

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA REDUÇÃO DE MINÉRIO DE
FERRO DE BODOQUENA, MS

Mateus Gomes Rossi

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 39)

SÃO PAULO
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

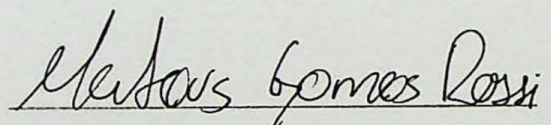
DEDALUS - Acervo - IGC

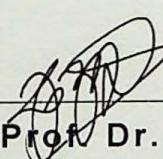


30900030328

“ESTUDO EXPERIMENTAL PARA A REDUÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO DE BODOQUENA, MS”




Aluno: Mateus Gomes Rossi

De acordo

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TF-2011/39

SÃO PAULO
2011

TF
R833
MG. e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA A REFINAÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO DE BODOQUENA, MS.



Co-orientador
[Signature]

[Signature]
Aluno: *[Name]*

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo André Mendes

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TE-2011-12

SÃO PAULO
1994

ABSTRACTO

Este presente trabalho é fruto do amor de dois apaixonados e apaixonados apaixonados, não somente dos seus sonhos e da sua vontade de crescerem. Mas também, importantes contribuições para meu aprendizado e para os outros, após esta conclusão do curso.

Primeiramente, agradeço a toda minha família. Aos pais, Ricardo Rosa, pela orientação, apoio e tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer. A minha mãe, Maria, pelo amor e carinho e tudo aquilo que me ensinou a viver a minha vida. A meu irmão "César", pelo apoio, incentivo e todas aquelas palavras "bom dia" que sempre me ajudam a crescer. Aos amigos, especialmente, Ricardo, Agostinho, Maria, João, João, João e Joana (os irmãos), Paulo, Rosa e Maria José. Espero que todos possam e se orgulhem com todos os conhecimentos de vida. Sem esquecer todos os meus amigos e "amigos" de São Bernardo e São Paulo.

A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer. A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer. A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer.

Ao professor Jorge Roberto Yamamoto, pela orientação e apoio neste trabalho de pesquisa, com os conhecimentos transmitidos ao longo do tempo. Todos as "portas abertas" que este trabalho me proporcionou foi fruto da sua paciência.

Aos professores Paulo César Oliveira e Paulo César Magalhães. O primeiro por me dar a primeira oportunidade de realizar um trabalho científico na USP. O segundo por ter agendado como "Tutor", ajudando e orientando durante toda a graduação.

Ao professor Marcelo André Moreira, da Pós-graduação, por orientar este trabalho e me ensinar aquilo que ultrapassam o nível de graduação.

Ao Grupo Yachiro, e a equipe de Laboratório Rômulo, pelo apoio e incentivo no desenvolvimento deste.

A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer. A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer.

A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer. A minha irmã, "Cary", sempre "pequena" (R), pela e mais e mais, pelo apoio, incentivo, apoio, apoio e "tudo aquilo que sempre me ensinou a crescer.

"O senhor saiba: eu toda a minha vida pensei por mim, forro, sou nascido diferente. Eu sou é eu mesmo. *Divêrjo* de todo o mundo... Eu quase que nada não sei. Mas desconfio de muita coisa".
(Riobaldo - João Guimarães Rosa)

AGRADECIMENTOS

Este presente trabalho é fruto de anos de amadurecimento e crescimento pessoal, não somente dos anos restritos a vida de estudante de graduação. Muitas pessoas importantes contribuíram para meu aprendizado e minha formação, sejam elas conselheiras ou profissionais.

Primeiramente, agradeço a toda minha família. Meu pai, Marcelo Rossi, pelos ensinamentos, ajuda e todo suporte como exemplo pessoal e profissional. À minha mãe, Maria Inês, por todo o carinho e auxílio sempre que precisei durante toda a minha vida. A meu irmão “distante”, Vitor, pela companhia e brincadeiras quando “éramos só nós dois”. Em especial, agradeço meus quatro avós: José Gomes e Geralda (*in memoriam*), Paulo Rossi e Maria José. Sempre me confortaram e me ensinaram com todas suas experiências de vida. Sem contar todos meus tios, primos e “agregados” de Belo Horizonte e Ribeirão Preto.

À Priscila Cury, famosa “pekena” (BU, para o mais íntimo), pelo companheirismo, afeto, ajuda e “auxílio acadêmico” ao longo desde últimos cinco anos, em momentos felizes e tristes também. Espero que mantenhamos este carinho e companheirismo por mais anos!

Ao professor Jorge Kazuo Yamamoto pela oportunidade e ajuda neste presente trabalho de formatura, além dos ensinamentos transmitidos ao longo deste ano. Todas as “portas abertas” que este trabalho me propiciou foi fruto de sua competência.

Aos professores Paulo César Giannini e Paulo César Boggiani. O primeiro por me dar a primeira oportunidade de realizar um trabalho científico no IGc-USP. O segundo por ter agüentado outro “Rossi”, ajudando e aconselhando durante toda a graduação.

Ao professor Marcelo Breda Mourão, da Poli-metalúrgica, por co-orientar este trabalho e me ensinar aptidões que extrapolam o limite da geologia.

Ao Mauro Yamamoto e a equipe do Laboratório Nomos, pela ajuda nos ensaios de beneficiamento mineral.

À Mineração Horii Ltda., principalmente Kazuto Horii e Hélio Gonçalves, que custearam, acreditaram e deram todo o suporte necessário para realização deste trabalho.

À família Cury Ribeiro, pelo apoio e ajuda “logística” (entenda-se comida, casa e roupa lavada) durante minha estadia na cidade de São Paulo. Além de fazerem companhia quando sentia saudades de casa.

À minha madrinha Zão (apesar de já ter mencionado a família) por me receber e sempre contribuir com “bons almoços” e carona.

Ao Isaac Sayeg do Laboratório de MEV do IGc-USP e aos técnicos Danilo e Gilmar da Poli-metalúrgica que me ajudaram muito na finalização deste trabalho.

Aos moradores da república Conglomerado e alguns amigos de graduação que fiz durante estes anos. Meus agradecimentos pela companhia e por “me agüentarem”.

Por último, mas não menos importante, a todos meus amigos de Belo Horizonte e da Ferteco. Em especial a família Schnellrath pelas “estadias” e auxílio durante minhas passagens pelo Rio de Janeiro neste ano, e ao pessoal do Colegium: “Faelzão”, Pedro Lanna, “Bolinha”, Vitor, Danilo, Marcos e tantos outros que, mesmo distantes, nunca deixaram de ser verdadeiros amigos.

RESUMO

O estudo de recursos e caracterização de jazidas de minério de ferro é de extrema importância frente à grande demanda deste bem mineral no contexto mundial. O provável depósito de minério de ferro em Bodoquena, MS, inserido na Faixa Paraguai desperta interesse para estudos que visam à viabilidade técnica e econômica deste recurso. A estratigrafia desta faixa compreende uma unidade inferior de metadiamicritos da Formação Puga, recoberto por rochas carbonáticas dos grupos Corumbá e Araras, sucedido por rochas siliciclásticas do Grupo Alto Paraguai. A mineralização de ferro está associada à Formação Puga, caracterizada por metadiamicritos, quartzitos e filitos alinhados norte-sul com mergulho para leste (entre 35-60°). Estas rochas apresentam matriz gradando de uma composição pelítica (rica em magnetita) até uma formação ferrífera com bandas de magnetita alternadas com quartzo. Este minério de ferro possui características peculiares que envolvem densidade aparente média de 2,94 g/cm³, matriz pelítico-magnetítica de granulação muito fina, variando de 0,01 mm a raros casos de 0,2mm e baixos teores de Fe (T), entre 18% e 25%. Os aspectos geológicos e geoquímicos destes metadiamicritos atentam para utilização de ensaios específicos para concentração de ferro em teores acima de 64%. Amostras de furos de sondagem e trincheiras foram selecionadas para o posterior tratamento do minério. O beneficiamento mineral, em escala de planta piloto, utilizou-se da moagem em escala granulométrica muito fina, separação magnética de baixa intensidade e flotação reversa geraram um produto magnetítico concentrado com teores de 64,86% (Fe) e baixos teores de contaminantes (P, Si, Al e K). A redução carbotérmica deste minério, em escala laboratorial, é eficaz mediante a pelotização sem aglomerantes químicos, utilizando-se de coque de carvão mineral na composição de pelotas auto-redutoras e como componente essencial para redução de pelotas queimadas e cruas (não queimadas). O produto final é uma pelota reduzida a ferro metálico com pequenos resquícios ou núcleos de óxido de ferro não reduzido e fases contaminantes segregadas (escória).

ABSTRACT

The study and characterization of iron ores deposits is extremely important in face of the high demand of this mineral resource in a global context. The probable deposit of iron ore in Bodoquena, MS, inserted in the Faixa Paraguai, induce the interest for studies aimed at the economical and technological availability of this resource. The stratigraphy of the Faixa Paraguai comprises a lower unit of metadiamicrites from the Puga Formation, covered by carbonate rocks related to Corumbá and Araras groups, succeeded by siliciclastic rocks of the Alto Paraguai Group. The iron mineralization is associated with Puga Formation, characterized as metadiamicrites, quartzites and phyllites aligned north-south dipping between 35°-60° to the east. These rocks have a matrix with gradation from a pelitic composition (rich in magnetite) to a banded iron formation, alternating magnetite and quartz bands. These iron ore has unique characteristics that involve average bulk density of 2,94 g/cm³, very fine-grained pelitic-magnetitic matrix, ranging from 0,01 mm to 0,2 mm in rare cases and low content of Fe (T), between 18% and 25%. The geological and geochemical aspects of these metadiamicrites indicate the application of specific tests for iron concentration at levels above 64%. Trench and drill samples were selected to further ore treatment. The mineral processing, in pilot plant scale, was consisted by milling in very fine particle size scale, low intensity magnetic separation and reverse flotation generated a magnetitic concentrate product containing 64.86% of Fe and low levels of contaminants (Si, P, Al and K). The carbothermic reduction of this ore is effective considering the production of pellets without chemical binders, using coking coal in self-reducing pellets and as a key component in the reduction of burned and raw (not burned) pellets. The final product is a pellet reduced to metallic iron with small remnants or nucleus of iron oxide unreduced and segregated contaminants phases (slag).

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS E METAS	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 ATIVIDADES REALIZADAS.....	4
1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 HISTÓRICO DE TRABALHOS REALIZADOS	5
2.2 FORMAÇÕES FERRÍFERAS E A FORMAÇÃO PUGA.....	6
2.3 CONTEXTO GEOTECTÔNICO E GEOLÓGICO DA REGIÃO	7
3. MATERIAS E MÉTODOS	10
3.1 ATIVIDADES DE CAMPO.....	10
3.2 AMOSTRAGEM.....	10
3.3 DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS E DOS FUROS DE SONDAGEM	10
3.4 ANÁLISES QUÍMICAS POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X E TITULAÇÃO	11
3.5 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	11
3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	11
3.7 TRATAMENTO DE MINÉRIOS.....	12
3.8 ENSAIOS METALÚRGICOS	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1 A FORMAÇÃO PUGA NA REGIÃO DE BODOQUENA: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOQUÍMICOS	16
4.1.1 Geologia Local:	16
4.1.2 Aspectos mineralógicos e petrográficos	18
4.1.3 Aspectos geoquímicos da Formação Puga:	21

4.2 CONCENTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO MINERAL	23
4.2.1 Furo FAES 01.....	23
4.2.2 Caracterização ao MEV e eletromicrografias	25
4.2.3 Beneficiamento do material de Trincheiras da Formação Puga.....	25
4.3 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DO MINÉRIO DE FERRO DE BODOQUENA ..	33
4.3.1 A redução carbotérmica de minério de ferro.....	33
4.3.2 Ensaios metalúrgicos	35
4.3.2.1 Pelotas convencionais	38
4.3.2.2 Pelotas auto-redutoras:.....	45
5. CONCLUSÕES.....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Produção e exportação brasileira de bens minerais e do minério de ferro nos últimos anos (IBRAM, 2010) 3
- Figura 2.** Localização da área de estudo, situação em relação a Campo Grande e acesso. Em detalhe a Fazenda São Manoel. Em vermelho as áreas de requerimento de pesquisa junto ao DNPM. (modificado de Rampazzo, 2007) 5
- Figura 3:** Localização de formações ferríferas relativas às glaciações do Neoproterozóico no mundo. 1- Grupo Bisokpabe, Togo; 2- Formação Chubos, Namíbia; 3- Formação Numees, Namíbia e África do Sul; 4- Subgrupo Yudnamutana, Austrália; 5- Grupo Tindir, Alasca (EUA); 6- Grupo Rapitan, Canadá; 7- Formação Kingston Peak, Califórnia (EUA); 8- Grupo Jacadigo – Maciço do Urucum, Mato Grosso do Sul (Brasil); 9- Grupo Macaúbas, Minas Gerais (Brasil); (Piacentini *et al.*, 2007) 7
- Figura 4:** Mapa Geológico da Faixa Paraguai; em evidência unidades ferríferas da região de Bodoquena, MS. (Mapa modificado de Alvarenga *et al.*, 2000) 9
- Figura 5:** Processo de pelotização do minério de ferro de Bodoquena. (I) Pelotizador tradicional, adaptado em uma betoneira rotativa; (II) Pelotas auto-redutoras feitas à mão 14
- Figura 6:** Equipamentos utilizados no processo de queima das pelotas de minério de ferro. (I) Forno (mufla) de resistência Lindberg/Blue M; (II) Prensa de ensaio universal KRATOS v1.0 para ensaio de compressão a frio; 14
- Figura 7:** Equipamentos utilizados na redução do minério de ferro; (I) Forno de tratamento térmico Brasimet K 400 (T máx 1300°C); (II) Resfriamento com auxílio de nitrogênio para evitar a oxidação; (III) Forno vertical Lindberg/Blue adaptado para ensaios termogravimétricos; (IV) Detalhe da abertura do forno vertical e do cadinho de alumina 15
- Figura 8:** Pelotas embutidas para metalografia; (I) Pelota convencional embutida a quente em braquelite; (II) Pelota embutida em resina Epoxiglass e polida em pano diamantado 15
- Figura 9:** Aspectos litológicos das unidades referentes à Formação Puga. (I) Mergulho das camadas, predominantemente, para leste (~45°). TBDQ-01; (II) Metadiamictito de matriz ferruginosa, granulação muito fina e clastos quartzosos. Matriz gradando para uma formação ferrífera; TBDQ-1; (III) Foliação moldando clastos quartzosos rotacionados centimétricos no metadiamictito da Fm. Puga. TBDQ-2; (IV) Clastos graníticos-gnáissicos suportados por uma matriz pelítica-ferruginosa muito fina. Metadiamictito da Fm. Puga. TBDQ-20 17
- Figura 10:** Aspectos litológicos das unidades referentes à Fm. Puga. (I) Clastos arredondados a estirados (centi a decimétricos) do metadiamictito da Fm. Puga. TBDQ-11; (II) Formação ferrífera laminada a bandada, associada aos metadiamictitos da Fm. Puga. TBDQ-20 18
- Figura 11:** Aspectos microscópicos dos metadiamictitos da Formação Puga. (I) Foliação crenulada (Sn+1). Clastos quartzosos alongados, moldados pela foliação pelítica-ferruginosa. Metadiamictito da Fm. Puga. BDQ- 2B. Nicóis paralelos. Lado maior: 3,25 mm; (II) Textura granolepidoblástica e granulação muito fina da matriz dos metadiamictitos da Fm. Puga. Grãos cúbicos de pirita. BDQ- 11A. Nicóis paralelos. Lado maior: 3,25 mm 19

Figura 12: Aspectos microscópicos da formação ferrífera bandada da Formação Puga. (I) Bandamento composicional, alternando bandas quartzosas e bandas ferríferas magnetíticas. Presença de grão idiomórfico de magnetita. Nicóis paralelos. BDQ 1A. Lado maior: 3,25mm; (II) Predomínio dos leitos ferríferos (magnetita e hematita) sobre leitos quartzosos na formação ferrífera associada a Fm. Puga. BDQ 2A. Nicóis cruzados. Lado maior: 1,30mm **19**

Figura 13: Substituição mineral pelo processo de martitização. (I). Substituição da magnetita (cinza-acastanhado) por hematita (cinza-claro) inicia-se pelas bordas dos grãos. Nicóis cruzados. Lado maior: 0,3 mm; (II) Processo de martitização capaz de gerar relictos de magnetita após a substituição parcial/completa por lamelas de hematita. Substituição ocorre preferencialmente pelos planos de clivagem. Nicóis cruzados. Lado maior: 0,3 mm. **20**

Figura 14: Correlação interelementar. Indica boa correlação entre Al_2O_3 com Zr e TiO_2 e moderada com Rb devido a presença de sedimentos detríticos **21**

Figura 15: Processos visando separação por densidade. (I) Jigge manual para separação gravimétrica em lump feed ($\pm 1''$); furo FAES 01; (II) Mesa concentradora para separação gravimétrica em sinter/pellet feed (100 mesh); furo FAES 01 **24**

Figura 16: Eletromicrografia dos produtos beneficiados referentes ao furo FAES 01. Imagens de grãos idiomórficos de magnetita menores que 400 mesh (cinza claro) com agregados alumino-silicáticos (cinza escuro); (I) Padrão observado em produtos pós flotação (afundado e flotado *re-cleaner*); (II) Produtos pós separação magnética (a 1270 gauss); (III) Imagens sobre grãos irregulares de magnetita menores que 500 mesh com agregados de sílica e alumino-silicatos. Produtos pós flotação (flotado e afundado *re-cleaner*) (IV) Imagens sobre grãos irregulares de magnetita menores que 500 mesh. Produtos pós separação magnética (1270 gauss) **25**

Figura 17: Processamento inicial do minério de ferro retirado de trincheiras na região de Bodoquena, MS. Amostra BDQ-TR; (I) Homogenização e quarteamento manual (II) Moinho de barras/bolas. Sistema a úmido (70% em massa) **26**

Figura 18: Separação em peneira vibratória com malha de 400 mesh. Amostra BDQ-TR; (I) Sistema de peneiramento a úmido em peneira vibratória; (II) Peneiramento a úmido em peneira vibratória, controlando geração de material entre 400-600 mesh **27**

Figura 19: Representação do funcionamento de um separador magnético de tambor. Detalhe para o sentido horário de rotação do tambor (Svoboda, 1987) **28**

Figura 20: Processo relativo a separação magnética do minério de ferro. Amostra BDQ-TR; (I) Separador magnético a úmido de tambor. Baixa intensidade (400-1300 gauss). Detalhe para produtos finais (magnético, não-magnético e overflow); (II) Separador magnético a úmido de tambor. Baixa intensidade (400-1300 gauss). Detalhe calhas de recolhimento; (III) Condicionador e bomba peristáltica utilizados para bombeamento do material em suspensão para o tambor magnético; (IV) Produto magnético (400-1300 gauss) filtrado evidenciando leito milimétrico acastanhado (possível composição alumino-silicática) **28**

Figura 21: Processo de desmagnetização; (I) Desmagnetizador por corrente alternada Magtek Túnel ITDT-C; (II) Alimentação por calha vibratória: velocidade de 10 cm/s **29**

Figura 22: Flotação em coluna do minério de ferro pós-separação magnética. Amostra BDQ-TR; (I) Coluna, condicionador, bombas peristálticas e tambores de coleta dos produtos; (II) Detalhe para inserção de ar induzido (mangueira vermelha) e coleta de material ferroso afundado (mangueira transparente); (III) Detalhe para produto flotado (contaminante), na zona da espuma. (IV) Bolhas de ar carregando material flotado (contaminando) **30**

Figura 23: Eletromicrografia e espectrometria do produto beneficiado concentrado a 64,86% Fe. Amostra BDQ-TR; (I) Eletromicrografia do produto afundado Recleaner. Nota-se predomínio de minerais ferrosos liberados até em 10 µm; (II) Detalhe dos grãos utilizados para análise em RX-EDS; (III) Resultados de RX-EDS, evidenciando composição ferrífera do minério beneficiado; (IV) Resultados de RX-EDS evidenciando a composição pelítica (Al, K e Si) das fases contaminantes restantes 32

Figura 24: Mecanismos de aglomeração e formação de pelotas. (Atsumi, 1999); (A) Ligação inicial com pontes de líquido; (B) Coalescência de filme líquido sobre as partículas; (C) Líquido preenche espaços vazios na pelota e há adesão de partículas nos núcleos formados 33

Figura 25: Sequência de eventos no caso de pelotas auto-redutoras quando submetida a altas temperaturas (Mourão & Takano, 2003) 35

Figura 26: Pelotas convencionais confeccionadas utilizando água como aglomerante 36

Figura 27: Resultados de ensaios a compressão na prensa KRATOS v1.0. (I) Pelota auto-redutora; (II) Pelota convencional 37

Figura 28: Processo de queima das pelotas convencionais. (I) Pelotas convencionais queimadas em cadinho de alumina à esquerda e pelotas não queimadas à direita; (II) Ensaio de resistência a compressão na prensa KRATOS v1.0; (III-A e B) Resultados obtidos da resistência mecânica a compressão em pelotas queimadas 38

Figura 29: Pelotas convencionais reduzidas. (I) Pelota não queimada, esquerda, e pelota queimada, direita; (II) Detalhes para estruturas internas das pelotas reduzidas. Pelota não queimada, à esquerda, e pelota queimada, à direita 39

Figura 30: Micrografias da pelota queimada e reduzida. (I) Aspecto geral da pelota; (II) Fases presentes na pelota queimada. Detalhe: Fe metálico, escória e a estrutura ferrita 40

Figura 31: Eletromicrografias sobre as pelotas queimadas com mapeamento em RX-EDS. (I) Localização dos “tiros” para análise espectrométrica; (II) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização (pontos claros) das unidades ricas em K; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em O 41

Figura 32: Espectrômetros (RX-EDS/ MEV) das fases existentes na pelota queimada após a redução. (I) Espectrômetro dos “grãos” de ferro metálico; (II) Espectrômetro sobre as fases contaminantes associadas (escória); (III) Espectrômetro sobre óxido de ferro que não reduziu a ferro metálico 42

Figura 33: Micrografia das pelotas não queimadas. (I) Aspecto geral da pelota não queimada ao microscópio de luz refletida; (II) Detalhe para ferro metálico em processo de sinterização (“ligação entre partículas”); (III) Detalhe para ferro metálico, escória (aspecto cristalino) e óxido de ferro associado às bordas do ferro metálico; 43

Figura 34: Eletromicrografias sobre as pelotas não queimadas com mapeamento em RX-EDS. (I) Localização dos “tiros” para análise RX-EDS/MEV; (II) Localização (pontos claros) das unidades ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Al; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em O 44

Figura 35: Espectrômetros (RX-EDS/MEV) das fases existentes na pelota não queimada após a redução. (I) Espectrômetro dos “grãos” de ferro metálico; (II) Espectrômetro sobre as fases contaminantes associadas (escória) **45**

Figura 36: Gráficos referentes aos resultados obtidos nos ensaios termogravimétricos com pelotas auto-redutoras. (I) Perda de peso (%) ao longo do tempo de residência da pelota auto-redutora no forno; (II) Evolução da fração de reação ao longo do tempo de residência da pelota auto-redutora no forno **47**

Figura 37: Pelotas auto-redutoras após os ensaios termogravimétricos; (I) Pelotas embutidas a frio em resina Epoxiglass. (II) Pelota auto-redutora embutida em resina Epoxiglass, em detalhe para direção de reação de redução (centro reduzido e bordas parcialmente reduzidas); (III) Esquema do forno vertical adaptado para testes de termogravimetria (Santos, 2002) **48**

Figura 38: Micrografias das pelotas auto-redutoras após redução. (I) Aspectos gerais da pelota reduzida. Poros são preenchidos pela resina Epoxiglass. (II) Estrutura tipo ferrita. Pelota atacada com ácido nítrico **49**

Figura 39: Espectrômetros (RX-EDS/ MEV) das fases existentes na pelota auto-redutora, após redução. (I) Espectrômetro dos “grãos” de ferro metálico; (II) Espectrômetro das fases contaminantes (escória) **49**

Figura 40: Eletromicrografias de pelotas auto-redutoras (mapeamento RX-EDS). (I) Localização dos “tiros” para análise espectrométrica; (II) Localização (pontos claros) das unidades ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Al; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em K **50**

Tabela 1: Cronograma de atividades realizadas no estudo em questão, entre janeiro e novembro de 2011 4

Tabela 2: Resultados da análise química por Fluorescência de Raios-X da Formação Puga. Amostras coletadas referentes ao metadiamictito de matriz ferruginosa (BDQ 5A, BDQ-11A, BDQ-18, BDQ-22) e a formação ferrífera (BDA-2A, BDQ-19). LD=Límite de detecção 22

Tabela 3: Amostra BDQ J referente ao furo Faes 01, após separação magnética 24

Tabela 4: Amostra BDQ-TR pós peneiramento a úmido sob malha regular de 400 mesh 27

Tabela 5: Amostra BDQ-TR, resultados da separação magnética úmida a baixa intensidade 29

Tabela 6: Amostra BDQ-TR, resultados pós flotação reversa de coluna 31

Tabela 7: Resultados de Fluorescência de Raios-X referentes à alíquota inicial do beneficiamento (BDQ-TR Original) e do produto concentrado pós flotação (BDQ-TR Flotação, em duplicata) 32

Tabela 8: Diâmetro médio e peso de pelotas convencionais e pelotas auto-redutoras 36

Tabela 9: Peso das pelotas antes e pós curadas/secas e sua umidade 36

Tabela 10: Pesagem das pelotas convencionais no processo de redução carbotérmica 39

Tabela 11: Valores de fração de perda de peso máxima da pelota M. M1= pelota 1, M2= pelota 2, M= pelota 3 45

Tabela 12: Resultados referentes aos ensaios termogravimétricos ao forno vertical adaptado Lundberg/Blue. Foram utilizadas 3 pelotas de diâmetro entre 14-18 mm 46

Tabela 13: Medidas de fração de reação para as pelotas auto-redutoras referentes aos ensaios termogravimétricos 46

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a descoberta da ocorrência de minério de ferro na Fazenda São Manoel, município de Bodoquena, MS, a Mineração Horii Ltda desenvolveu nos últimos anos intensa pesquisa mineral para a caracterização, avaliação e mapeamento do minério em questão.

O estudo desta formação ferrífera ocorre no contexto da Faixa Paraguai, borda sul do Cráton Amazônico e leste do Bloco Rio Apa (Almeida, 1984). A estratigrafia desta faixa compreende uma unidade inferior de metadiamicritos da Formação Puga, recoberto por rochas carbonáticas dos grupos Corumbá e Araras, sucedido por rochas siliciclásticas do Grupo Alto Paraguai. A mineralização de ferro está associada à Formação Puga, caracterizada por metadiamicritos, quartzitos e filitos alinhados norte-sul com mergulho para leste (entre 35-60°) e presença de clastos mili a decimétricos quartzo-gnaisses. Estas rochas apresentam matriz gradando de uma composição pelítica à rica em magnetita até a formação ferrífera com bandas de magnetita alternadas com quartzo. A formação ferrífera associada ocorre em camadas métricas de direção N-S e mergulho entre 40-50°E, com teores de Fe_2O_3 entre 75% na base e no topo do pacote e 52% em porções intermediárias (Piacentini *et al.*, 2007). Este minério de ferro possui características peculiares, como densidade aparente média de 2,94 g/cm³ e matriz magnetítica de granulação muito fina, variando de 0,01 mm a raros casos de 0,2 mm (Rampazzo, 2007).

A ocorrência de ferro associada aos metadiamicritos da Formação Puga são relacionadas a eventos glaciogênicos do Neoproterozóico, Glaciação Varanger (~610-590 Ma) (Alvarenga & Trompette 1992, Alvarenga *et al.* 2000). Formações ferríferas glaciais neoproterozóicas têm sido amplamente descritas e difundidas por constituir, não só um tema geológico de interesse na compreensão das mudanças climáticas no Pré-Cambriano, mas pela elevada importância econômica deste bem mineral e sua demanda no mercado mundial.

O presente trabalho trata do estudo analítico para redução do minério de ferro visando à avaliação de sua viabilidade tecnológica frente a produtos comerciais utilizados pela indústria mineral e siderúrgica, uma vez que se trata de um minério magnetítico, de baixo teor (Fe) e baixo grau de cominuição (Rampazzo, 2007). Vale ressaltar que as atividades de beneficiamento e os ensaios metalúrgicos do minério em estudo são de suma importância para estudos de viabilidade tecnológico-econômica da Mineração Horii Ltda. Portanto, as atividades em questão envolvem interesse da empresa em sua posterior aplicação em escalas industriais.

1.1 OBJETIVOS E METAS

Este trabalho de formatura tem como metas:

- I. Fornecer subsídios para auxílio da pesquisa mineral realizada pela Mineração Horii Ltda sobre a mineralização de ferro de Bodoquena;
- II. Compreender e contribuir para o entendimento dos processos que envolvem o beneficiamento e a redução do minério de ferro rico em magnetita;
- III. Caracterizar o minério de ferro de Bodoquena, avaliando a viabilidade técnica para a recuperação do mineral de minério e sua aplicação metalúrgica.

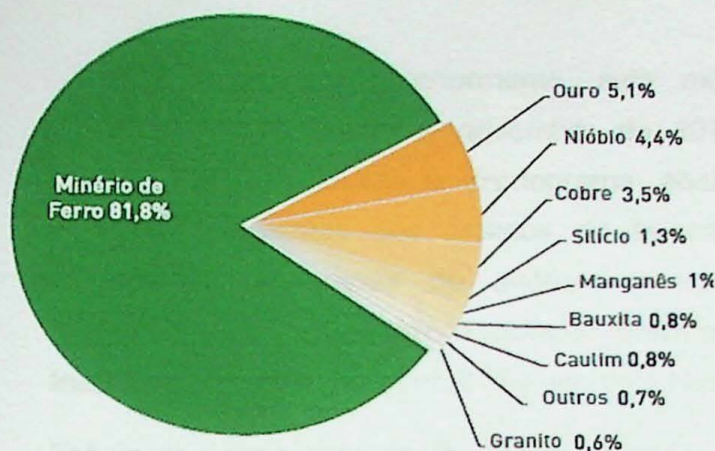
De forma a alcançar estas metas, foram relacionados os seguintes objetivos:

- I. Realizar uma pesquisa bibliográfica referente a trabalhos que englobem caracterização geológica da formação ferrífera de Bodoquena, avaliação dos recursos minerais de ferro, beneficiamento e redução de minérios de ferro;
- II. Coleta e descrição de amostras e material para posterior processamento (beneficiamento e redução), bem como para confecção de lâminas petrográficas que auxiliem e aperfeiçoem os ensaios de beneficiamento;
- III. Proceder com análises químicas, minerais e metalúrgicas para caracterização do minério de ferro.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo de recursos e caracterização de jazidas de minério de ferro é de extrema importância frente à grande demanda deste bem mineral em um contexto mundial. As reservas mundiais deste minério são da ordem de 370 bilhões de toneladas, dentre as quais o Brasil possui cerca de 29 bilhões de toneladas (8,1%). Segundo dados do IBRAM (2010), o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, tendo chegado a produção de 370 milhões de toneladas no ano de 2010 (Figura 1), cerca de 16% do total mundial (2,3 bilhões de toneladas). As exportações brasileiras de bens minerais, concentram-se neste minério (cerca de 82% dos produtos exportados) e a demanda por ferro é elevada, devido ao consumo para fabricação de aço e o Fator China que impulsionam os investimentos na pesquisa de novas jazidas.

Estudos do Banco *Credit Suisse* mostram que pelos próximos dois anos (2011 e 2012) haverá um déficit de 50 milhões de toneladas na demanda de minério de ferro. Em 2010, as exportações brasileiras de bens primários de ferro atingiram 311 milhões de toneladas (Figura 1), sendo a China responsável por 45% destas. Isso representa um aumento em 119% nos valores de exportação se comparado ao ano de 2009.



