UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

APLICAÇÃO DE ÍNDICE MINERALÓGICO COMO APOIO NA AVALIAÇÃO DE
RESERVAS DA MINA DE FOSFATO DE CAJATI-SP

Thiago Bastos Bonás

Orientadora: Prof. Dra. Lília Mascarenhas Sant' Agostino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais

SÃO PAULO
2007

Dedico este trabalho à minha família, Geovana e a pequena Júlia, minhas companheiras, onde encontro tudo aquilo que preciso para ser justo e feliz, e ao meu finado avô Eufrásio de onde tiro tudo de bom e perfeito, pois enquanto vivo foi um grande exemplo de homem e, agora desencarnado, é seguramente LUZ.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof^a. Dra. Lília M. Sant'Agostino pelos ensinamentos e transmissão de tudo que me transformou em um profissional melhor, pela sua capacidade de estabelecer linhas concretas e objetivas de estudo e finalmente pela difusão da geologia aplicada. Nesta conduta vejo o verdadeiro significado do tema extensão.

Aos colegas de IGc hoje distantes, que com muita alegria pude desfrutar bom tempo de minha vida. Um forte abraço para o Sérgio Rodrigues, Carlos Henrique, André Oliveira, Frederico Faleiros e Daniel Raposo.

A Bunge Fertilizantes pelo apoio ao desenvolvimento de meus trabalhos.

Aos amigos Marcelo Alves Pereira e Agenor de Faria Jr. pelo tempo em que pudemos compartilhar nossas experiências profissionais e tudo que nos faz pessoas melhores e mais maduras. Um grande abraço.

Às funcionárias da Seção de Pós Graduação Ana Paula Cabanal e Magali Poli Fernandes Rizzo, por toda ajuda e eficiência no atendimento ao Pós Graduando. Minhas sinceras considerações.

Não são nossas habilidades que dizem quem somos e sim nossas escolhas.

RESUMO

BONÁS, T. B. *Aplicação de índice mineralógico como apoio a avaliação de reserva da mina de fosfato de Cajati-SP*. 2007. 77f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

A mina de fosfato de Cajati localiza-se a 230 km a sudeste da cidade de São Paulo. Nela aflora, de forma alongada segundo a direção N27°W, um corpo de carbonatito mineralizado a apatita. O corpo mineralizado é subdividido em unidades litológicas a partir de variações nas características físicas (estruturas) e mineralógicas da matriz carbonática, dos principais acessórios e menores constituintes (textura e proporções).

Dentro das unidades litológicas existentes destacam-se a Zona de Xenólitos e Zonas de Diques, regiões caracterizadas por misturas entre magnetita-clinopiroxenitos, rocha encaixante e estéril com relação à mineralização de fosfato, e carbonatito em proporções que podem chegar a quase 100% de clinopiroxenito. Observam-se ainda zonas de reação, no contato entre as rochas descritas, caracterizando um bandamento centimétrico de composição silicática / carbonática com mineralogia peculiar e que na maioria das vezes são mineralizados economicamente a apatita.

Considerando as Zonas de Xenólitos e de Diques como de aproveitamento parcial em função da presença do clinopiroxenito estéril e que as relações de distribuição espacial desta fase contaminante é errática sem qualquer controle geológico conhecido de distribuição, buscou-se estabelecer indicadores que permitem a caracterização percentual entre minério e estéril contidos nesta região. Para tanto foram realizados estudos de relação entre a composição química e a mineralogia do minério que permitiram estabelecer tais índices, os quais aplicados aos dados de análises químicas obtidos a partir de testemunhos de sondagem rotativa e de percussão (pó de perfuratriz) associados a parâmetros de lavra permitiram estabelecer níveis de aproveitamento mineral para as rochas existentes nestas unidades litológicas.

Os indicadores matemáticos se apoiaram nos teores de sílica que refletem as proporções de silicatos (flogopita, olivina e piroxênio) e estabelecem nítidas fronteiras composicionais entre as três litologias presentes nas zonas de xenólitos, e definiram a Função Xenólitos.

As variáveis mineralógicas apóiam as determinações de potencialidades volumétricas dos recursos discretizados no modelo de blocos de longo prazo e o aproveitamento das frentes nos planos de pré-lavra.

Palavras Chave: Carbonatitos; Estequiometria; Mineralogia Aplicada

ABSTRACT

BONÁS, T. B. *Aplicação de índice mineralógico como apoio a avaliação de reserva da mina de fosfato de Cajati-SP*. 2007. 77f. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

The Cajati phosphate mine is located 230 km southeast of São Paulo city. The ore body is composed by carbonatites mineralized with apatite, which are disposed in plant as an ellipse N27°W oriented. The carbonatite is subdivided in lithological units defined by variations in the physical aspects (structures) and the mineralogical characteristics of the carbonatic matrix, mainly related with the principal accessories and smaller constituents (texture and proportions).

Xenoliths zones and Dikes zones are remarkable among the lithological units, they comprise portions characterized by mixtures of carbonatite and magnetite-clinopyroxenites, the hosting waste rock, in proportions that can reach almost 100% of clinopyroxenite. Some reaction zones are observed in the described rocks contact, characterizing centimetric bands (silicatic / carbonatic composition) with peculiar mineralogy that are frequently mineralized.

Considering the Xenoliths zones and Dikes zones only partially profitable in function of the presence of the clinopyroxenite waste and that the spatial distribution of this contaminant rock is erratic without any geological known settings, efforts were applied in the establishment of mineralogical indicators to define the relative proportions of the constituent rocks.

Stoichiometric relationships between chemical and mineralogical characteristics associated with mining parameters allowed to set up levels of mineral profitability for these lithological units, which were applied in the data obtained by rotative and percussion drilling.

Mathematical indicators based on silica grades, which reflect the silicates (phogopite, olivine and pyroxene) proportions, established a clear compositional division between the three lithologies present in the xenoliths zones and defined the Xenoliths Function.

The mineralogical variables support the profit potentiality definition for the ore resources associated with these assimilation zones, which were applied in the block model and are also used in the mining fronts.

Keywords: Carbonatites; Stequiometry; Applied Mineralogy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de acessos e localização da área de estudo	13
Figura 2 Mapa geológico do Complexo Alcalino de Jacupiranga adaptado de Germann <i>et al.</i> (1987)	18
Figura 3 Mapa das intrusões carbonatíticas modificado de Gaspar (1989). Intrusões: C1, C3 e C4- Sovitos calcíticos; C2- Sovito dolomítico; C5- Rauhaugito	21
Figura 4 Distribuição das Unidades Litológicas no Nível -60 (imagem à esquerda) de acordo com o modelo geológico atualizado em junho/2003 (visão 3D na imagem à direita)	23
Figura 5 Zona de xenólitos sul	25
Figura 6 Zona de xenólitos este	26
Figura 7 Zona de xenólitos norte	26
Figura 8 Morfologia em escala de afloramento da zona de xenólitos norte	28
Figura 9 Apresentação gráfica da relação Carbonatito > Zona de Reação > Jacupiranguito	28
Figura 10 Litologias formadoras das zonas de xenólitos e seus componentes mineralógicos	31
Figura 11 Esquema do encadeamento dos procedimentos realizados	32
Figura 12 Amostragem volumétrica realizada com equipamentos de lavra	39
Figura 13 Amostra estocada aguardando liberação do circuito de britagem	40
Figura 14 Fluxograma do processo de preparação das amostras e separação macroscópica das fases litológicas	41
Figura 15 Intervalos de amostragem em testemunhos de sondagem	42
Figura 16 Distribuição granulométrica e de teores das amostras volumétricas a -44,45 mm	46
Figura 17 Apresentação gráfica da distribuição de teores nos produtos de catação nas amostras volumétricas	50
Figura 18 Gráficos de correlação de teores de SiO ₂ com as proporções de Xenólitos	55
Figura 19 Validação de dados a partir de testemunhos de sondagem	58
Figura 20 Correlação das proporções de xenólitos por catação e pela função xenólitos	59
Figura 21 Front da rotina block model manipulation incluindo detalhes da sintaxe utilizada para descrever a função xenólitos para Zona de Xenólitos Norte	60
Figura 22 Apresentação da Função Xenólitos como variável no modelo de blocos	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química das Zonas de Xenólitos, base testemunhos de sondagem	30
Tabela 2 - Classificação granulométrica das amostras volumétricas britadas a -44,45 mm	45
Tabela 3 - Características dos litotipos obtidos por catação nas amostras volumétricas	48
Tabela 4 - Compilação de teores de P_2O_5 nas Zonas de Xenólitos com base em descrições macroscópicas de testemunhos de sondagem	51
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos das litologias nas Zonas de Xenólitos, dados de testemunhos de sondagem	53
Tabela 6 - Simulações de correlações visando à definição de % de xenólitos a partir dos teores de SiO_2	54
Tabela 7 – Resultados das proporções de xenólitos definidas pela Função Xenólitos e por catação manual	59

LISTA DE ABREVIATURAS

- CAJ - Complexo Alcalino de Jacupiranga
XEN - Xenólitos Norte (Terminologia de mina)
XES - Xenólitos Sul (Terminologia de mina)
XEE - Xenólitos Este (Terminologia de mina)
ZX - Zonas de Xenólitos

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA
 AGRADECIMENTOS
 EPÍGRAFE
 RESUMO
 ABSTRACT
 LISTA DE FIGURAS
 LISTA DE TABELAS
 LISTA DE SIGLAS
 SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Localização da Área de Estudo e Vias de Acesso	13
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	14
2.1. Objetivos	14
2.2. Justificativas	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Contexto Geológico	16
3.1.1. Regional	16
3.1.2. Local	19
3.2. Trabalhos Anteriores de Caracterização Tecnológica	24
4. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DO ESTUDO	25
4.1. Características morfológicas e texturais	27
4.2. Características de composição mineralógica e química	29
5. MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1. Revisão bibliográfica	33
5.2. Caracterização do objeto de estudo (Zona de Xenólitos)	33
5.3. Aquisição dos dados	34
5.4. Tratamento das amostras	35
5.5. Definição da Função Xenólitos	36
5.6. Validações da Função Xenólitos	36
5.7. Aplicação da Função Xenólito	37
6. RESULTADOS OBTIDOS	38
6.1. Aquisição dos dados	38
6.1.1. Amostras volumétricas	38
6.1.1.1. Coleta e preparação das amostras	38

6.1.2. Amostras de testemunhos de sondagem	42
6.2. Tratamento das amostras	44
6.2.1. Seleção de litotipos por catação	46
6.3. Definição da Função Xenólitos	51
6.4. Validações da Função Xenólitos	57
6.4.1. Testemunhos de sondagem	57
6.4.2. Amostras volumétricas	59
6.5. Aplicação da Função Xenólitos	60
7. CONCLUSÕES	62
7.1. Aprimoramento de parâmetros de descrição litológica	62
7.2. Desenvolvimento da metodologia de amostragem volumétrica	62
7.3. Caracterização química e correlação com macro-mineralogia	63
7.4. Considerações finais	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
ANEXOS	67

1. INTRODUÇÃO

O presente plano esteve fundamentado na necessidade de determinar as proporções de estéreis presentes nas unidades litológicas denominadas Zonas de Xenólitos que ocorrem associadas às unidades carbonatíticas na jazida do Morro da Mina, Cajati, SP.

O Morro da Mina vem sendo objeto de exploração mineira para obtenção de apatita essencialmente associada à carbonatitos desde 1942, para o que existe instalado no local um complexo industrial de mineração, beneficiamento e indústria química. Com início da lavra em rocha sã, na década de 70, e evolução das atividades de lavra constatou-se a presença de mineralização associada a zonas de incorporação de fragmentos da rocha encaixante pelo magma carbonatítico. Estas Zonas, denominadas de Xenólitos, são constituídas essencialmente por xenólitos de clinopiroxenitos (tradicionalmente denominados de jacupiranguitos) mesclados a material carbonatítico; nelas ocorrem porções sem mineralização a fosfato consideradas estéreis ou contaminantes, normalmente relativas ao jacupiranguito. Os xenólitos possuem dimensões extremamente variadas, de centímetros até métricas, e distribuição errática sem controles geológicos que auxiliem a determinação de sua representatividade em volume ou sua localização espacial.

Os carbonatitos da jazida constituem-se em rochas cujos carbonatos representam mais de 85% de sua composição que é complementada pelos acessórios mais comuns: apatita, magnetita, flogopita, olivina e sulfetos. Tal característica mineralógica os destaca significativamente dos clinopiroxenitos, máficos e de mineralogia menos variável, tendo sido o objetivo utilizar este contraste mineralógico como recurso para avaliar as proporções dos dois tipos de rocha integrantes da referida unidade litológica.

O desenvolvimento dos trabalhos focou a possibilidade do estabelecimento de parâmetros numéricos que fossem revertidos em potencial de aproveitamento volumétrico do recurso mineral existente na unidade Zonas de Xenólitos.

Recorreu-se, então, a critérios de composição química para avaliar as proporções de xenólitos com base nas diferenças mineralógicas marcantes entre os litotipos constituintes da unidade. No andamento dos trabalhos observou-se que estas diferenças se traduziam de forma bem clara na composição química disponível em testemunhos de sondagem, desde que estes foram sistematicamente amostrados e analisados quimicamente respeitando-se as variações de litologia e em amostras volumétricas geradas em frentes de lavra, após processo de separação manual dos litotipos em diferentes frações granulométricas e posterior análise química.

A determinação da assinatura estatística intrínseca para alguns elementos de cada uma das rochas formadoras das Zonas de Xenólitos foi o ponto de partida do desenvolvimento a metodologia aplicada e remete à importância desta ferramenta na geociência, mais particularmente na sua aplicação à mineração.

Os estudos apresentados mostram como a mineralogia de minério, mesmo quando descrita macroscopicamente, ou seja, baseada na determinação de principais constituintes possui uma notável aplicação na otimização do aproveitamento de recursos minerais.

1.1. Localização da Área de Estudo e Vias de Acesso

O complexo industrial de Cajati está localizado no município de Cajati, na região do Vale do Ribeira a sudeste do estado de São Paulo, próximo à divisa com o Paraná, e dista cerca de 240 km da capital paulista e 180 km de Curitiba, capital paranaense.

O acesso principal se faz pela BR-116, rodovia Régis Bittencourt, km 488,5, que liga o estado de São Paulo aos do sul do país, figura 1.

Figura 1 - Mapa de acessos e localização da área de estudo

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1. Objetivos

O trabalho visou à recomposição estequiométrica, com base nas diferenças mineralógicas marcantes entre as litologias componentes das Zonas de Xenólitos para determinação do percentual de porções aproveitáveis (carbonatitos) e não aproveitáveis (jacupiranguitos).

