208 mm (65 #)	43,48	3,64	43,93	8,91	67,17	43,65	40,78
Minério Total	100,00	2,36	43,76	9,50	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	10,82	1,81	25,30	18,30	8,30	6,26	20,85
Lamas Naturais (TQ)	11,95	4,21	29,50	14,60	21,33	8,06	18,37
Total Lamas (TQ+PM)	22,77	3,07	27,50	16,36	29,63	14,31	39,22
Magnéticos Moagem (PM)	22,65	0,38	81,50	1,02	3,65	42,18	2,43
Não Magnéticos Moagem (PM)	23,04	2,14	15,00	14,80	20,91	7,90	35,91
Deslamado Moagem (PM)	45,69	1,27	47,97	7,97	24,55	50,08	38,34
Magnéticos Naturais (TQ)	16,10	0,95	84,50	1,05	6,48	31,09	1,78
Não Magnéticos Naturais (TQ)	15,42	6,01	12,80	12,70	39,29	4,51	20,62
Deslamado Natural (TQ)	31,52	3,43	49,42	6,75	45,78	35,60	22,40
Total Magnéticos (TQ+PM)	38,75	0,62	82,75	1,03	10,13	73,27	4,21
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	38,46	3,69	14,12	13,96	60,20	12,41	56,53
Total Deslamado (TQ+PM)	77,21	2,15	48,56	7,47	70,33	85,68	60,74

TABELA 6

Resultados Integrados dos Ensaio de Separações Mineraias

AMOSTRA: MMB-2

Tipo Litológico: Minério com Magnetita e Barita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	60,12	0,57	31,23	10,28	43,05	62,19	49,92
Passante 0,208 mm (65 #)	39,88	1,14	28,63	15,55	56,95	37,81	50,08
Minério Total	100,00	0,80	30,19	12,38	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	13,55	0,94	22,10	17,80	16,00	9,92	19,48
Lamas Naturais (TQ)	13,32	1,25	31,00	15,40	20,92	13,68	16,57
Total Lamas (TQ+PM)	26,87	1,09	26,51	16,61	36,92	23,59	36,05
Magnéticos Moagem (PM)	13,01	0,16	83,40	0,84	2,61	35,94	0,88
Não Magnéticos Moagem (PM)	33,56	0,58	14,70	10,90	24,45	16,34	29,55
Deslamado Moagem (PM)	46,57	0,46	33,89	8,09	27,07	52,28	30,43
Magnéticos Naturais (TQ)	5,65	0,48	83,10	1,28	3,41	15,55	0,58
Não Magnéticos Naturais (TQ)	20,91	1,24	12,40	19,50	32,57	8,59	32,94
Deslamado Natural (TQ)	26,56	1,08	27,44	15,62	35,98	24,14	33,52
Total Magnéticos (TQ+PM)	18,66	0,26	83,31	0,97	6,02	51,49	1,47
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	54,47	0,83	13,82	14,20	57,02	24,93	62,48
Total Deslamado (TQ+PM)	73,13	0,69	31,55	10,83	63,05	76,41	63,95

AMOSTRA: MMG-1

Tipo Litológico: Minério com Magnetita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	58,61	1,30	42,64	4,44	41,74	58,52	53,62
Passante 0,208 mm (65 #)	41,39	2,57	42,80	5,44	58,26	41,48	46,38
Minério Total	100,00	1,83	42,71	4,85	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	10,10	2,18	34,40	8,76	12,06	8,14	18,23
Lamas Naturais (TQ)	10,96	3,18	39,60	8,35	19,09	10,16	18,86
Total Lamas (TQ+PM)	21,06	2,70	37,11	8,55	31,15	18,30	37,09
Magnéticos Moagem (PM)	19,32	0,45	84,10	0,52	4,76	38,05	2,07
Não Magnéticos Moagem (PM)	29,09	1,57	18,00	5,53	25,02	12,26	33,15
Deslamado Moagem (PM)	48,41	1,12	44,38	3,53	29,78	50,31	35,22
Magnéticos Naturais (TQ)	10,33	0,78	85,50	0,50	4,41	20,68	1,06
Não Magnéticos Naturais (TQ)	20,10	3,16	22,60	6,39	34,79	10,64	26,46
Deslamado Natural (TQ)	30,43	2,35	43,95	4,39	39,21	31,32	27,53
Total Magnéticos (TQ+PM)	29,65	0,56	84,59	0,51	9,18	58,73	3,13
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	49,19	2,22	19,88	5,88	59,81	22,90	59,61
Total Deslamado (TQ+PM)	78,84	1,60	44,21	3,86	68,99	81,63	62,74