COMÉRCIO EXTERIOR DO SETOR MINERAL VALORES EM MILHÕES DE US\$		
PRINCIPAIS PRODUTOS EXPORTADOS E IMPORTADOS		
	2009	2010
Exportação Mineral Bens Primários	18,096	35,360
Minério de Ferro	13,247	28,912
Ouro (em barras)	1,384	1,786
Nióbio (ferro-nióbio)	1,060	1,557
Cobre	803	1,238
Silício	347	460
Caulim	253	275
Minério de Manganês	186	357
Bauxita	158	270
Estanho	13	8
Chumbo	9	12
Granito	135	219
Outros	501	268

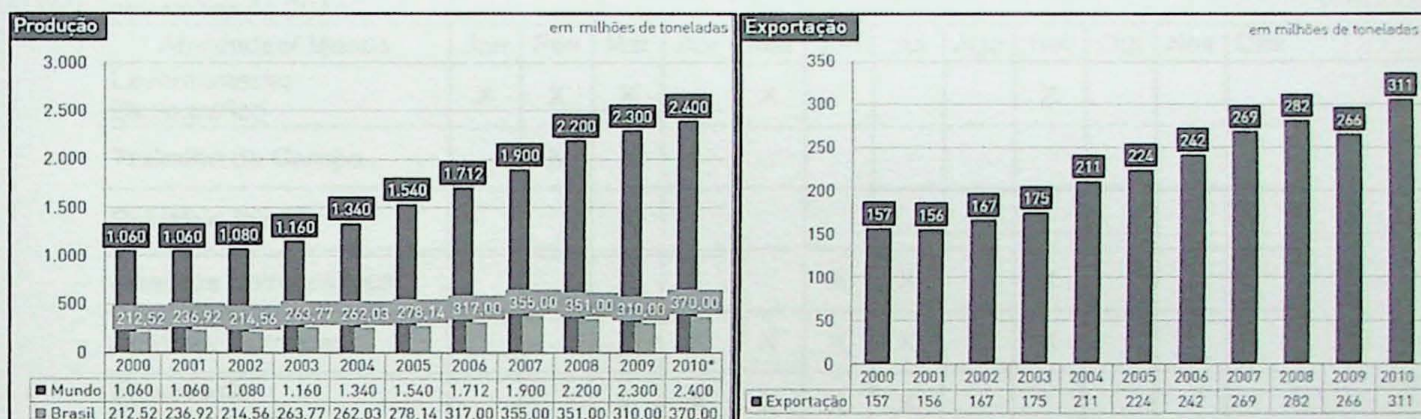


Figura 1: Produção e exportação brasileira de bens minerais e do minério de ferro nos últimos anos (IBRAM, 2010);

Aliado a isto, para o período de 2010-2014, são previstos investimentos da ordem de US\$ 62 bilhões na produção mineral brasileira, sendo o setor do minério de ferro responsável por 39,2 bilhões (63% do total).

O estado do Mato Grosso do Sul representa cerca de 17% (aproximadamente 5 bilhões de toneladas) das reservas brasileiras, destaque para o Maciço do Urucum. Pesquisas anteriores na região de Bodoquena (Rampazzo, 2007; Piacentini, 2008) evidenciaram possível reserva de 1,136 bilhões de toneladas (medido + indicado + inferido), certificando a importância da região para o setor mineral brasileiro.

Estudos para viabilidade tecnológica e econômica de minérios de ferro condizem com conhecimento geológico prévio e ensaios metalúrgicos. Dados mineralógicos, estruturais, teores de ferro e contaminantes e série de parâmetros metalúrgicos são determinantes para que depósitos minerais possam se tornar economicamente aproveitados. Portanto, trabalhos que visam à descrição e caracterização geológico-tecnológica são de suma importância para consolidação do país como importante player do setor mineral no mundo.

1.3 ATIVIDADES REALIZADAS

Como explicitado anteriormente, esta monografia compreende as atividades realizadas entre janeiro e novembro de 2011. Ao longo do ano, as atividades desenvolvidas seguiram o cronograma abaixo (tabela 1), ocorrendo pequenas variações referentes aos ensaios de beneficiamento. Todas as atividades que envolveram as etapas de análises minerais (petrográficas e químicas), de beneficiamento, pelotização e redução foram realizadas com amostras coletadas nos trabalhos de campo e material enviado pela Mineração Horii Ltda.

Tabela 1: Cronograma de atividades realizadas no estudo em questão, entre janeiro e novembro de 2011;

Atividades/ Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Levantamento Bibliográfico	X	X	X		X				X			
Trabalho de Campo		X	X									
Relatório Inicial			X									
Análises Petrográficas			X			X	X		X			
Análises Químicas			X	X	X	X	X	X	X			
Ensaios de Beneficiamento			X	X	X	X	X					
Relatório de Progresso							X	X				
Ensaios de pelotização e redução								X	X	X		
Relatório Final										X	X	
Apresentação												X

1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Bodoquena, porção oeste do estado de Mato Grosso do Sul (Figura 2). O município está situado a aproximadamente 260 km da capital do estado, Campo Grande, limitando-se a norte pelo município de Miranda, a sul e a leste com o município de Bonito e a oeste pelos municípios de Porto Murtinho e Corumbá. O acesso se dá pela BR-262 a partir de Campo Grande até Miranda, onde se toma a MS-339 em direção a Bodoquena. A Fazenda São Manoel, área da ocorrência mineral, encontra-se a 12 km do município e seu acesso se dá pela MS-178 (Bodoquena-Bonito).

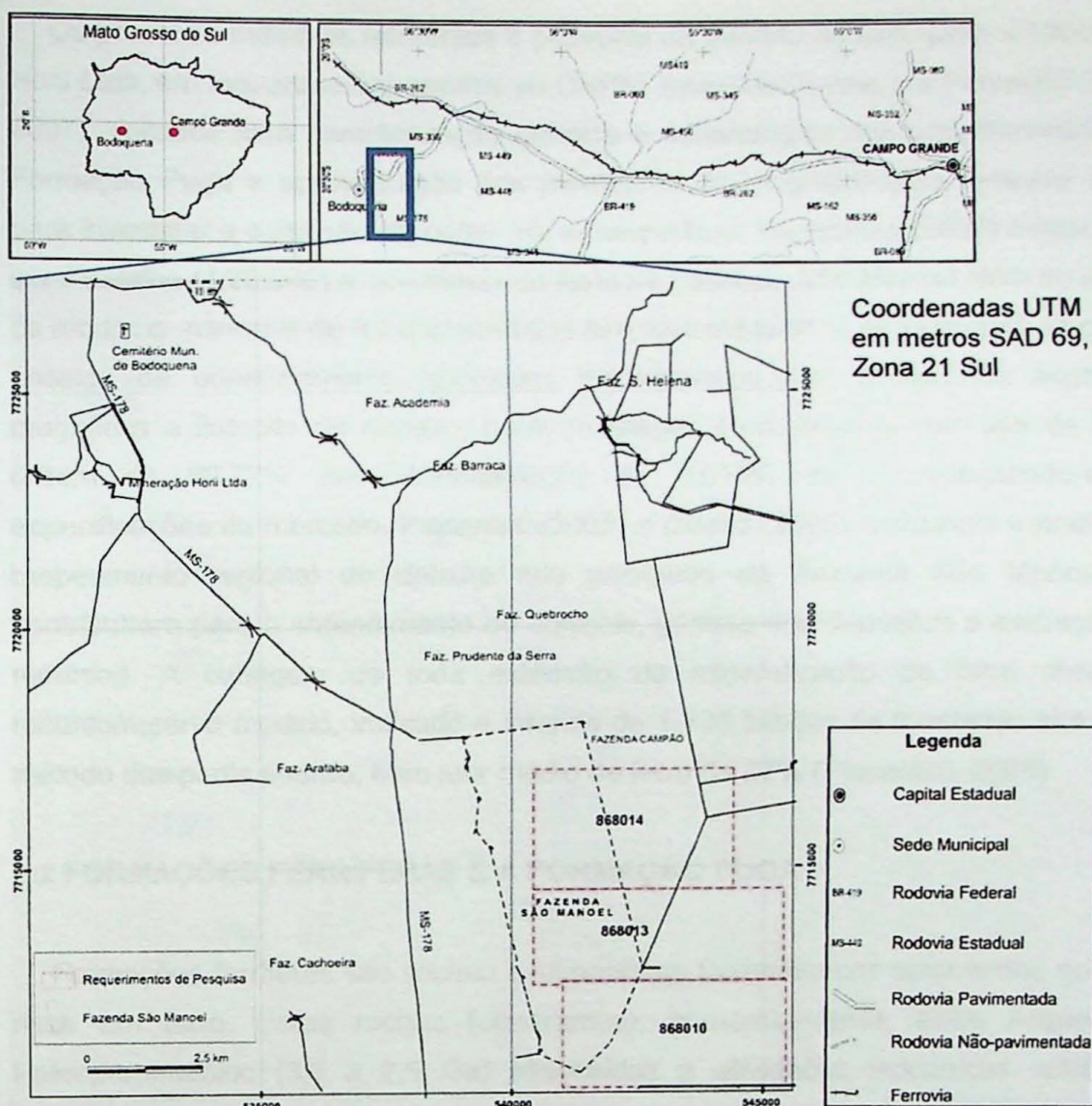


Figura 2. Localização da área de estudo, situação em relação a Campo Grande e acesso. Em detalhe a Fazenda São Manoel. Em vermelho as áreas de requerimento de pesquisa junto ao DNPM. (modificado de Rampazzo, 2007);

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DE TRABALHOS REALIZADOS

O prévio conhecimento geológico da região, sobre as rochas de matriz ferruginosa, é referente ao Projeto Bodoquena do convênio CPRM/DNPM ao fim da década de 1970. Projeto este que contou com a descrição da ocorrência de diamictito de matriz hematítica na região. Drummond & Pereira (1980) realizaram as primeiras análises de dados geofísicos do Projeto Bodoquena com ênfase em mapeamento geológico e prospecção mineral.

Os primeiros trabalhos referentes a pesquisa de minério de ferro junto a Mineração Hori Ltda, em requerimentos obtidos ao DNPM, foram realizados por Piacentini (2006, 2007), voltados para caracterização química e mineralógica dos metadiamictitos da Formação Puga e apresentação dos resultados da magnetometria terrestre usada para investigar a extensão do corpo em subsuperfície. Rampazzo (2007) mapeou em semi-detalle (1:20.000) a ocorrência de ferro na Fazenda São Manoel além de avaliar os recursos minerais de ferro associados aos metadiamictitos da Formação Puga. Os ensaios de beneficiamento realizados evidenciaram que, através da separação magnética e flotação de quartzo, pode-se chegar a um produto com teor de Fe na ordem de 69,72% com concentração de 0,015% de P, adequando-se às especificações do mercado. Piacentini (2008) e Duarte (2009) realizaram trabalhos de mapeamento regional de detalhe nos arredores da Fazenda São Manoel que contribuíram para o entendimento do controle, gênese dos depósitos e avaliação dos recursos. A cubagem de toda extensão da mineralização de ferro chegou a recurso/reserva medido, indicado e inferido de 1,136 bilhões de toneladas através do método dos perfis padrão, com teor médio de ferro de 27% (Piacentini, 2008).

2.2 FORMAÇÕES FERRÍFERAS E A FORMAÇÃO PUGA

Formações ferríferas são rochas sedimentares formadas por sedimentos químicos ricos em ferro. Estas rochas formaram-se, primordialmente, entre Arqueano e Paleoproterozóico (3,5 a 2,5 Ga) associadas a atividades vulcânicas relativas à sequências do tipo *greenstone belt*. Porém, no Neoproterozóico (0,8 a 0,6 Ga) surgiram novas condições favoráveis para a deposição destes sedimentos e neste contexto se encaixa os metadiamictitos ferruginosos da Formação Puga. Trendall (2002) sinaliza para importância das formações ferríferas no contexto das condições climáticas e geoquímicas da Terra primitiva, uma vez que atualmente os processos para formação de tais rochas não encontram condições favoráveis.

Várias propostas e sistemas de classificação para as Formações Ferríferas foram propostas e discutidas ao longo dos anos, mas nenhuma delas provou ser satisfatória. James (1954) classificou formação ferrífera como rochas composta por 15% ou mais de ferro de origem sedimentar, enquanto Davy (1983) definiu como formações que contém entre 25 e 32 % em peso de ferro e 50% de sílica. Assim sendo, destacam-se as divisões, das formações ferríferas, proposta por Gross (1980) em tipo Superior e tipo Algoma relativos ao ambiente de deposição e a elaborada por Trendall (2002) que dividiu, descritivamente, em BIFs (*Banded Iron Formation*) e GIFs (*Granular Iron Formation*).

Acredita-se que a origem destas formações está relacionada ao período que a atmosfera tinha pouco oxigênio livre e as águas marinhas possuíam abundância em ferro no fundo oceânico. O ferro se precipitaria em regiões de correntes ascendentes ao entrar em contato com águas superficiais oxidantes (Cloud 1973).

As formações ferríferas Neoproterozóicas, como é o caso da Formação Puga, referem-se a eventos relacionados à fragmentação do supercontinente Rodínia (0,9-0,6 Ga) e a glaciação Varangeniana/Marinoana. Estes eventos propiciaram a geração de bacias do tipo *rift*, algumas evoluídas para bacias de margens passivas (Trompette, 2000). No contexto desta glaciação houve condições favoráveis para deposição de formações ferríferas associadas a diamictitos. Calotas de gelo isolaram a atmosfera dos oceanos e geraram um ambiente anóxico. O ferro é concentrado a partir da exalação de fumarolas ricas neste elemento. Atividades vulcânicas abundantes concentram CO₂ na atmosfera, gerando efeito estufa e derretendo as calotas glaciais. Com esta deglaciação há o retorno de organismos fotossintetizantes que inserem oxigênio nos oceanos, oxidando estes e propiciando condições para precipitação química do ferro.

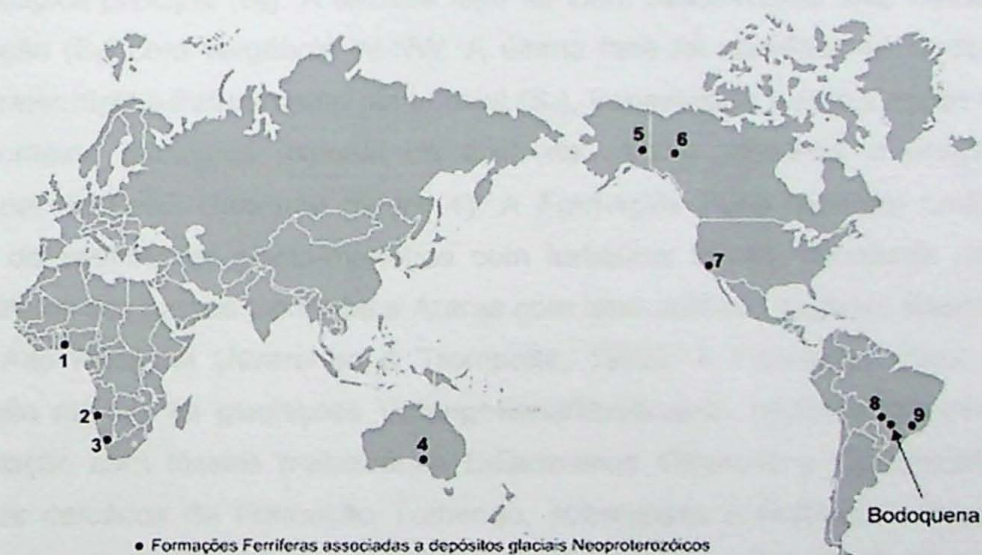


Figura 3: Localização de formações ferríferas relativas às glaciações do Neoproterozóico no mundo. 1- Grupo Bisokpabe, Togo; 2- Formação Chubos, Namíbia; 3- Formação Numees, Namíbia e África do Sul; 4- Subgrupo Yudnamutana, Austrália; 5- Grupo Tindir (EUA); 6- Grupo Rapitan, Canadá; 7- Formação Kingston Peak (EUA); 8- Grupo Jacadigo – Maciço do Urucum, MS (Brasil); 9- Grupo Macaúbas, MG (Brasil); (Piacentini *et al.*, 2007)

2.3 CONTEXTO GEOTECTÔNICO E GEOLÓGICO DA REGIÃO:

O estudo das rochas ferríferas da Formação Puga ocorre no contexto da Faixa Paraguai (unidade geotectônica da Província Estrutural Tocantins), borda sul do Cráton Amazônico e leste do Bloco Rio Apa. Esta faixa relaciona-se aos eventos do

7

Ciclo Brasileiro (0,6 a 0,5 Ga) e foi submetida à intensa deformação linear polifásica com presença de grandes falhamentos, longos cavalgamentos além de plútons graníticos pós-tectônicos em áreas mais internas (Almeida, 1984). A Faixa Paraguai ocorre exposta em uma porção setentrional, em Mato Grosso, e em uma porção meridional na Serra de Bodoquena e no Maciço de Urucum, em Mato Grosso do Sul. Coberturas sedimentares da Bacia do Paraná e da Bacia do Pantanal separam estas áreas. Não há deformações nestas coberturas cratônicas a oeste, porém a leste nota-se uma crescente deformação onde intensificam os falhamentos inversos e dobras isoclinais (Alvarenga 1990, Alvarenga & Trompette 1992). A evolução tectônica remete aos últimos eventos deformacionais brasileiros ao final do Ediacarano e início do Cambriano.

Considera-se que estes eventos deformacionais ocorreram em fases distintas. Alvarenga (1990) descreveu a fase principal como um evento caracterizado pela deformação e metaformismo crescente do cráton para a faixa, sinalizada por dobras abertas isoclinais (S_1). A seguinte fase trata-se de uma fase local evidenciada por clivagens de crenulação na direção N35-50/30-45NW, esta sendo a foliação macroscópica principal (S_2). A terceira fase também desenvolveu uma xistosidade de crenulação (S_3) com vergência W-NW. A última fase foi considerada tardibrasileira, com caráter rúptil e fraturamento plano axial (S_4), transversais à estruturação regional.

O contexto geológico regional da área de estudo refere-se à porção centro meridional da Faixa Paraguai (figura 4). A Formação Puga constitui uma unidade inferior de sedimentos glácio-marinhos com turbiditos distais, recoberta por rochas carbonáticas dos grupos Corumbá e Araras com uma unidade superior siliciclástica do Grupo Alto Paraguai (Alvarenga & Trompette, 1992). A Formação Puga teve sua deposição relativa às glaciações Varangeriana/Marinoana, confirmada indiretamente pela relação com fósseis metazoários Ediacaranos *Cloudina* e *Corumbella* (Zaine, 1991) de calcários da Formação Tamengo, sobreposta a Formação Puga, e pela datação de zircões detriticos, na região de Bodoquena e Morro do Puga, destes metadiamicritos em idades da ordem de 706 Ma (Babinski *et al.* 2008).

Na região em estudo, Serra da Bodoquena, há a ocorrência de sedimentos glácio-marinhos e turbiditos de influência glacial referentes a Formação Puga. Estratigraficamente, estes metadiamicritos são recobertos por unidades siliciclásticas e carbonáticas do Grupo Corumbá com espessuras de até 600m, sinalizando fim da influência glacial e subida do nível do mar. O Grupo Corumbá é constituído por uma unidade basal de conglomerados de leques aluviais sin-tectônicos da Formação Cadieus, sobreposta por conglomerados e pelitos da Formação Cerradinho. Acima destes conglomerados depositou-se a Formação Bocaina, composta por carbonatos

dolomíticos de águas rasas ricos em estromatólitos. As unidades superiores são pelitos carbonosos de águas mais profundas da Formação Tamengo e, por fim, siltitos acinzentados da Formação Guaicurus marcando o fim da deposição na Bacia Corumbá. Como mencionado anteriormente, estas unidades apresentam-se deformadas por falhamentos inversos e dobras isoclinais com vergência para oeste.

Na região em estudo, a Formação Puga é caracterizada por metadiamictitos, quartzitos e filitos com mergulho para leste entre 35-60°, alinhados norte-sul por aproximadamente 30 km de extensão. Estas rochas apresentam matriz gradando de uma composição pelítica a rica em magnetita até a formação ferrífera com bandas de magnetita alternadas com quartzo, além da presença de clastos mili a decimétricos de composição quartzo-granítica perfazendo até 15% da rocha e geralmente deformados. Tectonicamente, encontra-se sobreposta, por falhamentos inversos, a rochas carbonáticas do Grupo Corumbá (Piacentini, 2008).

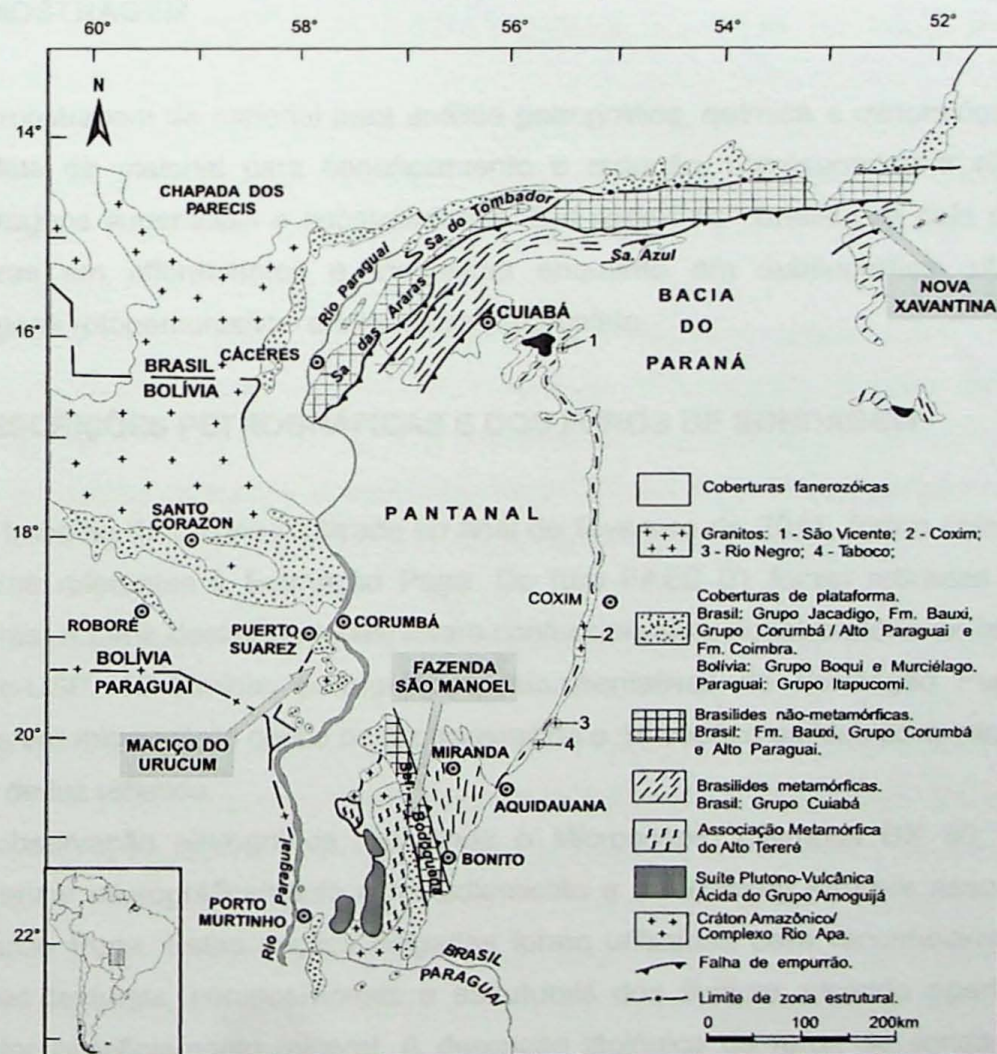


Figura 4: Mapa Geológico da Faixa Paraguai; em evidência unidades ferríferas da região de Bodoquena, MS. (Mapa modificado de Alvarenga *et al.*, 2000);

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 ATIVIDADES DE CAMPO

As atividades de campo foram realizadas no período de 25 a 28 de fevereiro de 2011, aos arredores da Fazenda São Manoel em Bodoquena (MS). O intuito destas atividades foi o reconhecimento da geologia local, caracterizando os litotipos da região, especificamente da Formação Puga, objeto de interesse do projeto vigente. Os locais visitados, bem como a localização da sondagem e trincheiras, são explicitados no anexo 1. O mapa geológico utilizado consta da compilação de dados geológicos e do mapa elaborado por Piacentini (2008).

3.2 AMOSTRAGEM

A amostragem de material para análise petrográfica, química e mineralógica, além da coleta de material para beneficiamento e redução, correspondeu a etapas de amostragens superficiais e subsuperficiais. Em superfície constitui-se pela coleta de amostras em afloramentos e trincheiras enquanto em subsuperfície utilizam-se sondagens rotopercurssivas e trincheiras para coleta.

3.3 DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS E DOS FUROS DE SONDAGEM

No trabalho de campo realizado no final de fevereiro de 2011, foram coletadas 13 amostras referentes à Formação Puga. Do furo FAES 01 foram retiradas mais 20 amostras. A partir destes materiais foram confeccionadas, no laboratório de laminação do IGc-USP, 15 lâminas petrográficas, representativas da Formação Puga, para análise em microscópio óptico de luz transmitida e 15 seções polidas para microscópio óptico de luz refletida.

A observação petrográfica, utilizando o Microscópio Olympus BX 50, permitiu caracterizar micrograficamente o metadiamictito e a formação ferrífera associada da Formação Puga. Estas seções delgadas foram utilizadas para reconhecimento das relações texturais, composicionais e estruturais dos litotipos visando aperfeiçoar o posterior beneficiamento mineral. A descrição litológica de furos de sondagem das unidades na região da Fazenda Manoel está explicitado no anexo 2.

3.4 ANÁLISES QUÍMICAS POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X E TITULAÇÃO

Para análises químicas, foram utilizadas amostras representativas da Formação Puga. O critério para esta seleção constitui-se da escolha por amostras de diferentes profundidades e com variações composicionais destacadas.

Seis amostras, dentre as coletadas em campo e do furo FAES 01, foram selecionadas para análise química por Fluorescência de Raios-X e preparadas previamente no Laboratório de Tratamento de Amostras (LTA). A preparação consiste em fragmentação do material analisado por uma prensa hidráulica, e pulverização em moinho de anéis de ágata. Para análise de elementos menores realizou-se micronização, homogeneização e pastilhamento. Procedeu-se a análise, no laboratório de Fluorescência de Raios-X, em pastilhas fundidas e prensadas para elementos maiores e menores SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e elementos traços Ba, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, F, Ga, La, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, S, Sc, Sr, Th, U, V, Y, Zn e Zr.

Durante a etapa de beneficiamento, análises químicas por titulação e Fluorescência de Raios-x foram realizadas para classificação dos produtos obtidos. A Fluorescência de Raios-X baseou-se na análise dos teores de ferro, fósforo e de fases contaminantes (Al_2O_3 e SiO_2).

A metodologia de titulação foi utilizada para controle dos teores de ferro alcançados durante o processamento mineral. Para titulação utiliza-se o dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Uma solução com pó das amostras, $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e HCl é resfriada com adição de cloreto estanhoso convertendo todo Fe^{2+} em Fe^{3+} . Posteriormente adiciona-se HgCl e mistura ácida, iniciando a titulação com o dicromato de potássio

3.5 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Foram selecionadas seis amostras, de diferentes profundidades e relativas ao furo FAES 01, para análise mineralógica em complemento às descrições em campo e petrográfica. O intuito desta atividade é atestar a relação mineralógica entre magnetita e hematita nos metadiamicritos da Formação Puga. As amostras pulverizadas em moinho de anéis de ágata, selecionando quantidade inferior a 0,1g. As análises foram realizadas no laboratório de difração de raios-x do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do IGc-USP.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise ao MEV-EDS foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do IGc-USP. O objetivo desta etapa consiste na análise descritiva do grau de cominuição além do entendimento da relação mineralógica entre as fases ferríferas (magnetita+hematita) e os agregados que perfazem a ganga do minério (quartzo+muscovita). Todo este processo visou uma melhor caracterização do material em estudo para seu o beneficiamento posterior. Para isso, foram escolhidas três amostras pulverizadas a menos de 325 *mesh* (#), utilizando recobrimento a carbono. Todas são referentes ao furo FAES 01, diferenciando-se por constituírem produtos distintos de um prévio ensaio de flotação e separação magnética. Utilizou-se, também, do MEV para caracterização do produto concentrado, além das pelotas reduzidas.

O MEV executa imagens de alta definição, alcançando aumentos de, no mínimo, 50 mil vezes. Possui diferentes tipos de detectores: SE1, para imagem de elétrons secundários; RX-EDS referentes a raios-x responsáveis pelas análises qualitativa e semi-quantitativa; e QBSD que capta a diferença do número atômico médio, indicado para obter informações tanto topológicas quanto composicionais.

3.7 TRATAMENTO DE MINÉRIOS

As atividades relacionadas ao tratamento de minérios, segundo Chaves *et al.* (1996) constituem “ o conjunto de operações unitárias de redução de tamanhos, separação de tamanhos, separação de espécies minerais e separação de sólidos líquidos, bem como a arte de combiná-las em fluxogramas de modo a obter concentrados e produtos aceitáveis pelo mercado”

Como caracterizado anteriormente, a Formação Puga engloba metadiamicritos gradando a uma formação ferrífera de granulação muito fina micro a milimétrica. Além da matriz ferruginosa (magnetita+hematita), outros componentes essenciais são basicamente agregados de sílica (quartzo) e alumino-silicatos (muscovita). Desta forma, o beneficiamento desse minério necessita de etapas que englobem cominuição, peneiramento a úmido, separação magnética e flotação de contaminantes.

✓ Cominuição: operações que visam à redução de tamanho de partículas minerais a fim de cumprir o objetivo estipulado para o tratamento do minério. As operações de cominuição são a britagem e moagem, que se diferem pela faixa de tamanho considerada e pelos mecanismos de redução de tamanhos envolvidos. A britagem utiliza da ação de forças de compressão ou de impacto, enquanto que a moagem baseia-se na abrasão e arredondamento das partículas (Chaves *et al.*, 2006);

- ✓ Peneiramento: operação para separação de uma população em frações diferentes em malhas de aberturas fixas e pré-determinadas. O peneiramento a úmido utiliza-se de grande quantidade de água em peneiras vibratórias (Chaves *et al.*, 2006);
- ✓ Separação magnética: baseia-se na suscetibilidade magnética dos minerais. Estes podem ser divididos em três grupos, de acordo com o seu comportamento quando são submetidos a um campo magnético: ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Os equipamentos mais utilizados são os tambores, correias, rolos, carrosséis e filtros (Chaves *et al.*, 2006). Para o presente trabalho, utilizou-se o separador de tambor;
- ✓ Flotação: é um processo de separação aplicado em partículas sólidas que utiliza as diferenças das características superficiais entre as partículas. O método leva em consideração misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa (polpas). É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina. A utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, permite a recuperação seletiva dos minerais de interesse por adsorção em bolhas de ar (Chaves *et al.*, 2006).

3.8 ENSAIOS METALÚRGICOS

Os ensaios metalúrgicos para minério de ferro são realizados a altas temperaturas (acima de 900° C). Geralmente, este minério é utilizado para estudos de redução a ferro metálico na forma de pelotas. Por vezes, as pelotas são queimadas para não perderem a coesão entre as partículas durante estes tratamentos (sinterização).

- Pelotização

A pelletização do minério beneficiado foi realizada utilizando apenas água como aglomerante, visto que o produto concentrado apresentava uma granulometria muito fina (< 400 *mesh*). Esta baixa granulometria propiciava ao material uma facilidade em aglomerar-se. Utilizou-se um disco pelletizador adaptado em uma betoneira (figura 5- I). Durante este processo, as pelotas são peneiradas em malhas com abertura de 15,9 mm, 12,7 mm e 8 mm. Todas as pelotas inferiores a abertura da última malha, retornam para o disco pelletizador. Durante a pelletização, a velocidade do disco pelletizador foi de 50 rpm e inclinação de 45° em relação ao eixo da betoneira.

As pelotas auto-redutoras foram confeccionadas a mão, utilizando água como aglomerante e coque de carvão mineral em sua composição. Cálculos estequiométricos indicaram utilização de 17% de coque na composição das pelotas (figura 5- II).



Figura 5: Processo de pelletização do minério de ferro de Bodoquena. (I) Pelotizador tradicional, adaptado em uma betoneira rotativa; (II) Pelotas auto-redutoras feitas à mão;

• Queima da pelota

A queima da pelota confere maior resistência mecânica ('ligação' entre as partículas) à estas. Foi realizada em forno (mufla) de resistência Lindberg/Blue M (Figura 6-I) para tratamento térmico ($T_{\text{máx}}$: 1500°C). Após queimadas, as pelotas foram submetidas a testes de compressão a frio na prensa KRATOS v1.0 (Figura 6-II).



Figura 6: Equipamentos utilizados no processo de queima das pelotas de minério de ferro. (I) Forno (mufla) de resistência Lindberg/Blue M; (II) Prensa de ensaio universal KRATOS v1.0 para ensaio de compressão a frio;

• Redução carbotérmica

A redução carbotérmica do minério de ferro de Bodoquena foi realizada em duas etapas: sobre pelotas convencionais queimadas e cruas (não queimadas) e, outra, em pelotas auto-redutoras com carvão mineral na composição. As pelotas convencionais foram reduzidas em forno de resistência Brasimet K 400 ($T_{\text{máx}}$ 1300°C). Utilizou-se recipiente de carbetto de silício e coque de carvão mineral na redução carbotérmica. Para evitar a oxidação à exposição ao ambiente, após retirada do forno, os recipientes e as pelotas foram resfriadas com nitrogênio (Figura 7 –I e II).

As pelotas auto-redutoras foram utilizadas para ensaios termogravimétricos no forno vertical Lindberg/Blue adaptado. Utilizou-se cadinho de alumina para locar as

pelotas e uma balança digital Ohaus Precision Plus para medição da perda em peso ao longo do processo de redução (figura 7- III e IV).