O objetivo foi gerar uma formulação matemática que se constituísse em índice mineralógico obtido a partir de análises químicas que pudesse ser aplicado como parâmetro numérico na avaliação de recursos e reservas minerais, bem como junto a atividades ligadas ao planejamento da lavra. As bases disponíveis para tal formulação foram dados de descrição macroscópica de frentes de lavra e de testemunhos de sondagem, e suas respectivas análises químicas.

Nas atividades de avaliação de reservas, os índices mineralógicos obtidos servirão como ponderadores volumétricos na obtenção das tonelagens dos litotipos componentes das Zonas de Xenólitos, servindo como base para o planejamento de lavra de longo prazo. Nos planos de lavra de curto prazo os dados gerados estarão atrelados ao índice de aproveitamento volumétrico das frentes “desmontadas”.

Dentro dos objetivos do trabalho, cuidou-se do desenvolvimento de procedimentos de validação da função matemática geradora do índice mineralógico atrelado à determinação de fases contaminantes e mineralizadas, através da sua correlação com padrões de recuperação do minério em frentes de lavra amostradas e retroagindo nas proporções litológicas obtidas por descrição macroscópica de furos de sondagem

2.2. Justificativas

O presente estudo insere-se em um programa de valorização das jazidas de fosfato com vistas ao atendimento de novas demandas de mercado e racionalização de recursos.

Quando apenas parâmetros químicos não são suficientes para coordenação do uso do minério liberado em uma frente de lavra é necessária a utilização de rotas, menos convencionais, ligadas a qualificação do recurso disponível mas que não percam o foco de aplicação, ou seja, devem surgir alternativas que atendam a necessidade da informação

praticamente em tempo real, pois elas balizam processos de *blending*, alocação de equipamentos e outras estratégias operacionais.

Outro aspecto menos operacional, mas economicamente estratégico está ligado à necessidade do aproveitamento máximo do recurso disponível. As zonas de xenólitos correspondem a considerável parcela dos recursos mineralizados a fosfato existentes na mina de Cajati. Não obstante a esta questão cabe destacar que sua maior porção é representada pela Zona de Xenólitos Norte que divide as unidades de carbonatito em norte e intermediária, criando uma fronteira na porção centro norte da cava tornando-se uma séria restrição de lavra no caso de não ser adequadamente aproveitada. Sendo compulsória sua remoção para maximizar a exploração das unidades carbonatíticas, tornou-se um desafio tecno-científico o aproveitamento dos recursos a ela associados.

Quanto mais precisa e eficaz for a determinação qualitativa de um minério maior será a possibilidade do mesmo ser recuperado e/ou concentrado com máxima eficiência, além da exclusão de possibilidades extremas de envio do mesmo a depósitos de estéril, prática que conjuga a perda de receita e geração de despesa, uma vez que material classificado como estéril a princípio não gera lucro.

O desenvolvimento do presente estudo justifica-se quando se insere de forma plena em planos estratégicos industriais utilizando não apenas características químicas das rochas, mas levando-se em conta aspectos mineralógicos macroscópicos para desenvolvimento de funções matemáticas que se traduzem no melhor entendimento da qualidade do recurso mineral disponível.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de informações relativas à mineralogia vem tomando ampla importância dentro de atividades ligadas ao acompanhamento de lavra em diversos bens minerais. A aplicação de conceitos ligados a associações e química mineral sempre tiveram como foco principal atividades de exploração mineira. Os chamados guias prospectivos, com o advento da aplicação de conceitos de mineralogia de minério, hoje são utilizados como parâmetros ligados ao rendimento metalúrgico em processos físicos e químicos de concentração mineral, controles de contaminantes, determinação de parâmetros físicos ligados à configuração de equipamentos de lavra e britagem, cargas de explosivos para desmonte de rocha, dentre outros.

Mais recentemente observam-se aplicações de índices ou variáveis mineralógicas, associados ao advento de tratamento estatístico e até geoestatístico, como apoio direto à avaliação de recursos e reservas minerais, bem como controladores de níveis de contaminantes que depreciam volumetricamente o aproveitamento de recurso mineral disponível.

Parte das dificuldades encontradas no seguimento da mineralogia aplicada à avaliação de recursos e reservas está atribuída ao caráter estratégico das informações que acabam ficando restritas às empresas que as geram ou consultoria especializada. Mesmo considerando estas restrições alguns trabalhos vêm tomando conhecimento público dentre os quais podemos citar Pereira (2003) que utilizou variável mineralógica na estimativa de reservas de ferro, aplicando dados mineralógicos representados por hematita especular. Métodos geoestatísticos de simulação condicional e de estimativa por krigagem foram usados para caracterizar a hematita especular em um modelo digital de blocos.

3.1. Contexto Geológico

3.1.1 Regional

O Morro da Mina está inserido no Complexo Alcalino de Jacupiranga, uma ocorrência brasileira clássica de rochas alcalinas e ultrabásicas com manifestações carbonatíticas associadas que constituem um depósito fosfático de afiliação magmática, atualmente em lavra. As rochas carbonatíticas ocorrem como uma expressão horizontal de cerca de 1.1 km² localizadas na porção centro-sul do Complexo.

O corpo carbonatítico principal se apresenta em uma estrutura interpretada como sendo um diatrema, descoberta por Bauer (1877) e investigado preliminarmente, em fins do século retrasado, por Derby (1891) e Hussak (1892, 1895, 1904, *apud* Ruberti *et al*, 1992), tendo estudos de maior detalhe, como os de Melcher (1954, 1965), somente a partir de 1943 com a remoção do manto de intemperismo decorrente de atividades de mineração a céu aberto no corpo carbonatítico do, então denominado, Morro da Mina.

A lavra de minério residual de teores elevados ($>25\%$ P_2O_5) perdurou até meados dos anos 60, década a partir da qual a base econômica da jazida começou a sofrer mudanças, iniciando a mineração do corpo carbonatítico subjacente ao manto intempérico que se mostrava mineralizado a apatita, com teores médios ao redor de 5% de P_2O_5 .

Foi possível, então, que trabalhos mais minuciosos sobre a geologia estrutural e mineralogia da área fossem desenvolvidos, a exemplo de Menezes Júnior & Martins (1984) e Gaspar & Wyllie (1983a e 1983b).

Determinações radiométricas K/Ar também foram feitas em carbonatitos do Complexo, indicando idade aproximada de 131 ± 3 Ma (Amaral, 1978), sendo reafirmadas posteriormente por Rb/Sr em trabalho de Roden *et al* (1985).

Com relação à tectônica, vários autores como Algarte (1972), Ferreira & Algarte (1979) e Almeida (1983), entre outros, admitem associação entre as rochas do Complexo e o lineamento de Guapiara, onde a atividade magmática alcalina mesozóica reconhecida nas rochas de Jacupiranga (Cajati) teria sido condicionada pelo Arco de Ponta Grossa.

Germann *et al* (1987) apresenta um mapa geológico onde o Complexo exhibe forma ovalada de aproximadamente 70 km^2 , segundo NNW, e acha-se inteiramente encaixado em rochas pré-cambrianas do Grupo Açungui (550 Ma): granodioritos de Fácies Cantareira, Proterozóico Superior, a norte e mica xistos do Complexo Turvo-Cajati, Proterozóico Inferior, ao centro e sul, figura 2.

As encaixantes do carbonatito são basicamente rochas alcalinas, representadas pelo jacupiranguito e dunitos bordejados por uma zona de assimilação na região setentrional. Vale realçar que a rocha jacupiranguito definida originalmente nas descrições de Derby (*op. cit*), designa um piroxenito constituído essencialmente por titano-augita, magnetita e nefelina, com biotita e olivina como acessórios, sendo que a presença de tal piroxênio na rocha é a característica fundamental para sua classificação.

Figura 2 - Mapa geológico do Complexo Alcalino de Jacupiranga adaptado de Germann *et al.* (1987)

Com a evolução dos estudos do Complexo, surgiu uma situação conflitante em relação ao termo, pois se verificou que o principal piroxênio do jacupiranguito é o diopsídio, e não a titano-augita; foi proposto, então, por Gaspar (1989) que o termo fosse evitado. Entretanto, em função do seu uso estar muito difundido na linguagem da mina, e mesmo na literatura, ele foi mantido neste trabalho, ao se referir ao corpo encaixante do carbonatito, subentendendo-se que se trata de um magnetita clinopiroxenito.

A intrusão alcalina apresenta também outros piroxenitos, peridotitos serpentinizados, ijolitos, nefelina sienitos, fenitos e, mais ao centro, carbonatitos, objeto deste trabalho, além de outros tipos de rochas alcalinas de menor expressão, que ocorrem principalmente sob a forma de diques, como essexitos, monchiquitos, melteigitos e fonalitos.

Ainda sobre o Complexo Alcalino de Jacupiranga, Reis (1983) e Ruberti *et al.* (1992) apresentaram sínteses das informações disponíveis, sendo tais trabalhos considerados as principais fontes das informações pesquisadas e aqui apresentadas.

3.1.2. Local

Considerando o corpo de carbonatito especificamente, porção onde está instalada a mineração de fosfato, o primeiro trabalho de maior relevância foi o de Gaspar & Wyllie (*op. cit.*) que identificou cinco fases de intrusões carbonatíticas, e não apenas duas (Melcher, *op. cit.*), e sua seqüência cronológica, tendo como rocha encaixante o chamado jacupiranguito.

Assim esta estrutura magmática foi interpretada como sendo uma chaminé vulcânica brechada, com forma cônica estreita e invertida, resultante de explosão subvulcânica de magma carbonatítico rico em voláteis, que ao atingir profundidades rasas da crosta provocou a expansão gasosa súbita como magma fluidizado, envolvendo fragmentos dos dutos, no caso xenólitos de jacupiranguito, e do próprio magma.

Uma característica marcante da região que evidencia a incorporação das encaixantes pelo magma é a presença de zonas de reação ou de fenitização, que correspondem a um bandamento de minerais carbonáticos e silicáticos neoformados, geradas da interação do carbonatito com o jacupiranguito, cuja espessura varia de milímetros a centímetros, podendo atingir até 30 cm.

Morbidelli *et al.* (1986) os autores elaboraram pela primeira vez estudo detalhado sobre as zonas de reação; eles descreveram uma seqüência de bandas silicáticas, a partir do jacupiranguito para o carbonatito, que se inicia com a banda A (anfíbolítica), banda F (flogopítica) e banda O (olivínica).

A banda A encontra-se no contato com o jacupiranguito, onde os anfíbólios são pseudomorfos de piroxênio. Apresenta espessura variável de 1 a 5 cm, tem coloração verde escura, intercalando-se com bandas milimétricas de carbonatos, num bandamento bem definido; ocorrem ainda flogopita e magnetita remanescentes. A banda F, mais desenvolvida, é composta essencialmente por flogopita, além de ilmenita e magnetita, com a estrutura bandada não tão regular ora ocorrendo como manchas apresenta espessura variável de poucos centímetros a 1 m e coloração vermelho vinho. A banda O, mais externa, contém, além de olivina abundante, flogopita, magnetita e ilmenita, apresenta espessura das bandas de dimensões centimétricas a decimétricas e a coloração muito escura, quase preta, sendo que sua estrutura bandada é menos regular que das fases anteriores, deformação essa causada por

veios carbonatíticos; comumente os cristais de olivina encontram-se fortemente afetados por serpentinização.

A fase carbonática pode ocorrer como bandas, manchas ou veios, que são essencialmente calcíticas. Em geral apresentam apatita associada, bem desenvolvida na banda F, além de flogopita e anfibólio.

Menezes Júnior & Martins (*op. cit*) dividiram os minerais da assembléia do depósito em dois grupos: aqueles encontrados no carbonatito e os encontrados no jacupiranguito. A lista completa consiste em 53 espécies. No carbonatito esses autores observaram: ancilita, aragonita (secundária), baddeleyta, barita, brucita, calcita (primária e secundária), calcopirita, titano-clinohumita, dolomita, estroncianita, flogopita, fluorapatita, forsterita, galena, geikielita, magnésio-ilmenita, magnetita, manasseita, pirita, pirrotita, quartzo (secundário), quintinita, minerais do grupo da serpentina, uranopirocloro, valeriita.

No jacupiranguito os minerais encontrados, segundo esses autores, são: aegirina, titano-andratita, titano-augita, barita, biotita, calcita, calzirtita, diopsídio, dolomita, edingtonita, flogopita, fluorapatita, forsterita, hornblenda, magnésio-ilmenita, magnetita, natrolita, nefelina, perovskita, pirita, pirrotita, richterita, schorlomita, tazheranita, titanita, tochilinita, tremolita, vesuvianita, vigezzita, wolastonita, zircão, zirconolita e zirkelita.

Com o controle químico e geológico efetuado durante as atividades de mineração e mapeamento de detalhe das frentes de lavra, foi possível a elaboração de um mapa com maior detalhamento de feições estruturais (foliação e lineação mineral) destas cinco fases intrusivas e, também, o desenvolvimento de um modelo estrutural do maciço rochoso em termos geométrico e evolutivo, figura 3. Assim, Gaspar (1985) dividiu as intrusões em duas porções: a porção Norte e a porção Sul. As intrusões da porção Sul foram denominadas: C₁, C₂, C₃ e as da porção Norte: C₄ e C₅, tendo sido determinado que a seqüência das intrusões carbonatíticas, da mais velha para a mais nova é: C₁, C₂, C₃, C₄ e C₅.

Figura 3 - Mapa das intrusões carbonatíticas modificado de Gaspar (1989). Intrusões: C1, C3 e C4- Sovitos calcíticos; C2- Sovito dolomítico; C5- Rauhaugito

Segundo o mesmo autor, C₁ é um sovito com granulação grossa e bandamento espesso, composto por calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos, sendo que toda a mineralogia é descrita pelo autor na ordem de maior para menor abundância. O bandamento é geralmente subvertical mergulhando para Norte. A lineação da apatita é sempre subhorizontal. Duas regiões ao Sul podem ser individualizadas por serem pobres em minerais não-carbonáticos, entretanto, fora dessas regiões o sovito é rico em olivina, magnetita e apatita e dentro contém apatita e flogopita.

A intrusão C₂ foi descrita como um sovito dolomítico com granulação fina a média composta por uma rocha finamente bandada, constituída por: calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos. Possui mergulho vertical, paralelo ao contato com C₁, e a lineação da apatita é subhorizontal. No contato entre C₂ e C₃ observou-se sovito e beforsito com bandamento difuso.