TABELA 7

Resultados Integrados dos Ensaios de Separações Mineraias

AMOSTRA: MMG-2

Tipo Litológico: Minério com Magnetita

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	79,90	1,34	48,31	4,44	76,10	80,28	78,21
Passante 0,208 mm (65 #)	20,10	1,67	47,18	4,92	23,90	19,72	21,79
Minério Total	100,00	1,41	48,08	4,54	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	15,89	1,88	43,80	8,65	21,23	14,47	30,30
Lamas Naturais (TQ)	5,68	2,06	48,70	5,57	8,32	5,75	6,97
Total Lamas (TQ+PM)	21,57	1,93	45,09	7,84	29,55	20,23	37,28
Magnéticos Moagem (PM)	19,13	0,68	81,40	0,60	9,25	32,39	2,53
Não Magnéticos Moagem (PM)	44,88	1,42	35,80	4,59	45,30	33,42	45,42
Deslamado Moagem (PM)	64,01	1,20	49,43	3,40	54,55	65,80	47,95
Magnéticos Naturais (TQ)	2,97	0,80	84,30	0,65	1,69	5,21	0,43
Não Magnéticos Naturais (TQ)	11,45	1,71	36,80	5,70	13,92	8,76	14,39
Deslamado Natural (TQ)	14,42	1,52	46,58	4,66	15,61	13,97	14,81
Total Magnéticos (TQ+PM)	22,10	0,70	81,79	0,61	10,94	37,59	2,96
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	56,33	1,48	36,00	4,82	59,22	42,18	59,80
Total Deslamado (TQ+PM)	78,43	1,26	48,90	3,63	70,15	79,77	62,76

AMOSTRA: CM

Tipo Litológico: Rocha Alterada

PRODUTO	% peso na amostra	teores (%)			partição (%)		
		Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	BaO
Retido 0,208 mm (65 #)	43,98	1,52	53,90	3,20	38,33	56,00	51,44
Passante 0,208 mm (65 #)	56,02	1,92	33,25	2,37	61,67	44,00	48,56
Minério Total	100,00	1,74	42,33	2,74	100,00	100,00	100,00
Lamas Moagem (PM)	6,02	1,86	33,40	6,06	6,42	4,75	13,33
Lamas Naturais (TQ)	16,96	1,09	24,60	2,86	10,60	9,86	17,73
Total Lamas (TQ+PM)	22,98	1,29	26,91	3,70	17,02	14,61	31,06
Magnéticos Moagem (PM)	22,66	0,42	84,60	0,80	5,46	45,29	6,63
Não Magnéticos Moagem (PM)	15,30	3,03	16,50	5,64	26,58	5,96	31,54
Deslamado Moagem (PM)	37,96	1,47	57,15	2,75	32,04	51,25	38,16
Magnéticos Naturais (TQ)	12,72	1,36	84,00	0,47	9,92	25,24	2,18
Não Magnéticos Naturais (TQ)	26,34	2,73	14,30	2,98	41,23	8,90	28,69
Deslamado Natural (TQ)	39,06	2,28	37,00	2,16	51,15	34,14	30,87
Total Magnéticos (TQ+PM)	35,38	0,76	84,38	0,68	15,38	70,53	8,81
Total Não Magnéticos (TQ+PM)	41,64	2,84	15,11	3,96	67,82	14,86	60,23
Total Deslamado (TQ+PM)	77,02	1,88	46,93	2,45	83,19	85,39	69,04

TABELA 8**Balço de Massas e Metalúrgico dos Ensaio de Flotação****AMOSTRA: BA****Tipo Mineralógico: A1**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	0,65	17,20	3,49	11,60	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	0,76	8,67	4,51	7,58	5,50	6,50	2,80	7,10	3,60
Lamas após Condicionamento	0,70	4,58	4,70	5,07	9,20	10,00	2,50	12,40	4,00
Rejeito para Descarte	0,26	8,74	4,28	8,06	40,00	16,00	20,40	49,20	27,70
Rejeito para Recirculação	0,86	28,35	2,39	16,68	44,90	59,30	74,10	30,80	64,50
Concentrado Final de Nióbio	15,40	13,60	6,06	6,86	0,40	8,40	0,30	0,60	0,20