Figura 7: Equipamentos utilizados na redução do minério de ferro; (I) Forno de tratamento térmico Brasimet K 400; (II) Resfriamento com auxílio de nitrogênio para evitar a oxidação; (III) Forno vertical Lindberg/Blue adaptado para ensaios termogravimétricos em pelotas auto-redutoras; (IV) Detalhe da abertura do forno vertical e do cadinho de alumina;

• Metalografia

Para caracterização metalográfica e posterior análise por MEV, as pelotas reduzidas foram embutidas em braquelite (figura 8-I) e resina Epoxiglass, lixadas e polidas em panos diamantados (figura 8-II) adequando as superfícies às análises metalográficas. Utilizou-se o microscópio BX 60 de luz refletida.



Figura 8: Pelotas embutidas para metalografia; (I) Pelota convencional embutida a quente em braquelite; (II) Pelota embutida em resina Epoxiglass e polida em pano diamantado;

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A FORMAÇÃO PUGA NA REGIÃO DE BODOQUENA: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOQUÍMICOS

Para estudos de beneficiamento e caracterização metalúrgica, a etapa que consiste na caracterização geológica e geoquímica é de suma importância. Todo conhecimento geológico referente à Formação Puga na região de Bodoquena irá auxiliar para o entendimento dos processos que englobam tratamento e redução de minério de ferro.

Assim sendo, estudos referentes aos aspectos geológicos e geoquímicos constam das etapas de trabalho de campo, coleta de amostras, confecção e descrição de lâminas petrográficas, análise e descrições de furos de sondagem, análise química por fluorescência de raios-x e análise mineralógica por difratometria de raios-x.

4.1.1 Geologia Local

Na região da Fazenda São Manoel, a Formação Puga manifesta-se na forma de metadiamicritos de matriz ferruginosa gradando para camadas métricas, superficiais, de *BIF* (Banded Iron Formation). Foi notado contato concordante entre a formação ferrífera e o metadiamicrito, mergulho aparente entre 35-50° para leste (figura 9-I), sobreposição às rochas calcárias dolomíticas do Grupo Corumbá a oeste e contato discordante erosivo a leste com xistos sericíticos e filitos quartzíticos do Grupo Cuiabá.

Os metadiamicritos da Formação Puga representam rochas xistosas, de coloração acinzentada a esverdeada, constituídas por uma matriz pelítica-ferruginosa muito fina e clastos mili a decimétricos de composição granítica-gnaissica (figura 9-II). A foliação principal (S_n) é definida, majoritariamente, pela matriz de textura grano-lepidoblástica composta por muscovita sericítica, clorita, magnetita e hematita (perfazendo porções ferruginosas). Foliação esta por vezes crenulada (S_{n+1}) a anastomosada ou moldando clastos e seixos quarto-graníticos (figura 9-III e IV). Quando alterado, este litotipo apresenta uma coloração mais amarelada e fortes níveis sericítizados.

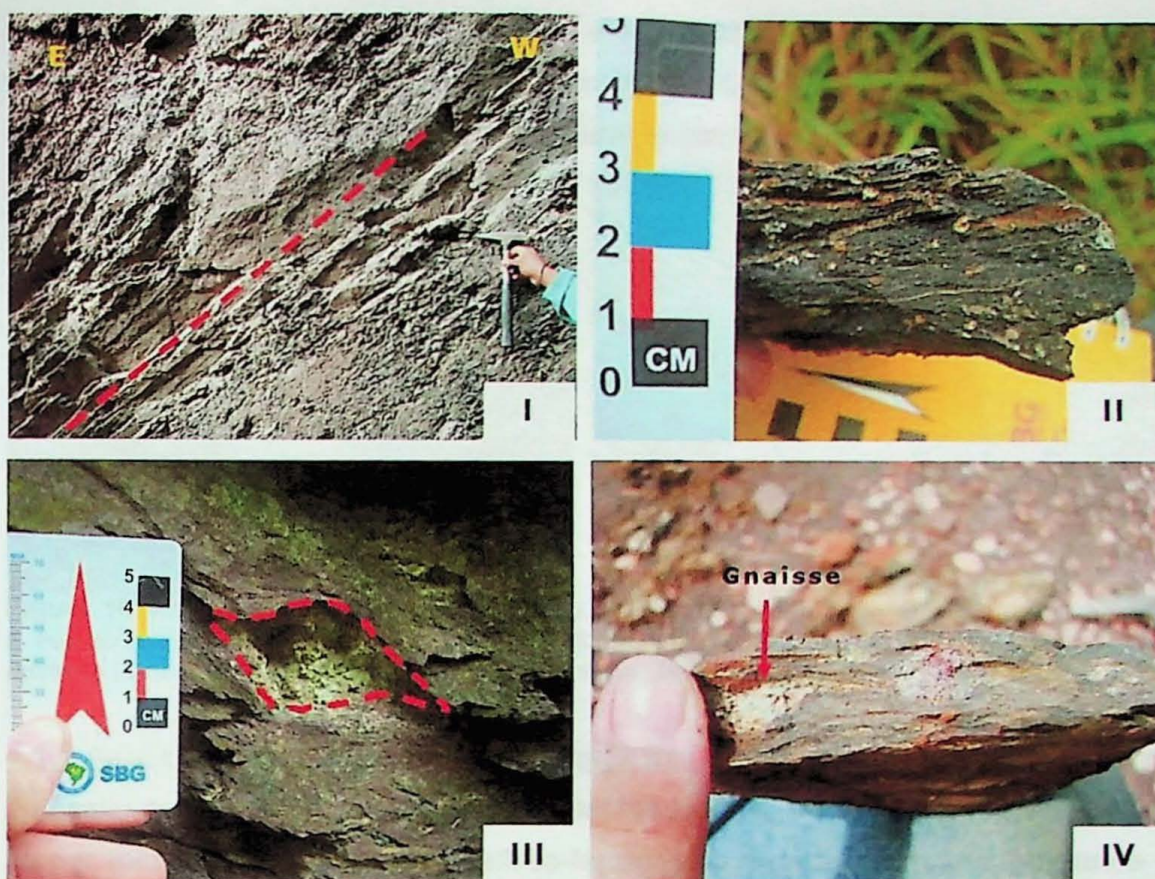


Figura 9: Aspectos litológicos das unidades referentes à Formação Puga. (I) Mergulho das camadas, predominantemente, para leste (~45°). TDBQ-01; (II) Metadiamicrito de matriz ferruginosa, granulação muito fina e clastos quartzosos. Matriz gradando para uma formação ferrífera; TBDQ-1; (III) Foliação moldando clastos quartzosos rotacionados centimétricos no metadiamicrito da Fm. Puga. TBDQ-2; (IV) Clastos graníticos-gnáissicos suportados por uma matriz pelítica-ferruginosa muito fina. Metadiamicrito da Fm. Puga. TBDQ-20;

Os clastos de composição quartzosa a gnáissica perfazem até 17% da rocha em alguns casos (figura 10-I). Possuem dimensões variadas, desde 0,1 cm a 30 cm, compostos por quartzo, muscovita, biotita, clorita, feldspato alcalino e plagioclásio. Alguns clastos quartzo-feldspáticos apresentam-se rotacionados a estirados, referentes às deformações que submeteram estas rochas a um metamorfismo de baixa intensidade (Piacentini, 2007). Leitões estirados de quartzo recristalizados, níveis sulfetados e carbonáticos também podem ser notados, em menor escala.

As porções ferruginosas (magnetita e hematita) da matriz muito fina caracterizam leitões granoblásticos que, localmente, gradam para uma camada enriquecida em ferro alternando-se com leitões quartzosos finamente bandados. Esta concentração constitui uma subunidade ferruginosa da Formação Puga (Piacentini, 2007). Esta formação ferrífera, associada aos metadiamicritos, ocorre em níveis métricos (2-4 metros). Caracterizam-se por uma rocha bandada, castanho-acinzentada, de granulação muito fina (figura 10-II). Bandamento marcado pela alternância de leitões granoblásticos magnetíticos a hematíticos e leitões lepidogranoblásticas constituídas de quartzo e

muscovita. Alguns clastos de quartzo e magnetita são identificados em escalas milimétricas, porém nota-se granulação muito fina ($<0,2$ mm), que dificulta a identificação e reconhecimento das estruturas primordiais desta formação ferrífera.



Figura 10: Aspectos litológicos das unidades referentes à Fm. Puga. (I) Clastos arredondados a estirados (centi a decimétricos) do metadiamictito da Fm. Puga. TBDQ-11; (II) Formação ferrífera laminada a bandada, associada aos metadiamictitos da Fm. Puga. TBDQ-20;

4.1.2 Aspectos mineralógicos e petrográficos

Assim como observado em padrões macroscópicos, a Formação Puga caracteriza-se por metadiamictito de matriz pelítica-ferruginosa e granulação fina, gradando para formação ferrífera bandada. Microscopicamente, nota-se que o metadiamictito apresenta uma estrutura xistosa, textura alternando-se em leitos granoblásticos e lepidoblásticos, matriz muito fina ($<0,01$ mm) e presença de clastos (0,5-2,5 mm) de composição variada (quartzo, pirita, carbonato, magnetita). A associação clorita e muscovita pode sugerir evento metamórfico de fácies xisto-verde. Em algumas lâminas observa-se que leitos micáceos estão crenulados em um evento posterior (S_{n+1}) marcada pela presença de leitos ferrugionosos (figura 11-I).

Em termos composicionais trata-se de um litotipo rico em quartzo (~35%) e uma matriz pelítica-ferruginosa composta por clorita (~10%), muscovita (~20%) e minerais ferrosos (~30 %). Quartzo apresenta-se desde grãos em contatos poligonizados e xenomórfos a grãos interlobados, induzindo possível recristalização estática. Quando clastos apresentam formas sigmoidais, amoldadas pela foliação da rocha, e sombras de pressão com recristalização de clorita e muscovita. É comum a associação com carbonatos em leitos granoblásticos de granulação fina. Muscovita e clorita anédricas a idiomórficas perfazem a matriz lepidoblástica pelítica muito fina. Constitui leitos, por vezes pouco espessos, orientados e que preservam a foliação anterior (S_n) a foliação principal crenulada (S_{n+1}). Possuem formas irregulares a tabulares e aciculares, associado às bordas de grãos de quartzo, magnetita e pirita (figura 11-II). Magnetita e hematita foram identificadas em seções polidas ao microscópio óptico de luz refletida. Notou-se, entretanto, que estes minerais constituem a matriz granoblástica

ferruginosa, com granulometria modal próximo a 0,02 mm. Por vezes gradam para concentração em leitos espessos, caracterizando formação ferrífera bandada (BIF).

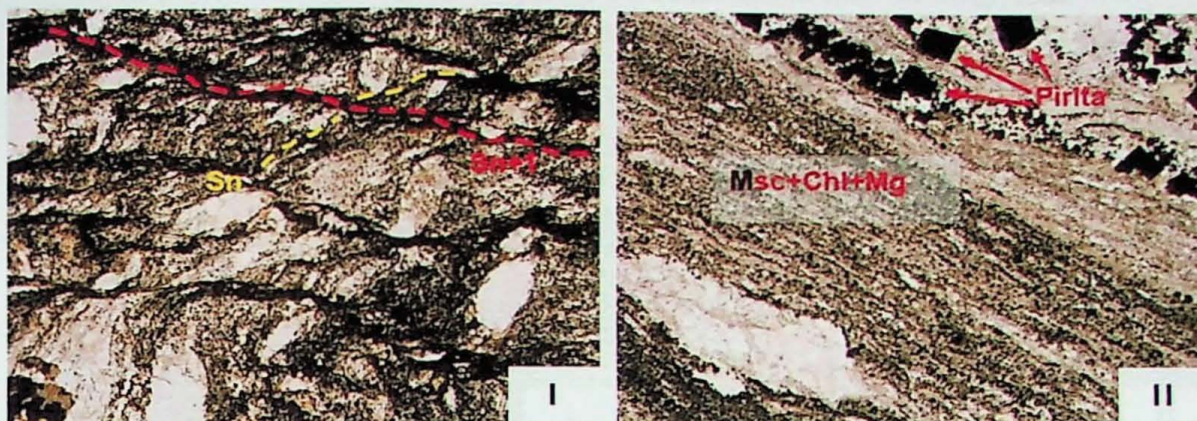


Figura 11: Aspectos microscópicos dos metadiamictitos da Formação Puga. (I) Foliação crenulada (S_{n+1}). Clastos quartzosos alongados, moldados pela foliação pelítica-ferruginosa. Metadiamictito da Fm. Puga. BDQ- 2B. Nicóis paralelos. Lado maior: 3,25 mm; (II) Textura granolepidoblástica e granulação muito fina da matriz dos metadiamictitos da Fm. Puga. Grãos cúbicos de pirita. BDQ- 11A. Nicóis paralelos. Lado maior: 3,25 mm;

A formação ferrífera, quando observada, preserva o bandamento composicional alternando porções laminadas micrométricas de quartzo e porções mili a centimétricas ferruginosa (magnetita+hematita) (figura 12-I e II). Por vezes, estas rochas apresentam-se dobradas em dobras fechadas com preservação de muscovita orientada plano-axial, indicando possível evento anterior à deformação (S_n).

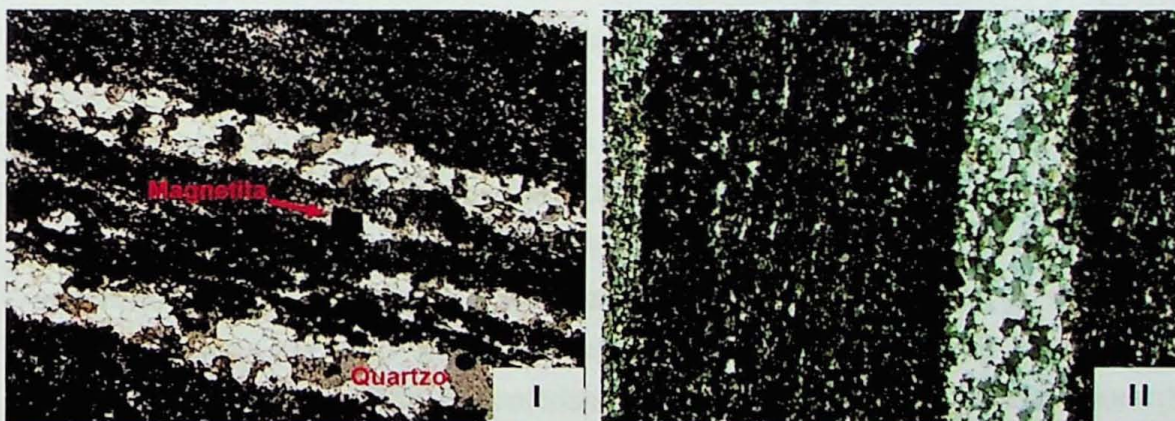


Figura 12: Aspectos microscópicos da formação ferrífera bandada da Formação Puga. (I) Bandamento composicional, alternando bandas quartzosas e bandas ferríferas magnetíticas. Presença de grão idiomórfico de magnetita. Nicóis paralelos. BDQ 1A. Lado maior: 3,25mm; (II) Predomínio dos leitos ferríferos (magnetita e hematita) sobre leitos quartzosos na formação ferrífera associada a Fm. Puga. BDQ 2A. Nicóis cruzados. Lado maior: 1,30mm

A hematita apresenta-se como produto da martitização da magnetita. Geralmente, a magnetita é um mineral resistente ao intemperismo na superfície terrestre. A martitização ocorre das bordas para o centro do grão, ao longo dos planos de clivagem e fraturas através da invasão de finas lamelas de hematita nos planos octaédricos da magnetita, podendo até substituir completamente este mineral (figura 13-I e II). Observou-se a presença de magnetita como grãos idiomórficos, agregados

granulares irregulares e como relictos no interior dos cristais de martita (hematita). A hematita possui formas octaédricas, fruto da substituição total da magnetita.

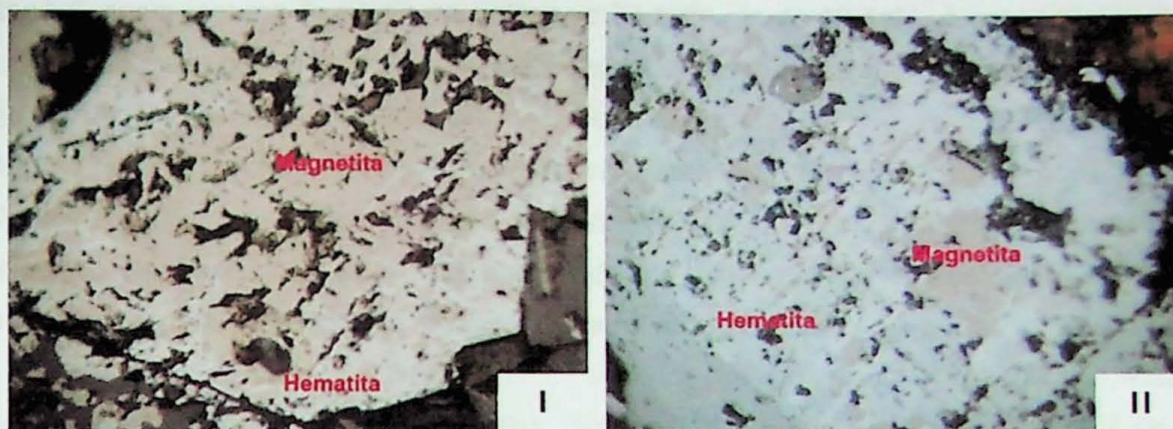


Figura 13: Substituição mineral pelo processo de martitização. (I). Substituição da magnetita (cinza-acastanhado) por hematita (cinza-claro) inicia-se pelas bordas dos grãos. Nicóis cruzados. BDQ- 19. Lado maior: 0,3 mm; (II) Processo de martitização capaz de gerar relictos de magnetita após a substituição parcial/completa por lamelas de hematita. Substituição ocorre preferencialmente pelos planos de clivagem. Nicóis cruzados. BDQ-22. Lado maior: 0,3 mm.

É importante ressaltar que o processo de martitização é mais nítido e eficiente em litotipos superficiais, como o caso das formações ferríferas. Em profundidade, há o predomínio da fase mineral magnetítica sobre a hematítica. Para certificar da influência do processo de martitização em camadas superficiais, realizou-se análise mineralógica por difração de raios-x de amostras ao longo do furo FAES 01 (anexo 2). Seis amostras foram selecionadas, de profundidades variadas, para avaliar a composição mineral das unidades da Formação Puga. Os difratogramas destas amostras, evidenciando os componentes mineralógicos, encontram-se no anexo 3.

Notou-se que em camadas superficiais, entre 1,05-4,00 m (BDQ 1A e 1B, anexo 3), a presença de hematita sobressai sobre magnetita corroborando com o processo de martitização pelo intemperismo. Com o aumento da profundidade, a magnetita se constitui como elemento principal nas unidades ferruginosas e na matriz dos metadiamicritos. Porém, em profundidades intermediárias, entre 15,20-25,50m (BDQ 3, anexo 3) e 31,50-44,30 (BDQ 9, anexo 3), a hematita ainda coexiste com a magnetita. Isto poderia sinalizar para o possível nível onde se iniciam os processos de martitização da magnetita, uma vez que em profundidade maiores, a partir de 51,70m (BDQ 17A e 17B, anexo 3) nota-se a ausência de minerais hematíticos.

Além da quantificação entre os minerais ferrosos, a difração por raios-x atestou ainda existência de outras fases minerais importantes. Como é o caso do quartzo, clorita e muscovita, que constituem os "principais contaminantes" para a posterior fase de tratamento do minério. Além destes, foi possível detectar carbonatos (dolomita), caulinita, pirita (BDQ 9), albita e anortita (BDQ 17A e 17B) em menores ocorrências.

4.1.3 Aspectos geoquímicos da Formação Puga

Nota-se que a composição química da Formação Puga, na região da Fazenda São Manoel, possui teores de Fe_2O_3 da ordem de 23,19% até de 49,44%. A soma de Fe_2O_3 e SiO_2 perfazem cerca de 70% a 93% da composição química destes litotipos (tabela 2). Elementos menores medidos (Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, U, Zn e Zr) apresentam valores não significativos, também notado para MnO (0,08% - 0,18%) e TiO_2 (0,17% - 1,43%). Teores de Cl, S e F estão abaixo do limite de detecção na fluorescência de raios-x. Pode-se relacionar os teores de S com a presença de pirita nos metadiamicritos de matriz ferruginosa.

Os valores elevados nos metadiamicritos de Zr (54-124 ppm), P_2O_5 (0,1%-1,4%), K_2O (0,6%-2,02%), MgO (0,2%-3,2%), Na_2O (0,4%-2,2%) e CaO (1,08%-7,4%) sinalizam contribuição detrítica durante a sedimentação da rocha. Fato explicitado pela presença de clastos granítico-gnáissicos observados macroscopicamente e microscopicamente. Outro fator que atenta para esta contribuição é a forte correlação de Al com Ti ($r = 0,89$) e Zr ($r = 0,88$) e moderada com Rb ($r = 0,55$) (Figura 14). Valores de Al_2O_3 (4,2%-8,4%), certificada pela presença de clorita e muscovita nas análises por difratometria de raios-x e seções petrográficas, indicam contribuição de componentes terrígenos nos metadiamicritos em estudo.

Nota-se uma significativa diferença entre os valores determinados para os metadiamicritos e os referentes à formação ferrífera da Formação Puga. Os BIFs apresentam baixos valores de MgO (0,24% - 0,84%), Na_2O (até 0,51%) e Al_2O_3 (1,37% - 2,58%) em relação aos metadiamicritos. Este padrão pode ser explicado pela menor ocorrência de clastos e grãos detríticos feldspáticos neste litotipo.

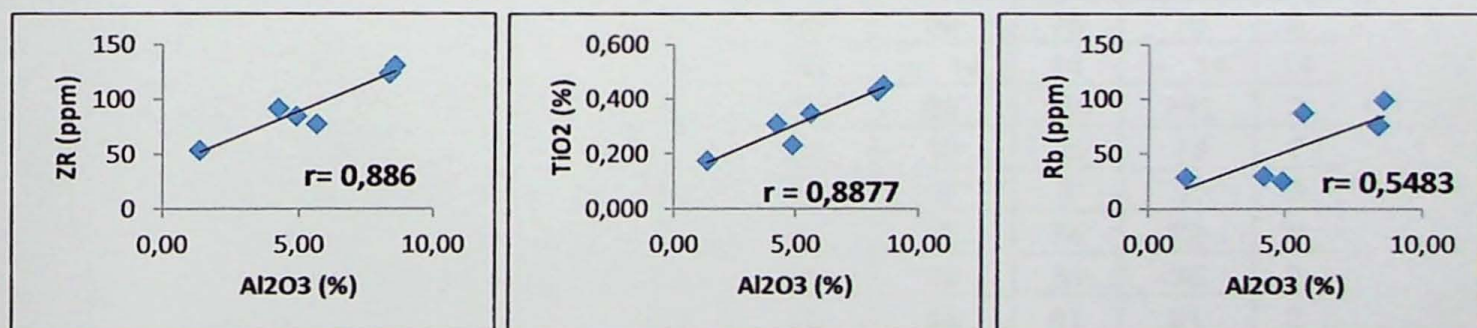


Figura 14: Correlação interelementar. Indica boa correlação entre Al_2O_3 com Zr e TiO_2 e moderada com Rb devido a presença de sedimentos detríticos;

Vale ressaltar que prévias análises químicas por titulação indicaram o predomínio de baixos teores de Fe (T) nos litotipos da Formação Puga. Estes resultaram evidenciaram teores de cabeça entre 18% a 25% em ferro total. Fator que determinante para a escolha de metodologias adequadas para o beneficiamento desse material.

Tabela 2: Resultados da análise química por Fluorescência de Raios-X da Formação Puga. Amostras coletadas referentes ao metadiamicrito de matriz ferruginosa (BDQ 5A, BDQ-11A, BDQ-18, BDQ-22) e a formação ferrífera (BDA-2A, BDQ-19). LD=Limite de detecção;

(%)	BDQ-18	BDQ-5A	BDQ-22	BDQ-2A	BDQ-19	BDQ-11A		LD
SiO₂	40,31	39,74	42,30	44,27	49,20	53,13	53,17	0,03
TiO₂	0,347	0,310	0,233	0,174	0,451	0,430	0,433	0
Al₂O₃	5,64	4,23	4,90	1,37	2,58	8,34	8,39	0,02
Fe₂O₃ *	28,80	45,85	44,25	49,44	40,92	23,11	23,19	0,01
MnO	0,632	0,089	0,186	0,078	0,179	0,150	0,147	0
MgO	3,32	1,17	0,65	0,24	0,84	2,03	2,02	0,01
CaO	7,41	2,42	2,12	1,08	0,37	3,43	3,44	0,01
Na₂O	0,40	1,58	2,23	< 0,02	0,51	1,95	1,98	0,02
K₂O	2,17	0,73	0,61	0,66	2,17	2,02	2,02	0,01
P₂O₅	0,400	0,470	0,113	0,909	0,265	1,476	1,459	0
Total	89,43	96,59	97,59	98,22	97,49	96,07	96,25	
(ppm)								
Ba	338	221	278	160	580	308	322	37
Ce	148	139	153	158	164	131	99	35
Co	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	6
Cr	18	28	33	22	75	21	21	13
Cu	26	42	35	43	36	29	28	5
Ga	< 9	< 9	< 9	< 9	9	11	11	9
La	< 28	< 28	< 28	< 28	50	37	32	28
Nb	9	13	13	9	12	11	11	9
Nd	58	79	82	85	72	54	62	14
Ni	7	13	10	12	17	17	18	5
Pb	27	33	34	41	30	22	21	4
Rb	87	30	25	29	99	76	76	3
Sc	18	17	< 14	15	< 14	14	< 14	14
Sr	571	233	46	120	89	280	281	2
Th	18	19	20	21	18	15	13	7
U	8	11	12	14	9	6	7	3
V	52	55	54	58	75	74	72	9
Y	24	28	29	30	35	36	36	2
Zn	39	30	38	32	44	61	61	2
Zr	77	92	84	54	131	123	124	2
Cl	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	50
F	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	500
S	1858	< 550	< 550	< 550	< 550	2501	2505	550

* Esta análise quantifica todo o Fe presente calculando-o como Fe₂O₃. Porém, deve-se ressaltar que a fase Fe₃O₄ é predominante (descrição macroscópica, microscópica e ensaios por difração de raios-x);

4.2 CONCENTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO MINERAL

Todos os ensaios para beneficiamento do minério de ferro da Formação Puga foram realizados no laboratório NOMOS ANÁLISES MINERAIS, em Duque de Caxias (RJ). Análises químicas por titulação e Fluorescência de Raios-X foram utilizadas para caracterizar os produtos obtidos. Além disto, foram realizados ensaios de densidade do minério com amostras coletadas de furos de sondagem.

Inicialmente, utilizou-se uma rota de processamento padrão e foram executados ensaios com alíquotas referentes ao furo FAES 01, previamente descrito. Esta primeira rota de processamento não alcançou resultados desejáveis, atingindo teores inferiores a 60% de Fe. Esta análise baseou-se na utilização de um grau de cominuição a 325 *mesh*, comuns a escalas industriais conhecidas.

Após utilizar eletromicrografias de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), pode-se perceber que a cominuição do material mineral deve chegar a escalas inferiores a 400 *mesh* (37 μm), alcançando por vezes 625 *mesh* (20 μm). Um novo fluxograma (anexo 4) foi elaborado, ajustando a cominuição e parâmetros adequados para otimizar o beneficiamento mineral. Utilizaram-se amostras coletadas de trincheiras (anexo 1) na região da Fazenda Manoel e enviadas para NOMOS pela Mineração Horii Ltda. Esta segunda rota de beneficiamento alcançou teores comerciais satisfatórios para os posteriores ensaios de redução do minério, capaz de concentrar o material a teores aceitáveis industrialmente, com 64,85% de Fe e baixas concentrações de Si, Al e P. Estudos anteriores determinaram densidade aparente média do minério, pelo método da Balança de Jolly, em 2,94 g/cm³ (Rampazzo, 2007).

4.2.1 Furo FAES 01

Seguindo a descrição deste furo (anexo 2), foi determinado um fluxograma para ensaios em *lump*, *sinter* e *pellet feed*. Apesar de os resultados finais não serem satisfatórios, este processamento foi importante para certificar que a escala de trabalho mais adequada é a de *pellet feed*, como observado pela granulometria micrométrica dos níveis ferruginosos da Formação Puga. O teor de Fe de cabeça para estas amostras era da ordem de 22%, com teores de SiO₂ de 49,2%, Al₂O₃ 0,522%, P a 0,7% e teores de S não representativos (abaixo dos limites de detecção).

As amostras foram submetidas a sucessivas britagens e moagens, reduzindo a escalas de ¼ " (polegadas) para ensaios em *lump*, 100 *mesh* para *sinter* e inferiores a 200 *mesh* para *pellet*. No caso de *lump* e *sinter* utilizou-se da separação gravimétrica em jigge manual e em mesa concentradora (figura 15- I e II). Para ensaios a *pellet*

utilizou-se a moagem em moinhos de barras e de bolas, retirou-se a fração menor do que 600 *mesh* por peneiramento a úmido em peneira vibratória.



Figura 15: Processos visando separação por densidade. (I) Jigge manual para separação gravimétrica em lump feed ($\pm 1''$); furo FAES 01; (II) Mesa concentradora para separação gravimétrica em sinter/pellet feed (100 *mesh*); furo FAES 01;

Por último, efetuou-se o processo para pellet feed, cominuindo o material inicialmente a 200 *mesh* e posteriormente a 325 *mesh*. O produto foi submetido a crescente separação magnética, desde intensidades mais baixas (400 gauss) a intensidades mais elevadas (17000 gauss). O resultado obtido pode ser resumido na tabela 3.

Tabela 3: Amostra BDQ J referente ao furo Faes 01, após separação magnética;

Intensidade	PESO (g)	% PESO	%Fe	Fe cont	dist. Fe (%)
400,00	5,30	0,12	47,68	0,06	0,31
800,00	192,84	4,53	41,90	1,90	9,91
1200,00	626,60	14,71	36,98	5,44	28,41
2400,00	995,41	23,36	16,23	3,79	19,81
4800,00	592,12	13,90	32,78	4,56	23,80
9600,00	164,88	3,87	29,63	1,15	5,99
17000,00	220,30	5,17	25,43	1,31	6,87
NÃO MAG	1463,60	34,35	2,73	0,94	4,90
TOTAL	4261,05	100,00		19,14	100,00

Todos os produtos magnéticos foram reunidos em um único concentrado e submetidos ao processo de flotação reversa em bancada. Esta medida foi tomada uma vez que os teores de Fe encontravam-se baixos ($\sim 40\%$). Após flotação, o concentrado final apresentou teores de Fe (T) igual a 59,65%, não satisfatórios para seu aproveitamento metalúrgico e sendo necessário caracterizar melhor o grau de cominuição, o fluxograma e os parâmetros utilizados desde a moagem até a flotação do material em estudo.

4.2.2 Caracterização ao MEV e eletromicrografias

A análise ao MEV-EDS permitiu a identificação da exata granulometria das fases minerais dos metadiamicritos e da formação ferrífera associada de Bodoquena (MS).

Notou-se que a 325 *mesh* partículas silicosas estão agregadas a grãos ferríferos. Desta forma, como a magnetita e a hematita não constituem fases minerais totalmente livres, o beneficiamento mineral não alcançaria resultados desejados nesta granulometria. Nas eletromicrografias (figura 16), percebe-se que a moagem deve alcançar escalas inferiores a 400 *mesh* (até 625 *mesh*). Isto é exemplificado pela não concentração em teores de ferro comerciais do minério, processado a 325 *mesh*.