A intrusão C₃ também é um sovito com granulação média a grossa, com bandamento menos evidente, sendo composta por: calcita, apatita, magnetita, flogopita, dolomita, olivina e sulfeto. Este corpo tem uma característica diferente dos demais no centro o mergulho é para

Norte, entre 20 a 40°, já nas bordas torna-se mais íngreme e em alguns locais, vertical. A lineação da apatita é geralmente paralela ao mergulho.

Na porção Norte o corpo C₄ foi descrito como um sovito com granulação média, composto por: calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos, em forma de uma intrusão cilíndrica com bandamento vertical paralelo às bordas com lineação subhorizontal.

E, por último, a intrusão C₅, que foi descrita como um rauhaugito, com granulação média a grossa, composta por dolomita, apatita, flogopita, magnetita, sulfetos e calcita. Para o autor C₅ corta C₄ e possui bandamento com mergulhos próximos a 80° para Norte. A lineação da apatita é paralela ao mergulho.

Face à evolução da atividade de lavra da jazida com exposição de novas feições do corpo mineralizado que impactaram o processo de beneficiamento, associada à necessidade de reavaliação do depósito pela agregação de investigações em profundidade por sondagens rotativas, Saito *et al.* (2004) desenvolveram extensivo mapeamento das frentes de lavra que possibilitou um refinamento da divisão para o corpo carbonatítico. Foram, então, individualizadas doze unidades que levam em consideração não só características geológicas, como também características tecnológicas relevantes da rocha como minério, figura 4.

Em complemento às definições de Gaspar (*op. cit.*), os autores distinguiram sete unidades exclusivamente carbonatíticas (1, 2, 3, 6, 7, 8 e 9), com características petrográficas distintas, contatos mapeáveis e uma organização interna distinta, com foliação de fluxo concêntrico e com presença de xenólitos nas regiões de contato (jacupiranguito e carbonatitos mais antigos).

Correlacionando com o mapa de Gaspar (*op. cit.*), as unidades carbonatíticas 1 a 3 correspondem à intrusão C₁, as unidades 6 a 8 correspondem à intrusão C₂, a unidade 6 também corresponde à C₃, a unidade 9 corresponde à C₄, e aparentemente o carbonatito dolomítico (11) corresponde à C₅.

Foram diferenciadas, ainda, lentes métricas isoladas de foscoritos a norte e sul (4 e 10) e um corpo carbonatítico dolomítico (11), de granulação grossa a pegmatóide, em contato transicional, além de relíctos de rocha foliada, aparentemente produtos de alteração carbonática tardia (dolomitização) Lee (2006). Além da zona de xenólitos norte mapeada por Gaspar (1989), foram identificadas outras duas regiões a leste e sul, onde os xenólitos centimétricos a métricos são de jacupiranguito com bordas metassomatizadas, ora suportadas por matriz carbonática ora por xenólitos.

A zona de falha (5) corresponde à principal de um regime de cisalhamento rúptil que produziu um sistema de falhas principais e subsidiárias, com atitude N75W / subvertical e componente de cisalhamento sinistral. O falhamento produziu uma série de produtos como brechas, cataclasitos e *gouges*, além de permitir a alteração/oxidação pervasiva e fissural do carbonatito, em diferentes intensidades.

Unidades Litológicas

1	Carbonatito Periférico Sul	CPS	8	Carbonatito Branco	CBR
2	Carbonatito Calcítico Sul	CCS	9	Carbonatito Norte	CBN
3	Carbonatito Oxidado	COX	10	Zona com Foscoritos Norte	FCN
4	Zonas com Foscoritos Sul	FCS	11	Carbonatito Dolomítico	DOL
5	Zona de Falha	ZFA	12	Zonas de Xenólitos N	XEN
6	Carbonatito Intermediário	CBI	12	Zonas de Xenólitos NE	XEE
7	Carbonatito Foliado	CBF	12	Zonas de Xenólitos S	XES

Figura 4 - Distribuição das Unidades Litológicas no Nível -60 (imagem à esquerda) de acordo com o modelo geológico atualizado em junho/2003 (visão 3D na imagem à direita)

3.2. Trabalhos Anteriores de Caracterização Tecnológica

Alguns estudos de caracterização tecnológica, que reforçaram a base deste trabalho, dentre os quais destacam-se Alves (1999), que correlacionou os tipos litológicos de minério e seu aproveitamento na usina de beneficiamento implantando a primeira rotina de caráter sistemático voltada a caracterização tecnológica da jazida; Bonás (2001) que padronizou critérios de descrição litológica, com vista ao acompanhamento de lavra e pesquisa mineral. Nesta ocasião observou-se o quanto seria importante a existência de atributos numéricos associado às textura e proporções minerais, além da consolidação de critérios para nomenclaturas de cor e modelos de indicação de acessórios listando os mais comuns para cada unidade litológica. Foram definidos pranchas modelo que servem como guias para descrições de novas campanhas ou treinamento de pessoal.

Inserindo-se em um programa mais amplo voltado à caracterização tecnológica das zonas de xenólitos, Brumatti (2004) detalhou a sua mineralogia. Foram utilizadas duas técnicas voltadas à identificação mineral. A primeira delas, com a utilização de microscópio estereoscópico, permitiu a macro identificação de fases, sendo aplicada principalmente na determinação dos maiores constituintes além da determinação de suas proporções relativas nas amostras estudadas. A segunda técnica adotada foi a de caracterização via separações minerais e análises químicas e por difratometria de Raios-X pelo método do pó. O trabalho contou com um modelo de amostragem volumétrica que totalizou uma movimentação total de rocha de cerca de 750 toneladas.

4. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A Zona de Xenólitos (ZX) é formada pela interação entre carbonatito e jacupiranguito, sendo o segundo distribuído de maneira caótica na matriz carbonatítica. Em três regiões da jazida existem unidades de porte significativo e que são individualizadas no modelo geológico da jazida: Zona de Xenólitos Sul (XES), Zona de Xenólitos Este (XEE) e Zona de Xenólitos Norte (XEN), como ilustrados nas figuras 5, 6 e 7 respectivamente.

As Zonas Sul e Este têm caráter de contato entre a intrusão carbonatítica e as encaixantes, situando-se nos limites da jazida; ambas apresentam pequena expressão volumétrica e são, de fato, caracterizadas por uma intercalação entre carbonatito e jacupiranguito formando uma zona de diques. O termo xenólitos atribuído a estas regiões visa à diminuição da complexidade de terminologias que são empregadas no dia a dia da mina. A Zona de Xenólitos Norte em parte insere-se no meio de unidades carbonatíticas e parte no limite extremo norte da jazida do Morro da Mina, constituindo um segmento cilíndrico anelar de considerável expressão volumétrica.

Figura 5 – Zona de xenólitos sul

Figura 6 – Zona de xenólitos este

Figura 7 – Zona de xenólitos norte

4.1. Características morfológicas e texturais

As rochas formadoras das ZX possuem proporções variadas dos minerais componentes das encaixantes, além daqueles neoformados pela assimilação destas pelo magma carbonatítico gerador do corpo de minério.

A Zona de Xenólitos possui fragmentos de jacupiranguito de tamanhos variados, que chegam a atingir alguns metros, imerso em uma massa carbonatítica, feição que pode ser observada na figura 8. A proporção entre essas duas fases varia amplamente, sendo que em alguns locais pode haver 70% de jacupiranguito em 30% de carbonatito.

Uma característica marcante dessa região é a presença de zonas de reação, que correspondem a um bandamento de minerais carbonáticos e silicáticos neoformados, geradas da interação do carbonatito com o jacupiranguito (femitização), cuja espessura varia de milímetros a centímetros, podendo atingir em torno de 30 cm como ilustrado nas fotos da figura 9. Macroscopicamente forma bandas avermelhadas a cor de vinho, constituídas na sua maioria por flogopita, contudo e principalmente no contato com jacupiranguitos, são observados cristais de anfibólio associados as zonas de reação, com textura fibrosa, que crescem ortogonalmente a direção de desenvolvimento do bandamento mineralógico marcado pelas flogopitas e carbonatos.

Os fragmentos de jacupiranguitos mostram-se praticamente inalterados, com as características originais da rocha encaixante. Um aspecto morfológico bem evidente associado a femitização é o da concentração do processo de digestão magmática em regiões mais angulares dos xenólitos forçando sempre o arredondamento dos mesmos.

O carbonatito contido nestas zonas é principalmente calcítico, sendo que apresenta conteúdo variável de apatita, magnetita e silicatos. Destaca-se que a Zona de Xenólitos Sul apresenta características marcadamente diversas que as outras duas zonas (XEN e XEE), com porções de textura “pegmatóide” de desenvolvimento de cristais milimétricos a centimétricos das fases minerais componentes e maior conteúdo de magnetita.

Como característica física / tecnológica notável inerente as ZX quando submetidas a fragmentação, desmonte por explosivos e britagem, as três fases litológicas (carbonatito, zona de reação e jacupiranguito) se liberam bastante tornando escassa a ocorrência de fragmentos com mistura de litologias. Esta propriedade pode ser facilmente explicada pela existência de zonas de fraqueza associadas a “contato” e intervalos de reação. Este aspecto foi fundamental no desenvolvimento do presente estudo, que considera quantificação destas fases litológicas e que, conforme característica descrita, já possuem dentro de parte do processo de cominuição

utilizado pela BUNGE, uma tendência natural de se separarem tornando todo o trabalho de qualificação macroscópica e validação muito mais precisos.

Figura 8 – Morfologia em escala de afloramento da zona de xenólitos norte

Legenda:

Demarcação de xenólitos

Jacupiranguito

Carbonatito

Testemunho de sondagem

Figura 9 – Apresentação gráfica da relação Carbonatito > Zona de Reação > Jacupiranguito

4.2. Características de composição mineralógica e química

A partir das descrições dos testemunhos de sondagem disponíveis até 2003, foram selecionados intervalos correspondentes aos três litotipos (carbonatitos, zonas de reação e jacupiranguito) classificados a partir de descrições macroscópicas e para os quais se dispunha de análises químicas, obtendo-se, assim, as características de composição química dos mesmos, como indicado na tabela 1.

Observa-se semelhança de valores de mínimos e máximos entre as Zonas Norte e Este para teores de CaO , Al_2O_3 e K_2O entretanto as distribuições destes teores são diferentes como indicado pelas modas. Já a zona Sul mostra comportamento bastante diferenciado mesmo quanto aos limites de variação de valores, exceção feita para o CaO em que mostra similaridade com as outras zonas de xenólitos.

Nos carbonatitos o P_2O_5 , em média, é superior a 3%, a sílica é maior nas Zonas de Xenólitos Este e Sul e o MgO com médias menores que 7% revelando uma componente calcítica a magnesiânica a estas rochas.

Dos dez elementos submetidos à dosagem aquele que mais traça uma zona de fronteira entre as rochas analisadas é a sílica, sempre maior nas zonas de reação e nos jacupiranguitos.

Os resultados da perda ao fogo corroboram bem a presença de carbonatos. Este fato é evidenciado pelos resultados apresentados para os carbonatitos que chegam a ser constituídos por até 80% de carbonatos.

Os litotipos formadores das zonas de xenólitos possuem assinaturas mineralógicas bem distintas conforme apresentado na figura 10. Os carbonatitos e zonas de reação possuem constituintes mineralógicos comuns porém suas proporções são muito diferentes. A flogopita, presente em pequena quantidade nos carbonatitos é o principal mineral da zona de reação seguido dos carbonatos. Os jacupiranguitos são formados por mais de 70% de minerais silicáticos sendo o de maior expressão o piroxênio.

A caracterização macroscópica da zona de xenólitos mostrou que o grande diferencial existente entre seus litotipos está ligado a presença ou não de minerais silicáticos e suas proporções, fato corroborado pelos resultados químicos obtidos.

Tabela 2 - Composição Química das Zonas de Xenólitos, base testemunhos de sondagem