AMOSTRA: CG**Tipo Mineralógico: A2**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	2,30	6,20	5,50	42,20	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	2,58	3,29	6,64	33,60	12,10	13,40	6,40	14,50	9,60
Lamas após Condicionamento	2,66	2,31	4,98	31,90	3,90	4,40	1,50	3,50	2,90
Rejeito para Descarte	1,65	7,05	5,48	50,63	64,70	45,70	73,70	64,10	77,80
Rejeito para Recirculação	2,36	6,05	4,78	21,92	18,50	18,70	17,90	15,90	9,60
Concentrado Final de Nióbio	52,70	2,57	13,70	5,11	0,80	17,80	0,30	1,90	0,10

AMOSTRA: MG-1**Tipo Mineralógico: B1**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	1,82	5,20	6,80	31,10	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	2,01	2,70	21,10	15,17	12,50	13,80	6,50	38,80	6,10
Lamas após Condicionamento	2,01	1,70	10,10	35,20	4,00	4,40	1,30	5,90	4,50
Rejeito para Descarte	1,12	5,36	4,43	37,14	62,96	38,70	64,90	41,50	75,20
Rejeito para Recirculação	2,42	7,07	4,54	21,87	19,90	26,50	26,85	12,90	13,99
Concentrado Final de Nióbio	47,20	5,31	10,60	9,72	0,64	16,60	0,50	1,00	0,20

TABELA 9**Balço de Massas e Metalúrgico dos Ensaio de Flotação****AMOSTRA: MG-2****Tipo Mineralógico: B1**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	1,50	6,10	3,60	42,10	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	1,48	3,56	5,92	34,97	12,20	12,10	7,10	20,10	10,10
Lamas após Condicionamento	2,08	2,32	6,43	48,05	4,47	6,50	1,70	7,98	5,10
Rejeito para Descarte	0,75	6,15	3,48	47,43	63,91	32,10	63,50	55,50	72,00
Rejeito para Recirculação	2,56	8,80	2,81	28,31	18,75	32,10	27,01	14,63	12,61
Concentrado Final de Nióbio	36,20	6,20	9,10	14,30	0,71	17,20	0,72	1,79	0,24

AMOSTRA: MMG-1**Tipo Mineralógico: B2**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	2,34	4,83	4,00	24,10	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	0,25	0,60	22,70	3,47	6,40	0,68	0,79	36,10	0,90
Lamas após Condicionamento	2,74	2,00	6,61	29,10	0,52	0,61	0,21	0,85	0,60
Rejeito para Descarte	0,28	1,80	2,66	22,88	64,50	6,60	24,00	43,00	61,30
Rejeito para Recirculação	6,82	12,84	2,67	31,76	28,20	82,00	74,70	18,80	37,10
Concentrado Final de Nióbio	49,20	2,86	10,80	4,83	0,50	10,10	0,30	1,30	0,10

AMOSTRA: MMG-2**Tipo Mineralógico: B2**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	1,70	2,20	6,20	37,40	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	0,36	0,54	27,50	10,10	13,90	2,90	3,40	61,40	3,80
Lamas após Condicionamento	2,21	1,35	4,75	42,20	2,2	2,90	1,40	1,70	2,50
Rejeito para Descarte	0,53	1,00	3,85	43,30	34,10	11,90	15,10	20,90	39,50
Rejeito para Recirculação	2,51	3,61	1,92	41,01	49,20	72,20	79,30	15,10	63,90
Concentrado Final de Nióbio	30,90	4,96	8,86	18,30	0,60	10,20	1,20	0,80	0,30

TABELA 10**Balanco de Massas e Metalúrgico dos Ensaio de Flotação****AMOSTRA: MB****Tipo Mineralógico: B1b**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	0,91	6,40	12,20	20,70	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	0,28	1,44	27,20	7,84	31,40	9,60	7,10	69,90	11,60
Lamas após Condicionamento	1,15	3,24	7,04	31,60	1,60	2,00	0,80	0,90	2,50
Rejeito para Descarte	0,11	1,87	7,59	20,65	38,50	4,50	11,30	23,90	38,50
Rejeito para Recirculação	2,27	18,24	2,16	34,81	28,00	69,50	80,00	4,90	47,30
Concentrado Final de Nióbio	31,20	13,30	9,88	9,43	0,40	14,40	0,90	0,30	0,20