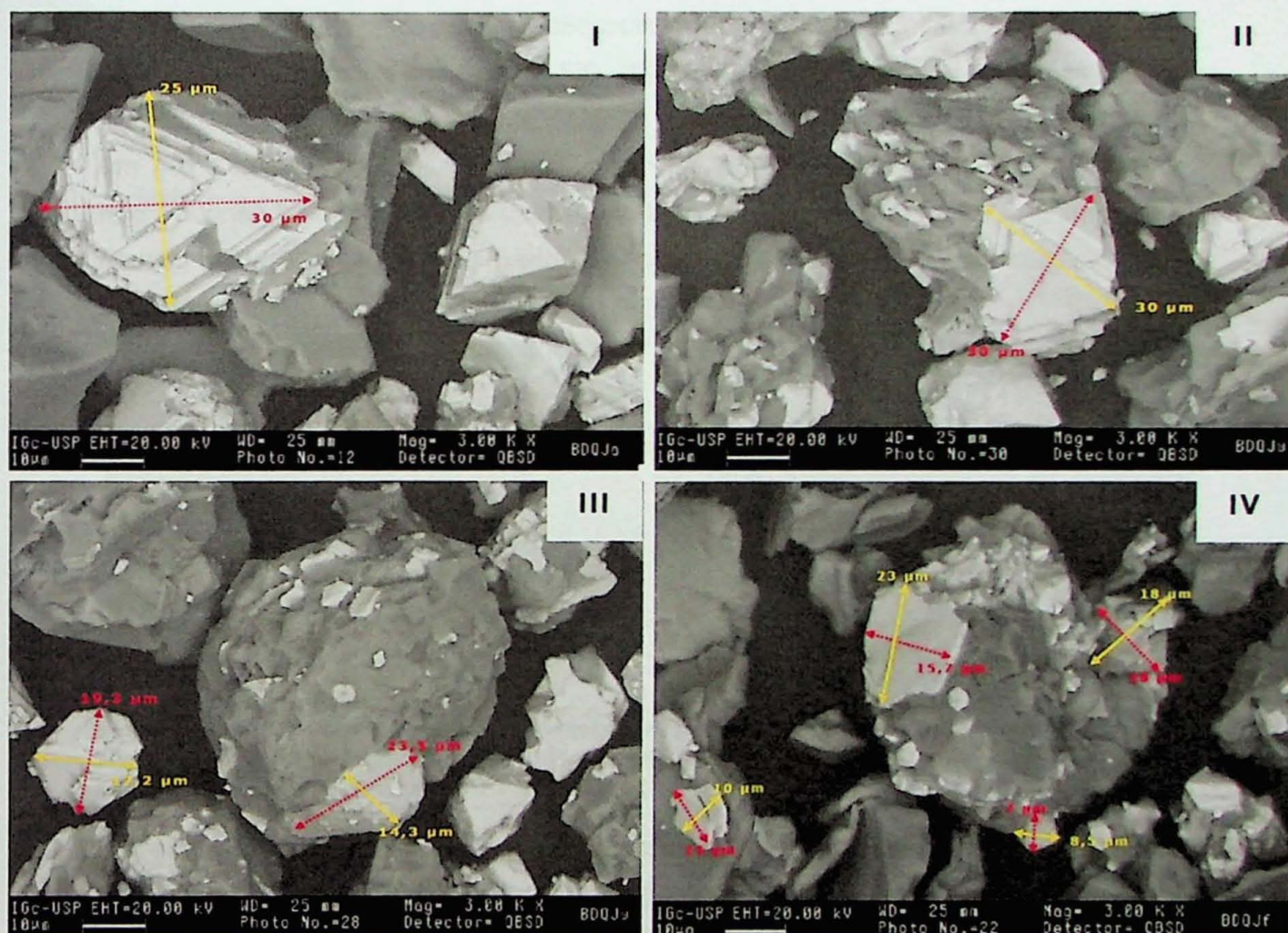


Figura 16: Eletromicrografia dos produtos beneficiados referentes ao furo FAES 01. Imagens de grãos idiomórficos de magnetita menores que 400 *mesh* (cinza claro) com agregados alumino-silicáticos (cinza escuro); (I) Padrão observado em produtos pós flotação (afundado e flotado *recleaner*); (II) Produtos pós separação magnética (a 1270 gauss). BDQ-J furo FAES 01; (III) Imagens sobre grãos irregulares de magnetita menores que 500 *mesh* com agregados de sílica e alumino-silicatos. Produtos pós flotação (flotado e afundado *recleaner*) (IV) Imagens sobre grãos irregulares de magnetita menores que 500 *mesh*. Produtos pós separação magnética (1270 gauss). BDQ-J furo FAES 01;

4.2.3 Beneficiamento do material de Trincheiras da Formação Puga

As amostras referentes à nova rota de beneficiamento dos litotipos da Formação Puga, foram coletadas sob a supervisão da Mineração Horri Ltda em trincheiras

métricas a decamétricas abertas pela mesma. As trincheiras contam com profundidades de 1,5 a 2 metros por 20 a 30 metros de comprimento. Uma prévia britagem a 6 mm foi realizada antes do envio das amostras para o laboratório NOMOS. Foram coletadas amostras referentes a 35 trincheiras na região da área de estudo, totalizando cerca de 125 kg para cada trincheira. O fluxograma utilizado, bem como o balanço de massa total do processamento, pode ser observado no anexo 4.

Optou-se pela composição de todas as amostras em uma única alíquota que foi posteriormente homogeneizada, quarteada manualmente (figura 17-I) e dividida em quatro sub-alíquotas de 50 kg para dar continuação aos ensaios de beneficiamento. O teor médio de Fe (T) destas sub-alíquotas eram de 23,89% (titulação Fe (t)), com contaminantes principais na fase de SiO_2 (50,19%), Al_2O_3 (8,721%) e P (0,064%).

Utilizando dos resultados do MEV-EDS e das descrições petrográficas foi elaborado um novo fluxograma considerando também o modelo de processamento mineral do tipo Taconite (minérios magnetíticos muito finos, abaixo de 400 *mesh*). Assim sendo, decidiu-se utilizar moinho de barras e de bolas para atingir a cominuição total a escalas menores que 400 *mesh* (figura 17-II).



Figura 17: Processamento inicial do minério de ferro retirado de trincheiras na região de Bodoquena, MS. Amostra BDQ-TR; (I) Homogeneização e quarteamento manual (II) Moinho de barras/bolas. Sistema a úmido (70% em massa);

Toda a moagem foi feita a úmido obtendo uma polpa com 70% em massa do material no volume dentro dos moinhos, utilizando, portanto, 22 litros de H_2O para o processo de cominuição. Via úmida, pode-se controlar a dissipação de calor e abatimento de poeiras. A escolha inicial por moinhos de barras deve-se a preocupação em controlar a geração de material friável em granulometrias menores do que 600 *mesh*. O moinho de bolas foi utilizado para cominuição final de porções mais coesas e de difícil fragmentação em moinhos de barras. Para garantir a eficiência deste processo peneirou-se a úmido (malha regular de 400 *mesh*), em peneiras vibratórias, o material cominuído (figura 18 e tabela 4).

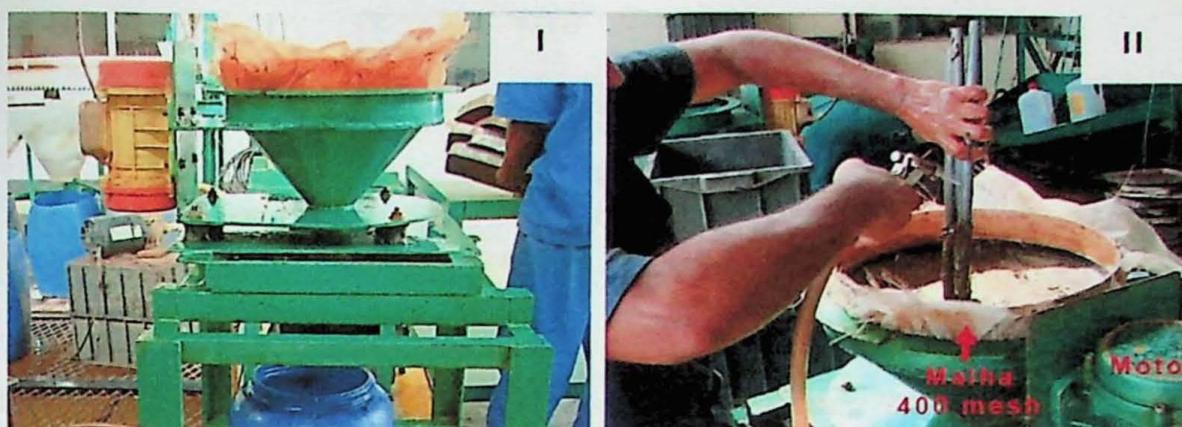


Figura 18: Separação em peneira vibratória com malha de 400 mesh. Amostra BDQ-TR; (I) Sistema de peneiramento a úmido em peneira vibratória; (II) Peneiramento a úmido em peneira vibratória, controlando geração de material entre 400-600 mesh;

Tabela 4: Amostra BDQ-TR pós peneiramento a úmido sob malha regular de 400 mesh

Peneiramento a úmido	Peso (kg)	% dist. peso	% Fe	Fe cont	% dist Fe
Fração < 400#	45,00	90,00	23,89	21,50	89,98
Fração > 400#	5,00	10,00	23,94	2,39	10,02
Total	50,00	100,00		23,90	100,00

Após esta etapa, observou-se que cerca de 5 kg da alíquota inicial não foi cominuída 100% a 400 mesh, restando 45 kg para etapas posteriores. O próximo ensaio constituiu a separação magnética a úmido de baixa intensidade em um separador magnético de tambor, apropriado para concentração de minérios menores a 1 mm e fortemente magnéticos (magnetita). Esta separação englobou escalas crescentes de intensidade magnética, variando de 400 gauss a 1300 gauss (tabela 5). A separação magnética em questão utiliza-se da rotação em sentido horário do tambor, sentido contrário ao do fluxo da alimentação no separador (figura 19). Todo material magnético é coletado imediatamente e descartado em uma primeira “calha” receptora. Vale a pena ressaltar que se deve manter constante o nível de água no interior do equipamento, controlando a água de lavagem e o fluxo da alimentação. As outras duas divisões no interior remetem ao material não magnético de baixa intensidade e o produto overflow (figura 20). Todo material não magnético a baixa intensidade decanta-se naturalmente, depositando sobre um silo abaixo do separador magnético. Mantendo-se o nível de água constante, cria-se um nível sobrenadante acima do material não magnético, caracterizando todas as fases contaminantes de baixa densidade. Esta porção é coletada em uma terceira calha, originando um produto composto das fases alumino-silicáticas.

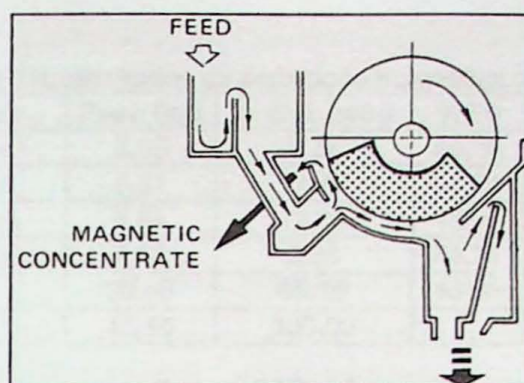


Figura 19: Representação do funcionamento de um separador magnético de tambor. Detalhe para o sentido horário de rotação do tambor (Svoboda, 1987);

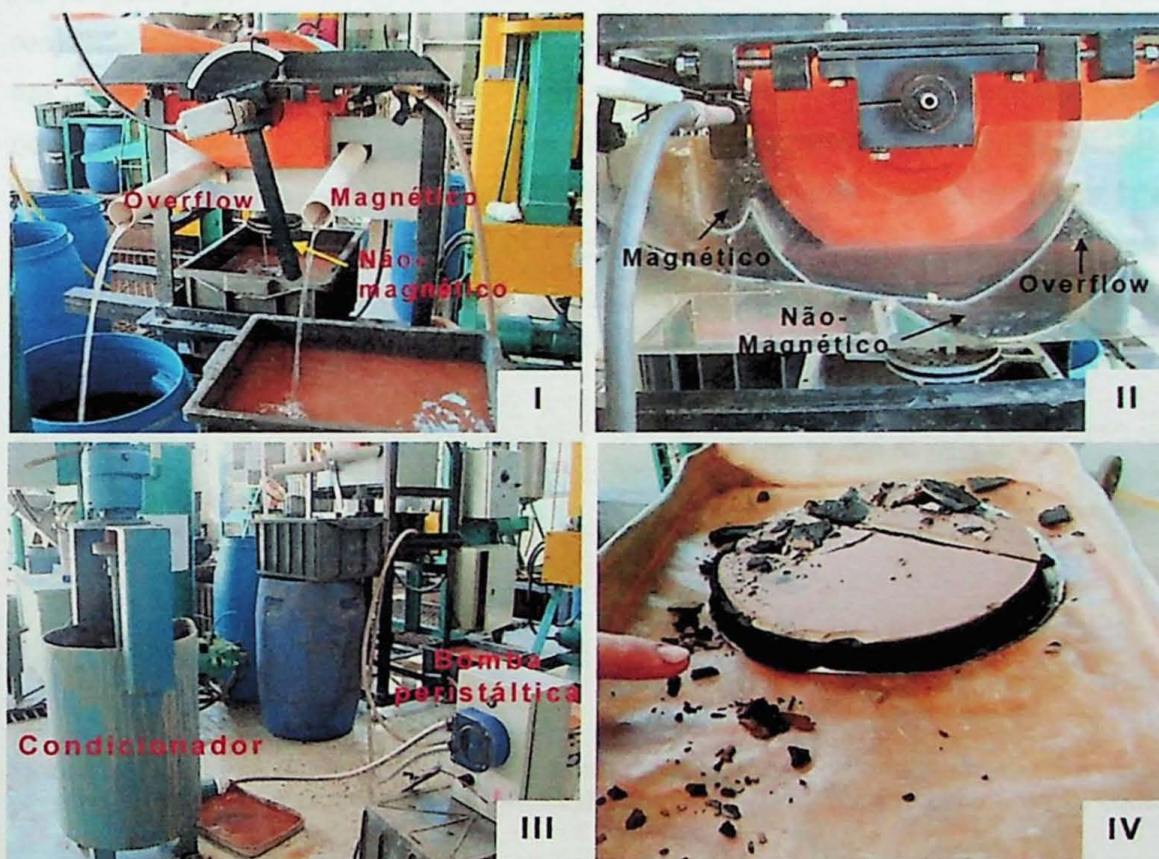


Figura 20: Processo relativo a separação magnética do minério de ferro. Amostra BDQ-TR; (I) Separador magnético a úmido de tambor. Baixa intensidade (400-1300 gauss). Detalhe para produtos finais (magnético, não-magnético e overflow); (II) Separador magnético a úmido de tambor. Baixa intensidade (400-1300 gauss). Detalhe calhas de recolhimento; (III) Condicionador e bomba peristáltica utilizados para bombeamento do material em suspensão para o tambor magnético; (IV) Produto magnético (400-1300 gauss) filtrado evidenciando leito milimétrico acastanhado (possível composição alumino-silicática);

Como a separação magnética não atinge intensidades acima de 3000 gauss, a hematita não é recolhida com eficiência. Porém, vale ressaltar que se trata de um ensaio para caracterização geológico-metalúrgica para um minério magnetítico.

Tabela 5: Amostra BDQ-TR, resultados da separação magnética úmida a baixa intensidade;

Separação Magnética	Peso (kg)	% dist. peso	% Fe	Fe cont	% dist Fe
Magnético 400 gauss	3,05	6,77	46,05	3,12	13,05
Magnético 800 gauss	5,31	11,77	55,34	6,51	27,26
Magnético 1300 gauss	5,84	12,95	48,00	6,21	26,01
Não-Mag. Baixa intensidade	1,50	3,33	44,71	1,49	6,22
Over-flow	29,40	65,19	10,06	6,56	27,45
Total	45,10	100,00		23,89	100,00

Pode-se observar que a separação magnética foi responsável pela recuperação de 66% do ferro contido, resultando em um composto final com 50,33% em teor médio de Fe (t) (titulação). A fim de atingir concentrações em teores comerciais, foi proposta a realização do processo de flotação reversa em coluna para flotar contaminantes livres em fases silicosas (quartzo). Antes deste processo realizou-se uma desmagnetização por corrente alternada do material composto. O princípio básico de desmagnetizadores por corrente alternada é criar um campo magnético alternado, decrescente em função do tempo, afastando gradativamente o produto a ser desmagnetizado da fonte de campo alternado. Utilizou-se o Desmagnetizador Magtek Túnel ITDT-C (figura 21).



Figura 21: Processo de desmagnetização. Amostra BDQ-TR; (I) Desmagnetizador por corrente alternada Magtek Túnel ITDT-C; (II) Alimentação por calha vibratória: velocidade de 10 cm/s;

O processo de flotação reversa de coluna consiste na utilização de reagentes propícios para flotar fase contaminante/ganga do minério em processamento e reagentes propícios para afundar concentrado ferrífero. Basicamente, a separação ocorre entre partículas hidrofóbicas e partículas hidrofílicas em fluxo de ar induzido através de uma suspensão aquosa contendo as duas espécies. As partículas hidrofóbicas seriam carregadas pelo ar enquanto que as hidrofílicas permaneceriam em suspensão. Apenas a passagem de ar não é suficiente para carrear partículas hidrofóbicas, por isto é necessário a formação de uma espuma estável gerada pela reação de reagentes espumantes (Chaves *et al.*, 2006).

Os parâmetros ajustados para a flotação de coluna englobam:

- ✓ Porcentagem sólido (magnético composto) no condicionador: 10% massa

- ✓ Vazão do volume de ar induzido na coluna: 0,5 L/min;
- ✓ Depressor: Solução amido de milho gelatinizado (solubilização com NaOH) - 5ml/L (por litro de solução do condicionador);
- ✓ Coletor (reagente espumante): Solução amina (NO_3) – 1,25 ml/L (por litro de solução do condicionador);
- ✓ Hidróxido de Sódio (NaOH) para controle da ph básico (~ 10);
- ✓ Vazão da alimentação de material na coluna: 0,96l/min;

O funcionamento da coluna de flotação é caracterizado pela alimentação através de bomba peristáltica acoplada ao condicionador (material em solução com reagentes). A coluna de flotação conta com inserção de ar induzido a baixa vazão para não criar alto volume de bolhas que possam carrear material de interesse. Depois de condicionar, nos parâmetros designados, inicia-se a flotação. Material contaminante (Si, Al e P), em reação com amina (NO_3) torna-se hidrofóbico flotando até zona da espuma. Enquanto isto o concentrado ferruginoso é deprimido com ajuda da solução de amido de milho gelatinizado, depositando-se ao fundo da coluna e sendo coletado por outra bomba peristáltica (figura 22).

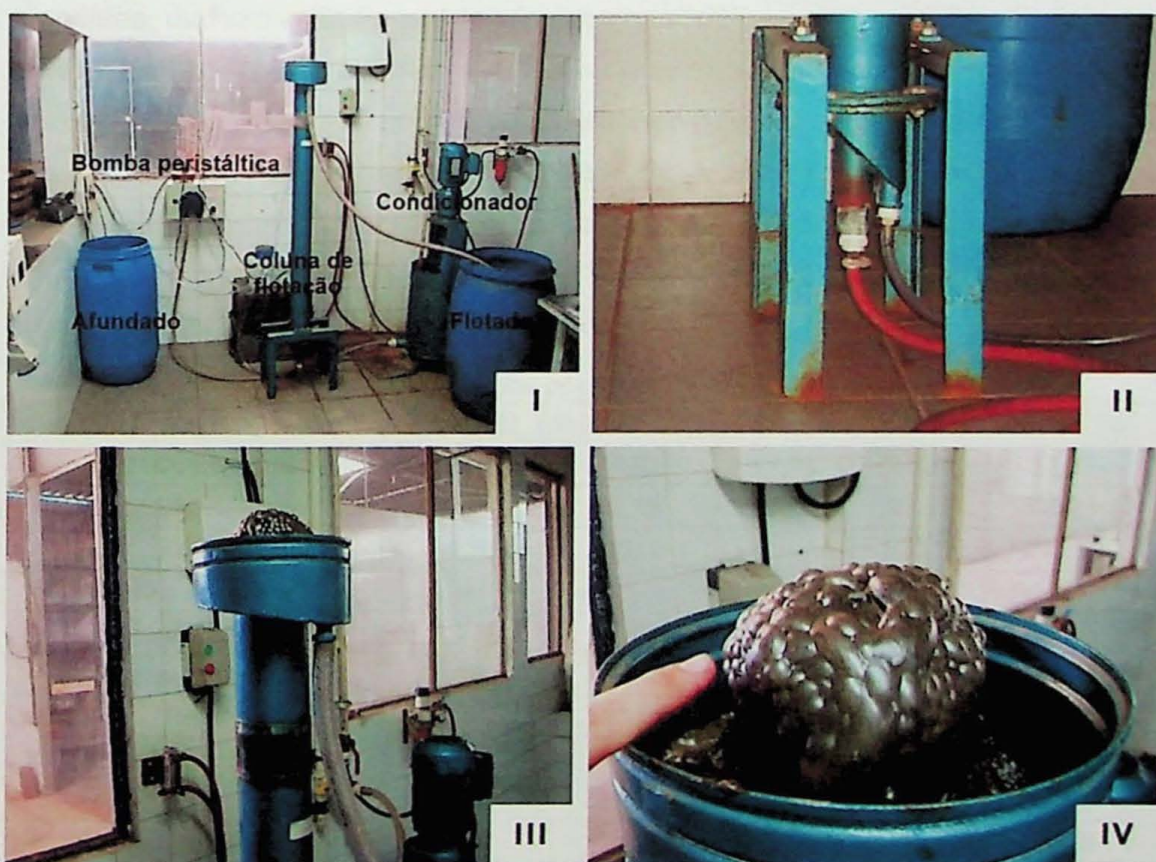


Figura 22: Flotação em coluna do minério de ferro pós-separação magnética. Amostra BDQ-TR; (I) Coluna, condicionador, bombas peristálticas e tambores de coleta dos produtos; (II) Detalhe para inserção de ar induzido (mangueira vermelha) e coleta de material ferroso afundado (mangueira transparente); (III) Detalhe para produto flotado (contaminante), na zona da espuma. (IV) Bolhas de ar carregando material flotado (contaminado);

Este processo de flotação ocorre em três etapas: Flotação *Rougher*, *Cleaner* e *Reclenear* (anexo 4 e tabela 6). Todo afundado continua no sistema até seu produto final, o afundado *Reclenear*. O flotado *Rougher* constitui basicamente um concentrado de material contaminante, e se necessário, a recuperação de minério ainda presente se dá por um processo denominado *Scavenger* (nova flotação visando recuperar o conteúdo de ferro ainda presente). Os produtos referentes ao flotado *Cleaner* e *Reclenear* são cargas circulantes (voltam à etapa flotação *Rougher*), sempre enriquecendo o sistema e gerando mais massa com elevada concentração de ferro.

Os resultados obtidos (afundado *Reclenear*) alcançaram teores médios de Fe (t) igual a 64,86%, satisfatórios para as condições comerciais e para a utilização em ensaios metalúrgicos de pelotização e redução. Foi recuperado próximo a 75% do Fe contido (anexo 4), apresentando um produto final de baixo teor de P (0,01-0,04%), SiO₂ (±4,5 %) e Al (±1,8%) (tabela 7), dentro dos limites praticados pelos produtores de minério de ferro no mercado mineral. Pelos resultados adquiridos pode-se considerar que a separação dos componentes minerais ferrosos (magnetita e hematita), dos metadiamicritos de matriz ferruginosa e da formação ferrífera associada, da Formação Puga é tecnicamente viável.

As fases contaminantes restantes foram quantificadas por difratometria de raios-x (anexo 3), indicando baixa presença de quartzo e muscovita. Eletromicrografias (MEV) foram utilizadas para ilustrar a eficácia do processamento mineral dentro do fluxograma proposto. Percebe-se que o grau de cominuição foi adequado para liberação de agregados indesejáveis e o produto, pós-beneficiamento, era composto essencialmente por grãos de óxido de ferro (figura 23).

Tabela 6: Amostra BDQ-TR, resultados pós flotação reversa de coluna;

Flotação Rougher	Peso (kg)	% dist. peso	% Fe	Fe cont	% dist. Fe
Flotado Rougher	4,23	29,81	37,91	11,30	21,71
Afundado Rougher	9,97	70,19	58,06	40,75	78,29
Total	14,20	100,00		52,05	100,00
Flotação Cleaner	9,97		58,06		
Flotado Cleaner	4,78	47,95	53,74	25,77	43,53
Afundado Cleaner	5,19	52,05	64,22	33,43	56,47
Total	9,97	100,00		59,20	100,00
Flotação Recleaner	5,19		64,22		
Flotado Recleaner	2,02	38,95	57,00	22,20	35,92
Afundado Recleaner	3,17	61,05	64,86	39,60	64,08
Total	5,19	100,00		61,80	100,00
Flotação Scavenger	4,23		37,91		
Flotado Scavenger	0,73	17,24	24,89	4,29	10,83
Afundado Scavenger	3,50	82,76	42,71	35,35	89,17
Total	4,23	100,00		39,64	100,00

Tabela 7: Resultados de Fluorescência de Raios-X referentes à alíquota inicial do beneficiamento (BDQ-TR Original) e do produto concentrado pós flotação (BDQ-TR Flotação, em duplicata);

	BDQ-TR Original	BDQ-TR Flotação (1)	BDQ-TR Flotação (2)
SiO ₂	50,19	4,41	4,73
TiO ₂	0,39	0,51	0,53
Al ₂ O ₃	8,72	1,86	1,88
Fe	24,11	64,85	64,79
Mn	0,17	0,1	0,10
MgO	0,58	0,20	0,46
CaO	0,33	0,10	0,13
Na ₂ O	0,06	0,06	0,07
K ₂ O	2,05	0,31	0,35
V ₂ O ₅	< 0,01	< 0,01	0,01
P	0,06	0,01	0,05
Cr ₂ O ₃	0,02	0,08	0,07
Total	86,69	72,49	73,17

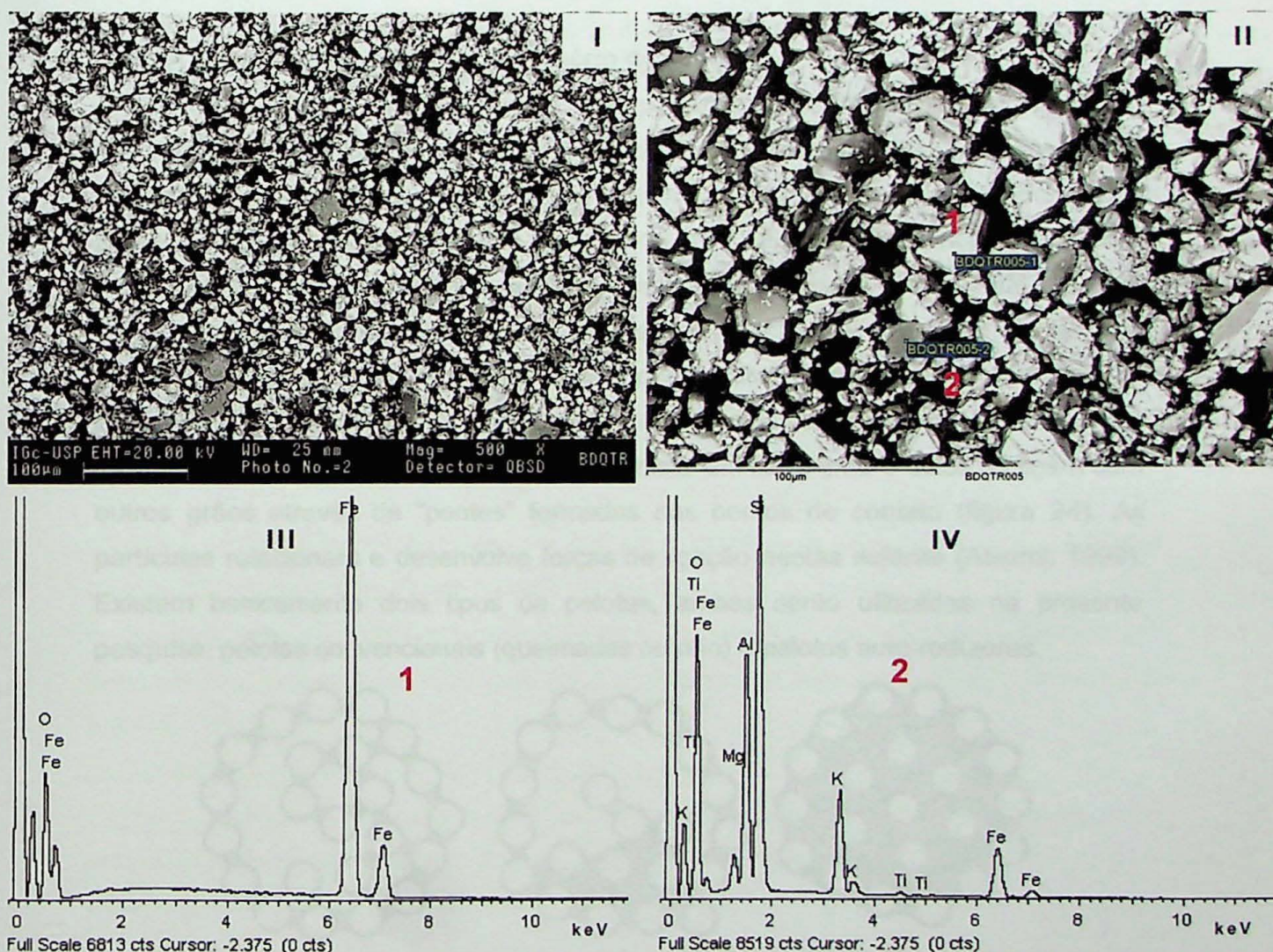


Figura 23: Eletromicrografia e espectrometria do produto beneficiado concentrado a 64,86% Fe. Amostra BDQ-TR; (I) Eletromicrografia do produto afundado Recleaner. Nota-se predomínio de minerais ferrosos liberados até em 10 μ m; (II) Detalhe dos grãos utilizados para análise em RX-EDS; (III) Resultados de RX-EDS, evidenciando composição ferrífera do minério beneficiado; (IV) Resultados de RX-EDS evidenciando a composição pelítica (Al, K e Si) das fases contaminantes restantes.

4.3 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DO MINÉRIO DE FERRO DE BODOQUENA

A caracterização metalúrgica foi realizada sobre o produto final (afundado Recleaner) adquirido no beneficiamento do minério de ferro de Bodoquena (MS). Esta etapa consta da realização de pelletização convencional (produção de pelotas), queima das pelotas e ensaios para redução carbotérmica do material. Estas atividades foram realizadas, em escala laboratorial, no LABRED, Laboratório de Auto Redução e Fusão Redução do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica-USP.

Os ensaios para redução do minério de ferro de Bodoquena são de suma importância para certificar a viabilidade tecnológica do aproveitamento mineral.

4.3.1 A redução carbotérmica de minério de ferro

As etapas correspondentes às atividades para redução carbotérmica de minério de ferro necessitam de etapas prévias de pelletização e queima da pelota. Pelotização é o método de aglomeração ou moldagem do minério de ferro, após o beneficiamento (*pellet*). Pelotas são aglomerados (entre 5-18 mm), de forma esférica de minérios finos, gerados com o auxílio de aditivos, centrifugadas em tambores rotativos para criar bolas esféricas seguido por um endurecimento a frio ou a quente. Os aditivos geralmente utilizados são: fundentes (calcário, dolomita), aglomerantes (bentonita, cal hidratada) e combustível sólido (antracito). Quando os finos do material são misturados, forma-se uma camada fina superficial em cada grão e estes se ligam com outros grãos através de "pontes" formadas nos pontos de contato (figura 24). As partículas rotacionam e desenvolve forças de ligação nestas esferas (Atsumi, 1999). Existem basicamente dois tipos de pelotas, ambas serão utilizadas na presente pesquisa: pelotas convencionais (queimadas ou não) e pelotas auto-redutoras.

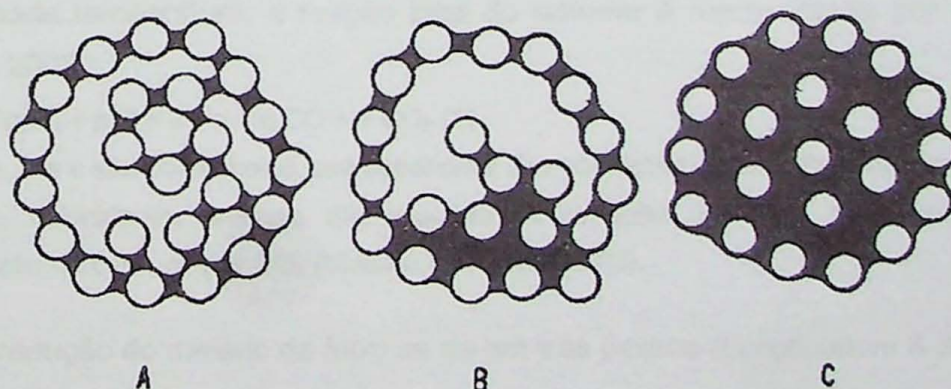


Figura 24: Mecanismos de aglomeração e formação de pelotas. (Atsumi, 1999); (A) Ligação inicial com pontes de líquido; (B) Coalescência de filme líquido sobre as partículas; (C) Líquido preenche espaços vazios na pelota e há adesão de partículas nos núcleos formados;

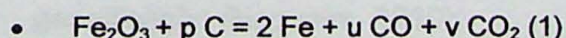
Queima da pelota consiste no processo de tratamento térmico que visa ligação atômica entre a superfície de partículas vizinhas (sinterização), conferindo maior resistência mecânica às pelotas. Basicamente, neste processo, à medida que se aumenta a temperatura, ocorre um aumento da densidade, acompanhado de esferoização e progressivo fechamento dos vazios; finalmente, mediante uma difusão nos contornos dos grãos, desaparecem os últimos vazios arredondados e isolados.

O processo de redução carbotérmica consiste no tratamento químico de redução de uma substância mineral (quimicamente um óxido) utilizando o gás CO (combustão de material carbonáceo com ar nas ventaneiras ou pelo gás gerado pela reação de gaseificação de carvão na cuba) que tem origem numa substância portadora do elemento carbono – comumente nas ‘formas’ *coque* ou *carvão vegetal* 1 – para a produção de um metal (Mourão & Takano, 2003). Esta operação emprega alta temperatura, fundindo todos os outros componentes da carga - com a exceção da substância portadora do carbono. Os produtos, excetuando-se os gases, são removidos no estado líquido.

Basicamente, o óxido do metal de valor é reduzido, o restante da ganga permanece inalterado, mas, devido à alta temperatura, esta se funde e origina a parte principal da escória. Geralmente, a ganga não é removida totalmente no tratamento do minério, pois é economicamente vantajoso realizar este processo final na metalurgia extrativa.