Zona de Xenólitos Norte												
Litologia	parâmetros	Teores (%)										
		P₂O₅	MgO	SiO₂	CaO	Fe₂O₃	Al₂O₃	TiO₂	K₂O	S	SrO	PF
Jacupirangitos	mínimo	0,01	2,80	12,3	12,90	5,20	1,61	0,54	0,01	0,01	0,02	0,22
	máximo	8,06	20,10	46,1	33,40	34,50	6,05	5,95	3,56	0,47	0,26	23,20
	média	2,17	11,03	34,1	19,44	14,09	4,67	2,86	0,99	0,11	0,10	5,97
	desvio padrão	2,08	4,91	6,7	3,45	5,88	0,79	0,98	0,79	0,10	0,05	4,83
	moda	0,01	4,75	32,6	21,10	18,30	4,31	2,45	0,63	0,01	0,07	6,67
Carbonatito SiO ₂ < 10%	mínimo	0,10	1,42	0,14	32,40	0,66	0,09	0,01	0,01	0,43	0,02	22,30
	máximo	18,6	15,5	9,41	51,5	16,7	1,49	1,70	2,04	0,70	1,32	43,6
	média	4,10	5,86	1,75	47,17	3,24	0,52	0,23	0,27	0,48	0,11	33,86
	desvio padrão	2,01	2,94	2,01	4,17	2,43	0,27	0,21	0,31	0,05	0,12	3,22
	moda	4,02	3,96	0,62	50,69	1,77	0,48	0,01	0,01	0,45	0,06	32,81
Zonas de Reação SiO ₂ > 10%	mínimo	0,16	3,28	10,4	13,6	4,52	1,56	0,53	0,16	0,01	0,04	1,05
	máximo	5,96	24,8	40,4	34,7	27,7	6,26	3,88	5,56	0,45	4,00	29,8
	média	2,49	13,6	23,2	22,3	11,1	3,40	1,80	1,61	0,25	0,24	15,2
	desvio padrão	1,42	5,38	7,14	4,62	4,36	1,07	0,85	0,83	0,09	0,47	6,41
	moda	1,35	16,6	20,0	18,8	10,7	1,56	0,96	0,76	0,25	0,08	14,2
Zona de Xenólitos NE												
Jacupirangitos	mínimo	0,01	11,9	21,5	14,0	7,64	3,36	1,50	0,11	0,01	0,03	0,49
	máximo	3,69	19,0	41,9	24,6	30,2	6,19	4,97	3,34	0,27	0,16	18,4
	média	0,77	14,1	34,3	20,2	15,1	4,87	3,02	0,76	0,10	0,08	5,54
	desvio padrão	0,92	1,90	5,42	2,75	4,39	0,84	0,76	0,68	0,09	0,04	4,75
	moda	0,01	12,9	35,7	18,0	12,9	5,44	2,43	0,30	0,01	0,12	10,8
Carbonatito SiO ₂ < 10%	mínimo	0,27	1,96	0,23	26,4	1,85	0,13	0,10	0,01	0,26	0,05	20,0
	máximo	10,4	15,9	9,83	52,1	21,3	1,81	1,98	1,23	0,64	0,37	39,3
	média	4,58	6,89	2,91	43,0	5,64	0,60	0,38	0,32	0,48	0,11	34,0
	desvio padrão	1,95	2,77	2,46	5,19	3,36	0,41	0,31	0,26	0,07	0,06	3,68
	moda	2,18	10,7	3,20	49,1	3,01	0,47	0,19	0,11	0,47	0,07	33,1
Zonas de Reação SiO ₂ > 10%	mínimo	0,28	9,18	10,8	13,0	4,03	0,75	0,72	0,22	0,01	0,03	2,14
	máximo	4,69	24,3	38,0	37,2	26,7	5,72	4,41	2,81	0,39	0,19	28,3
	média	1,96	16,2	23,7	23,5	11,7	3,39	1,89	1,35	0,23	0,10	15,3
	desvio padrão	1,12	3,53	8,21	5,66	4,13	1,07	0,80	0,68	0,09	0,04	7,15
	moda	1,78	13,5	24,6	21,3	11,5	--	2,05	--	0,16	0,10	10,9
Zona de Xenólitos Sul												
Jacupirangitos	mínimo	0,01	12,5	28,8	12,6	11,8	4,04	2,62	0,04	--	--	0,10
	máximo	0,77	16,4	44,4	22,6	24,1	5,49	3,76	1,34	--	0,06	7,38
	média	0,17	14,5	38,9	17,4	16,6	4,83	3,05	0,46	--	0,03	2,16
	desvio padrão	0,27	1,41	5,68	3,35	4,53	0,56	0,37	0,54	--	0,02	2,37
	moda	0,01	--	42,80	--	13,40	--	--	--	--	--	--
Carbonatito SiO ₂ < 10%	mínimo	0,70	1,23	0,10	35,4	0,38	0,30	0,01	0,01	0,36	--	23,9
	máximo	9,44	7,87	8,19	53,9	13,2	0,92	1,10	0,38	0,51	0,17	41,3
	média	5,03	3,89	2,11	46,8	5,97	0,45	0,34	0,09	0,44	0,08	33,3
	desvio padrão	2,61	1,91	2,53	4,86	3,15	0,18	0,25	0,13	0,06	0,04	4,80
	moda	--	--	0,10	44,20	--	0,33	--	0,01	--	0,07	34,3
Zonas de Reação SiO ₂ > 10%	mínimo	0,09	12,4	22,4	15,9	6,24	2,14	1,01	0,22	0,23	--	2,17
	máximo	3,25	20,2	40,1	26,6	17,5	5,46	3,68	1,82	0,23	0,36	18,5
	média	1,13	14,8	31,4	19,5	13,8	4,30	2,42	0,97	0,23	0,08	8,90
	desvio padrão	1,01	1,99	5,58	3,16	2,97	0,98	0,75	0,44	--	0,08	4,94
	moda	--	13,80	--	18,20	17,50	--	--	0,85	--	0,05	--

Carbonatito:

Calcita / Dolomita

Apatita

Magnetita

Flogopita < 2%

Acessórios: Piroxênio e Olivina

Zona de Reação:

Calcita / Dolomita

Apatita

Flogopita = 55%

Acessórios: Piroxênio, Anfibólio e Olivina

Jacupiranguito:

Piroxênio = 40%

Magnetita

Flogopita

Olivina

Anfibólio

} = 35%

Outros: Serpentina

Figura 10 – Litologias formadoras das zonas de xenólitos e seus componentes mineralógicos

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as bases necessárias para o bom andamento do projeto e implantação da metodologia a seguir foram fornecidas pela BUNGE Fertilizantes, empresa detentora dos direitos minerais e de lavra dos carbonatitos aflorantes no Morro da Mina e colaboradora neste projeto.

O fluxograma da figura 11 apresenta a seqüência lógica das atividades executadas neste estudo. Nele é observado o paralelismo existente entre operações em duas escalas de trabalho, a de afloramento e de furos de sondagem. A justificativa para este modelo operacional está voltada a necessidade de se gerar procedimento final único que sirva para empresa aplicar em diferentes situações, como por exemplo, na exploração e lavra.

Cabe salientar que a convergência ao fluxo de trabalho ocorre no processo de validação do que foi definido como Função Xenólitos, reforçando o plano voltado ao atendimento de diferentes demandas.

A seguir, serão detalhados os métodos adotados e as atividades desenvolvidas para a realização deste trabalho.

Figura 11 - Esquema do encadeamento dos procedimentos realizados

5.1. Revisão Bibliográfica

No levantamento bibliográfico procurou-se enfatizar o conhecimento da química mineral, amplamente descrita em trabalhos internos da empresa voltados à tecnologia mineral. Foram consideradas informações existentes em sete trabalhos de formatura desenvolvidos por alunos do Instituto de Geociências - USP em convênio universitário com a BUNGE Fertilizantes, todos eles voltados ao refinamento da mineralogia e química mineral aplicada à tecnologia mineral dos carbonatitos aflorantes no Complexo Alcalino de Jacupiranga – CAJ, com vistas ao aproveitamento industrial do recurso disponível.

Publicações clássicas ligadas ao conhecimento genético e mineralógico dos carbonatitos do CAJ foram utilizadas, pois delas obteve-se forte base para cálculos de reestruturação mineralógica via estequiometria.

Publicações ligadas a atividades de avaliação dos recursos e reservas foram utilizadas como base para tratamentos estatísticos, fundamentais ao desenvolvimento dos trabalhos ora apresentados.

5.2. Caracterização do objeto de estudo (Zona de Xenólitos)

Observações de campo: Procurou-se a caracterização macroscópica das principais feições geológicas existentes na Zona de Xenólitos e suas relações espaciais com outras unidades de Carbonatito.

Integração com testemunhos de sondagem: Consistiu na correlação das feições observadas em campo com as informações obtidas por intermédio da descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem. Uma atenção adicional foi dada à questão da identificação das fases litológicas existentes, que deveriam corresponder àquelas identificadas nos trabalhos de geologia de superfície. Devido a questões de suporte amostral, as informações obtidas nas sondagens poderiam mascarar feições que em escala de afloramento são facilmente diagnosticadas.

5.3. Aquisição dos dados

Amostragem em testemunhos de sondagem: Foram utilizadas informações de testemunhos de sondagem relativos às Zonas de Xenólitos obtidos nas campanhas desenvolvidas em 2000, 2002 e 2003, que totalizaram 400 amostras analisadas por fluorescência de raios X via pastilha fundida a exceção 'S' onde foi utilizada pastilha fundida. Todos os resultados analíticos utilizados foram gerados no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP.

Para os testemunhos foram adotados os critérios de amostragem praticados na pesquisa mineral feita em Cajati pela BUNGE, desenvolvidos por Alves (1999) e refinados por Bonás (2001). Tais critérios consideraram intervalos amostrais de 5 m ao longo dos testemunhos, subdivididos segundo as intersecções litológicas desde que estas representassem segmentos maiores ou iguais a 0,90 cm, considerando aspectos ligados a proporções de maiores constituintes, natureza da matriz carbonática e feições estruturais do maciço. Esta sistemática teve por objetivo traduzir da melhor forma possível a variabilidade química existente nas diferentes unidades litológicas sem que se desviasse do objetivo principal da tomada de amostras que é o da modelagem geológica e avaliação dos recursos.

Amostragem de frentes de lavra: Voltada ao atendimento de atividades de caracterização tecnológica e de processo, a amostragem volumétrica teve, por definição, a característica de representar de forma mais realista o universo que se pretendeu estudar, atuando fortemente na questão do suporte e conseqüentemente representatividade amostral.

No estudo em questão foram utilizadas amostras volumétricas de cinco diferentes frentes de lavra, especificamente coletadas. A sistemática de amostragem volumétrica respeitou as etapas a seguir:

- A - Seleção da frente de lavra a ser amostrada,
- B - Geração de “material” por desmonte com explosivos e coleta, com uso de pá carregadeira, de 5 a 6 alíquotas com 30 toneladas cada,
- C - Britagem da alíquota primária em britador cônico giratório da unidade industrial com redução de fragmentos abaixo de 8”,
- D - Rebritagem em britadores cônicos também da unidade industrial com redução de fragmentos abaixo de 1,75”,

E - Confecção de pilha alongada de seção triangular com cerca de 20 m de comprimento com todo material amostrado no pátio de homogeneização usando-se para isso o *STAKER**

F - Tomada da alíquota final com cerca de 300 kg, em seções transversais à pilha triangular, com uso de pá manual.

5.4. Tratamento das amostras

Amostras de testemunhos de sondagem: Para verificação do comportamento estatístico dos principais óxidos que constituem as fases minerais existentes nas Zonas de Xenólitos foi utilizado o banco de dados dos testemunhos de sondagem, aliando-se análises químicas com as descrições dos testemunhos.

A composição do banco de dados partiu da amostragem executada em testemunhos de sondagem, para todos os furos realizados nas Zonas de Xenólitos, que constituem atualmente na base de informações utilizados na avaliação das reservas da mina de Cajati. Os elementos considerados nos estudos foram P_2O_5 , MgO, SiO_2 , CaO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , SrO, K_2O , SO_3 e PF.

Estatisticamente foram levantadas informações básicas como média, desvio padrão, máximo, mínimo e moda. O universo amostral para a Zona de Xenólitos Norte constituiu em 237 análises, enquanto que para as Zonas de Xenólitos Este e Sul 123 e 40 amostras respectivamente.

Foram também utilizados os dados da estimativa de teores por IQD dos blocos de lavra relativos às Zonas de Xenólitos, obtidos a partir do modelo de blocos atualizado em 2003 utilizado, naquela época, para execução do planejamento de longo e curto prazo da mina.

Amostras volumétricas: Concluída a fase de amostragem deu-se início à etapa de preparação e estudo das amostras em laboratório.

Uma alíquota de cerca de 40 kg de cada amostra, obtida por quarteamento em pilha alongada de seção triangular feita manualmente, foi submetida à classificação granulométrica nas malhas 44,450 mm, 12,700 mm, 9,525 mm e 6,350 mm por peneiramento a úmido.

* Equipamento para homogeneização de minério

A classificação granulométrica mostrou um comportamento bem peculiar do minério quando submetido à britagem, como era do conhecimento empírico na mina. As três fases litológicas que constituem a Zona de Xenólitos (Carbonatito, Jacupiranguito e Zona de Reação) mostraram boa liberação entre si. Essa característica permitiu, para as frações acima de 6,35 mm, a individualização, por catação manual, dos diferentes litotipos conseqüente determinação das proporções dos mesmos.

Os produtos gerados por intermédio da catação manual, para cada uma das amostras volumétricas, foram submetidos a processos de identificação mineral.

5.5. Definição da Função Xenólitos

Com base em correlações estabelecidas entre as composições químicas e mineralógicas a partir dos estudos realizados, recorreu-se a critérios apoiados nas diferenças mineralógicas marcantes entre as rochas constituintes traduzidas na sua composição química disponível.

A partir do tratamento de dados definiu-se uma função matemática para determinação de fases litológicas contidas nas Zonas de Xenólitos, tanto carbonatíticas como as contaminantes, a partir de dados de análises químicas, correspondendo ao que se chamou de Função Xenólito

5.6. Validações da Função Xenólitos

Para validação dos critérios propostos de cálculo das proporções de xenólitos foi feito um confronto da função aplicada nos dados de análises químicas com as descrições litológicas das amostras dos testemunhos de sondagem tomadas a intervalos compatíveis com os blocos de cubagem (cerca de 10 m).

Outro critério de validação baseou-se no confronto entre as proporções litológicas obtidas por intermédio da catação manual em diferentes frações granulométricas e os resultados percentuais de jacupiranguito e zona de reação obtidos aplicando-se a Função Xenólitos.

5.7. Aplicação da Função Xenólitos

Com o intuito de se representar a proporção de xenólito no bloco digital de lavra foi implementada uma rotina no sistema Gemcom - Gems v6.04 onde o valor percentual de fases litológicas contaminantes (xenólitos) foram definidas a partir da construção de uma rotina matemática interna ao software correspondente a Função Xenólitos. O sistema passou a reconhecer e discretizar os valores correspondentes a percentuais de contaminantes e considerá-lo em cálculos de cubagens.

6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1. Aquisição dos dados

As três zonas de xenólitos definidas na jazida apresentam nível diferente de informações. A mais investigada é a Zona de Xenólitos Norte e para a qual se dispõe de 237 amostras analisadas; a Zona de Xenólitos Este, de ocorrência no limite entre a intrusão carbonatítica e as rochas encaixantes, embora com menor número de amostras 123 ainda tem bom embasamento para avaliações estatísticas; já para a Zona de Xenólitos Sul os dados são mais escassos e a avaliação se baseou em um número de 40 amostras.

Os estudos das Zonas de Xenólitos se apoiaram em amostras volumétricas obtidas em frentes de lavra (zonas N e NE) e amostras de testemunhos de sondagem nas 3 zonas de xenólitos.

A heterogeneidade das Zonas de Xenólitos, com grande variação de proporções das fases litológicas componentes além de espessura das zonas de reação e dimensões dos blocos de jacupiranguito, faz sua amostragem ser complexa. Para melhor representatividade do domínio e qualidade dos resultados obtidos foi realizada amostragem volumétrica em frentes de lavra. Os dados relativos a furos de sondagem rotativa (amostras lineares) não possuem adequada representatividade face ao seu pequeno volume quando comparado à heterogeneidade de distribuição espacial das litologias componentes destas unidades.

6.1.1. Amostras volumétricas

6.1.1.1. Coleta e preparação das amostras

As amostras volumétricas foram coletadas em zonas de xenólitos distribuídas ao longo das faixas aflorantes na mina e em lavra na ocasião de amostragem, como indicado no croqui do ANEXO A.

Para a amostragem das frentes de lavra foram considerados desmontes de blocos de lavra posicionados de forma a abranger porções das zonas de xenólitos distribuídas ao longo das faixas aflorantes na mina e em lavra na ocasião de amostragem. As amostras foram selecionadas a partir de dados de pó de perfuratriz, comumente obtidos para o controle químico da lavra, tendo sido realizados desmontes especificamente voltados para obtenção de material das zonas de xenólitos.