AMOSTRA: MMB**Tipo Mineralógico: B2b**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	0,77	2,50	15,00	14,90	100	100	100	100	100
Concentrado de Barita	0,16	0,60	42,00	3,13	12,90	2,70	3,10	36,30	2,70
Lamas após Condicionamento	1,42	1,66	28,50	28,80	0,20	0,50	0,20	0,30	0,30
Rejeito para Descarte	0,10	0,49	14,58	11,74	50,80	6,80	9,90	49,50	40,00
Rejeito para Recirculação	1,24	6,08	5,71	23,88	35,50	57,40	86,20	13,60	56,90
Concentrado Final de Nióbio	51,40	2,83	11,20	3,71	0,50	32,70	0,60	0,40	0,10

AMOSTRA: CM**Tipo Mineralógico: C**

	Teores %				Recuperação %				
	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃	peso	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Alimentação da Flotação	2,60	2,10	5,50	17,90	99	100	100	100	100
Concentrado de Barita	1,24	0,89	17,90	11,60	7,00	3,70	3,40	25,90	5,10
Lamas após Condicionamento	1,63	0,99	4,26	27,80	0,28	0,20	0,10	0,20	0,40
Rejeito para Descarte	2,72	2,20	4,45	18,28	88,70	91,40	94,80	72,40	91,00
Rejeito para Recirculação	3,71	1,23	3,05	20,03	2,68	4,40	1,60	1,50	3,00
Concentrado Final de Nióbio	1,34	0,28	0,40	47,40	0,35	0,20	0,10	0,10	0,90

TABELA 11

Relação dos Furos de Sondagem Utilizados na Modelagem (pelo programa LYNX)

LYNX : Hole Catalog
Active Project : CATALAO

Wed Oct 9 17:31:20 1996
User : lynx

Subset: dh5
Description: Area de Niobio

HOLE #	NORTH	EAST	ELVN	LGTH
0001 36-17	1225.00	1775.00	761.10	35.30
0002 36-19	1125.00	1775.00	776.20	63.80
0003 36-21	1025.00	1775.00	775.00	34.10
0004 38-19	1125.00	1875.00	795.90	82.30
0005 39-17	1225.00	1925.00	792.00	50.00
0006 39-19	1125.00	1925.00	806.00	50.00
0007 39-21	1025.00	1925.00	821.00	90.00
0008 41-17	1225.00	2025.00	820.00	50.00
0009 42-19	1125.00	2025.00	826.40	98.00
0010 42-21	1025.00	2075.00	842.00	107.60
0011 45-17	1225.00	2225.00	850.00	130.00
0012 45-20	1075.00	2225.00	856.60	120.00
0013 AB16	1025.00	1675.00	784.00	40.00
0014 AB17	925.00	1675.00	810.00	45.00
0015 AB18	825.00	1675.00	836.00	50.20
0016 BC16	1025.00	1575.00	764.00	26.00
0017 BC17	925.00	1525.00	795.00	40.00
0018 CD16	1025.00	1475.00	756.00	16.00
0019 CD18	825.00	1475.00	796.00	50.10
0020 M14	1225.00	2975.00	840.00	50.00
0021 M16	1025.00	2975.00	835.00	50.00
0022 O14	1227.00	2763.40	835.50	50.00
0023 O16	1023.00	2756.00	833.60	50.00
0024 P17	927.00	2653.00	834.20	144.00
0025 Q14	1228.00	2562.00	840.50	50.30
0026 Q15	1122.00	2560.00	836.30	248.00
0027 Q15A	1125.00	2575.00	678.00	89.00
0028 Q16	1023.00	2558.00	835.00	50.20
0029 Q17	924.00	2556.00	835.00	47.70
0030 Q18	823.00	2557.00	834.90	50.00
0031 QR18	800.00	2500.00	836.00	100.00
0032 R14	1242.00	2453.00	852.80	113.00
0033 R15	1139.00	2452.00	844.40	122.00
0034 R16	1021.00	2437.00	835.70	50.00
0035 R17	922.00	2456.00	832.00	50.50
0036 R17-18	850.00	2450.00	837.00	28.00
0037 R18	822.00	2457.00	835.70	50.00
0038 RS18	800.00	2400.00	840.00	91.00
0039 S14	1334.00	2361.00	853.30	50.40
0040 S15	1099.00	2353.00	854.80	96.00
0041 S16	1021.00	2356.00	843.80	50.00
0042 S17	921.00	2356.00	835.30	50.50
0043 S18	872.00	2406.00	835.40	50.00
0044 ST17-18	850.00	2300.00	840.00	85.30
0045 ST18	800.00	2300.00	855.00	100.90