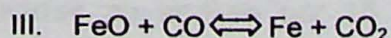
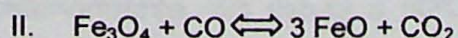
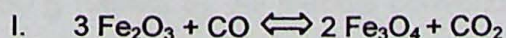
A fusão ocorre pelo ajuste, com uso de fundentes, da composição da ganga para uma região de baixo ponto de fusão. Pela ação de forças gravitacionais, a imiscibilidade e a diferença de densidade promovem a separação das fases metal e escória em dois “produtos”. Essa separação *líquido-líquido*, entre metal e ganga, constitui o motivo primordial para se operar o processo a uma temperatura elevada (acima dos pontos de fusão do metal e da escória).

Em misturas de óxido e carbono (pelotas auto-redutoras), quando aquecida em determinada temperatura, a reação total do sistema é representada por (Mourão & Takano, 2003):



(1) p , u e v são coeficientes que dependem das condições de equilíbrio na temperatura do processo, velocidades relativas das reações de redução de óxido de ferro por CO e gaseificação de carbono por CO₂ (Mourão & Takano, 2003).

Esta redução do minério de ferro se dá em três passos (Longtbottom & Kolbeinsen, 2008):



Pelotas de óxido de ferro, em altas temperaturas, pode originar ferro metálico fundido parcial ou totalmente, dependendo do grau de carburização do produto. Matsumura *et al.* (1998) realizou experiências com pelotas de minério de ferro, carbono e bentonita a altas temperaturas. Notou-se primeiramente que ocorre rápida redução endotérmica dos óxidos de ferro pelo carbono. Posteriormente, com a redução completa, há aumento no aquecimento e a escória começa a se fundir. O ferro metálico diminui sua temperatura *líquidus* ao absorver o carbono e acaba por se fundir (figura 25), acarretando em duas fases líquidas (metal e escória).

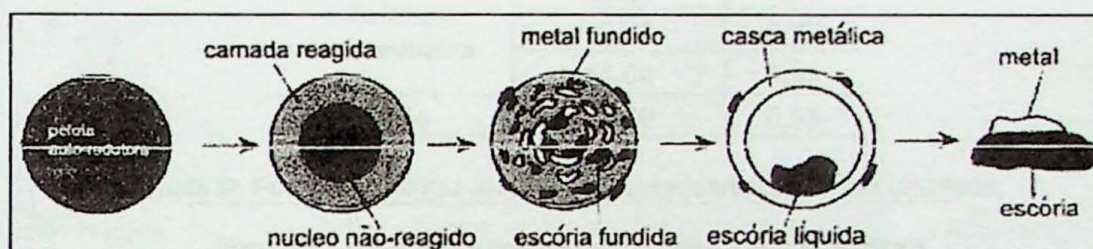


Figura 25: Sequência de eventos no caso de pelotas auto-redutoras quando submetida a altas temperaturas (Mourão & Takano, 2003);

A redução carbotérmica de óxidos de ferro depende de diversos fatores, como:

- ✓ Temperatura: aumento de temperatura, acelera a velocidade de redução (Santos, 2002);
- ✓ Efeito da velocidade de aquecimento: aquecimento gradativo evita a crepitação dos aglomerantes, excessivas evoluções gasosas e efervescência (*foaming*) (Nogueira, 2010);
- ✓ Redutores: O aumento da proporção molar entre o carbono fixo contido no redutor e o óxido de ferro acima da relação estequiométrica promove um aumento da taxa de redução (Nogueira, 2010);
- ✓ Tamanho da pelota: estudos indicam que pelotas de diâmetros menores possuem taxa inicial de reação superior às com diâmetros maiores (Santos, 2002);
- ✓ Efeito de outras substâncias no processo de redução: alguns elementos podem afetar a pressão parcial de CO no sistema de redução, afetando as reações de gaseificação (Nogueira, 2010);

4.3.2 Ensaio metalúrgicos

Os resultados de âmbito metalúrgico mostraram que a pelletização foi satisfatória utilizando-se apenas água como aglomerante. As pelotas produzidas atendem as especificações do mercado, possuindo diâmetro médio de 16,5 mm e peso médio de 6,50 g (tabela 8). As pelotas convencionais foram curadas ao ar livre por sete dias e, posteriormente, em estufa a 50°C por um dia. Já as pelotas auto redutoras foram curadas ao ar livre por 15 dias e em estufa a 55° C por um dia. Após secas,

determinou-se a umidade relativa referente à utilização de água como aglomerante durante a pelletização. Notou-se que, para ambas as amostras, possuíam umidade em torno de 9% de sua composição em peso (g) (tabela 9).

Tabela 8: Diâmetro médio e peso de pelotas convencionais e pelotas auto-redutoras;

Pelota/parâmetro	Diâmetro (mm)	Peso
Pelota Convencional	16,00	6,45
	17,00	7,30
	15,00	5,56
Média	16,00	6,44
Pelota Autoreductora	18,00	7,00
	17,00	6,72
	16,00	5,95
Média	17,00	6,55

Tabela 9: Peso das pelotas antes e pós curadas/secas e sua umidade;

Peso (g)	Pelota Convencional		Pelota auto-redutora	
Peso úmido	401,40	18,78	86,10	44,47
Peso seco	365,70	17,10	78,25	40,50
% umidade	8,89	8,95	9,12	8,93

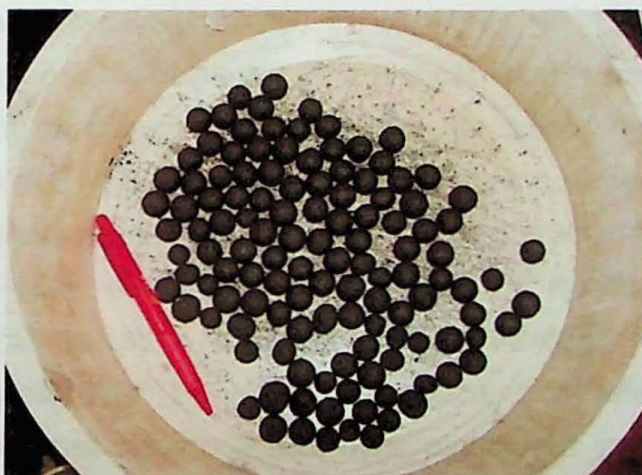


Figura 26: Pelotas convencionais confeccionadas utilizando água como aglomerante;

Testes de compressão na prensa de ensaio universal KRATOS v1.0 foram realizados para determinar o grau de coesão das pelotas. As pelotas convencionais suportaram uma força compressiva de 20 kgf (N) até se fragmentarem e perderem a coesão. Já as pelotas auto-redutoras, suportaram uma compressão menos intensa, alcançando valores de 14 kgf (Figura 27 e 28).

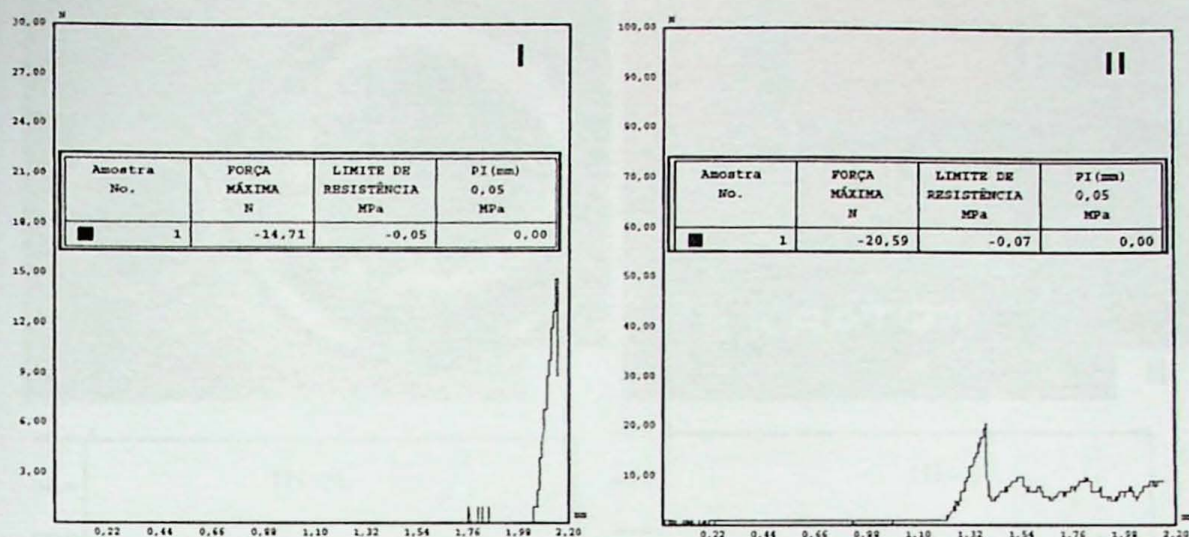


Figura 27: Resultados de ensaios a compressão na prensa KRATOS v1.0. (I) Pelota auto-redutora; (II) Pelota convencional;

Para testes de redução carbotérmica em laboratório, foram utilizadas pelotas convencionais queimadas e pelotas não queimadas (cruas/verdes). As pelotas queimadas sofreram tratamento térmico no forno de resistência Lindberg/Blue M, iniciando a 30°C e atingindo 1300°C, com uma velocidade de aquecimento de 20°C/min. Pelotas ficam resididas em cadinho de alumina e permanecem por cerca de 10 minutos a temperatura máxima (1300°C).

Após queimadas, as pelotas obtiveram uma redução de 8% em peso e de 20% no diâmetro médio, além do aumento da resistência mecânica. Testes na prensa de ensaio universal KRATOS v1.0, indicaram que as pelotas queimadas suportaram até 8400 kgf (N) (figura 28) quando comprimidas, certificando o objetivo desta etapa. Fato importante que se deve destacar é que durante a queima, a pelota sofre transformação mineral devido o aquecimento e oxidação. Portanto, a pelota inicialmente magnetítica (Fe_3O_4) torna-se hematítica, fato testado com imã de neodímio-ferro (pelotas queimadas possuem fraca atração ao imã). As pelotas auto-redutoras não são queimadas, uma vez que durante o tratamento térmico já iniciariam o processo de redução devido à presença de coque de carvão mineral em sua composição.

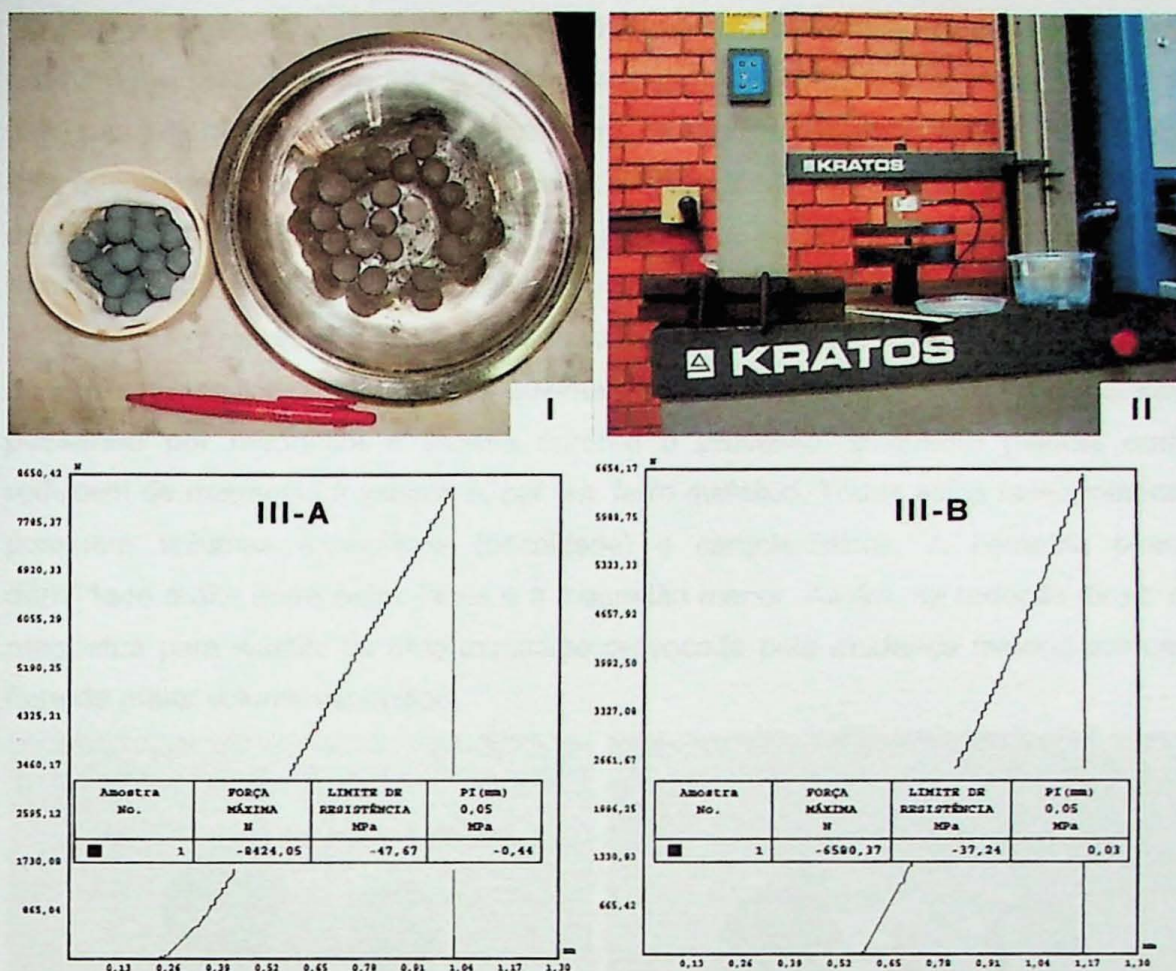


Figura 28: Processo de queima das pelotas convencionais. (I) Pelotas convencionais queimadas em cadinho de alumina à esquerda e pelotas não queimadas à direita; (II) Ensaio de resistência a compressão na prensa KRATOS v1.0; (III-A e B) Resultados obtidos da resistência mecânica a compressão em pelotas queimadas;

A redução das pelotas convencionais e das pelotas auto-redutoras foi realizada em duas etapas: utilizando forno de resistência Brasimet K 400 e forno vertical adaptado Lundberg/Blue M. As pelotas auto-redutoras foram utilizadas para ensaios termogravimétricos, visando a quantificação da perda de peso em função do tempo de residência das pelotas

4.3.2.1 Pelotas convencionais

Pelotas convencionais queimadas e cruas (não queimadas) foram reduzidas em forno de resistência Brasimet K400 na temperatura de 1000 °C durante 90 minutos. Utilizou-se de coque de carvão mineral envolto às pelotas no recipiente de carbeto de silício para redução carbotérmica. Estes foram vedados com argila e, após tempo de residência no forno, foram resfriados utilizando nitrogênio para diminuir os efeitos de oxidação quando expostos ao ambiente. Após a redução, ensaios metalográficos e de MEV foram realizados para avaliar a eficiência do processo de redução no minério de ferro de Bodoquena.

Durante a redução, as pelotas tiveram perda de cerca de 20% em peso e alteração no diâmetro médio (figura 29-I e II). Notou-se uma diminuição no diâmetro médio (14 mm) das pelotas queimadas e aumento do diâmetro médio, e porosidade, das pelotas não queimadas (18 mm). Provavelmente, esta expansão em pelotas não queimadas deve-se ao fato de que tais pelotas não possuem partículas ligadas (sinterização) entre si como em pelotas queimadas.

Outro fato preponderante refere-se à mudança de estrutura devido a transformação mineral durante a redução. Pelotas queimadas, reduzem de hematita a ferro metálico, passando por magnetita e wustita durante o processo. Enquanto pelotas cruas reduzem de magnetita a wustita e, por fim, ferro metálico. Todas estas fases minerais possuem volumes específicos (densidade) e característicos. A hematita possui densidade maior entre estas fases e a magnetita menor. Assim, na redução direta de magnetita para wustita há uma expansão provocada pela mudança mineral em uma fase de maior volume específico.

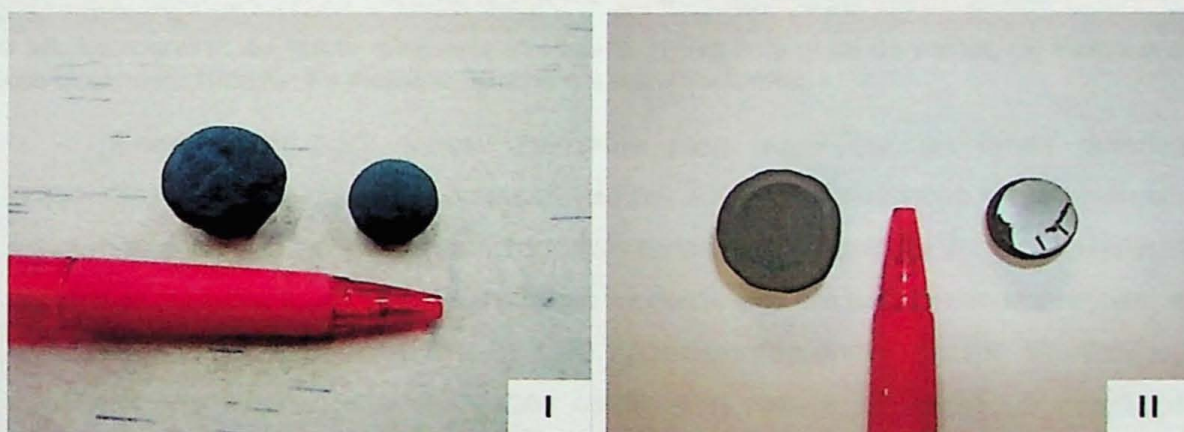


Figura 29: Pelotas convencionais reduzidas. (I) Pelota não queimada, esquerda, e pelota queimada, direita; (II) Detalhes para estruturas internas das pelotas reduzidas. Pelota não queimada, à esquerda, e pelota queimada, à direita;

Tabela 10: Pesagem das pelotas convencionais no processo de redução carbotérmica;

Peso (g)	Pelota queimadas		Pelota crua	
Peso inicial	32,40	169,00	36,60	160,00
Peso final	25,01	133,00	28,76	125,60
% perda	22,81	21,30	21,42	21,50

Após redução carbotérmica, as pelotas foram embutidas em braquelite e resina Epoxiglass e analisadas ao microscópio óptico de luz refletida e ao MEV. Estes resultados visaram qualificar a eficiência do processo de redução.

Micrograficamente observou-se, nas pelotas queimadas, predomínio de ferro metalizado (> 90%), pouca a ausente presença de óxido de ferro não reduzido e baixa quantidade de escória. Quando presente, os óxidos de ferro restringem-se ao centro

de grãos metalizados e a escória em grãos de aspecto cristalino (mineral). Quando atacadas com ácido nítrico 2%, nota-se o predomínio da estrutura tipo ferrita, caracterizada pela pouca influência de compostos de C. Pouca ocorrência de óxido de ferro, presença de estrutura tipo ferrita e “ligação” (sinterização) entre os grãos metalizados, atestam para a eficiência do processo de redução (figura 30).

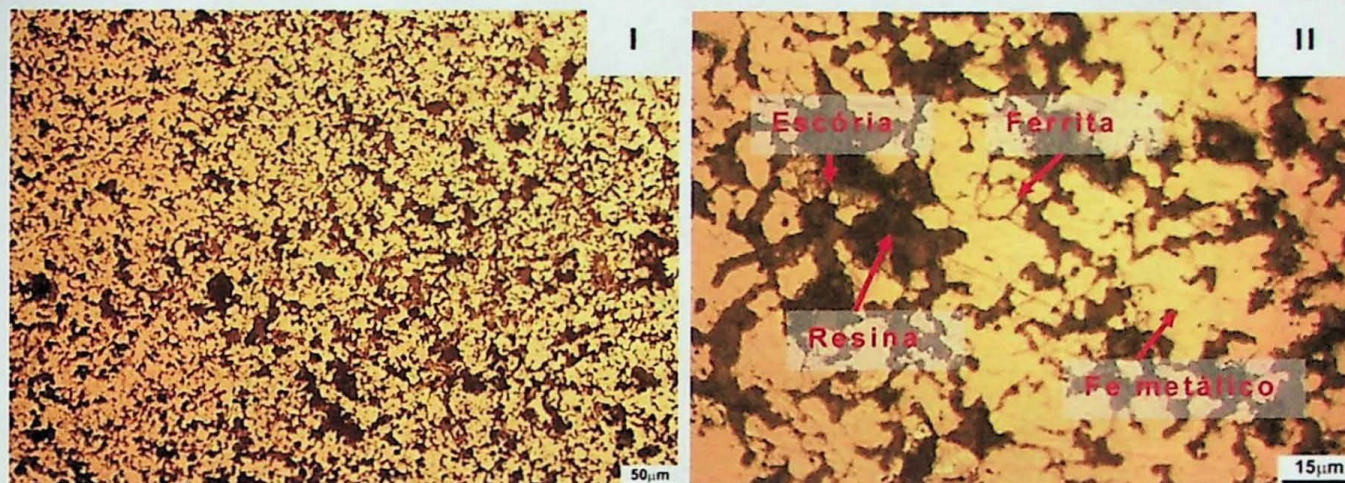


Figura 30: Micrografias da pelota queimada e reduzida. (I) Aspecto geral da pelota; (II) Fases presentes na pelota queimada. Detalhe: Fe metálico, escória e a estrutura ferrita;

Ensaio em MEV foram realizados para quantificar as fases químicas presentes, utilizando dados de mapeamento por RX-EDS de elétrons retroespalhados ao aumento de 1000x. As eletromicrografias geradas sinalizam para o predomínio da composição de ferro metálico do produto e a ocorrência, em pequenas proporções, de escória como contaminantes em Si, O e Al (referentes componentes quartzosos e micáceos restantes). Estes resultados corroboram para a eficiência da reação de redução nestas pelotas. A ocorrência de C e Cl são devido à composição da resina Epoxiglass (embutimento das pelotas). Todas as fases contaminantes estão associadas, indicando a eficácia da segregação entre o ferro metalizado e a escória durante a redução do minério (figura 31).

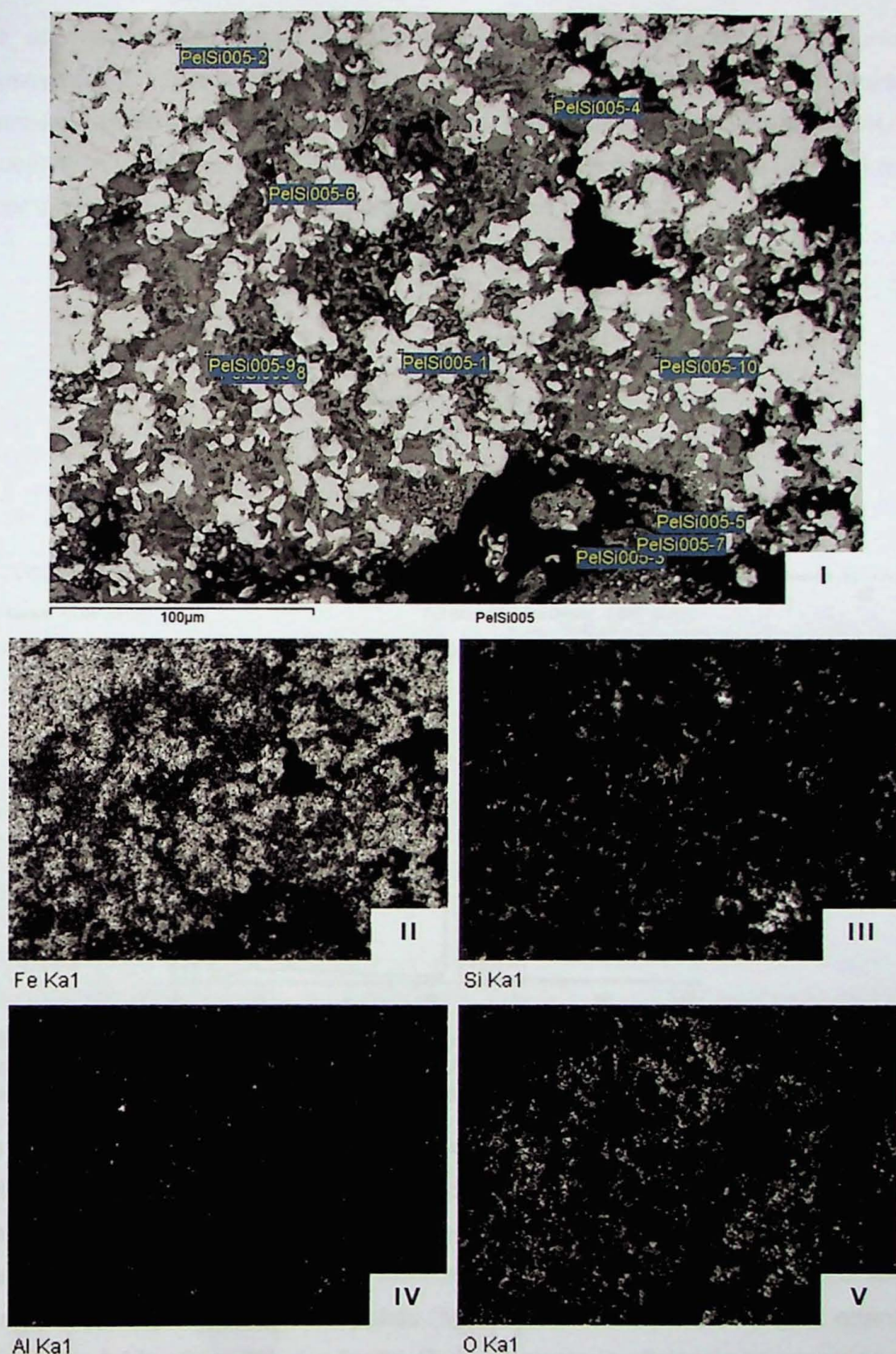


Figura 31: Eletromicrografias sobre as pelotas queimadas com mapeamento em RX-EDS. (I) Localização dos “tiros” para análise espectrométrica; (II) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Al; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em O;

Os espectrômetros obtidos atentam para a boa relação entre os elementos contaminantes Si, O e Al e pequena relação entre Fe e O. As fases contaminantes referem-se à composição mineral da escória em SiO_2 (quartzo) e $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ (muscovita). A relação entre Fe e O sugere a existência de óxido de ferro (wustita) que não completou o processo de redução a ferro metálico (figura 32).

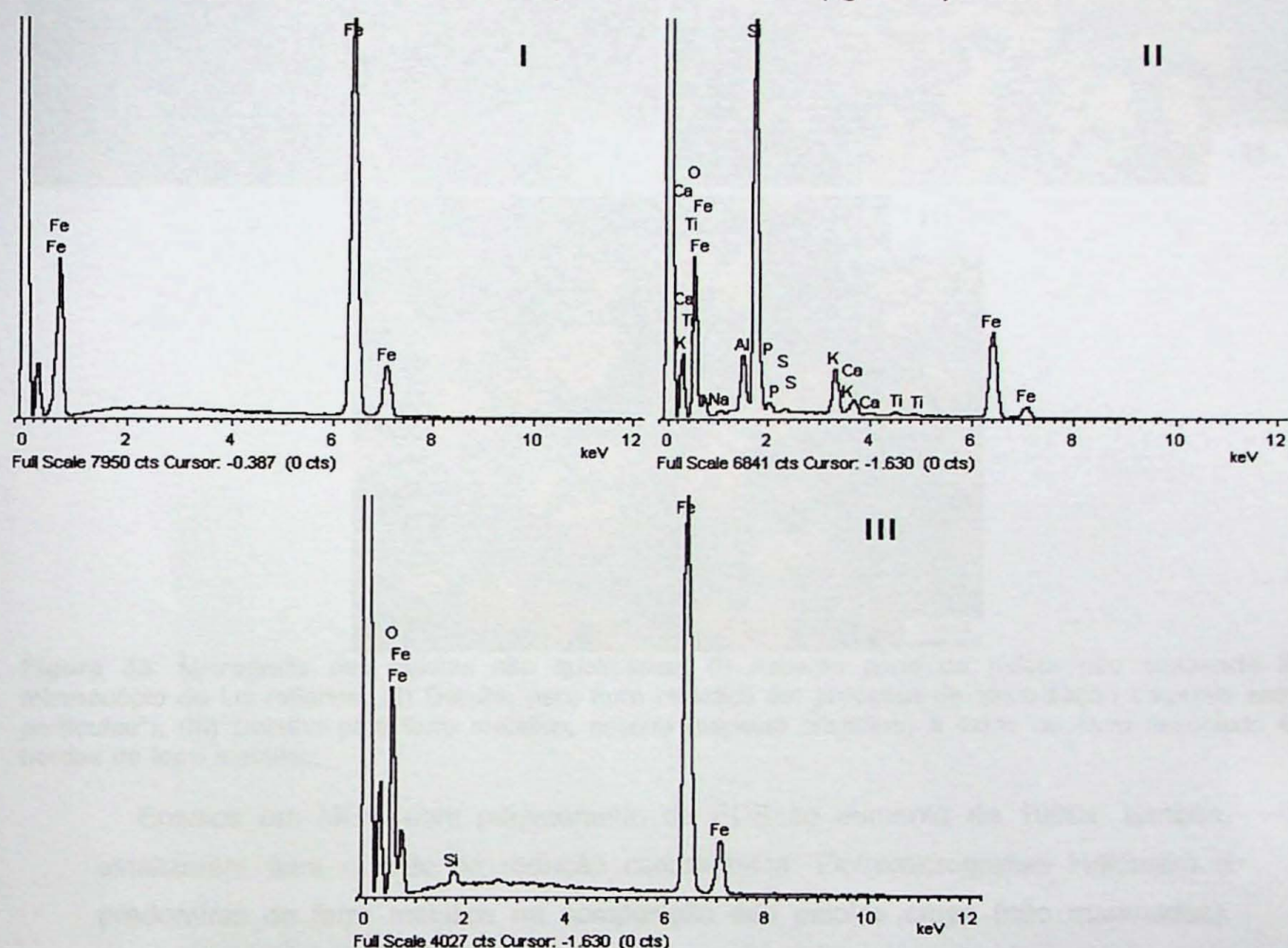


Figura 32: Espectrômetros (RX-EDS/ MEV) das fases existentes na pelota queimada após a redução. (I) Espectrômetro dos “grãos” de ferro metálico; (II) Espectrômetro sobre as fases contaminantes associadas (escória); (III) Espectrômetro sobre óxido de ferro que não reduziu a ferro metálico;

As pelotas cruas proporcionaram resultados semelhantes às pelotas descritas anteriormente. Nota-se, micrograficamente, que os grãos metalizados estão poucos “conectados” (sinterizados) e há destacada porosidade preenchida pela resina do embutimento. Grãos de óxido de ferro são mais notados, porém ferro metálico constitui a fase principal e predominante da pelota (figura 33). A estrutura observada, quando atacado com ácido nítrico 2%, é a ferrita. Pode-se atestar a eficiência do processo de redução carbotérmica para pelotas não queimadas. Este fator é de suma importância, uma vez que sugere resultados similares com pelotas comerciais utilizadas nos processos siderúrgicos em escala industrial (pelotas hematíticas).