A delimitação em campo de locais para coleta foi baseada em análises químicas obtidas a partir de pó de perfuratriz (malha de perfuração 3 x 4,5 m), as amostras lineares coletadas por sondagem roto-percussiva nas quais podem ocorrer perdas durante a amostragem (liberação de pó para o ambiente).

A tomada das amostras foi realizada com equipamentos de lavra, figura 12. As alíquotas geradas corresponderam a cinco viagens de caminhão Random com cerca de 27 t cada, totalizando 135 t por amostra.

Figura 12 – Amostragem volumétrica realizada com equipamentos de lavra

As amostras volumétricas geradas foram identificadas segundo o padrão de nomenclatura dos fogos utilizados na mina. O material amostrado ficava estocado em boxes aguardando a limpeza de todo o sistema de britagem em função de paradas realizadas para manutenção preventiva.

A foto da figura 13 apresenta uma das amostras B30F688 (Bancada 30 Fogo 688) com cerca de 130 toneladas estocada em um dos boxes criados.

Figura 13 – Amostra estocada aguardando liberação do circuito de britagem

O material coletado para cada amostra foi submetido a cominuição na unidade industrial, com britagem primária em 8" (203,20 mm) e britagem secundária com diâmetro máximo 1¾" (44,45 mm).

No retorno das operações as amostras eram submetidas a britagem com circuito limpo, o que garantia que não houvesse contaminação de minério vindo de outras frentes de lavra diferente da amostrada.

O minério britado foi homogeneizado em pilha alongada de seção triangular com recursos mecanizados no pátio de produção e retomado em parte, gerando alíquotas de aproximadamente 300 kg as quais foram encaminhadas para diversos tipos de estudos como indicado no fluxograma da figura 14. Após esta etapa, as amostras foram peneiradas a úmido gerando quatro frações granulométricas: -44,45 +12,7 mm, -12,7+9,525 mm, -9,525+6,35 mm e -6,35 mm.

Figura 14 – Fluxograma do processo de preparação das amostras e separação macroscópica das fases litológicas

6.1.2 Amostras de testemunhos de sondagem

As amostras de testemunhos de sondagem foram tomadas segundo os seguintes critérios:

- ⇒ Representatividade espacial - intervalos de testemunho de sondagem superiores a 10m (compatível com a escala de lavra);
- ⇒ Representatividade das características - propriedades físicas e mineralógicas obtidas nas descrições macroscópicas da unidade.

A amostragem dos testemunhos de sondagem foi realizada a intervalos de 5 m contados a partir do início do furo. Dentro de cada intervalo foram consideradas as intersecções litológicas quando representavam um segmento maior ou igual a 0,90 m, com base na descrição dos aspectos ligados a proporções de maiores constituintes, natureza da matriz carbonática e aspectos estruturais do maciço existentes. Desta forma foram introduzidas sub-amostras dentro de um mesmo intervalo que permitem recompor a base amostral geral. A caixa de testemunhos apresentada na figura 15 possui 3 intervalos de amostra individualizados (A, B e C). O intervalo A é formado por 2,6m de carbonatito, B por 1,4m de jacupiranguito e C por mais 1,0m de carbonatito totalizando um set de amostragem de 5,0m

Figura 15 – Intervalos de amostragem em testemunhos de sondagem

Esta sistemática teve por objetivo traduzir da melhor forma possível a variabilidade química existente nas diferentes unidades litológicas sem que se desviasse do objetivo principal da tomada de amostras que é o da modelagem geológica e avaliação dos recursos.

Foram utilizadas informações de testemunhos de sondagem relativos às Zonas de Xenólitos obtidos nas campanhas desenvolvidas em 2000, 2002 e 2003.

6.2. Tratamento das amostras

Após o processo de britagem e reamostragem descritos no item 6.1.1.1., fluxograma da figura 14, alíquotas de cerca de 50 kg foram submetidas à separação granulométrica com caracterização química das faixas, cujo resultado é apresentado na tabela 2.

Notou-se distribuição granulométrica similar para as amostras do banco trinta fogos 689, 688 e 682, com cerca de 75% retidos em 12,7 mm e 12% passantes em 6,35 mm. A outra amostra do banco 30 fogo 248 apresentou igual porcentagem de grossos com aumento relativo dos finos. A amostra do banco 10 mostrou-se mais friável, com 50% em peso contidos na fração mais grossa e 40% passantes na mais fina.

O P_2O_5 total foi mais elevado na amostra 304, contudo uma particularidade química deste elemento característica das amostras da Zona de Xenólitos Norte é do mesmo apresentar-se superior a 3,00% nas frações abaixo de 6,35mm com valores em torno de 4,55%. Na única amostra volumétrica gerada para a Zona de Xenólitos Este (688), este comportamento não foi observado.

A presença de finos (-6,35 mm), com teores superiores a 3,00%, gerados pelo sistema de britagem proporciona um aproveitamento direto de, pelo menos, uma das faixas granulométricas que segundo os números obtidos na classificação totalizam em média 24% da massa amostrada, ou seja, da frente de lavra. O número se refere a ¼ do produto lavrado na Zona de Xenólitos Norte dentro de especificações econômicas em P_2O_5 .

Quanto à distribuição da sílica nas frações pode-se dizer que as amostras que mostraram os menores percentuais em peso retidos em 12,70 mm (304, 248 e 688), ou seja, mais friáveis, conservaram os maiores valores de SiO_2 semelhantes nos extremos da distribuição em +12,70 e -6,35 mm nas amostras 248 e 688 maior na 304 para o passante em 6,35 mm, figura 16.

Para os demais elementos analisados o F688 apresentou pequeno desvio de valores para as diferentes frações granulométricas.

A distribuição do P_2O_5 nas diferentes frações mostrou o quanto as frações intermediárias, +9,53 e +6,35 mm não foram representativas quanto à presença de apatita.

Tabela 2 - Classificação granulométrica das amostras volumétricas britadas a -44,45 mm

Amostras	Fração	Peso	Teores (%)										Distribuição
	(mm)	(%)	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	PF	P ₂ O ₅ (%)	
B10F304/3	-44,45+12,7	49,4	2,76	32,9	11,2	13,4	8.57	1,87	1,07	0,76	24,0	39,7	
	-12,7+9,53	4,9	2,19	31,8	9,73	11,6	9,63	1,56	1,09	0,54	23,6	3,1	
	-9,53+6,35	6,1	3,12	33,8	10,6	13,5	8,86	1,89	1,11	0,61	24,7	5,6	
	-6,35	39,6	4,48	32,7	9,94	16,3	10,6	2,30	1,38	0,48	20,1	51,6	
	Total		3,45	32,8	10,6	14,4	9,45	2,03	1,20	0,58	22,5	100	
B30F248	-44,45+12,7	74,5	2,44	33,0	10,6	14,5	9,65	2,13	1,18		24,1	64,3	
	-12,7+9,53	3,9	2,41	33,4	10,6	14,1	9,42	2,11	1,19		24,15	3,4	
	-9,53+6,35	3,55	2,02	32,8	9,83	13,0	12,1	1,91	1,14		24,5	2,5	
	-6,35	18,1	4,65	34,5	9,84	14,5	8,93	2,15	1,15		22,3	29,7	
	Total		2,82	33,3	10,5	14,4	9,60	2,13	1,17		23,8	100	
B30F682/4	-44,45+12,7	77,9	2,67	42,0	7,24	6,58	4,89	0,85	0,614	0,35	33,9	72,4	
	-12,7+9,53	5,99	2,48	51,2	6,79	7,99	6,26	1,08	0,70	0,37	22,4	5,2	
	-9,53+6,35	5,23	2,55	41,8	7,70	6,31	4,22	0,74	0,44	0,39	34,8	4,6	
	-6,35	10,9	4,70	40,7	7,78	7,60	5,57	1,03	0,55	0,36	30,7	17,8	
	Total		2,87	42,3	7,30	6,76	5,01	0,88	0,60	0,24	33,0	100	
B30F688	-44,45+12,7	74,6	2,14	30,2	11,9	16,1	11,2	2,29	1,41	0,90	22,7	70,3	
	-12,7+9,53	5,93	2,28	29,6	12,3	19,4	9,47	2,67	1,50	0,71	20,9	6,0	
	-9,53+6,35	6,51	2,48	30,9	11,3	16,0	11,5	2,16	1,58	0,97	22,5	7,1	
	-6,35	13,0	2,91	30,5	11,1	17,5	11,2	2,40	1,61	0,85	21,0	16,7	
	Total		2,27	30,2	11,8	16,4	11,1	2,32	1,45	1,04	22,3	100	
B30F689/4	-44,45+12,7	79,0	2,55	30,5	13,3	15,8	9,72	2,20	1,18	0,86	23,1	72,4	
	-12,7+9,53	4,95	2,72	34,5	10,3	13,7	8,38	2,01	1,11	0,80	25,7	4,8	
	-9,53+6,35	4,09	2,34	30,7	12,3	13,5	11,3	2,16	1,06	0,86	24,6	3,4	
	-6,35	12,0	4,49	35,9	9,02	11,7	9,66	1,94	1,01	0,60	24,7	19,3	
	Total		2,78	31,4	12,6	15,1	9,71	2,16	1,16	0,84	23,5	100

Figura 16 - Distribuição granulométrica e de teores das amostras volumétricas a -44,45 mm

6.2.1. Seleção de litotipos por catação

As rochas formadoras das Zonas de Xenólitos apresentam, na fragmentação, tendência natural de liberação entre as três litologias básicas, carbonatito, zona de reação e jacupiranguito. Este fato foi utilizado na preparação das amostras volumétricas para os estudos.

Com vistas a obter amostras das litologias individualizadas procedeu-se a uma separação manual por catação nas três frações granulométricas mais grossas, apoiada na expressiva diferença de cor das mesmas conforme apresentado no ANEXO B e cujos resultados do balanço de massa e suas respectivas características químicas encontram-se na tabela 3. Esta separação visou obter dados para a validação da Função Xenólitos.

As proporções relativas de carbonatito tenderam a ser menores na fração mais grossa aumentando em direção à fina, efeito contrário foi observado para as proporções de jacupiranguito; a zona de reação ocorreu em quantidades relativas similares nas três frações granulométricas processadas.

Os teores de P_2O_5 apresentaram-se da mesma ordem de grandeza nos carbonatitos e nas zonas de reação, com valores entre 1,60 e 3,50%. Os teores mais elevados de fosfato mostraram-se preferencialmente associados às zonas de reação, menos freqüentemente aos carbonatitos.

O carbonatito mostrou teores da ordem de 4,70% MgO com sílica normalmente inferior a 1%, indicando que este óxido está associado aos carbonatos. Os teores de magnésio da zona de reação e do jacupiranguito oscilaram de 13 a 18%. Na amostra B30F688 oriunda da Zona de Xenólito Este, observou-se expressivo aumento do MgO nos carbonatitos na ordem de 6,00% evidenciando uma componente mais magnesiana aos carbonatos formadores desta fase.

Os teores de sílica mostraram-se expressivamente diversos nas três litologias: inferiores a 1,5% nos carbonatitos, 15 a 20% na zona de reação e 27 a 37% nos jacupiranguitos. O alumínio tende a seguir a sílica mostrando-se também com um indicador químico diferencial entre as litologias, associado ao potássio e a perda ao fogo.

Destacaram-se, ainda, tendências a similaridade de ordem de grandeza de teores de Fe_2O_3 e diferenças significativas para TiO_2 , mais elevados no jacupiranguito, onde foram por vezes observadas “ripas” de ilmenita.

O potássio, mais elevado nas zonas de reação, evidenciou bem a presença das flogopitas formadoras das bandas silicáticas associadas a esta fase litológica.

Tabela 3 - Características dos litotipos obtidos por catação nas amostras volumétricas