0046 T14	1224.00	2266.00	856.30	93.00
0047 T15	1130.00	2265.00	856.00	50.00
0048 T16	1025.00	2261.00	852.30	50.00
0049 T17	922.00	2257.00	835.80	50.00
0050 T17-18	850.00	2250.00	840.00	100.50
0051 T18	808.00	2261.00	855.80	50.00
0052 TU17-18	850.00	2200.00	840.00	83.00
0053 TU18	800.00	2200.00	854.00	100.00
0054 U14	1230.00	2166.00	848.90	50.00
0055 U15	1126.00	2161.00	845.80	139.50
0056 U16	1029.00	2165.00	847.10	50.00
0057 U17	921.00	2157.00	839.90	40.00
0058 U17-18	850.00	2150.00	846.00	78.00
0059 U18	831.70	2167.00	845.00	88.60
0060 UV17-18	850.00	2125.00	847.00	50.00
0061 UV18	800.00	2100.00	852.00	98.00
0062 V14	1231.00	2065.00	837.80	80.00
0063 V16	1000.00	2175.00	847.00	50.10
0064 V17	922.09	2064.08	845.50	92.00
0065 V18	825.00	2075.00	850.00	50.00
0066 X14	1237.00	1952.00	802.80	50.00
0067 X15	1124.00	2015.00	829.70	50.00
0068 X16	1028.00	2015.00	836.40	50.00
0069 X17	922.00	1958.00	840.40	50.00
0070 X18	828.00	1955.00	850.60	84.00
0071 Y14	1239.00	1860.00	775.50	49.00
0072 Y16	997.00	1852.00	795.20	50.50
0073 Y17	926.00	1856.00	810.80	50.00
0074 Y18	825.00	1875.00	848.00	50.00
0075 Z16	1000.00	1766.00	779.00	36.00
0076 Z17	925.00	1775.00	802.50	50.00
0077 Z18	818.00	1749.00	844.40	90.40

Tabela 12
Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico A1 (pelo programa LYNX)

LYNX VOLUMETRICS - GEOLOGICAL RESERVES

PROJECT : CATALAO
ANALYSIS : TIPO A1

3D GRID MODEL : PLANO
PRIMARY NUMERIC VARIABLE : Nb2O5
CUTOFF VALUE : .40
NUMERIC VARIABLE SCALING FACTOR : 1.0
VOLUME MODEL SELECTION : G,PLANO ,A*,*,5
VOLUME INTEGRATION INCREMENT : 1.00
DENSITY OF DEFINED MATERIAL : 2.300
DENSITY OF UNDEFINED MATERIAL : 2.300
VOLUME/TONS SCALING FACTOR : 1000.0