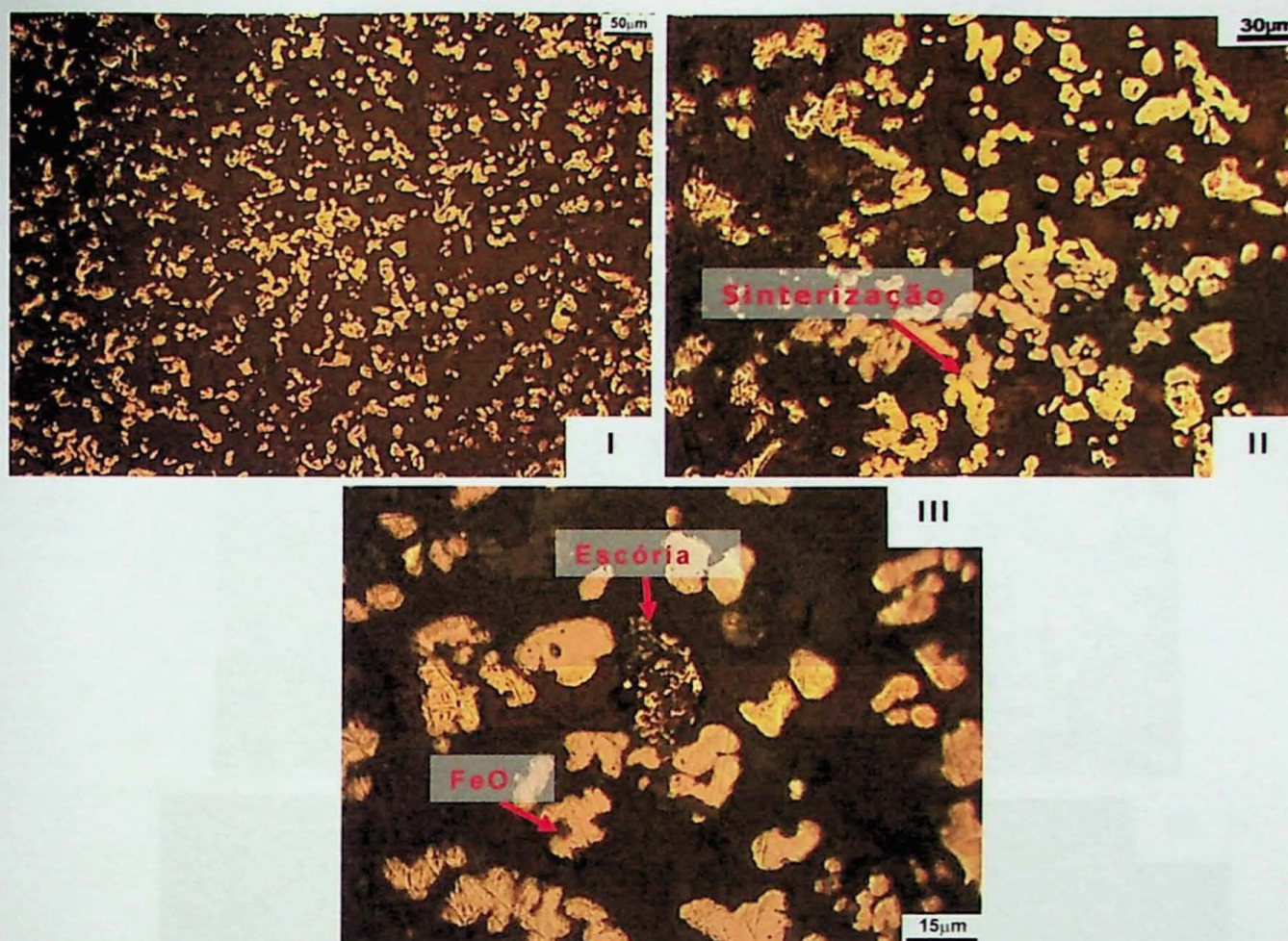


Figura 33: Micrografia das pelotas não queimadas. (I) Aspecto geral da pelota não queimada ao microscópio de luz refletida; (II) Detalhe para ferro metálico em processo de sinterização ("ligação entre partículas"); (III) Detalhe para ferro metálico, escória (aspecto cristalino) e óxido de ferro associado às bordas do ferro metálico;

Ensaio em MEV, com mapeamento de EDS ao aumento de 1000x, também sinalizaram para o êxito da redução carbotérmica. Eletromicrografias indicaram o predomínio de ferro metálico na composição das pelotas cruas (não queimadas). Teores de C foram mais elevados do que encontrado para as pelotas queimadas. Isto é explicado pela maior porosidade destas pelotas e o conseqüente preenchimento por resina Epoxiglass. Notou-se, também, a baixa relação entre os elementos Fe e O e alta relação entre óxidos de Si e de Al (escória). Esta escória encontra-se, predominantemente, segregada e contendo a associação das fases Si, O e Al (quartzo e muscovita) (figura 34).

Os espectrômetros obtidos na rotina de MEV sinalizam para elevado teor de ferro metálico, associação entre Si, Al, K e O na escória e pouca ocorrência de óxido de ferro não reduzidos a ferro metálico (figura 35).

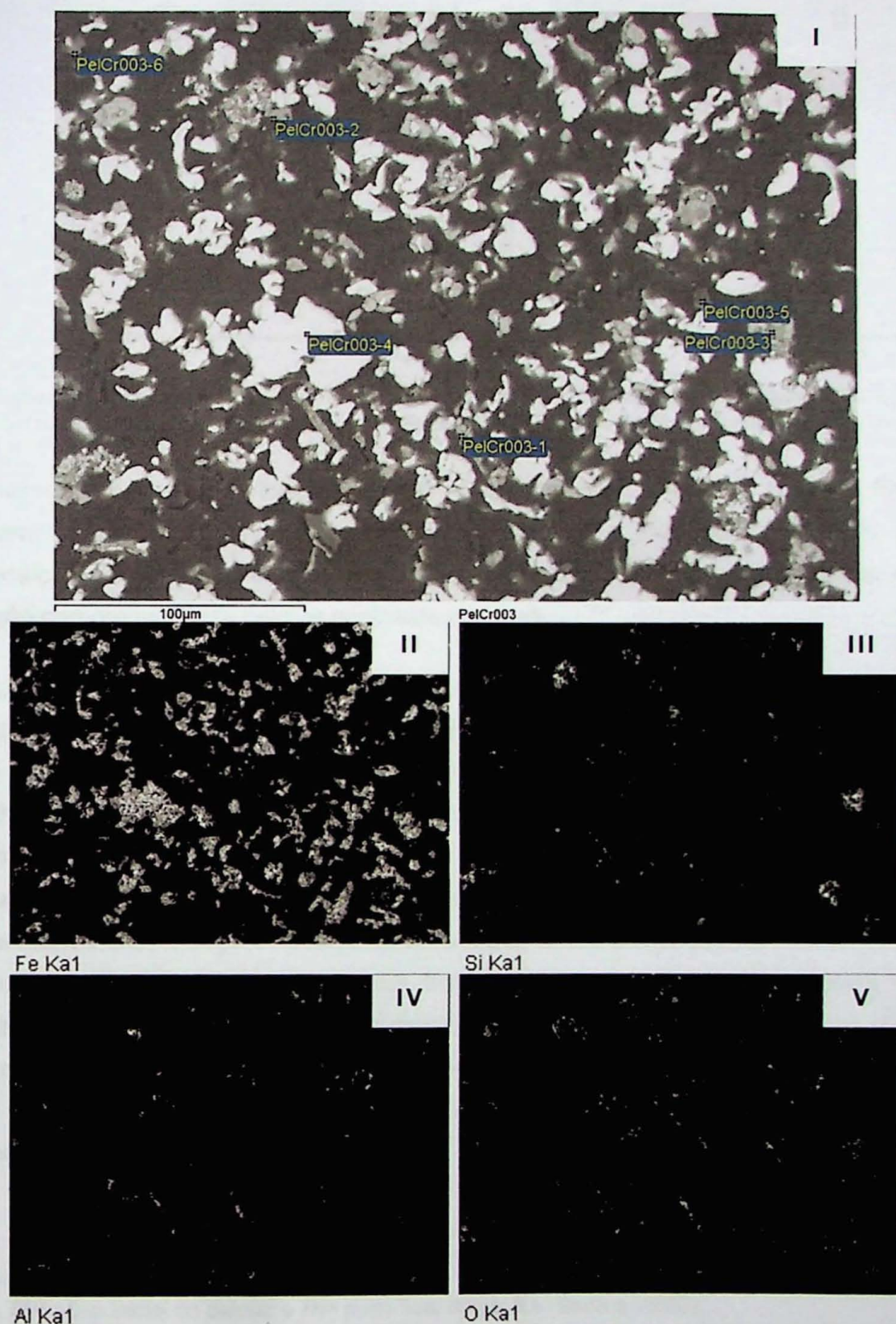


Figura 34: Eletromicrografias sobre as pelotas não queimadas com mapeamento em RX-EDS. (I) Localização dos "tiros" para análise RX-EDS/MEV; (II) Localização (pontos claros) das unidades ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Al; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em O;

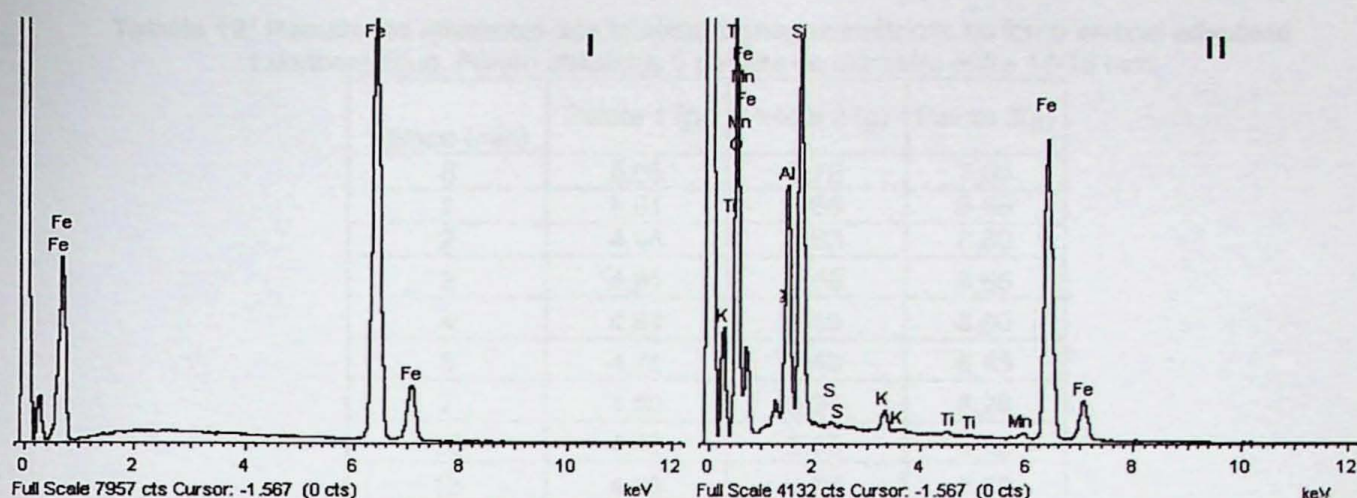


Figura 35: Espectrômetros (RX-EDS/ MEV) das fases existentes na pelota não queimada após a redução. (I) Espectrômetro dos “grãos” de ferro metálico; (II) Espectrômetro sobre as fases contaminantes (escória);

Análises químicas por titulação foram realizadas no Laboratório Nomos. Elas atestaram, para as pelotas convencionais, teores de Fe total acima de 85% da composição da pelotas. Fator este que corrobora com o sucesso do processo de redução carbotérmica nas pelotas queimadas e cruas.

4.3.2.2 Pelotas auto-redutoras:

As pelotas auto-redutoras foram utilizadas para ensaios termogravimétricos no forno vertical adaptado de resistência Lundberg/Blue. Ajustou-se a temperatura em 1.150° C e, com ajuda de balança de precisão Ohaus, foram medida a massa perdida durante a redução. O tempo de residência da pelota no forno foi de 70 minutos. Sabe-se que as pelotas auto-redutoras, continham até 17% de sua composição em coque de carvão mineral. O objetivo destes ensaios é quantificar a redução de pelotas auto-redutoras, levando-se em conta a sua fração de reação ao longo do tempo de residência. Ou seja, o quanto da pelota reagiu ao longo da redução.

O cálculo desta fração de reação se dá por:

$$fr = (M_i - M_t) / (M \times M_i) (*)$$

(*) Onde: fr = Fração de reação

M_i = Peso inicial da pelota (g)

M_t = Peso da pelota em um instante t (g)

M = Fração correspondente a perda de peso máxima da pelota (Santos, 2002) (**)

(**) M é dado por: $M = (M_i - M_f) / M_i$

Onde, M_i = peso inicial da pelota; e M_f = peso final da pelota (Santos, 2002);

As medidas dos ensaios termogravimétricos podem ser ilustradas na tabelas 11, 12 e 13 e nos gráficos 1 e 2 (figura 36).

Tabela 11: Valores de fração de perda de peso máxima da pelota M . M_1 = pelota 1, M_2 = pelota 2, M_3 = pelota 3;

M_1	M_2	M_3
0,30	0,32	0,32

Tabela 12: Resultados referentes aos ensaios termogravimétricos ao forno vertical adaptado Lundberg/Blue. Foram utilizadas 3 pelotas de diâmetro entre 14-18 mm;

Tempo (min)	Pelota 1 (g)	Pelota 2 (g)	Pelota 3(g)
0	5,05	5,72	7,00
1	5,01	5,66	6,95
2	4,98	5,63	6,80
3	4,91	5,58	6,65
4	4,84	5,49	6,60
5	4,75	5,40	6,43
7	4,60	5,24	6,26
10	4,46	5,05	6,02
15	4,18	4,79	5,80
20	4,07	4,59	5,63
25	3,95	4,44	5,43
30	3,84	4,32	5,24
35	3,76	4,22	5,02
40	3,70	4,14	4,83
50	3,59	4,03	4,78
60	3,52	3,97	4,75
70	3,52	3,97	4,75
Perda (%)	30,36	30,52	32,14

Tabela 13: Medidas de fração de reação para as pelotas auto-redutoras referentes aos ensaios termogravimétricos;

Tempo (min)	fr 1	fr 2	fr 3
0	0	0	0
1	0,03	0,04	0,02
2	0,05	0,05	0,09
3	0,09	0,08	0,15
4	0,14	0,13	0,18
5	0,20	0,17	0,25
7	0,30	0,26	0,33
10	0,38	0,37	0,44
15	0,57	0,50	0,54
20	0,64	0,61	0,61
25	0,72	0,70	0,70
30	0,79	0,76	0,78
35	0,84	0,82	0,88
40	0,88	0,86	0,96
50	0,95	0,92	0,99
60	1,00	0,95	1,00
70	1,00	1,00	1,00

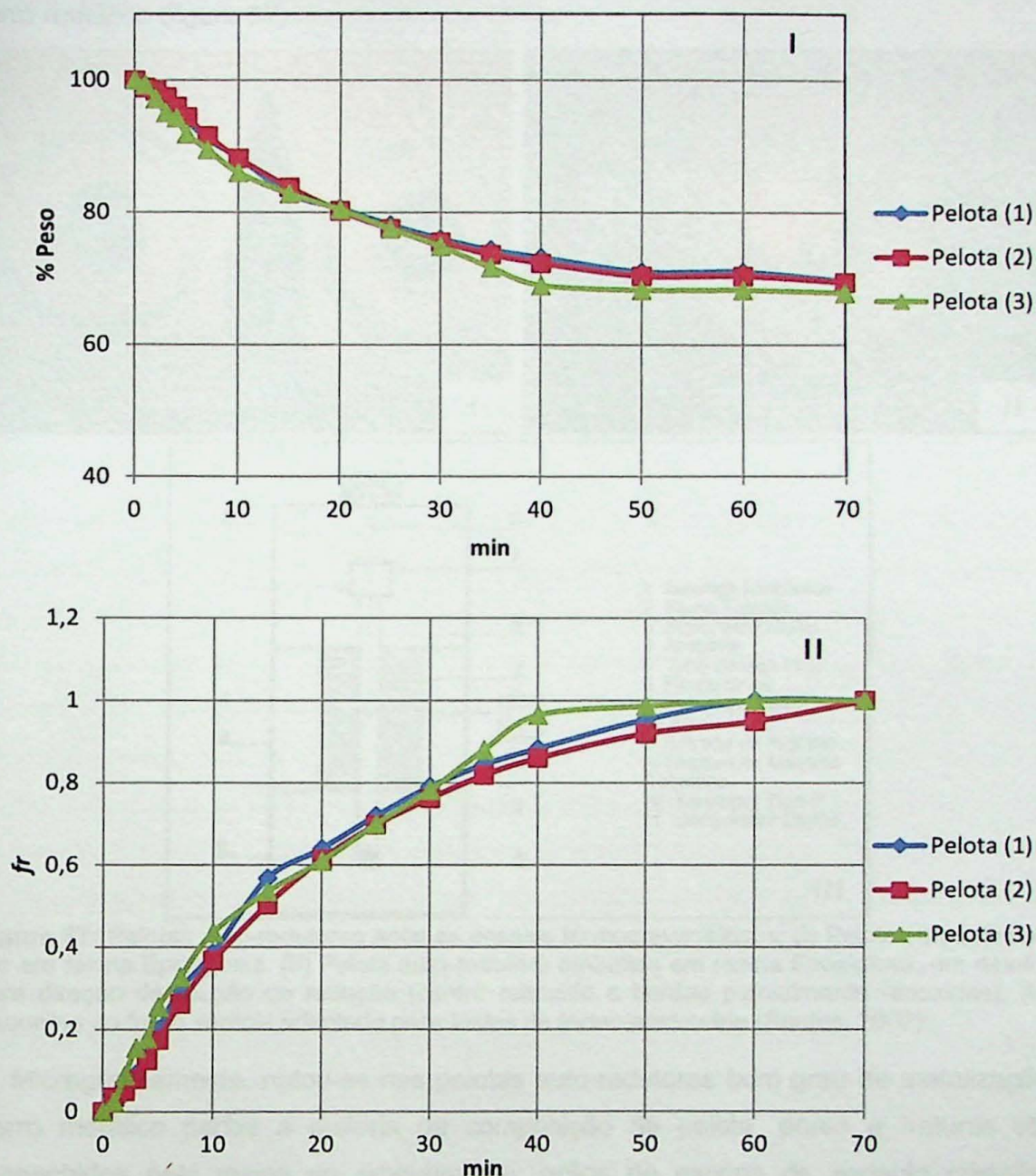


Figura 36: Gráficos referentes aos resultados obtidos nos ensaios termogravimétricos com pelotas auto-redutoras. (I) Perda de peso (%) ao longo do tempo de residência da pelota auto-redutora no forno; (II) Evolução da fração de reação ao longo do tempo de residência da pelota auto-redutora no forno.

A redução das pelotas auto-redutoras resultou em perda de até 32% do peso inicial. Observou-se que o processo de redução foi mais intenso nos primeiros 20 minutos de residência, alcançando fração de reação de 0,6. Durante este estágio inicial, a pelota reduziu-se em 20% do peso. Entre os 20-40 minutos de residência a redução da pelota processa-se mais lentamente, até atingir frações de redução de 0,86 e 0,93. Por fim, nos minutos finais (após 40 minutos), alcança-se o estágio de equilíbrio e a redução já está quase finalizada. A pelota possui perdas em peso pequenas (< 4%).

Neste período, espera-se que a pelota sofra sinterização, interligando as partículas de ferro metálico (figura 37).

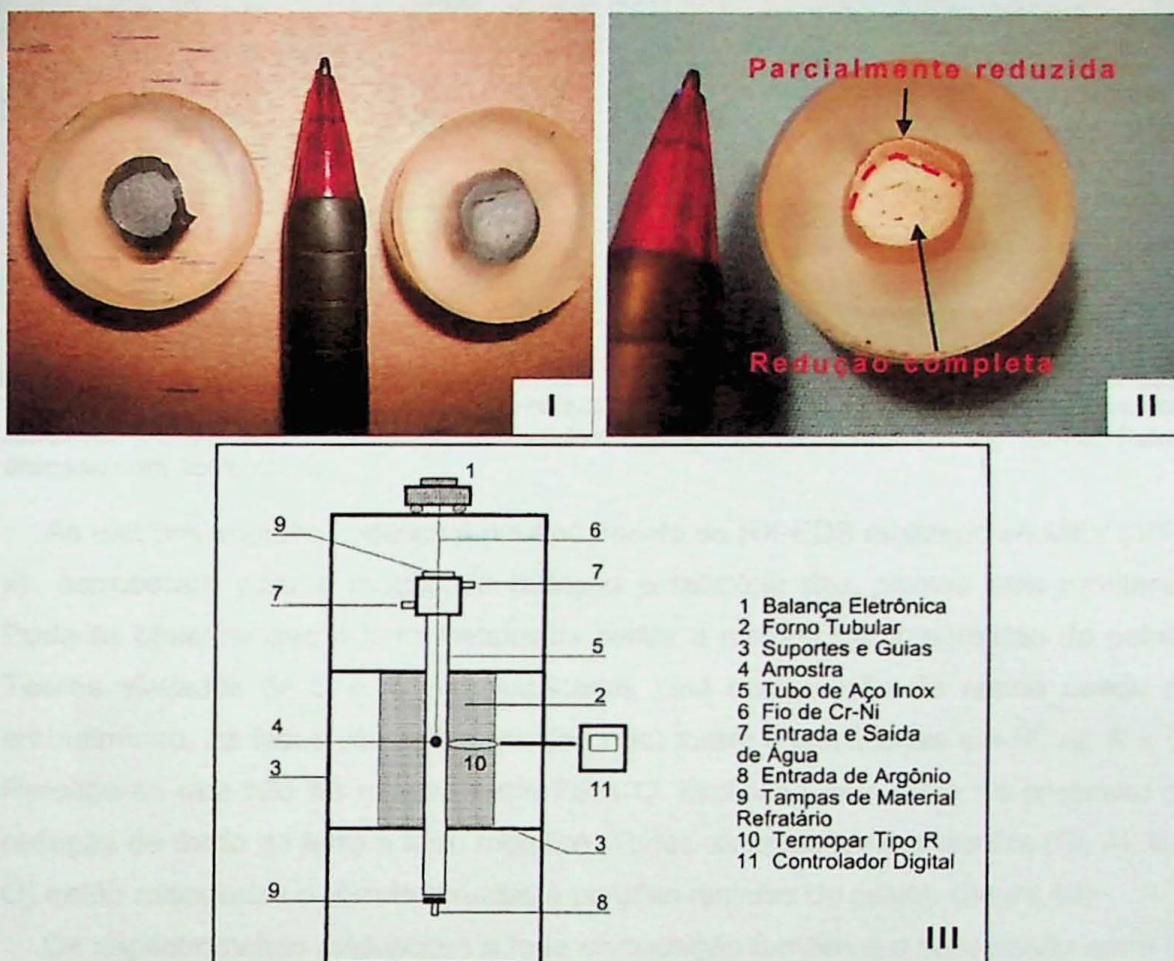


Figura 37: Pelotas auto-redutoras após os ensaios termogravimétricos; (I) Pelotas embutidas a frio em resina Epoxiglass. (II) Pelota auto-redutora embutida em resina Epoxiglass, em detalhe para direção de reação de redução (centro reduzido e bordas parcialmente reduzidas); (III) Esquema do forno vertical adaptado para testes de termogravimetria (Santos, 2002);

Micrograficamente, notou-se nas pelotas auto-redutoras bom grau de metalização. Ferro metálico perfaz a maioria da composição da pelota, poros e fraturas são preenchidos pela resina do embutimento, grãos de escória de aspecto cristalino (quartzo), ausência a pequena ocorrência de núcleos e porções de óxido de ferro não reduzido e estrutura tipo ferrita quando atacados com ácido nítrico. Devido ao tratamento em altas temperaturas, as partículas de ferro metalizado estão, por vezes, interligadas entre si. Isto indica a ocorrência de sinterização (aumento da resistência mecânica pela ligação de partículas metálicas) durante a redução destas pelotas.

Os aspectos micrográficos atentam para eficácia na reação de redução destas pelotas (figura 38). Pode-se observar, também, que a escória está segregada a uma porção da pelota. Isto atesta para o comportamento de pelotas de minério de ferro quando submetidas ao tratamento térmico: surgimento de uma fase metálica e uma fase de menor densidade relativa aos contaminantes (escória).

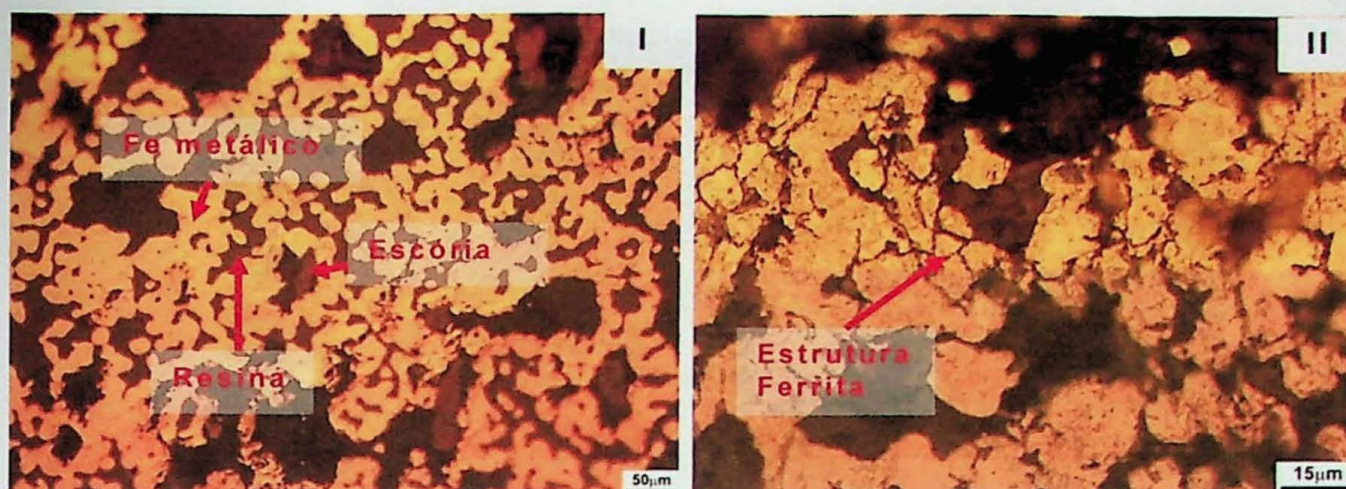


Figura 38: Micrografias das pelotas auto-redutoras após redução. (I) Aspectos gerais da pelota reduzida. Poros são preenchidos pela resina Epoxiglass. (II) Estrutura tipo ferrita. Pelota atacada com ácido nítrico;

As eletromicrografias obtidas e o mapeamento de RX-EDS realizado ao MEV (1000 x), corroboram para a reação de redução satisfatória das pelotas auto-redutoras. Pode-se observar que o ferro metalizado perfaz a maioria da composição da pelota. Teores elevados de C e Cl são explicados pela composição da resina usada no embutimento. As fases contaminantes (escória) foram quantificadas em Si, Al, K e O. Percebe-se que não há relação entre Fe e O, explicada pelo êxito no processo de redução de óxido de ferro a ferro metálico. Todas as fases contaminantes (Si, Al, K e O) estão associadas e correlacionadas à porções restritas da pelota. (figura 40).

Os espectrômetros evidenciam a forte composição ferrítica e a associação entre as fases contaminantes (figura 39). A composição da escória condiz com os dados de Difratometria de raios-x do produto concentrado, anterior aos ensaios metalúrgicos. Estes resultados atestaram, além de magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3), para presença de muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e quartzo (SiO_2) como componentes mineralógicos do minério beneficiado.

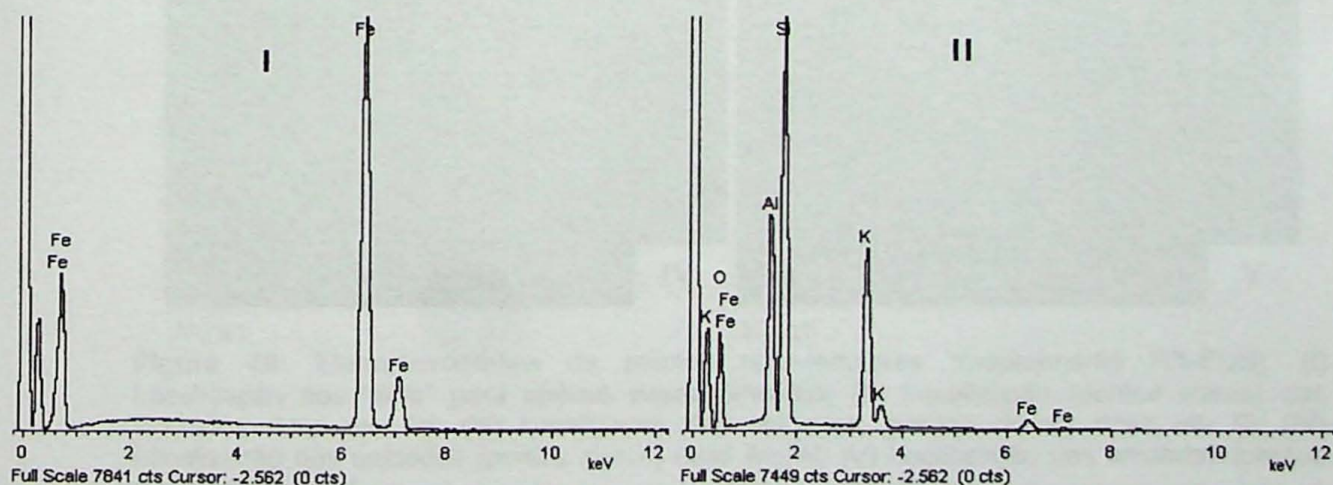


Figura 39: Espectrômetros (RX-EDS/ MEV) das fases existentes na pelota auto-redutora, após redução. (I) Espectrômetro dos "grãos" de ferro metálico; (II) Espectrômetro das fases contaminantes (escória);

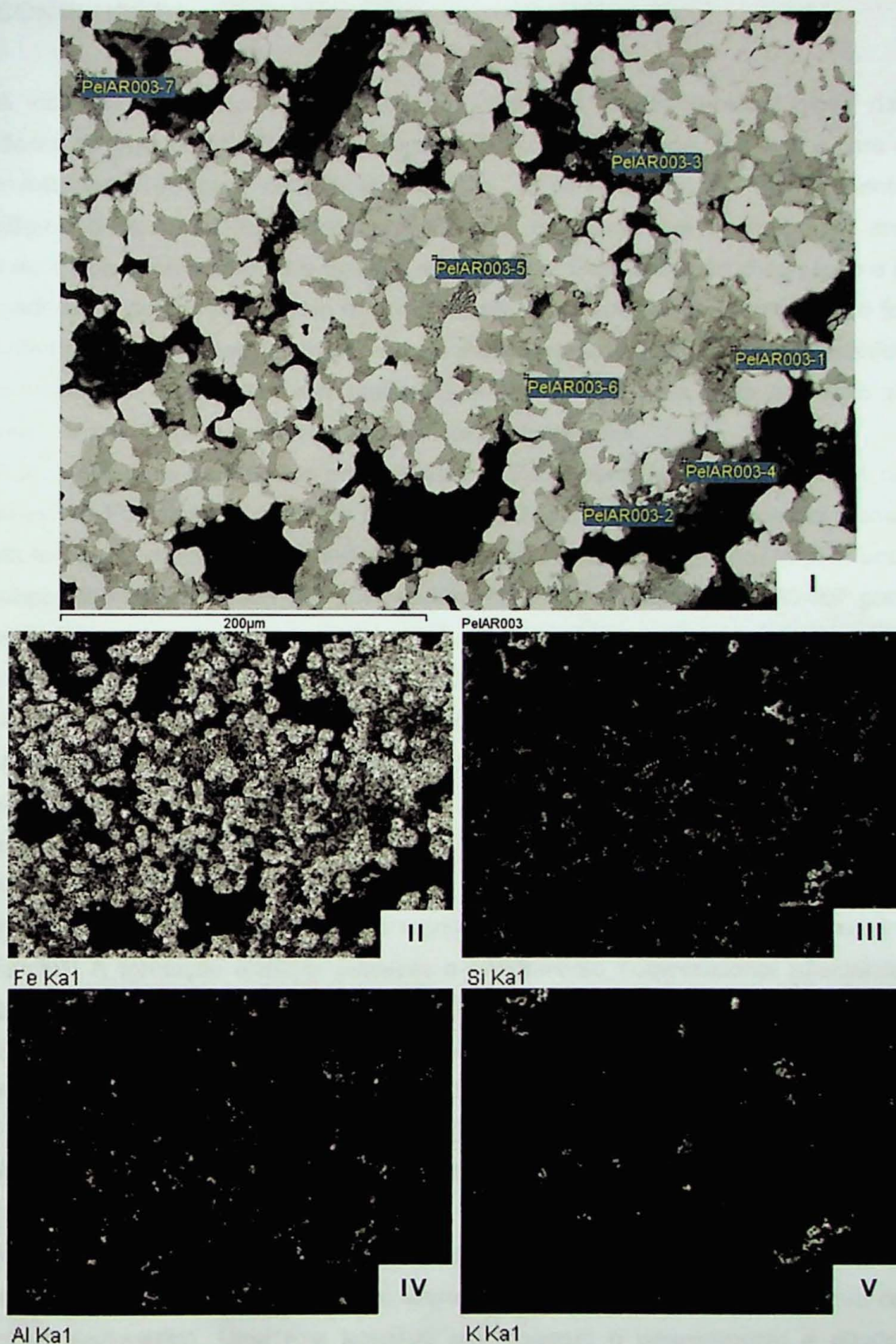


Figura 40: Eletromicrografias de pelotas auto-redutoras (mapeamento RX-EDS). (I) Localização dos "tiros" para análise espectrométrica; (II) Localização (pontos claros) das unidades ricas em Fe; (III) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Si; (IV) Localização das unidades (pontos claros) ricas em Al; (V) Localização das unidades (pontos claros) ricas em K;

5. CONCLUSÕES

A compilação e análise de todos os resultados geológico-metalúrgicos das unidades ferruginosas da Formação Puga, provaram a viabilidade tecnológica para o aproveitamento do bem mineral em questão. A caracterização e conhecimento geológico destes metadiamicritos serviram para contribuir com a otimização dos processos de beneficiamento e ensaios metalúrgicos. Grau exato de cominuição e o entendimento do comportamento de minérios em baixa escala granulométrica só foi possível graças ao entendimento e aparato das informações geológicas. Os ensaios para tratamento de minério foram realizados em escala de planta piloto, enquanto as atividades metalúrgicas compreenderam ensaios laboratoriais.