Fração (mm)	Litologia	Peso (%)	Teores (%)								
			P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	PF
B10F304/3											
-44,45+12,70	Carbonatito	51,2	3,52	45,4	4,25	0,82	7,11	0,11	0,19	-	38,3
	Zona de Reação	28,1	2,92	21,0	17,3	19,0	11,7	2,79	1,46	2,14	17,7
	Jacupiranguito	20,8	0,87	17,7	15,3	31,0	17,4	4,43	3,21	0,76	4,34
-12,70+9,53	Carbonatito	49,3	3,67	46,6	4,86	0,83	3,18	0,07	0,12	-	38,6
	Zona de Reação	26,2	2,87	22,7	14,6	16,9	14,2	2,51	1,51	1,62	17,3
	Jacupiranguito	24,5	0,47	18,6	15,9	30,9	15,4	4,04	2,93	0,49	4,86
-9,53+6,35	Carbonatito	54,0	2,94	46,4	4,82	0,74	2,97	0,08	0,05	-	38,9
	Zona de Reação	19,5	3,34	21,7	17,2	18,0	14,3	2,49	1,34	1,80	17,5
	Jacupiranguito	26,5	1,34	16,9	17,1	31,4	15,7	4,36	2,76	0,98	5,06
B30F248											
-44,45+12,70	Carbonatito	47,4	2,29	46,2	4,29	0,82	7,11	0,11	0,19	0,02	38,2
	Zona de Reação	33,5	2,71	21,7	17,8	19,0	11,7	2,79	1,46	2,05	17,7
	Jacupiranguito	19,1	0,58	17,7	12,6	30,9	17,4	4,43	3,21	0,41	4,34
-12,70+9,53	Carbonatito	54,4	2,60	46,2	4,94	0,83	3,18	0,07	0,12	0,01	38,6
	Zona de Reação	23,6	2,98	21,9	17,3	16,9	14,1	2,51	1,51	2,10	17,3
	Jacupiranguito	22,0	0,44	20,0	14,3	30,9	15,4	4,04	2,93	0,63	4,86
-9,53+6,35	Carbonatito	54,0	2,94	46,4	4,82	0,74	2,97	0,08	0,05	0,05	38,9
	Zona de Reação	19,5	3,34	21,7	17,2	18,0	14,3	2,49	1,34	2,34	17,5
	Jacupiranguito	26,5	1,34	16,9	17,1	31,4	15,7	4,36	2,76	0,72	5,06
B30F682/4											
-44,45+12,70	Carbonatito	71,9	2,18	46,1	5,30	0,37	4,22	0,08	0,09	0,01	39,9
	Zona de Reação	13,4	3,48	25,1	14,7	17,8	11,8	2,92	1,42	1,71	18,7
	Jacupiranguito	14,7	0,56	20,2	15,9	38,0	12,6	4,75	2,64	0,81	4,27
-12,70+9,53	Carbonatito	74,4	1,63	46,0	5,44	0,35	3,70	0,07	0,08	0,00	40,8
	Zona de Reação	10,7	3,45	25,4	12,8	14,9	14,8	2,23	1,11	1,94	18,8
	Jacupiranguito	14,8	0,74	19,6	15,8	36,3	12,6	4,57	2,72	1,06	6,24
-9,53+6,35	Carbonatito	78,8	2,43	47,0	5,37	0,38	2,21	0,07	0,02	0,04	40,6
	Zona de Reação	7,9	2,16	23,0	14,5	18,9	12,7	3,30	1,53	2,56	19,5
	Jacupiranguito	13,3	0,88	18,5	17,2	33,9	13,9	4,31	2,52	1,18	7,09
B30F688											
-44,45+12,70	Carbonatito	36,4	2,35	45,5	5,46	1,27	4,34	0,07	0,18	0,07	39,1
	Zona de Reação	27,8	2,71	19,4	17,4	22,1	14,4	3,07	1,94	2,45	14,8
	Jacupiranguito	35,8	0,38	17,4	13,5	35,0	21,6	4,86	3,65	0,54	1,86
-12,70+9,53	Carbonatito	50,3	2,66	45,2	6,04	0,71	3,92	0,05	0,14	0,08	39,6
	Zona de Reação	14,6	2,96	19,0	18,3	21,6	13,8	2,96	1,99	2,44	14,9
	Jacupiranguito	35,1	0,65	17,3	13,8	32,9	21,4	4,88	3,49	0,89	3,32
-9,53+6,35	Carbonatito	47,5	2,87	45,4	6,25	1,78	2,29	0,09	0,05	0,12	39,4
	Zona de Reação	19,3	2,28	20,5	17,4	19,5	13,7	2,89	1,78	2,59	17,3
	Jacupiranguito	33,2	0,76	15,6	15,5	31,2	22,7	4,30	3,23	0,94	4,06
B30F689/4											
-44,45+12,70	Carbonatito	46,6	2,86	47,9	4,31	0,26	2,94	0,07	0,11	-	39,7
	Zona de Reação	29,5	2,77	18,1	18,5	21,1	16,5	3,31	1,75	2,10	14,2
	Jacupiranguito	23,9	1,17	15,7	19,0	32,5	17,4	4,31	2,48	1,00	4,68
-12,70+9,53	Carbonatito	51,6	2,48	48,2	4,22	0,34	2,73	0,11	0,05	0,03	40,3
	Zona de Reação	22,9	3,71	22,0	17,9	18,3	13,3	2,63	0,95	2,13	18,2
	Jacupiranguito	25,4	0,83	11,2	19,0	27,4	27,0	4,35	3,18	1,17	5,07
-9,53+6,35	Carbonatito	53,8	2,16	48,1	4,39	0,38	2,37	0,09	0,10	-	40,9
	Zona de Reação	29,6	2,78	18,7	17,1	19,3	18,1	3,22	1,87	2,19	15,2
	Jacupiranguito	16,6	0,94	14,3	18,8	30,5	20,2	4,50	2,74	1,25	5,47

A apresentação gráfica dos resultados químicos obtidos por fração granulométrica pode ser observada no conjunto cartesiano da figura 17. Neles pôde-se observar, para os óxidos maiores constituintes da mineralogia básica das zonas de xenólitos, comportamento tipo ou específico para cada uma das 3 litologias formadoras.

Um diagnóstico mineralógico geral a partir da química apresentada nos gráficos para as diferentes litologias pode ser descrito da seguinte forma:

- ✓ P_2O_5 (Apatita) – Ocorreu em patamares semelhantes nos carbonatitos e zonas de reação sendo ligeiramente maiores na segunda fase. O P_2O_5 traça muito bem uma fronteira entre o jacupiranguito e as demais litologias.
- ✓ SiO_2 – Apresentou claramente como os minerais silicáticos estão presentes nas litologias em proporções bem distintas. Sua associação com MgO forma um dos principais minerais que constituem os jacupiranguitos “diopsídio” e a “flogopita” que constituiu mais de 50% das zonas de reação. Os baixos teores de SiO_2 nos carbonatitos remeteram à presença do MgO associado a carbonatos nesta rocha.
- ✓ Al_2O_3 – Corroborou de forma clara a presença da flogopita, uma vez que a simetria entre os gráficos da sílica e alumínio nas diferentes rochas e frações foi muito grande.
- ✓ P.F. – A perda ao fogo caracterizou muito bem as três litologias uma vez que a mesma remeteu muito bem à proporção de carbonatos.
- ✓ K_2O – Traçou muito bem a proporção de flogopita nas diferentes rochas.

Figura 17 - Apresentação gráfica da distribuição de teores nos produtos de catação nas amostras volumétricas

6.3. Definição da Função Xenólitos

O tratamento das amostras apresentado no item 6.2. permitiu a qualificação das fases minerais constituintes em cada unidade litológica. Foram descritas a inter-relação elementar e a macro composição mineral, de onde se pode observar o quanto a sílica traçava zonas de fronteira que demarcam os tipos litológicos formadores das zonas amostradas.

Mediante as análises realizadas foram definidos como contaminantes as litologias sem mineralização a fosfato, onde se destacam, necessariamente, os xenólitos de jacupiranguitos e por vezes zonas de reação, vide tabela 4 que apresenta, para alguns furos do XEN, padrões de mineralização de P_2O_5 . Estes xenólitos de jacupiranguito além de possuírem dimensões variadas têm disposição espacial sem controles geológicos identificados que possibilitassem definição de geometria interna e determinação de proporções volumétricas em escala significativa para fins de lavra, a partir de dados de sondagem e mapeamentos de frentes de lavra.

Tabela 4 - Compilação de teores de P_2O_5 nas Zonas de Xenólitos com base em descrições macroscópicas de testemunhos de sondagem

Furo de Sondagem	Zona de Xenólitos		Carbonatito		Zona Reação		Jacupiranguito	
	espessura (m)	% P_2O_5	% volume	% P_2O_5	% volume	% P_2O_5	% volume	% P_2O_5
SP 01	115,5	3,50	51	4,74	40	2,80	9	0,10
SP 03	77,8	2,52	44	3,39	43	1,97	13	1,40
SP 04	32,9	3,31	48	3,78	52	2,88	---	---
SP 15	144,4	2,87	38	4,64	26	2,90	36	0,94
SP 17	12,8	1,61	--	--	45	0,83	55	2,24

Recorreu-se, então, a critérios de composição química para avaliar as proporções de xenólitos com base nas diferenças mineralógicas marcantes entre os litotipos constituintes das unidades. Estas diferenças se traduzem na composição química disponível em testemunhos de sondagem, desde que estes estivessem sistematicamente amostrados e analisados respeitando-se as variações entre litologias, conforme apresentado no item 6.2.1.

Foram estabelecidas correlações entre os resultados químicos obtidos por fração litológica e a assembléia mineral descrita para a uma mesma fração.

Praticamente toda a sílica contida no material provém de minerais que constituem o jacupiranguito e as zonas de reação; este óxido serviu de guia elementar na determinação da proporção destas rochas.

Definiu-se o que foi denominada **Função Xenólitos** utilizando o teor de SiO_2 como gerador de um índice mineralógico ou guia geoquímico na compartimentação dos tipos litológicos. A sílica ligada aos carbonatitos foi subtraída da sílica total, fazendo com que a remanescente fosse atribuída a constituição de jacupiranguito e zonas de reação. Com isso obteve-se uma curva de correlação entre resultados químicos de SiO_2 total e proporções litológicas.

As etapas envolvidas para definição desta função foram:

- verificação dos teores nas unidades litológicas puras carbonatitos e jacupiranguitos;
- verificação do teor da mistura de jacupiranguito com as bandas centimétricas de zonas de reação;
- determinação da curva de correlação entre teor de SiO_2 com as diferentes proporções de carbonatito versus jacupiranguito e carbonatito versus jacupiranguito+zona de reação.

Para definir os teores de sílica nos carbonatitos e jacupiranguitos puros com base estatística, eram disponíveis os dados dos testemunhos de sondagem amostrados e os dados da estimativa via IQD da SiO_2 no modelo de blocos utilizado para a avaliação de recursos / reservas e planejamento de mina.

Com vistas a compatibilizar os dados com a escala de lavra, verificou-se a estatística dos teores nos blocos das três zonas de xenólitos, de acordo com o modelo do Morro da Mina atualizado em 2003, tendo-se obtido como o menor teor em blocos (10 m por 10 m) de carbonatito puro (0,21% SiO_2) e o teor máximo como de jacupiranguito puro (41,99% SiO_2). Estes teores comparados com os obtidos no tratamento estatístico dos dados de testemunhos de sondagem (tabela 5), dos quais foram consideradas as respectivas modas das distribuições de teores de cada litologia como o teor mais consistente.

Para o carbonatito, considerando as Zonas de Xenólitos Norte e Sul, os valores obtidos nos dois tipos de dados foram da mesma ordem de grandeza, fato que possibilita a utilização combinada de teores das duas bases de dados (modelo de blocos e testemunhos de sondagem) com bom grau de consistência para a definição de critérios. Já para a Zona NE os testemunhos de sondagem apresentaram um valor significativamente mais elevado o que pode introduzir desvios expressivos quando mescladas as duas bases de dados.

Para o jacupiranguito, na definição da Função Xenólito, adotou-se o critério mais conservador aplicando-se os teores obtidos a partir dos testemunhos de sondagem, os quais foram inferiores aos indicados pelo modelo de blocos nas Zonas de Xenólitos Norte e Este e da mesma ordem de grandeza na Sul.

O passo seguinte foi o estabelecimento de um critério que pudesse refletir os teores de sílica relativos a jacupiranguitos contendo zonas de reação associadas, que, na prática, significam a composição dos xenólitos considerando que as zonas de reação permanecerem associadas aos fragmentos de jacupiranguito. Para isso foram utilizados os dados de testemunhos de sondagem que continham a devida individualização de litotipos na sua amostragem, o que seria inviável de obter a partir dos blocos de cálculo de reservas. Então, com base na avaliação dos dados de composição química de testemunhos de sondagem assumiu-se para os xenólitos como consistente, embora conservadora, uma proporção de 70% de jacupiranguito e 30% de zona de reação.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos das litologias nas Zonas de Xenólitos, dados de testemunhos de sondagem

Litologia	Parâmetros	Zona de Xenólitos Norte		Zona de Xenólitos Este		Zona de Xenólitos Sul	
		%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%P ₂ O ₅	%SiO ₂
Carbonatito SiO ₂ < 10%	mínimo	0,10	0,14	0,27	0,23	0,70	0,10
	máximo	18,6	9,41	10,4	9,83	9,44	35,1
	média	4,10	1,75	4,58	2,91	5,03	7,03
	desvio padrão	2,01	2,01	1,95	2,46	2,61	10,0
	moda	4,02	0,62	2,18	3,20	#N/D	0,10
	<i>nº amostras</i>	105		55		22	
Zonas de Reação SiO ₂ > 10%	mínimo	0,16	10,4	0,28	10,8	0,09	15,9
	máximo	5,96	40,4	4,69	38,0	3,25	26,6
	média	2,49	23,2	1,96	23,7	1,13	19,5
	desvio padrão	1,42	7,14	1,12	8,21	1,01	3,16
	moda	1,35	20,0	1,78	24,6	#N/D	18,2
	<i>nº amostras</i>	138		40		15	
Jacupiranguitos	mínimo	0,01	12,3	0,01	21,5	0,01	28,8
	máximo	8,06	46,1	3,69	41,9	0,77	44,4
	média	2,17	34,1	0,77	34,3	0,17	38,9
	desvio padrão	2,08	6,7	0,92	5,42	0,27	5,68
	moda	0,01	32,6	0,01	35,7	0,01	42,8
	<i>nº amostras</i>	41		29		8	

A partir de tais bases, foram feitas simulações (vide tabela 6 e gráficos da figura 18) de correlações para definir a quantidade de xenólitos a partir do teor de SiO_2 aplicando dois critérios distintos:

1º critério – considerou os xenólitos constituídos somente de jacupiranguitos (100% jacupiranguito), com os teores de sílica definidos pela moda das distribuições de teores desta litologia, e os teores de sílica dos carbonatitos definidos pelo modelo de blocos (0,21% SiO_2);

2º critério – considerou os xenólitos constituídos pela mistura de jacupiranguito (70%) com zona de reação (30%), com teores definidos pela moda das distribuições de teores destas litologias e os teores de sílica dos carbonatitos definidos pelo modelo de blocos (0,21% SiO_2).

No primeiro critério o jacupiranguito foi considerado como estéril e as zonas de reação como minério, fato que é comum, mas que pode apresentar desvios, uma vez que em algumas situações a zona de reação não apresenta teores de P_2O_5 superiores ao limite de corte aplicado na mina (3,00%) como indicado na tabela 4. O segundo critério é mais conservador e considerou parte das zonas de reação como estéril, o que apesar de não representar necessariamente a realidade, pois pode superestimar o conteúdo de xenólitos, atribui uma componente segura para uso da informação gerada por intermédio da aplicação da função.

Tabela 6 - Simulações de correlações visando a definição de % de xenólitos a partir dos teores de SiO_2

ZONA DE XENÓLITOS		NORTE - XEN		NE - XEE		SUL - XES	
Composição dos Xenólitos		J=100% ZR=0%	J=70% ZR=30%	J=100% ZR=0%	J=70% ZR=30%	J=100% ZR=0%	J=70% ZR=30%
% Carbonatito	% Xenólitos	% SiO_2 na amostra	% SiO_2 na amostra	% SiO_2 na amostra	% SiO_2 na amostra	% SiO_2 na amostra	% SiO_2 na amostra
-	100	32,7	28,9	35,7	32,4	42,8	35,4
10	90	29,4	26,0	32,2	29,2	38,5	31,9
20	80	26,2	23,1	28,6	25,9	34,3	28,4
30	70	22,9	20,3	25,1	22,7	30,0	24,9
40	60	19,7	17,4	21,5	19,5	25,8	21,3
50	50	16,4	14,5	18,0	16,3	21,5	17,8
60	40	13,2	11,68	14,4	13,1	17,2	14,3
70	30	10,0	8,81	10,9	9,86	13,0	10,8
80	20	6,70	5,94	7,31	6,64	8,73	7,25
90	10	3,46	3,08	3,76	3,43	4,47	3,73
100	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
% xenólitos =		$3,0798 \cdot \text{SiO}_2 - 0,6468$	$3,4885 \cdot \text{SiO}_2 - 0,7326$	$2,8177 \cdot \text{SiO}_2 - 0,5917$	$3,4282 \cdot \text{SiO}_2$	$2,348 \cdot \text{SiO}_2 - 0,4931$	$2,8953 \cdot \text{SiO}_2$
jacupiranguito		$> 32,7\% \text{ SiO}_2$	$> 28,9\% \text{ SiO}_2$	$> 35,7\% \text{ SiO}_2$	$> 29,2\% \text{ SiO}_2$	$> 42,8\% \text{ SiO}_2$	$> 35,4\% \text{ SiO}_2$

$J = \text{jacupiranguito}$

$ZR = \text{zona de reação}$

A **Função Xenólitos** foi definida com base no segundo critério, mais conservador, e fez-se, então, fundamental a validação dos critérios adotados através de comparação com dados reais obtidos por critérios visuais, descrição dos testemunhos de sondagem e litotipos individualizados por catação.