<.....VOLUME IDENTITY.....><--.....TOTAL.....><GREATER THAN CUTOFF><LESS THAN CUTOFF><UNDEF

UNIT	COMPONENT	CODE	VOL	TON	VOL	TON	Nb2O5	VOL	TON	Nb2O5	(%)	TON
A	NV760	5	22	51.	0.	0.	.00	12.	28.	.11	44.	23.
A	NV770	5	58.	134.	0.	0.	.00	45.	104.	.12	23.	30.
A	NV780	5	93.	213.	0.	0.	.00	75.	173.	.24	19.	41.
A	NV790	5	154.	355.	0.	0.	.00	131.	301.	.32	15.	54.
A	NV800	5	262.	603.	44.	101.	.45	186.	429.	.30	12.	74.
A	NV810	5	459.	1057.	257.	592.	.47	146.	337.	.28	12.	128.
A	NV820	5	688.	1581.	487.	1120.	.56	131.	302.	.28	10.	159.
A	NV830	5	640.	1472.	435.	1000.	.63	153.	352.	.29	8.	120.
A	NV834	5	339.	779.	266.	612.	.68	50.	114.	.34	7.	53.
A	NV838	5	43.	98.	42.	97.	1.10	0.	0.	.32	2.	2.
A1	NV830	5	139.	320.	132.	303.	.83	7.	16.	.34	0.	1.
A1	NV834	5	105.	241.	102.	234.	1.26	3.	7.	.32	0.	0.
A1	NV838	5	105.	241.	96.	220.	1.23	8.	18.	.32	1.	3.
A1	NV842	5	31.	71.	26.	60.	.88	5.	11.	.34	0.	0.
A1	NV846	5	9.	21.	8.	19.	.83	1.	2.	.34	0.	0.
A3	NV838	5	20.	46.	4.	10.	.53	9.	21.	.33	33.	15.
A3	NV842	5	7.	17.	0.	0.	.00	3.	7.	.29	59.	10.
TOTAL			3174.	7300.	1899.	4367.	.69	966.	2221.	.28	10.	713.

Tabela 13
Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico A2 (pelo programa LYNX)

LYNX VOLUMETRICS - GEOLOGICAL RESERVES

PROJECT : CATALAO
ANALYSIS : TIPO A2

3D GRID MODEL : PLANO
PRIMARY NUMERIC VARIABLE : Nb2O5
CUTOFF VALUE : .40
NUMERIC VARIABLE SCALING FACTOR : 1.0
VOLUME MODEL SELECTION : G,PLANO,CG*,*,6
VOLUME INTEGRATION INCREMENT : 1.00
DENSITY OF DEFINED MATERIAL : 2.300
DENSITY OF UNDEFINED MATERIAL : 2.300
VOLUME/TONS SCALING FACTOR : 1000.0

<.....VOLUME IDENTITY.....><--.....TOTAL.....><GREATER THAN CUTOFF><LESS THAN CUTOFF><UNDEF

UNIT	COMPONENT	CODE	VOL	TON	VOL	TON	Nb2O5	VOL	TON	Nb2O5	(%)	TON
CG1	NV800	6	48.	109.	0.	0.	.00	34.	78.	.30	28.	31.
CG1	NV810	6	99.	228.	29.	67.	.41	47.	108.	.34	23.	53.
CG1	NV820	6	230.	529.	136.	312.	.44	64.	148.	.35	13.	70.
CG1	NV830	6	317.	730.	154.	353.	.46	139.	319.	.36	8.	58.
CG1	NV834	6	221.	507.	57.	132.	.46	147.	337.	.35	8.	39.
CG1	NV838	6	222.	512.	45.	103.	.45	160.	369.	.33	8.	40.
CG1	NV842	6	170.	390.	64.	147.	.49	70.	162.	.33	21.	82.
CG1	NV846	6	128.	296.	57.	131.	.49	47.	107.	.29	19.	57.
CG1	NV850	6	85.	195.	23.	52.	.49	35.	80.	.27	32.	63.
CG1	NV854	6	44.	100.	0.	0.	.00	21.	47.	.27	53.	53.
CG2	NV830	6	60.	139.	16.	37.	1.00	16.	36.	.39	47.	66.
CG2	NV834	6	57.	130.	0.	0.	.00	48.	110.	.39	15.	20.
CG2	NV838	6	96.	220.	0.	1.	.50	90.	206.	.37	6.	13.
CG2	NV842	6	118.	271.	3.	7.	.54	86.	198.	.35	25.	67.
CG2	NV846	6	84.	193.	2.	4.	.54	71.	163.	.35	13.	26.
CG2	NV850	6	57.	130.	1.	2.	.54	29.	67.	.35	47.	61.
CG3	NV834	6	103.	237.	45.	103.	1.18	58.	134.	.35	0.	0.
CG3	NV838	6	108.	249.	78.	178.	.97	28.	65.	.31	2.	6.
CG3	NV842	6	95.	218.	73.	168.	.76	20.	46.	.34	2.	4.
CG3	NV846	6	92.	211.	64.	147.	.76	20.	46.	.34	9.	18.
CG3	NV850	6	66.	151.	43.	99.	1.06	7.	16.	.35	24.	36.
CG3	NV854	6	29.	68.	22.	51.	1.53	0.	0.	.00	24.	17.
TOTAL			2527.	5812.	911.	2094.	.65	1236.	2842.	.34	15.	876.