A área estudada situa-se nas proximidades de Bodoquena, Mato Grosso do Sul, no contexto da Formação Puga. Nas proximidades da Fazenda São Manoel as rochas desta formação constituem metadiamicritos de matriz ferruginosa gradando para uma formação ferrífera bandada (*BIF*). Possuem mergulho aparente entre 35-50° para leste, sobrepondo o Grupo Corumbá a oeste e em contato discordante erosivo a leste com o Grupo Cuiabá. Os metadiamicritos da Formação Puga são rochas xistosas, acinzentadas a esverdeadas, constituídas de matriz pelítica-ferruginosa muito fina e clastos mili a decimétricos de composição granítica-gnaissica. Matriz definida pela foliação granolepidoblástica constituída de muscovita, clorita e leitos ferruginosos (magnetita+hematita). Microscopicamente apresentam e textura alternando-se em leitos granoblásticos e leitos lepidoblásticos, matriz ferruginosa muito fina (0,03-0,01 mm) e clastos (0,1mm-0,5 mm) de composição variada (quartzo, pirita, carbonato, feldspato). A formação ferrífera preserva o bandamento composicional alternando porções laminadas micrométricas de quartzo e porções milimétricas ferruginosas (magnetita+hematita). A hematita é produto da martitização da magnetita. Quimicamente, os elevados valores, especialmente para metadiamicritos, de Zr (054-124 ppm), P_2O_5 (0,1%-1,4%), K_2O (0,6%-2,02%), MgO (0,2%-3,2%), Na_2O (0,4%-2,2%) e CaO (1,08%-7,4%) evidenciam contribuição detrítica na sedimentação.

O tratamento e beneficiamento do minério ocorreram após o reconhecimento, com auxílio de MEV, do grau de cominuição abaixo de 400 *mesh*. Apenas moagem abaixo desta faixa granulométrica foi capaz de liberar eficazmente o componente ferrífero de interesse (magnetita). Uma rota baseada em moagem e peneiramento a úmido, seguindo de separação magnética de baixa intensidade, também a úmida, e flotação reversa de coluna provaram a viabilidade técnica dos metadiamicritos de matriz ferruginosa, e da formação ferrífera associada, da Formação Puga. Moagem utilizando britadores de barras/bolas, peneiramento a úmido em peneiras vibratórias, separação

magnética em tambor de baixa intensidade (400-1300 gauss) e flotação reversa *Rougher*, *Cleaner* e *Recleaner* de coluna geraram um produto final com teores médios de Fe (t) igual a 64,86%, satisfatórios para as condições comerciais. Foi recuperado cerca de 75% do Fe contido, apresentando um produto final de baixo teor de P (0,01-0,04%), SiO_2 ($\pm 4,5$ %) e Al ($\pm 1,8$ %). Fases finais deste produto beneficiado, através de resultados de difratometria de raios-x, constituíram os minerais ferrosos (magnetita+hematita) e quartzo (SiO_2).

Os ensaios metalúrgicos consistiram nas atividades de pelletização, queima da pelota e redução carbotérmica. O estudo para redução do minério de ferro de Bodoquena mostrou-se eficaz em escala laboratorial (forno de resistência Brasimet K 400 e forno vertical Lindberg/Blue). A pelletização, etapa inicial, foi realizada sem a utilização de aglomerante químico. A baixa granulometria (400-600 *mesh*) propiciou a utilização apenas de água para formação dos núcleos aglomerantes da pelletização. As pelotas produzidas possuíam diâmetro médio entre 12-18 mm, 9% de umidade e, no caso das pelotas auto-redutoras, composição em 17% de coque de carvão mineral.

A queima das pelotas foi realizada com intuito de aumentar a resistência mecânica destas (sinterização). Ensaios a compressão mostraram que pelotas queimadas suportavam forças compressivas de até 8400 kgf (N). Isto ocorre devido a uma maior ligação entre partículas feríferas. Para redução, pelotas convencionais queimadas e cruas (não queimadas) sofreram tratamento térmico envolto por coque de carvão mineral a 1000° C, por 90 minutos. Pelotas auto-redutoras foram utilizadas para ensaios termogravimétricos a fim de testar a velocidade e como se processa a reação de redução. Ensaios termogravimétricos sugerem que as reações de redução são mais intensas nos primeiros 20 minutos de residência no forno, atingindo fração de reação (*fr*) de 0,6 e perda de 20% em peso das pelotas. Nota-se que após 40 minutos, o estado de equilíbrio é atingido, com pequena redução em peso e *fr* da ordem de 0,9.

Todas as pelotas obtiveram resultados expressivos e eficazes em termos de redução a ferro metálico. Pelotas convencionais não queimadas (cruas) expandiram-se e se tornaram mais porosas que as demais. Isto é explicado pela transformação mineral entre fases minerais com volume específico diferente, além de não se tratarem de pelotas previamente queimadas.

Resultados micrográficos e de MEV mostraram que ferro metálico perfaz a maior parte da composição das pelotas, ausência a pequena ocorrência de núcleos e porções de óxido de ferro não reduzido, estrutura tipo ferrita e fases contaminantes associadas entre si (Si, Al, K e O). Resultados de mapeamento RX-EDS (MEV) e por titulação mostraram que as pelotas possuem mais do que 85% de composição em Fe, não associado a O, provando mais uma vez o sucesso da redução do minério.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F. F. M. 1984. Província Tocantins- Setor Sudoeste. In: Almeida, F. F. M. & Hasui, Y. eds. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Ed Blücher. 265-281p.

Alvarenga, C.J.S. 1990. Phénomènes sédimentaires, structuraux et circulation de fluides développés à La transition chaîne-craton. Exemple de chaîne Paraguai d'âge protéroïque supérieur, Mato Grosso, Brésil. Thèse doct. Univ. Aix-Marseille III, France, 177 p.

Alvarenga, C.J.S. de & Trompette R. 1992. Glacially influenced sedimentation in the later Proterozoic of the Paraguay Belt (Mato Grosso, Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 92:85-105.

Alvarenga, C.J.S., Moura C.A.V., Gorayeb P.S.S., Abreu F.A.M. 2000. Paraguay and Araguaia belts. In.: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomas Filho, A., Campos, D.A. (eds). *Tectonic Evolution of South América*. 31st. International Geological Congress. Rio de Janeiro, p. 183-193.

Atsumi, E. T. 1999. Comportamento a quente de pelotas auto-redutoras de poeira de sinterização e de minério de ferro com variações do teor de aglomerantes. Monografia de Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP. 62p.

Babinski, M., Boggiani P. C., Trindade R. I. F., Fanning M. 2008. Datação U-Pb SHRIMP de zircões detríticos glaciais da Formação Puga, Faixa Paraguai Sul: qual a idade de deposição e de onde vem os sedimentos? In: Anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba-PR. p.11.

Chaves, A. P. 1996. Teoria e prática para o tratamento de minério. Signus, São Paulo, v.1, 1 ed., 233p..

Chaves, A. P. 2006. Teoria e prática para o tratamento de minério: britagem, peneiramento e moagem. Signus, São Paulo, v.3, 3 ed., 674p..

Chaves, A. P. 2006. Teoria e prática para o tratamento de minério: Flotação- O estado da Arte no Brasil. Signus, São Paulo, v.4, 1.ed, 444p.

Cloud, P. 1973. Paleoecological significance of the banded iron-formation. *Econ. Geol.*, 68: 1135-1143.

Davy, R. 1983. A contribution on the chemical composition of Precambrian Iron-formations. *In*: Trendall, A.F. & Morris, R.C. (eds.) *Iron Formation: Facts and Problems*. Amsterdam, Elsevier, 325-343.

Drummond, D. & Pereira P. G. 1890. Projeto Bodoquena: Aerogeofísica (análise e interpretação)". Ministério das Minas e Energia, Empresas Nucleares Brasileiras S.A. – NUCLEBRÁS / DEGE, Relatório de Fase, 35 p., Il., tab., perfis, mapas, Rio de Janeiro.

Duarte, T. G. 2009. Modelo Geológico-Estrutural de depósitos de ferro relacionados à Formação Puga, na região da Serra da Bodoquena, MS. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, USP. 48p.

Gross, G.A. 1980. A Classification of Iron-formation Based on Depositional Environments. *Canadian Mineralogist*, **18**: 215-222.

Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM 2010. Informações e análises da economia mineral brasileira – 5ª edição. Brasília.

James, H.L. 1954. Sedimentary facies of iron formation. *Economic Geology*, **49**: 235-293.

Longbottom, R. & Kolbeinsen, L. 2008. Iron ore Reduction with CO and H₂ Gas Mixtures – Thermodynamic and Kinetic Modelling. *In*: 4th ULCOS Seminar, Essen, p.:1-15.

Matsumura, T., Takenaka, Y., Shimizu, M., Negami, T., Kobayashi, J., Urugami, A. 1998. Direct production of molten iron from carbon composite iron pellet. *Revue de Metallurgie*, p.: 341-451.

Mourão, M. B. & Takano, C. 2003. Pelotas auto-redutoras para obtenção de ferro metálico: cinética e processamento. *In*: LVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Rio de Janeiro, p.: 15-29.

Nogueira, A. E. A. 2010. Estudo da redução carbotérmica de minérios de ferro na forma de pelotas ou misturas auto-redutoras em forno rotativo. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP. 154p.

Nogueira, A. E. A. 2005. Estudo do processo de redução e fusão de pelotas auto-redutoras de minério de ferro no intervalo de temperaturas entre 1573 K e 1673 K. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP. 99 p.

Piacentini, T. 2006. Caracterização da Formação Ferrífera Bandada associada à Formação Glacial Puga na Região de Bodoquena- MS. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, USP. 58p.

Piacentini, T., Boggiani P. C., Yamamoto J. K., Freitas B. T., Campanha G. A. C. 2007. Formação Ferrífera associada à sedimentação glaciogênica da Formação Puga (Marioniano) na Serra da Bodoquena, MS. *Revista Brasileira de Geociências*, **37** (3): 530-541.

Piacentini, T. 2008. A Formação Ferrífera da Formação Puga: Avaliação Regional dos Recursos da Serra da Bodoquena, MS. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, USP. 65p.

Rampazzo, G. J. 2007. Avaliação dos recursos minerais de ferro associados aos metadiamicritos da Formação Glacial Puga na região de Bodoquena-MS. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, USP. 50p.

Santos, D. M. 2002. Auto-redução & Fusão-redução de pelotas contendo óxidos de ferro. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP. 169p.

Svoboda, J. 1987. *Magnetic Methods for Treatment of Minerals*. Elsevier, New York, v. 8, ed. 1, 692p.

Trendall, A.F. 2002. The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *In: Precambrian Sedimentary Environments: A Modern Approach to Ancient Depositional Systems*. Special Publication n.33 of the IAS, (W. Alteramann and P. L. Corcoran eds.), Blackwell Science, p.33-66.

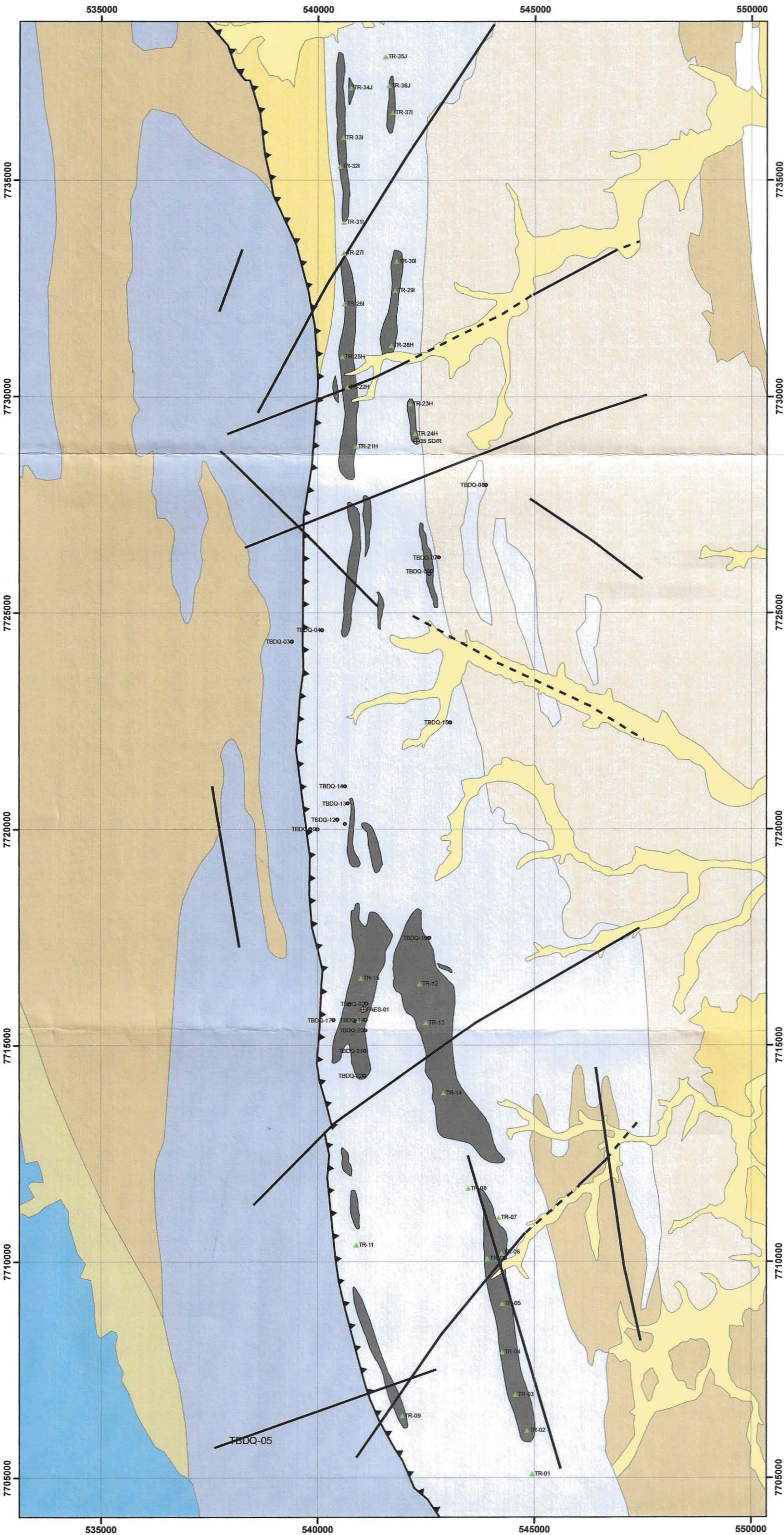
Trompette, R. 2000. Gondwana evolution; its assembly at around 600 Ma. *Academie Des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes/Earth and Planetary Sciences*, **330**: 305-315.

Zaine, M. F. 1991. Análise dos fósseis de parte da Faixa Paraguai (MS, MT) e seu contexto temporal e paleoambiental. Tese de Doutorado, IG-USP.

ANEXO 1

**Mapas (geológico e topográfico) de pontos,
trincheiras e furos de sondagem;**

MAPA GEOLÓGICO REGIONAL COM PONTOS DE CAMPO, TRINCHEIRAS E SONDAGENS



- CENOZÓICO**
- Aluvião, areias, argilas e cascalhos
- NEOPROTEROZÓICO**
- Grupo Corumbá**
- Formação Bocaina: mármore dolomítico, estromatolítico, com laminações algáceas fosfatizadas, brecha carbonática
 - Formação Cerradinho: paraconglomerados, arcócio, arenito com lâminas de argilito, folhelho com intercalações de calcário
- Formação Puga**
- Metadiamiclitos e paraconglomerados com blocos e seixos de quartzito, calcário, gnaiss, anfibolito, granito, mili a decimétricos, caoticamente dispersos em matriz silto-arenosa com clorita e sericita
 - Subunidade com enriquecimento da matriz em ferro, contendo porções altamente concentradas, finamente laminadas, formação ferrífera
- Grupo Cuiabá**
- Mármore calcíticos e dolomíticos, por vezes intraclásticos, com metabrechas calcárias
 - Filitos, por vezes quartzíticos, e raramente conglomeráticos
 - Sericita xisto, muscovita-quartzito xisto e clorita xisto
 - Quartzitos e metarenitos

- Falha inversa e/ou empurrão inferido
- Lineamento
- Lineamento inferido

- Trincheiras
- Sondagens
- Pontos de campo

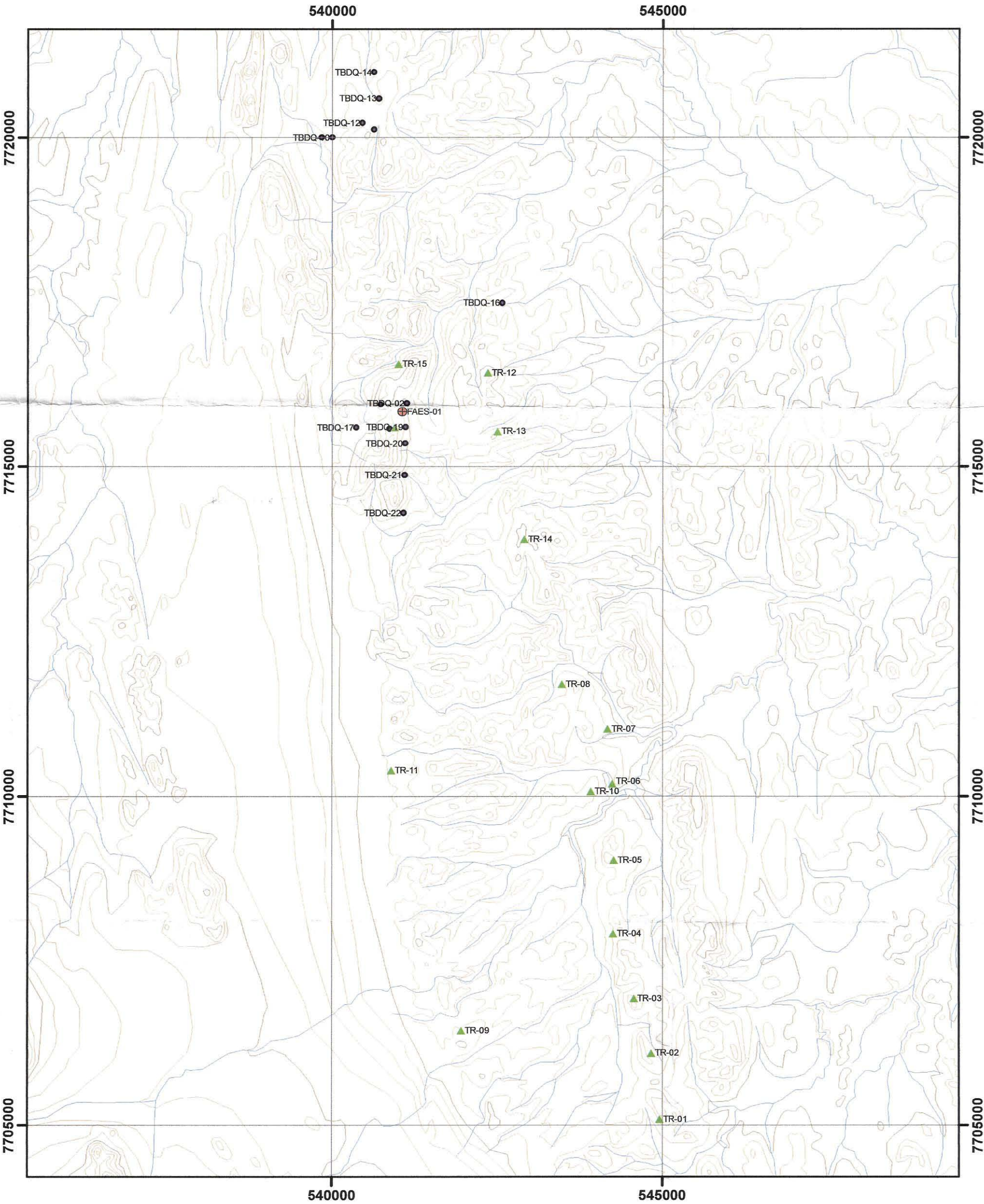
0 0,5 1 2 3 4 5 km
ESCALA 1:75.000



Compilação de dados geológicos da dissertação de Mestrado "A formação ferrífera da Formação Puga: avaliação regional dos recursos da Serra da Bodoquena, MS" (Piacentini, 2008)

PROJEÇÃO	UTM	UF	MS
ELIPSÓIDE	HAYFORD 1910	MUNICÍPIOS	BODOQUENA / BONITO
MERIDIANO CENTRAL	-57		
ZONA	21		
DATUM	SAD 69		

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CAMPO, TRINCHEIRAS E SONDAGENS



- ▲ Trincheiras
- ⊕ Sondagens
- Pontos de campo

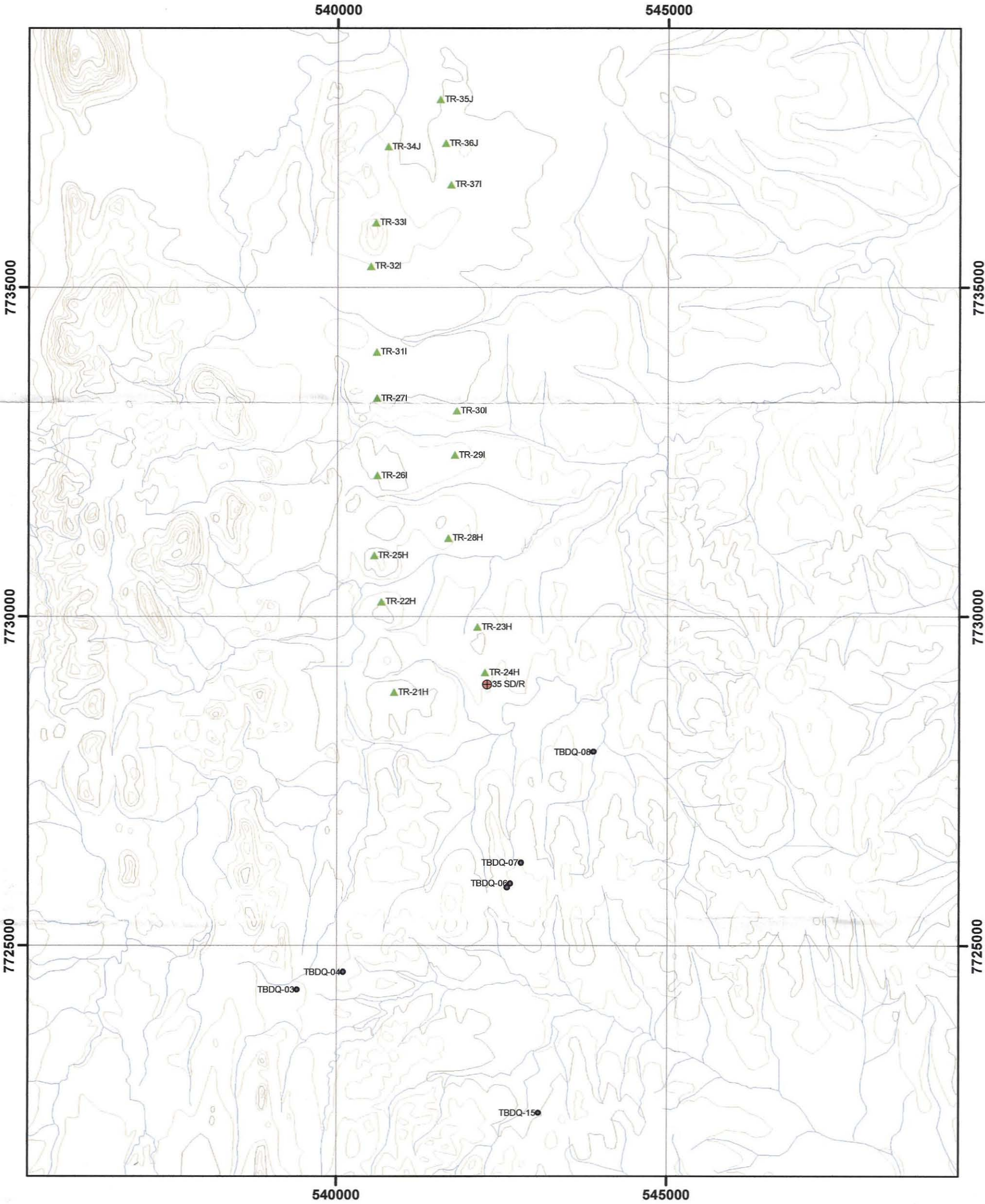


ESCALA 1:75.000

Planimetria obtida através de originais cartográficos em escala 1:50000, editados pelo Serviço Geográfico do Exército, em 1969 / 73 / 74, folhas SF.21 - X - A - IV - 2 (Bodoquena) e SF.21 - X - A - I - 4 (Córrego Potreiro). Compilação de dados geológicos do Projeto Bodoquena DNPM/CPRM, 1978, Folhas Bodoquena e Córrego Potreiro.

PROJEÇÃO	UTM	UF	MS
ELIPSÓIDE	HAYFORD 1910	MUNICÍPIOS	BODOQUENA / BONITO
MERIDIANO CENTRAL	-57		
ZONA	21		
DATUM	SAD 69		

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CAMPO, TRINCHEIRAS E SONDAGENS



- ▲ Trincheiras
- ⊕ Sondagens
- Pontos de campo



ESCALA 1:75.000

Planimetria obtida através de originais cartográficos em escala 1:50000, editados pelo Serviço Geográfico do Exército, em 1969 / 73 / 74, folhas SF.21 - X - A - IV - 2 (Bodoquena) e SF.21 - X - A - I - 4 (Córrego Potreiro). Compilação de dados geológicos do Projeto Bodoquena DNPM/CPRM, 1978, Folhas Bodoquena e Córrego Potreiro.

PROJEÇÃO	UTM	UF	MS
ELIPSÓIDE	HAYFORD 1910	MUNICÍPIOS	BODOQUENA / BONITO
MERIDIANO CENTRAL	-57		
ZONA	21		
DATUM	SAD 69		

TITULO

ANEXO 2**Log dos furos de sondagem;**

SONDAGEM FAES-01

COORDENADAS (zona 21K):

N = 7715837

E = 541058

PROF. (m) PERFIL GEOL. LITOLOGIA

UNIDADE GEOLÓGICA

1.05 Nivel intemperizado friável, sericítico a ferruginoso, com baixa susceptibilidade magnética.

4.02 Formação ferrífera (BIF) pouco friável, finamente laminada a bandada, castanha-avermelhada, composta por quartzo alternando leitos ferrosos (mg+hem). Moderada susceptibilidade magnética. **BDQ-1A e 1B**

15,20 Rocha xistosa acinzentada coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina, caracterizada por uma matriz pelítica-ferruginosa suportando clastos mili a centimétricos quartzo-graníticos. Presença de leitos quartzosos milimétricos. Moderada susceptibilidade magnética. Por vezes esta matriz concentra leitos granoblásticos ferruginosos (magnetita) gradando para uma formação ferrífera bandada.

25,50 Rocha xistosa cinza-esverdeada coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina, caracterizada por uma matriz pelítica-ferruginosa suportando clastos mili a centimétricos quartzo-graníticos, por vezes rotacionados. A foliação encontra-se crenulada. Forte susceptibilidade magnética. Próxima a base desta camada nota-se uma porção menos coesa caracterizada por venulações de quartzo deformadas. **BDQ-03**

31,50 Rocha xistosa cinza claro coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina caracterizada por uma matriz pelítica-ferruginosa. Clastos mili a centimétricos quartzo-graníticos perfazem até 12% da rocha. Forte susceptibilidade magnética. Presença de venulações carbonáticas milimétricas.

44,30 Rocha xistosa cinza-esverdeada coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina caracterizada por uma matriz pelítica-ferruginosa suportando clastos mili a centimétricos granítico-gnaissicos. Estes clastos apresentam-se mais estirados e menos arredondados perfazendo até 17% da rocha. Fortíssima susceptibilidade magnética. Presença de níveis sulfetados de granulação fina e leitos quartzosos recristalizados. **BDQ-09**

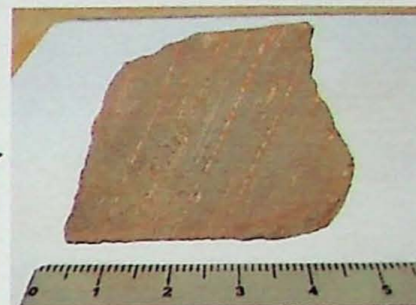
51,70 Rocha xistosa cinza claro coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina. Matriz pelítica-ferruginosa suportando até 15% de clastos mili a decimétricos granítico-gnaissicos. Fortíssima susceptibilidade magnética. Presença de níveis sulfetados de granulação fina e leitos quartzosos recristalizados.

69,00 Rocha xistosa cinza-esverdeada coesa, granolepidoblástica, granulação muito fina. Matriz pelítica-ferruginosa, por vezes crenulada, suportando até 10% de clastos mili a centimétricos quartzo-graníticos. Os clastos são moldados por leitos escurecidos de composição ferruginosa (magnetita). Fortíssima susceptibilidade magnética. Presença de níveis sulfetados de granulação fina associados a níveis estirados de quartzo recristalizado. **BDQ-17A**

81,10 Rocha xistosa acinzentada coesa, granolepidoblástica de granulação muito fina. Matriz pelítica-ferruginosa, por vezes crenulada com clorita e muscovita associadas a esta fase. Apresenta até 18% de clastos mili a decimétricos granítico-gnaissicos. Os clastos encontram-se estirados, com sombra de pressão. Suceptibilidade magnética moderada a forte. Presença de níveis sulfetados de granulação muito fina a fina, com distinção de pirita. **BDQ-17B**

Metadiamicitite de matriz ferruginosa

FORMAÇÃO PUGA



Amostra difração raios-x : **BDQ-17B**

SONDAGEM 35 SD/R

COORDENADAS (zona 21k):

N = 542277

E = 7728975

PROF. (m)	PERFIL GEOL.	LITOLOGIA	UNIDADE GEOLÓGICA
0,90		Solo argiloso (óxido de ferro e sericita) que sugere mistura das bandas de BIF pré-existentes.	FORMAÇÃO PUGA
7,68		Formação ferrífera (BIF) com alta susceptibilidade magnética, composta de quartzo, magnetita e muscovita.	
15,75		Muscovita sericita xisto, com textura lepidoblástica, em contato abrupto com as camadas adjacentes. Composto de muscovita, sericita, quartzo, clorita.	
24,73		Formação ferrífera (BIF) com alta susceptibilidade magnética, composta de quartzo, magnetita, hematita e muscovita.	
33,00		Rocha de matriz micácea a pouco ferruginosa com porfiroclastos granoblásticos de composição granítica. A matriz é composta de muscovita, clorita, quartzo e magnetita.	
40,00		Rocha xistosa de matriz pelítica-ferruginosa, textura lepidoblástica, com porfiroclastos quartzosos. Matriz composta de clorita e muscovita, e leitos granoblásticos magnetíticos.	
44,30		Rocha de matriz micácea a pouco ferruginosa com porfiroclastos granoblásticos de composição granítica. A matriz é composta de muscovita, clorita, quartzo e magnetita.	

Metadiamicito de
matriz ferruginosa



SONDAGEM 13 SA

COORDENADAS:

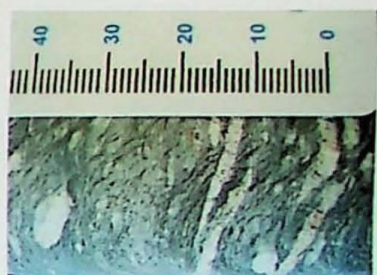
N = -

E = -

PROF. (m)	PERFIL GEOL.	LITOLOGIA	UNIDADE GEOLOGICA
		Solo intemperizado de origem pelítica sem estruturas primárias preservadas.	
4,60		Metadiamiclito de matriz pouco ferruginosa com presença de clastos e leitos quartzo-graníticos estirados a deformados perfazendo até 10% da rocha. Concentração de leitos magnetíticos ocorrem próximo as bordas dos leitos e clastos.	
8,60		Metadiamiclito de matriz pouco ferruginosa fortemente fragmentado e com baixa susceptibilidade magnética (diminuição em leitos magnetíticos). Clastos graníticos apresentam-se, por vezes, rotacionados com sombras de pressão assimétricas.	
14,00		Metadiamiclito com matriz de composição pelítica-ferruginosa com moderada susceptibilidade magnética. Clastos graníticos mili a centimétricos perfazem até 15% da rocha. Presença de níveis milimétricos de material terroso/argiloso e leitos decimétricos de quartzo recristalizado de granulação grossa.	
17,40		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com forte susceptibilidade magnética. Clastos e leitos quartzosos deformados perfazem até 20% da rocha. Foliação por vezes encontra-se crenulada a anastomosada e há ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1% da rocha).	
23,45		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com forte susceptibilidade magnética. Clastos e leitos quartzosos deformados chegam a dimensões de até 8 cm. Nota-se a ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1% da rocha) e venulações de calcíticas cortando as estruturas primárias da rocha.	
29,45		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com forte susceptibilidade magnética. Clastos e leitos quartzosos deformados perfazem até 15% da rocha. Foliação por vezes encontra-se crenulada a anastomosada e há ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1% da rocha).	
36,95		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos quartzo-graníticos deformados.	
44,45		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos quartzo-graníticos deformados. Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
50,45		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos quartzo-graníticos decimétricos. Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
57,00		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos quartzo-graníticos decimétricos. Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
62,80		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos graníticos deformados (perfazendo até 17% da rocha). Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
68,20		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos graníticos deformados (perfazendo até 17% da rocha). Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
74,77		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado. Clastos e leitos decimétricos graníticos deformados a estirado, perfazendo até 15% da rocha. Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
80,77		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos graníticos deformados (perfazendo até 15-20% da rocha). Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
85,77		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos graníticos deformados (perfazendo até 17% da rocha). Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos.	
90,77		Metadiamiclito de matriz ferruginosa com ocorrência de sulfeto disseminado (aprox. 1 % da rocha) em associação com clastos e leitos graníticos deformados (perfazendo até 17% da rocha). Concentração de minerais magnéticos nas bordas dos leitos e clastos descritos. nível métrico de granito com presença cristais grosso de quartzo e feldspato alcalino.	