Conforme observado nos gráficos da figura 18, fica claro que a Função Xenólito corresponde à equação da reta estabelecida pelos patamares máximos e mínimos definidos para 100% xenólitos e 100% carbonatitos, tabela 6, e as simulações geradas visando determinação de percentuais intermediários de xenólitos versus teores de SiO_2 .

Figura 18 - Gráficos de correlação de teores de SiO_2 com as proporções de Xenólitos

Figura 18 - Gráficos de correlação de teores de SiO₂ com as proporções de Xenólitos

Em síntese caracterizam-se, para cada uma das zonas de xenólitos, as seguintes funções matemáticas que visam determinação de percentual de fases contaminantes (jacupirangitos & zonas de reação – segundo critério) a partir de análises de SiO₂ em amostra total.

✓ **Zona de Xenólitos Norte:**

$$\%Xenólitos = (3,4885 * SiO_2) - 0,7326$$

✓ **Zona de Xenólitos Este:**

$$\%Xenólitos = 3,4282 * SiO_2$$

✓ **Zona de Xenólitos Sul:**

$$\%Xenólitos = 2,8953 * SiO_2$$

6.4. Validações da Função Xenólitos

Foram adotados dois critérios para validação. O primeiro deles aplicado a intervalos específicos em testemunhos de sondagem onde as proporções de xenólitos descritas, formadas por jacupiranguito e zonas de reação, foram cruzadas às proporções obtidas, para os mesmos intervalos, via Função Xenólitos.

Outro critério de validação apoiou-se nos dados das amostras volumétricas, confrontando-se as proporções litológicas obtidas por intermédio da catação manual nas frações granulométricas superiores a 6,35 mm e os resultados percentuais de jacupiranguito e zona de reação calculados pela Função Xenólitos.

6.4.1. Testemunhos de sondagem

Foram realizadas comparações entre as proporções de xenólitos obtidas pelo cálculo da Função Xenólitos com os dados das descrições litológicas das amostras dos testemunhos de sondagem tomadas a intervalos compatíveis com os blocos digitais de lavra (10 m). As descrições litológicas habilitaram à determinação aproximada das proporções de zonas de reação e de jacupiranguitos, cuja soma foi assumida como a proporção de xenólitos.

Os gráficos das Figuras 19 ilustram os resultados comparativos tendo-se indicado como jacupiranguito franco aqueles grupos de intervalos com teores de sílica superiores ao limites indicados para cada unidade de zona de xenólitos já apresentados no capítulo 8; sendo os dados completos apresentados no ANEXO C. As correlações apresentam-se com dispersão moderada devido às coexistência de minerais nas três litologias que por vezes se mesclam de forma heterogênea, devendo-se ainda considerar que as descrições macroscópicas tiveram um foco genético pouco voltado para a quantificação de xenólitos especificamente.

Foi possível perceber aspectos relevantes de associação entre litologias:

- ✓ presença de carbonatitos muito enriquecidos em silicatos que devido ao suporte amostral utilizado acabam não sendo bem caracterizados, podendo inclusive representar zonas de reação em um estágio de “digestão magmática” mais avançado.
- ✓ presença de associações zona de reação + carbonatitos que não foram compatibilizadas no critério de cálculo assumido.
- ✓ nítida correlação inversa do P_2O_5 a proporção de xenólitos, aumentando quando diminuem as proporções dos mesmos.

Figura 19 - Validação de dados a partir de testemunhos de sondagem

6.4.2. Amostras volumétricas

Foram utilizados os produtos das separações por catação nas frações +12,70, +9,53 e +6,35 mm e suas proporções que foram correlacionadas com aquelas geradas pela aplicação da Função Xenólitos, desenvolvidas conforme critérios apresentados no capítulo 8, com a utilização da análise de SiO_2 , apresentado na tabela 7.

Verificou-se que os dados obtidos pelos dois procedimentos mostraram estreita correlação linear ($r^2=0,876$, figura 20), refletindo que a Função Xenólitos reproduz a quantidade de xenólitos (jacupiranguitos+zonas de reação) obtida por uma seleção manual que se apóia em critérios visuais.

Tabela 7 – Resultados das proporções de xenólitos definidas pela Função Xenólitos e por catação manual

Amostras	Fração (mm)	teores (%)		Função xenólitos	Catação manual (% peso)		
		P_2O_5	SiO_2		Z. Reação	Jacupiranguito	soma
B10F304/3	-44,45+12,7	2,76	13,4	46	28	21	49
	-12,7+9,53	2,19	11,6	40	26	25	51
	-9,53+6,35	3,12	13,5	46	20	27	46
B30F248	-44,45+12,7	2,44	14,5	50	34	19	53
	-12,7+9,53	2,41	14,1	48	24	22	46
	-9,53+6,35	2,02	13,0	45	20	27	46
B30F682/4	-44,45+12,7	2,67	6,58	22	13	15	28
	-12,7+9,53	2,48	7,99	27	11	15	26
	-9,53+6,35	2,55	6,31	21	8	13	21
B30F688	-44,45+12,7	2,14	19,4	66	28	36	64
	-12,7+9,53	2,28	16,1	55	15	35	50
	-9,53+6,35	2,48	16,0	55	19	33	53
B30F689/4	-44,45+12,7	2,55	15,8	54	30	24	53
	-12,7+9,53	2,72	13,7	47	23	25	48
	-9,53+6,35	2,34	13,5	46	30	17	46

Figura 20 - Correlação das proporções de xenólitos por catação e pela função xenólitos

6.5. Aplicação da Função Xenólitos

Após a conclusão de todo o processo de validação deu-se início aos trabalhos de aplicação da Função Xenólitos, incluindo-a nas rotinas do planejamento de lavra com intermédio do uso de software GMP – (General Mining Package). O Gemcom, utilizado nos trabalhos de geologia da BUNGE Fertilizantes – Cajati, provê a capacidade de aplicação de funções matemáticas no modelo digital de lavra ou simplesmente modelo de blocos com uso de processo de manipulação simples aplicável a variáveis físicas ou químicas estimadas ou determinadas no modelo de blocos.

A figura 21 apresenta a interface do software incluindo o *front* da rotina *block model manipulation*. Nela é inserida, para cada uma das Zonas de Xenólitos, a função matemática que indica o percentual de carbonatito existente em cada bloco de lavra. O valor deste percentual fica armazenado como uma variável do modelo, ver figura 22 e pode ser utilizado como ponderador volumétrico nas rotinas de cubagens executadas pelo software.

Figura 21 – *Front* da rotina *block model manipulation* incluindo detalhes da sintaxe utilizada para descrever a função xenólitos para Zona de Xenólitos Norte

Figura 22 – Apresentação da Função Xenólitos como variável no modelo de blocos

Considerando as proporções médias de contaminantes definidas com a aplicação da Função Xenólitos para cada uma das três zonas submetidas a estudos, observam-se os seguintes valores: Zona de Xenólitos Norte – 40% do recurso disponível consistem em xenólitos, seguida da Zona de Xenólitos Este com 56% e finalmente 57% para a Zona de Xenólitos Sul. Os números mostram como o caráter genético semelhante entre as zonas Sul e Este resulta em proporções médias de contaminantes praticamente iguais.

7. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da metodologia para quantificação numérica de fases litológicas contaminantes nas unidades litológicas denominadas Zonas de Xenólitos, viabilizaram os seguintes aspectos:

7.1. Aprimoramento de parâmetros de descrição litológica

O investimento em pesquisa mineral apoiada em sondagens rotativas pode ser maximizado quando a utilização dos parâmetros obtidos por intermédio da análise descritiva e química ultrapassa a necessidade da obtenção de mero acréscimo volumétrico e identificação ou não de zonas mineralizadas. Os atributos levantados devem munir as equipes de desenvolvimento com informações tecnológicas que possam ser revertidas na otimização do recurso já disponível. O presente estudo mostrou que intervalos centimétricos atribuídos às zonas de reação têm caráter decisivo na definição dos parâmetros matemáticos atribuídos a proporções de fases contaminantes.

7.2. Desenvolvimento de metodologia de amostragem volumétrica

Os estudos tinham, necessariamente, que representar sistemática de lavra, ou seja, eles deveriam ser desenvolvidos considerando da melhor forma possível processos de lavra. Partindo desta premissa os seguintes parâmetros foram respeitados:

- a- Foram amostrados fogos de produção, sem nenhuma modificação do mecanismo físico de desmonte,
- b- O volume amostrado atende pré-requisitos ligados a conceitos de relação variância / volume, ou simplesmente relação V/v , atingindo cerca de 35 toneladas por amostra.
- c- Foram utilizados os sistemas de britagem primária, secundária e de homogeneização de minério, sem que existisse nenhuma adequação ligada aos estudos,
- d- A reamostragem do material britado retomou cerca de 300 a 350 kg em pelo menos 10 pontos da pilha de homogeneização descartando-se seus extremos.
- e- Todos os ensaios de individualização das fases litológicas consideraram o produto britado, ou seja sem cominuição em laboratório.
- f- Os fatores acima descritos proporcionaram a descoberta do fato de que cerca de 25% da massa lavrada nas zonas de xenólitos Norte e Este geradas a partir de corte granulométrico

em 6,35 mm, atendem às especificações de P_2O_5 , sem a necessidade da realização de nenhum tipo de preparação ou adequação física posterior.

7.3. Caracterização química e correlação com macro-mineralogia

As diferenças de composição mineral das litologias que compõem a Zona de Xenólitos possibilitaram estabelecer correlações entre os teores de SiO_2 e as proporções relativas destas litologias.

O SiO_2 foi considerado o divisor principal entre os carbonatitos, zonas de reação e jacupiranguitos nas zonas de xenólitos, contudo as rochas existentes em Cajati propiciam inúmeras correlações entre geoquímicas e parâmetros tecnológicos para aproveitamento do recurso disponível. Pode-se citar o Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO e MgO óxidos que sozinhos ou conjugados com outros podem reportar recomposições estequiométricas de fases minerais economicamente interessantes.

7.4. Considerações finais

A função xenólitos definida através de dados de análise química, comuns nas atividades de pesquisa mineral e de lavra, possibilitou estimar as proporções de litologias contaminantes, ou seja, sem mineralização econômica a fosfato.

Sendo uma função matemática a Função Xenólitos é utilizada como ponderador volumétrico tanto para cálculos de recursos e reservas como para planejamento e operação de lavra.

Estudos de validação mostraram excelente coerência nas proporções de litologias obtidas a partir da Função Xenólitos com os dados de descrições em testemunhos de sondagem e de catação manual em amostras volumétricas.

Em algumas amostras da Zona de Xenólitos Norte o processo de correlação não demonstrou reprodutibilidade da Função Xenólitos com relação a descrição dos testemunhos. Em verificações nas amostras notou-se que se tratavam de carbonatitos extremamente enriquecidos em sílica, provavelmente por fazerem parte de fases de “digestão magmática” mais avançadas em uma zona de reação, que pelo problema de suporte, relacionado à amostragem linear com cerca de 7,00 cm de diâmetro em testemunho, acabaram por ser tratadas como carbonatitos puros.

Não foram realizadas amostragens volumétricas na Zona de Xenólitos Sul pelo fato da mesma não corresponder a área em lavra durante o período de desenvolvimento do programa. Faz-se necessária a construção de todas as etapas desenvolvidas para as demais zonas quando houver possibilidade de geração das amostras nesta unidade.

Por se tratar de uma função matemática gerada a partir de atributos estatísticos inerentes a cada unidade litológica estudada, a Função Xenólitos pode e deve ser continuamente revisada e caso necessário aprimorada, visando à segurança dos parâmetros por ela gerados.

O modelo de aplicação da Função Xenólitos no sistema Gemcom mostra como o desenvolvimento tecnológico mineral pode ser facilmente inserido como variável de controle ligada à geologia e ao planejamento de lavra.

Finalmente, cabe ressaltar que as funções matemáticas geradas ou Função Xenólitos são aplicadas exclusivamente às unidades a que se destinam, não devendo, em hipótese alguma, serem extrapoladas para outras litologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, P.R.P.C. 1999. Estudos de caracterização tecnológica no minério apatítico do Complexo Alcalino de Jacupiranga, SP. Monografia de trabalho de formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 59p+anexos.
- BAUER, H.E. 1877. As minas de ferro de Jacupiranga. *Rev. Eng.*, Rio de Janeiro, 213 p.
- BONÁS, T.B. 2001. Consolidação de critérios de descrição litológica para o minério apatítico do Complexo Alcalino de Jacupiranga. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 48p+anexos.
- BONÁS, T.B.; SANT'AGOSTINO, L.M.; PEREIRA, M. 2004. *A mineralogical guide supporting reserve evaluation and mining of Cajati phosphate ore*. In: International Congress on Applied Mineralogy, 8. Brasil, 2004. *Applied Mineralogy*, 2: 861-864.
- BRANDÃO, A.G.P. 2003. Investigações mineralógicas em matéria-prima carbonática de uma determinada unidade litológica da Mina de Cajati (SP), visando novas aplicações industriais. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 39p+anexos.
- BRUMATTI, M. 2004. Detalhamento mineralógico da Zona de Xenólitos a Norte e a Leste da mina de Cajati, SP. Monografia de trabalho d Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 34p+anexos.
- DERBY, O.A. 1891. The magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. *American Journal of Science*, 141: 311-321 (Series 3).
- GASPAR, J.C. 1989. Geologie el mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Brésil. França, Tese de Doutorado U.E.R. de Science Fundamentales et Appliquées, Université d'Orleans, 344 p.