MIN2	NV834	3	47.	108.	5.	11.	.79	38.	88.	.27	9.	9.
MIN4	NV760	3	117.	269.	69.	160.	.94	1.	3.	.29	39.	106.
MIN4	NV770	3	177.	406.	131.	300.	1.00	34.	77.	.29	7.	28.
MIN4	NV780	3	392.	902.	228.	524.	.99	115.	266.	.25	12.	112.
MIN4	NV790	3	418.	962.	254.	584.	.95	134.	307.	.25	7.	71.
MIN4	NV800	3	648.	1491.	427.	982.	.81	203.	467.	.29	3.	42.
MIN4	NV810	3	501.	1151.	398.	916.	.73	90.	207.	.31	3.	29.
MIN4	NV820	3	331.	762.	271.	623.	.76	54.	124.	.34	2.	15.
MIN4	NV830	3	147.	338.	113.	260.	.97	30.	70.	.34	3.	9.
MIN4	NV834	3	36.	82.	32.	74.	.87	0.	0.	.00	10.	8.
MIN7	NV790	3	25.	59.	25.	59.	.82	0.	0.	.39	0.	0.
MIN5	NV790	3	683.	1572.	69.	159.	.66	359.	826.	.21	37.	588.
MIN5	NV800	3	726.	1669.	36.	84.	.65	548.	1260.	.20	19.	325.
MIN5	NV810	3	562.	1292.	56.	130.	.53	440.	1012.	.20	12.	150.
MIN5	NV820	3	462.	1063.	134.	309.	.72	276.	635.	.21	11.	119.
MIN5	NV830	3	216.	497.	67.	155.	.79	149.	342.	.26	0.	1.
MIN5	NV834	3	41.	93.	11.	25.	.64	28.	65.	.32	3.	3.

Tabela 14
Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico B (pelo programa LYNX)

LYNX VOLUMETRICS - GEOLOGICAL RESERVES

PROJECT : CATALAO
ANALYSIS : TIPO B

3D GRID MODEL : PLANO
PRIMARY NUMERIC VARIABLE : Nb2O5
CUTOFF VALUE : .40
NUMERIC VARIABLE SCALING FACTOR : 1.0
VOLUME MODEL SELECTION : G,PLANO ,MIN*,*,3
VOLUME INTEGRATION INCREMENT : 1.00
DENSITY OF DEFINED MATERIAL : 2.300
DENSITY OF UNDEFINED MATERIAL : 2.300
VOLUME/TONS SCALING FACTOR : 1000.0

<.....VOLUME IDENTITY.....><--...TOTAL.....><GREATER THAN CUTOFF><LESS THAN CUTOFF><UNDEF

UNIT	COMPONENT	CODE	VOL	TON	VOL	TON	Nb2O5	VOL	TON	Nb2O5 (%)	TON	
MIN1	NV740	3	110.	253.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	253.
MIN1	NV750	3	186.	427.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	427.
MIN1	NV760	3	349.	803.	0.	0.	.00	139.	320.	.29	60.	482.
MIN1	NV770	3	256.	589.	92.	212.	.43	104.	239.	.30	23.	138.
MIN1	NV780	3	394.	906.	129.	297.	.44	206.	474.	.29	15.	135.
MIN1	NV790	3	434.	998.	24.	54.	.46	355.	816.	.26	13.	127.
MIN1	NV800	3	413.	950.	0.	0.	.00	387.	890.	.25	6.	61.
MIN1	NV810	3	489.	1124.	55.	127.	.43	396.	910.	.25	8.	87.
MIN1	NV820	3	304.	700.	62.	142.	.54	230.	530.	.27	4.	27.
MIN1	NV830	3	135.	310.	32.	74.	.66	102.	234.	.30	1.	2.
MIN3	NV730	3	433.	997.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	997.
MIN3	NV740	3	489.	1125.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	1125.
MIN3	NV750	3	603.	1386.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	1386.
MIN3	NV760	3	969.	2228.	26.	61.	.61	339.	779.	.18	62.	1389.
MIN3	NV770	3	664.	1527.	9.	20.	.49	391.	900.	.17	40.	607.
MIN3	NV780	3	891.	2048.	44.	102.	.46	602.	1385.	.21	27.	562.
MIN3	NV790	3	939.	2160.	101.	233.	.50	731.	1682.	.24	11.	246.
MIN3	NV800	3	665.	1530.	11.	25.	.49	567.	1305.	.23	13.	199.
MIN3	NV810	3	675.	1553.	147.	338.	.56	448.	1031.	.25	12.	184.
MIN3	NV820	3	684.	1572.	246.	565.	.57	362.	832.	.27	11.	175.
MIN3	NV830	3	332.	764.	81.	185.	.53	199.	457.	.26	16.	122.
MIN3	NV834	3	128.	294.	47.	107.	.52	57.	132.	.28	19.	55.
MIN3	NV838	3	110.	253.	38.	87.	.51	53.	122.	.28	17.	44.
MIN3	NV842	3	44.	101.	20.	46.	.48	16.	37.	.22	18.	18.
MIN2	NV740	3	256.	588.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	588.
MIN2	NV750	3	507.	1166.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100.	1166.
MIN2	NV760	3	882.	2029.	9.	20.	.99	290.	667.	.27	66.	1343.
MIN2	NV770	3	786.	1809.	82.	189.	1.03	353.	812.	.25	45.	807.
MIN2	NV780	3	1145.	2632.	154.	354.	.93	603.	1387.	.23	34.	892.
MIN2	NV790	3	938.	2157.	74.	171.	.55	673.	1548.	.24	20.	439.
MIN2	NV800	3	701.	1613.	15.	35.	.59	588.	1353.	.25	14.	225.
MIN2	NV810	3	532.	1223.	29.	68.	.52	451.	1038.	.25	10.	118.
MIN2	NV820	3	476.	1096.	155.	356.	.53	284.	652.	.28	8.	88.
MIN2	NV830	3	151.	347.	67.	153.	.58	72.	166.	.33	8.	27.

Tabela 15
Relatório de Reservas do Tipo Mineralógico C (pelo programa LYNX)

LYNX VOLUMETRICS - GEOLOGICAL RESERVES

PROJECT : CATALAO
 ANALYSIS : Rocha

3D GRID MODEL : PLANO
 PRIMARY NUMERIC VARIABLE : Nb2O5
 CUTOFF VALUE : .40
 NUMERIC VARIABLE SCALING FACTOR : 1.0
 VOLUME MODEL SELECTION : G,PLANO ,CM*,*,25
 VOLUME INTEGRATION INCREMENT : 1.00
 DENSITY OF DEFINED MATERIAL : 2.300
 DENSITY OF UNDEFINED MATERIAL : 2.300
 VOLUME/TONS SCALING FACTOR : 1000.0

<.....VOLUME IDENTITY.....><--....TOTAL.....><GREATER THAN CUTOFF><LESS THAN CUTOFF> <UNDEF

UNIT	COMPONENT	CODE	VOL	TON	VOL	TON	Nb2O5	VOL	TON	Nb2O5	(%)	TON
CM1	NV730	25	363.	834.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	834.
CM1	NV740	25	211.	486.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	486.
CM1	NV750	25	187.	430.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	430.
CM1	NV760	25	305.	701.	45.	104.	1.02	90.	207.	.28	56	390.
CM1	NV770	25	217.	500.	87.	201.	.71	74.	170.	.29	26	129.
CM2	NV730	25	805.	1852.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	1852.
CM2	NV740	25	952.	2189.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	2189.
CM2	NV750	25	1026.	2361.	0.	0.	.00	0.	0.	.00	100	2361.
CM2	NV760	25	1063.	2446.	212.	488.	1.37	157.	360.	.15	65	1597.
CM2	NV770	25	364.	836.	156.	358.	1.89	94.	217.	.10	31	262.
CM2	NV780	25	142.	327.	128.	294.	1.33	7.	15.	.36	5	18.
CM2	NV790	25	39.	91.	37.	86.	.71	2.	5.	.39	0	0.
CM3	NV760	25	445.	1024.	66.	152.	.90	13.	30.	.25	82	841.
CM3	NV770	25	532.	1224.	84.	194.	.69	127.	292.	.29	60	738.
CM3	NV780	25	671.	1544.	80.	185.	.56	240.	553.	.26	52	807.
TOTAL			7323.	16844.	897.	2062.	1.17	804.	1848.	.23	77	12933.