- GERMAN, A.; MARKER, A.; FRIEDRICH, G. 1987. The alkaline complex of Jacupiranga, São Paulo, Brazil. Petrology and genetic consideration. *Zbl. Geol. Paleont. Teil I*, 7/8: 807-818.
- MELCHER, G.C. 1965. O Carbonatito de Jacupiranga. Boletim 282, Geologia nº 21, São Paulo, Brasil.
- MENEZES JR., L.A.D.; MARTINS, J. M. 1984. The Jacupiranga mine. São Paulo, Brasil. *The Mineralogical Record*, 15(5): 261-270.
- PEREIRA, W.C.; REMACRE, A.Z. 2003. Utilização de variável mineralógica na estimativa de reservas de minério de ferro. *Rev. Esc. de Minas, Ouro Preto*, 56(2): 123 - 129
- RAPOSO, D.B. 2002. Investigação tecnológica em minério carbonatítico de Cajati-SP, utilizado como matéria-prima na produção de fosfógeno. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 28p+anexos.
- RUBERTI, E.; MARGUTI, R.L.; GOMES, C.B. 1992. O Complexo carbonatítico de Jacupiranga, SP: Informações gerais. Roteiro das excursões do 37º Congresso Brasileiro de Geologia – SBG/SP, São Paulo, SP. V. 4, 16 p.
- SILVA, J.F. 2001. Detalhamento da mineralogia em apoio à caracterização tecnológica do minério de fosfato da mina de Cajati, São Paulo. Monografia de trabalho de formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 33p+anexos.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Croqui representando as frentes de lavra submetidas a amostragem volumétrica

ANEXO B – Registro fotográfico da separação por catação nas frações $+1/2''$, $-1/2+3/8''$ e $-3/8+1/4''$

ANEXO C – Resultado completo das validações realizadas com uso de testemunhos de sondagem

ANEXO A

ANEXO A – Croqui representando as frentes de lavra submetidas à amostragem volumétrica

Amostras volumétricas

- B 30F682/4 XEN
- B 30F689/4 XEN
- B-30F688 XEE
- B-10F304/3 XEN
- B-30F248 XEN
- Afloramentos das XEN e XEE

30 Cota da bancada

ANEXO B

ANEXO B – Registro fotográfico da separação por catação nas frações $+1/2''$, $-1/2+3/8''$ e $-3/8+1/4''$

Amostra B30F682/4 – da esquerda para a direita: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito

Amostra B30F689/4 – da esquerda para a direita: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito

Amostra B30F688 – da esquerda para a direita: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito

Amostra B-10F304/3 – da esquerda para a direita: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito

Amostra B-30F248 – da esquerda para a direita: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito

ANEXO C

ZONA DE XENÓLITOS NORTE XEN

ANEXO C – Resultado completo das validações realizadas com uso de testemunhos de sondagem

FURO	de	até	Teores (%)			%xenólitos	Dados da Descrição Litológica		
			SiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Função Xenólitos	jacupiranguito	zona de reação	soma
SM09	452,10	465,00	9,18	3,56	26,4	31	0%	41%	41%
SM09	465,00	480,00	9,34	4,05	27,1	32	0%	52%	52%
SP01	170,00	180,00	4,78	1,83	17,5	16	0%	5%	5%
SP01	137,88	150,00	6,58	7,46	24,1	22	0%	24%	24%
SP01	191,39	201,63	6,86	2,94	31,9	23	0%	42%	42%
SP01	180,00	191,39	6,90	2,80	30,2	23	0%	25%	25%
SP01	160,00	170,00	7,35	2,42	15,6	25	0%	0%	0%
SP01	150,00	160,00	11,4	3,69	23,2	39	0%	50%	50%
SP01	225,00	235,00	12,7	1,37	23,8	43	0%	35%	35%
SP01	126,16	137,88	13,7	3,57	22,6	47	0%	43%	43%
SP01	115,00	126,16	14,0	4,16	23,27	48	0%	59%	59%
SP01	201,63	212,70	15,7	2,36	23,1	54	0%	63%	63%
SP01	212,70	225,00	35,4	0,01	1,57	100	81%	19%	100%
SP03	105,00	115,00	2,04	6,20	34,2	6	0%	0%	0%
SP03	145,00	155,00	4,63	1,53	17,6	15	0%	0%	0%
SP03	125,00	135,00	12,9	3,57	24,8	44	0%	0%	0%
SP03	115,00	125,00	13,1	3,69	25,7	45	0%	50%	50%
SP03	175,00	180,00	14,2	2,59	24,4	49	0%	51%	51%
SP03	155,00	165,00	15,7	1,58	13,7	54	0%	72%	72%
SP03	135,00	145,00	16,8	1,33	11,9	58	0%	76%	76%
SP03	165,00	175,00	26,8	1,14	12,45	93	0%	100%	100%
SP04	224,03	235,00	0,28	3,65	36,8	0	0%	0%	0%
SP04	235,00	238,80	11,9	3,62	25,8	41	0%	48%	48%
SP04	242,08	255,00	31,5	1,12	8,58	100	0%	100%	100%
SP04	255,00	265,00	33,0	0,61	7,08	100	44%	56%	100%
SP14A	240,00	250,00	6,96	5,95	27,5	24	0%	23%	23%
SP14A	250,00	260,00	31,8	1,18	8,11	100	0%	100%	100%
SP15	25,00	35,54	5,68	4,19	30,9	19	0%	0%	0%
SP15	5,00	15,00	7,36	4,09	32,2	25	0%	47%	47%
SP15	15,00	25,00	13,3	1,69	22,1	46	0%	42%	42%
SP15	46,80	57,20	14,2	3,09	21,8	49	35%	0%	35%
SP15	105,00	115,00	21,8	2,49	14,7	75	0%	0%	0%
SP15	57,20	70,00	22,2	1,73	12,1	77	49%	29%	78%
SP15	95,00	105,00	22,8	3,29	16,8	79	0%	0%	0%
SP15	82,60	95,00	24,1	2,94	15,7	83	0%	0%	0%
SP15	115,00	130,00	24,8	2,46	12,0	86	0%	0%	0%
SP15	70,00	82,60	26,1	1,85	14,2	90	47%	53%	100%
SP15	35,54	46,80	27,1	1,11	8,44	94	88%	0%	88%
SP17	252,00	252,00	5,56	2,14	33,8	19	0%	16%	16%
SP17	260,00	270,00	15,8	1,17	24,8	55	0%	100%	100%
SP17	270,00	280,35	22,8	1,57	10,6	79	0%	100%	100%
SP17	239,20	250,45	28,2	1,35	12,8	98	79%	0%	79%

FURO	de	até	Teores (%)			%xenólitos	Dados da Descrição Litológica		
			SiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Função Xenólitos	jacupiranguito	zona de reação	soma
SP31	55,00	65,00	0,41	4,85	37,5	1	0%	0%	0%
SP31	85,00	95,00	1,20	4,50	34,7	3	0%	0%	0%
SP31	75,00	85,00	2,38	5,11	35,6	8	0%	0%	0%
SP31	65,00	75,00	2,99	8,45	32,3	10	0%	0%	0%
SP31	105,00	115,22	3,41	4,14	34,4	11	0%	49%	49%
SP31	125,15	135,00	9,05	2,88	30,5	31	0%	22%	22%
SP31	95,00	105,00	12,2	5,48	24,9	42	32%	11%	43%
SP31	145,00	160,00	14,5	3,82	23,9	50	0%	33%	33%
SP31	115,22	125,15	16,0	2,06	23,9	55	45%	25%	70%
SP31	135,00	145,00	20,3	1,89	15,8	70	0%	53%	53%
SP32	0,00	15,00	0,30	3,59	37,9	0	0%	0%	0%
SP33	0,00	15,00	3,80	3,86	30,5	13	0%	31%	31%
SP34	20,00	30,00	5,93	4,90	29,4	20	0%	23%	23%
SP34	40,00	50,34	17,9	2,40	20,7	62	16%	44%	60%
SP34	70,00	85,34	18,8	2,43	19,7	65	15%	37%	51%
SP34	60,00	70,00	21,4	2,56	18,6	74	11%	44%	55%
SP34	30,00	40,00	36,1	0,93	6,00	100	75%	25%	100%
SP34	50,34	60,00	31,8	1,63	10,8	100	58%	13%	71%
SP35	55,00	65,00	3,25	1,79	38,6	11	0%	0%	0%
SP35	115,00	125,00	4,49	3,47	36,9	15	0%	10%	10%
SP35	0,00	10,00	9,63	2,31	30,1	33	0%	100%	100%
SP35	75,00	85,00	11,7	0,98	30,7	40	29%	0%	29%
SP35	43,80	55,00	12,5	2,28	29,9	43	0%	0%	0%
SP35	10,00	20,00	19,7	0,60	22,0	68	33%	50%	83%
SP35	105,00	115,00	23,6	1,86	18,7	81	0%	78%	78%
SP35	95,00	105,00	24,3	2,88	17,8	84	0%	100%	100%
SP35	125,00	138,70	24,8	2,23	16,1	86	36%	64%	100%
SP35	65,00	75,00	25,4	0,63	18,2	88	50%	26%	76%
SP35	85,00	95,00	31,8	0,65	9,98	100	89%	0%	89%
SP35	20,00	30,00	35,9	0,38	4,03	100	100%	0%	100%
SP35	20,00	30,00	35,9	0,38	4,03	100	100%	0%	100%
SP35	30,00	43,80	31,3	0,71	9,27	100	35%	47%	82%

Zona de Xenólitos Este XEE

ANEXO C – Resultado completo das validações realizadas com uso de testemunhos de sondagem

FURO	de	até	Teores (%)			%xenólitos	Dados da Descrição Litológica		
			SiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Função Xenólitos	jacupiranguito	zona de reação	soma
OP03	10	210,5	0,51	7,21		2	0%	0%	0%
SP07	210,5	220,0	9,45	3,97	28,1	32	0%	19%	19%
SP07	220	230,0	9,13	3,57	28,0	31	59%	0%	59%
SP07	230	240,0	15,8	2,81	22,6	54	25%	25%	50%
SP07	240	250,0	5,29	3,73	33,2	18	50%	0%	50%
SP07	250	260,0	1,35	4,49	35,9	5	0%	0%	0%
SP07	260	270,0	21,0	1,24	18,6	72	47%	0%	47%
SP07	270	280,0	6,50	2,58	30,9	22	0%	10%	10%
SP07	280	290,0	23,7	1,68	13,7	81	0%	65%	65%
SP07	290	300,0	17,7	2,24	19,5	61	0%	25%	25%
SP07	300	310,0	18,9	2,87	15,1	65	0%	26%	26%
SP18	5	15,0	17,3	2,89	20,8	59	19%	20%	39%
SP18	15	32,1	11,4	4,56	24,4	39	22%	0%	22%
SP18	25,2	100,0	36,1	0,43	3,77	100	100%	0%	100%
SP31	260	270,0	16,0	3,41	22,0	55	23%	52%	75%
SP31	270	280,0	20,8	2,3	19,6	71	86%	14%	100%
SP31	280	290,0	4,49	3,86	34,1	15	11%	0%	11%
SP31	290	300,0	7,54	2,75	33,0	26	36%	0%	36%
SP31	310	310,0	7,10	5,15	30,4	24	9%	0%	9%
SP31	310	320,0	22,2	2,49	16,4	76	50%	50%	100%
SP31	320	330,0	24,5	2,12	14,7	84	30%	50%	80%
SP31	330	340,0	16,1	4,12	22,2	55	18%	32%	50%
SP31	340	350,0	22,3	1,86	17,4	76	100%	0%	100%
SP31	350	360,0	26,9	1,63	13,1	92	100%	0%	100%
SP31	360	370,0	18,4	2,69	19,6	63	23%	50%	73%
SP31	370	384,5	1,75	5,67	34,7	6	0%	0%	0%
SP33	103,2	110,4	37,2	0,73	5,54	100	25%	75%	100%
SP33	110,4	119,5	17,7	1,49	22,3	61	58%	0%	58%
SP33	119,5	130,0	23,8	1,63	14,7	81	0%	67%	67%
SP33	130	140,6	13,3	3,11	25,0	46	45%	11%	57%
SP33	140,6	150,0	1,82	3,95	36,3	6	0%	0%	0%
SP33	150	160,0	12,0	4,19	25,0	41	0%	28%	28%
SP33	160	170,0	32,7	0,9	8,21	100	0%	81%	81%
SP33	170	180,0	13,5	4,5	24,3	46	13%	32%	45%
SP33	180	190,0	1,77	4,99	35,5	6	0%	0%	0%
SP33	190	200,3	0,89	3,61	36,8	3	0%	0%	0%
SP33	200,3	207,3	26,5	0,36	6,71	91	30%	70%	100%
SP38	113,7	124,2	24,8	2,15	4,76	85	52%	48%	100%
SP38	124,2	135,3	12,0	4,47	25,3	41	0%	26%	26%
SP38	230	244,3	21,1	2,38	16,7	72	64%	0%	64%

Zona de Xenólitos Sul XES

ANEXO C – Resultado completo das validações realizadas com uso de testemunhos de sondagem

FURO	de	até	Teores (%)			%xenólitos Função Xenólitos	Dados da Descrição Litológica		
			SiO ₂	P ₂ O ₅	PF		jacupiranguito	zona de reação	soma
SM12	185	195	1,21	7,54	30,4	4	0%	0%	0%
SM12	195	205	1,14	7,04	31,4	3	0%	0%	0%
SM12	205	215	8,54	2,91	29,8	25	34%	0%	34%
SM12	215	230	15,2	1,56	25,3	44	33%	0%	33%
SP02	195	210	28,9	1,18	9,03	84	33%	33%	67%
SP02	210	223,13	32,6	1,56	10,0	94	0%	0%	0%
SP11	125	140,75	34,9	0,97	5,79	101	32%	37%	68%
SP11	140,75	150	18,6	2,54	20,1	54	54%	0%	54%
SP11	150	160	26,6	3,28	12,8	77	50%	18%	68%
SP12	174,8	185	36,2	0,09	2,24	100	49%	0%	49%
SP12	185	195	33,9	0,41	7,06	98	50%	0%	50%
SP12	195	205	31,2	0,95	9,47	90	100%	0%	100%
SP19	10	20	17,9	3,38	19,3	52	43%	0%	43%
SP19	20	28,8	25,0	2,16	12,5	72	84%	0%	84%
SP40	200	211,9	35,0	1,35	7,41	101	42%	58%	100%
SP40	211,9	220	1,97	5,71	32,4	6	0%	0%	0%
SP40	220	230	1,49	4,22	35,3	4	0%	0%	0%

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.