Metadiamiclito de matriz ferruginosa

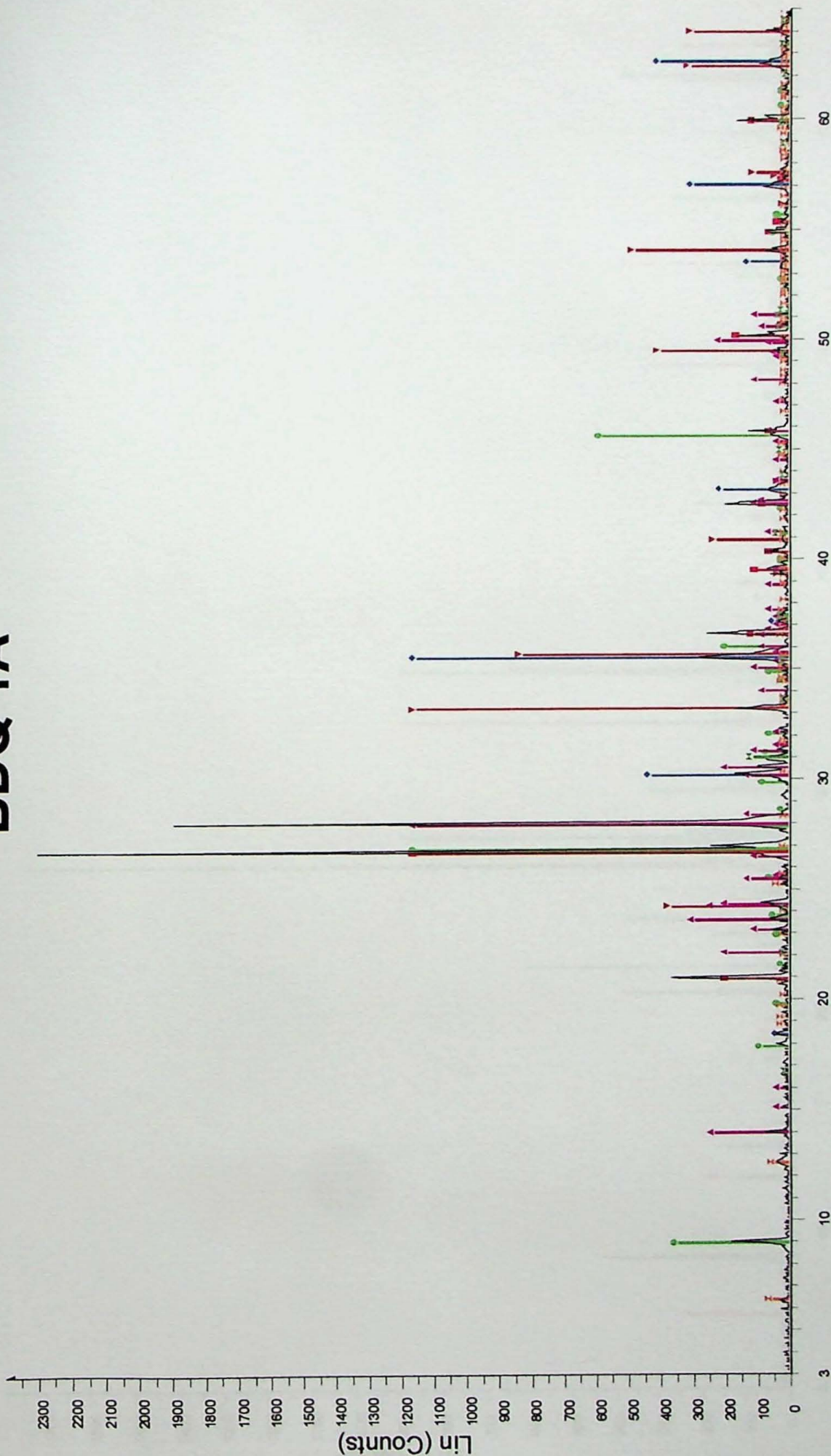
FORMAÇÃO PUGA



ANEXO 3

Difratogramas de raios-x;

BDQ 1A



BDQ-1B-levé - File: BDQ-1B-levé.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.05 [01-089-5862 (A) - Dolomite - CaMg(CO₃)₂

Operations: Background 1,000,1,000 | Import

00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO₂

01-071-6449 (*) - Magnetite, titanian - Fe(Fe_{1.17}Ti_{0.54})O₄

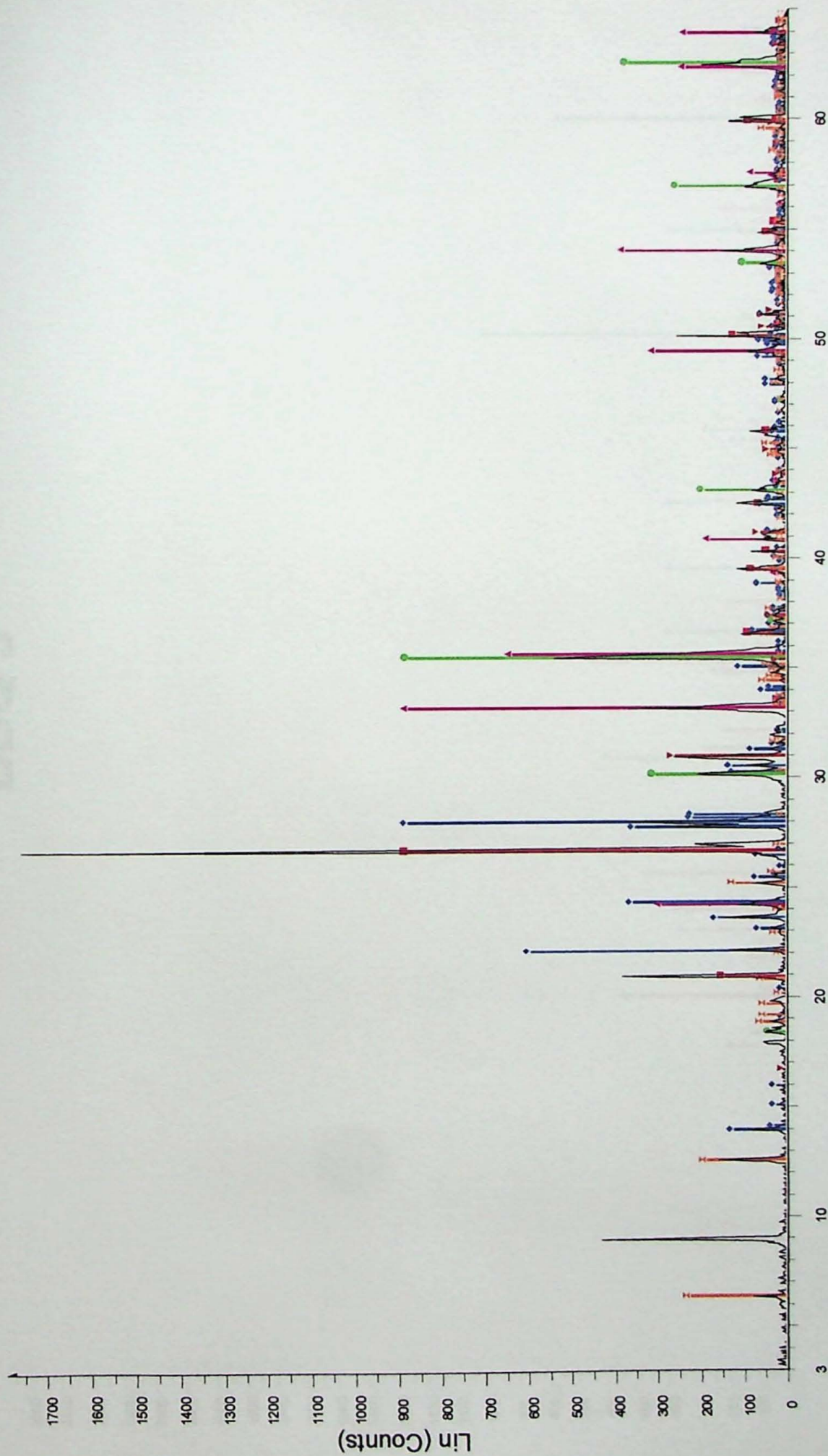
01-087-1165 (D) - Hematite - Fe₂O₃

00-046-1409 (I) - Muscovite-2M1, vanadian barian - (K,Ba,Na)_{0.75}(Al,Mg,Cr,V)₂(Si,Al)₄H₄O₁₀(OH,O)₂

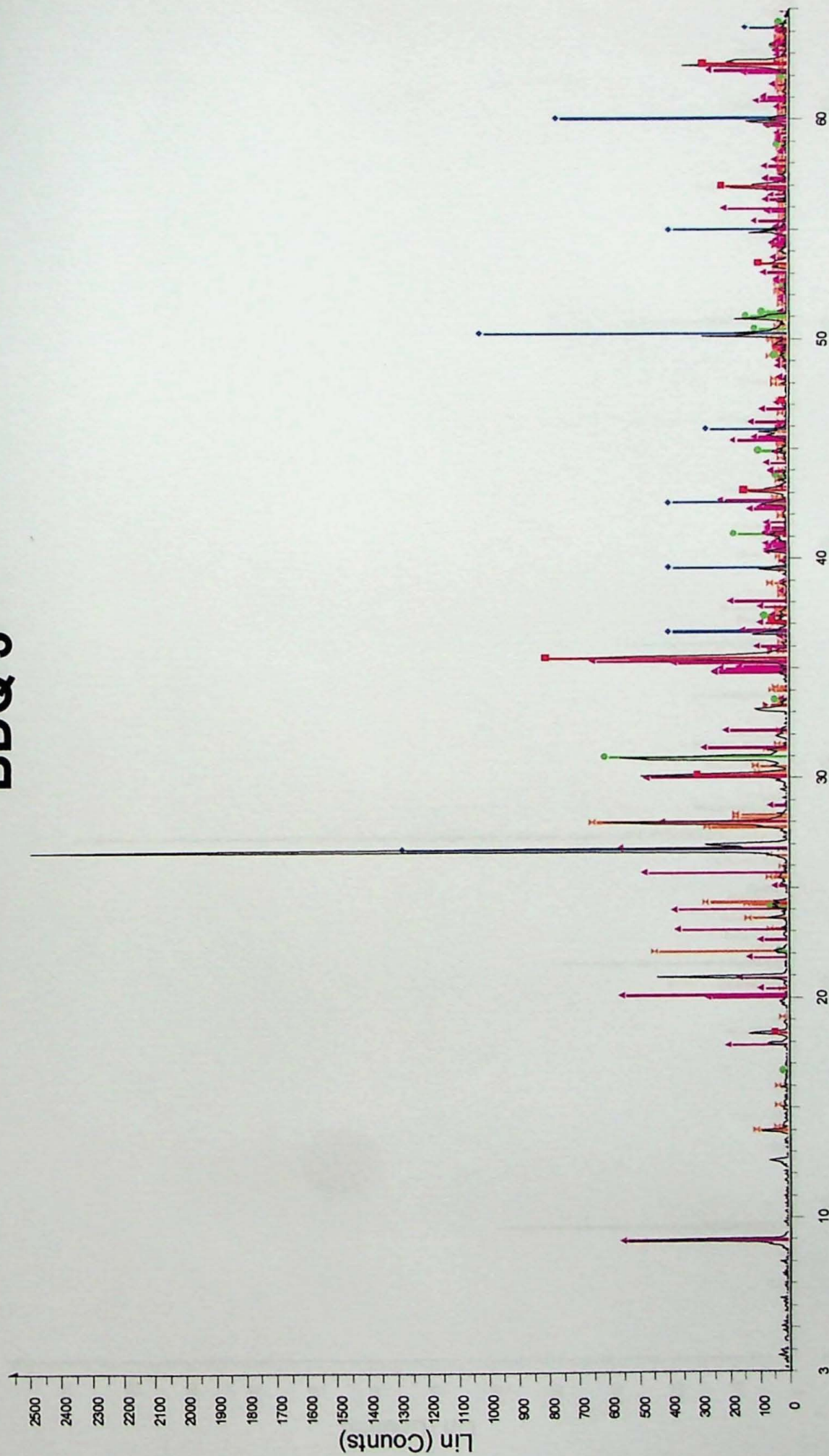
00-009-0466 (*) - Albite, ordered - NaAlSi₃O₈

01-089-2972 (A) - Clinocllore 1Mla - Mg_{2.5}Fe_{1.65}Al_{1.5}Si_{2.2}Al_{1.8}O₁₀(OH)₈

BDQ 1B



BDQ 3



2-Theta - Scale

BDQ-3-pesado - File: BDQ-3-pesado RAW - Type: 2Th/Th locked - Start 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time 5. s

Operations: Background 1,000,1,000 | Import

01-070-8131 (*) - Magnetite, zindian, syn - (Fe_{0.6}Zn_{0.4})(Fe_{1.4}Ni_{0.2}Mg_{0.4})O₄

01-070-3752 (I) - Albite - (Na_{0.98}Ca_{0.02})(Al_{1.02}Si_{2.98}O₈)

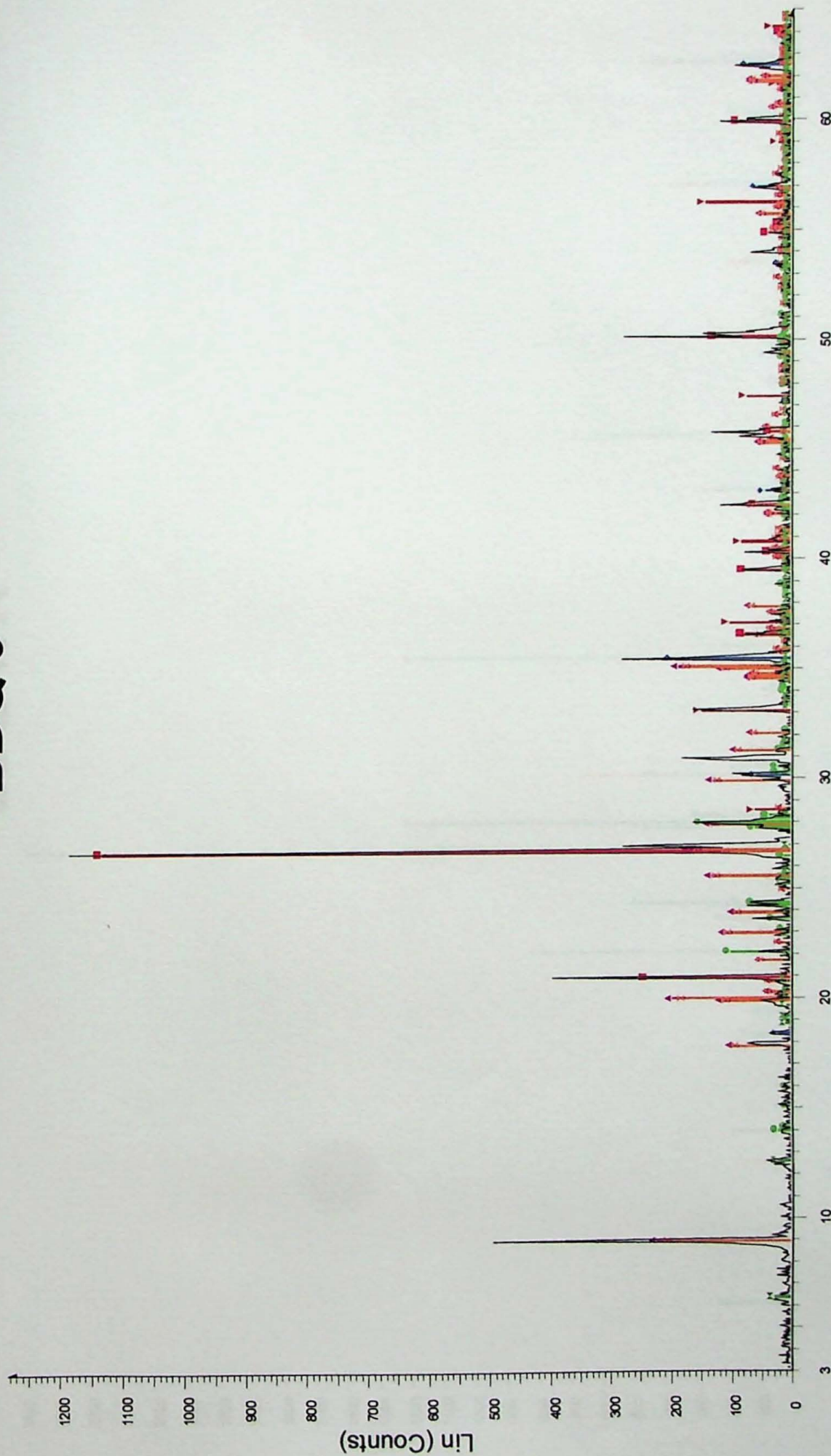
01-074-7799 (*) - Dolomite - Ca(Ca_{0.08}Mg_{0.92})(CO₃)₂

00-002-0471 (D) - Quartz - SiO₂

01-084-1304 (A) - Muscovite-2M1 - KAl₃(Si₃O₁₀)(OH)₂

01-089-8104 (A) - Hematite, syn - Fe₂O₃

BDQ 9



2-Theta - Scale

BDQ-9-pesado - File: BDQ-9-pesado.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.01 ° - 01-089-2972 (A) - Clinoclare 1Mla - Mg2.5Fe1.65Al1.5S2.2Al1.8O10(OH)8

Operations: Background 1.000, 1.000 | Import

01-079-1910 (*) - Quartz, syn - SiO2

01-070-3752 (I) - Albite - (Na0.98Ca0.02)(Al1.02Si2.98O8)

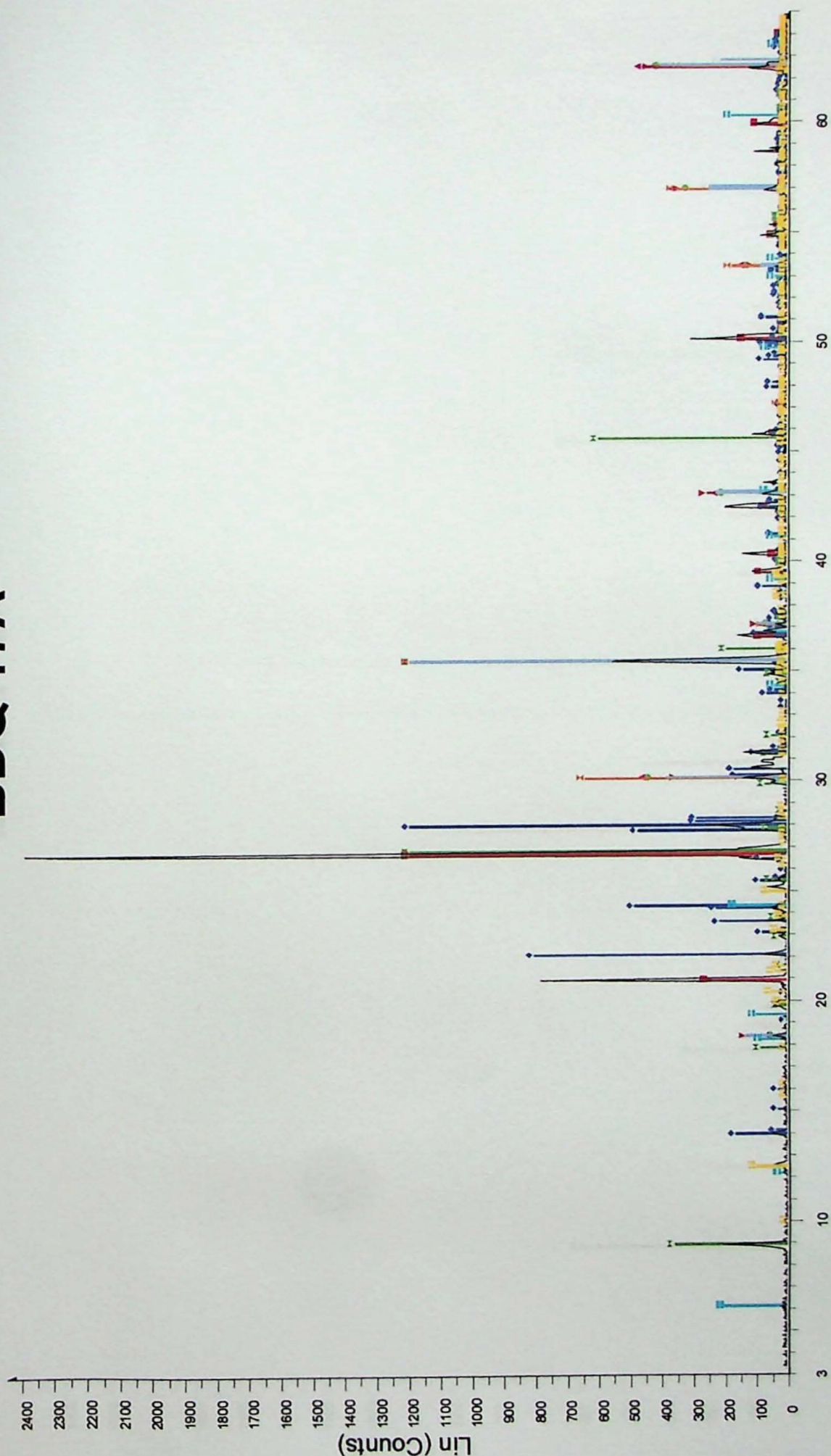
01-086-1344 (*) - Magnetite - Fe2.946O4

01-089-8216 (N) - Muscovite-2M1 - (K0.727Na0.170Ca0.011)(Al0.933Fe0.016Mg0.011)2(Si0.782Al0.221

03-065-3321 (A) - Pyrite, syn - FeS2

01-089-8216 (N) - Muscovite-2M1 - (K0.727Na0.170Ca0.011)(Al0.933Fe0.016Mg0.011)2(Si0.782Al0.221

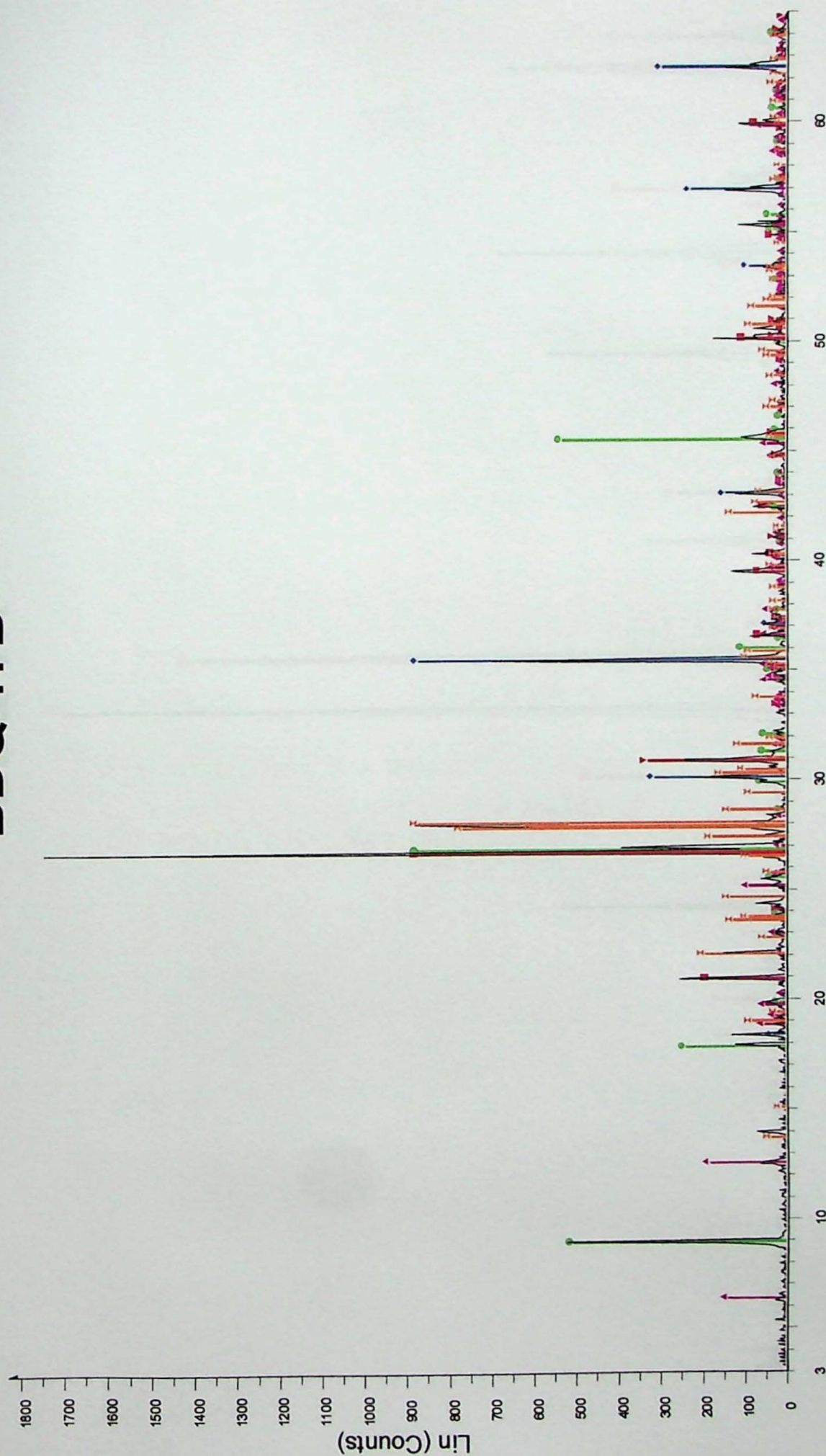
BDQ 17A



2-Theta - Scale

- BDQ-17-leve - File: BDQ-17-leve RAW - Type: 2Th/Tn locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050
 Operations: Background 1.000, 1.000 | Import
- 01-078-1910 (*) - Quartz, syn - SiO₂
 - 01-070-3752 (I) - Albite - (Na_{0.98}Ca_{0.02})(Al_{1.02}Si_{2.98}O₈)
 - 01-070-8131 (*) - Magnetite, Zindan, syn - (Fe_{0.62}Zn_{0.4})(Fe_{1.4}Ni_{0.2}Mg_{0.4})O₄
 - 01-088-2182 (*) - Magnetite - Mg_{0.64}Fe_{2.36}O₄
 - 01-086-1344 (*) - Magnetite - Fe_{2.946}O₄
 - 01-086-2250 (I) - Cadmium Zinc Iron Oxide - Cd_{0.75}Zn_{0.25}Fe₂O₄
 - 01-078-0955 (N) - Iron Oxide - Fe₃O₄
 - 00-046-1409 (I) - Muscovite-2M1, vanadate barian - (K,Ba,Na)_{0.75}(Al,Mg,Cr,V)₂(Si,Al)₄O₁₀(OH,₂O)₂
 - 00-013-0086 (N) - Saponite-15A - Mg₃(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·4H₂O
 - 01-080-0886 (I) - Kaolinite-1A - Al₂(Si₂O₅)(OH)₄

BDQ 17B



2-Theta - Scale

BDQ-17-pesado - File: BDQ-17-pesado.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 5. s

Operations: Background 1,000,1,000 | Import

01-079-1910 (*) - Quartz, syn - SiO₂

01-070-8131 (*) - Magnetite, zindan, syn - (Fe_{0.6}Zn_{0.4})(Fe_{1.4}Ni_{0.2}Mg_{0.4})O₄

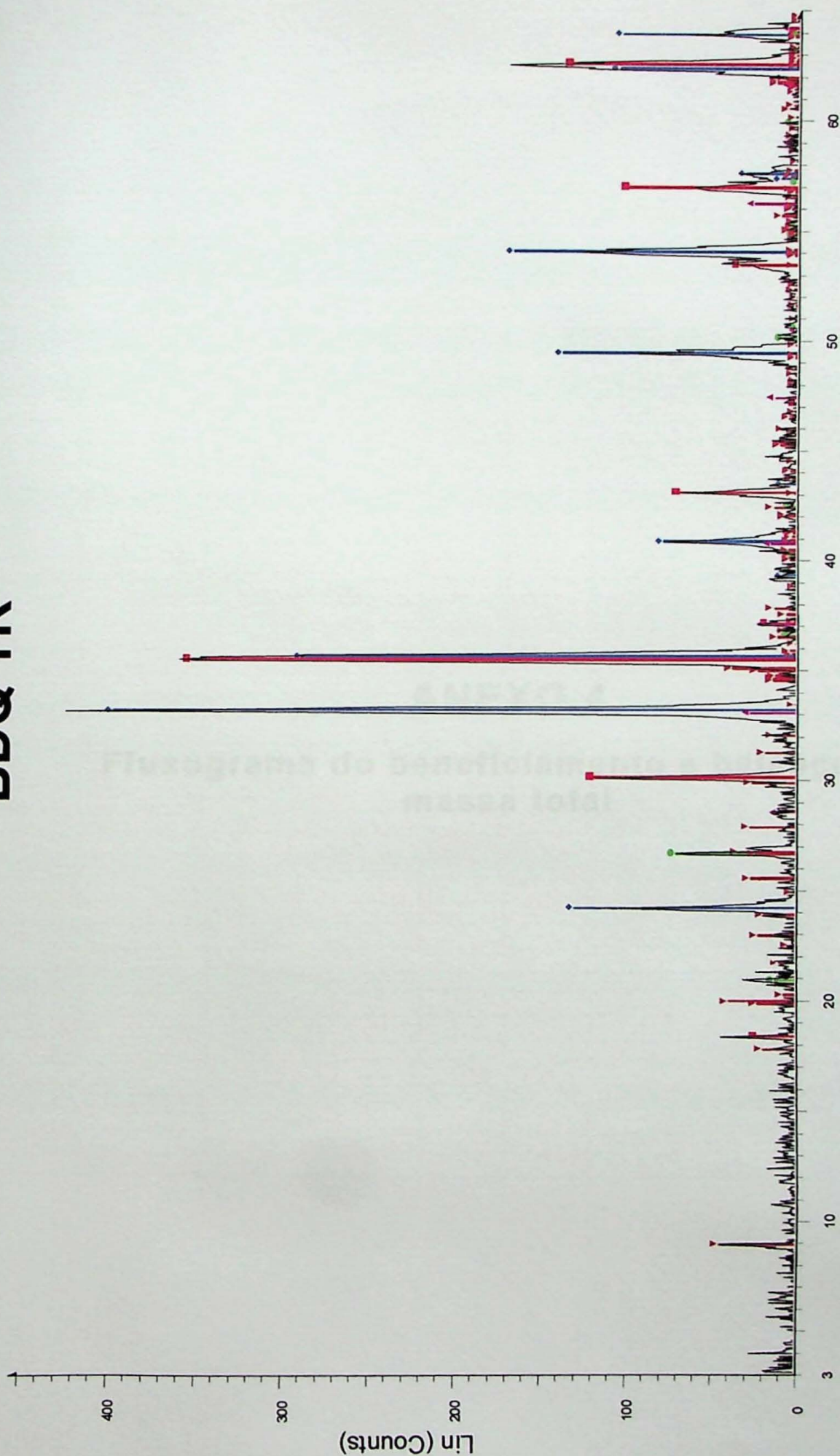
00-058-2034 (I) - Muscovite-2M1 - KAl₂(Si₄Al₁O₁₀(OH)₂

01-079-1270 (I) - Clinocllore - (Mg_{2.96}Fe_{1.55}Fe_{1.36}Al_{1.27})(Si_{2.62}Al_{1.37})(OH)₈

00-034-0517 (D) - Dolomite, ferroan - Ca(Mg,Fe)(CO₃)₂

00-041-1486 (*) - Anorthite, ordered - CaAl₂Si₂O₈

BDQ TR



2-Theta - Scale

BDQ-TR1 - File: BDQ-TR1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 5. s

Operations: Background 1,000,1,000 | Import

- 01-071-5088 (*) - Hematite, syn - Fe₂O₃
- 01-080-0390 (*) - Magnetite - Fe_{0.85}Fe_{1.81}Mg_{0.42}Al_{1.1}Ti_{0.3}O₄
- 03-065-0466 (A) - Quartz low, syn - O₂Si
- 03-065-3321 (A) - Pyrite, syn - FeS₂
- 01-089-6216 (N) - Muscovite-2M1 - (K_{0.727}Na_{0.170}Ca_{0.011})(Al_{0.933}Fe_{0.016}Mg_{0.011})₂(Si_{0.782}Al_{0.221})Ti

BALANÇO DE MASSA TOTAL

ANEXO 4

Fluxograma do beneficiamento e balanço de massa total

BALANÇO DE MASSA FINAL

Etapas de Processo				Peso	% dist peso	% Fe	Fe cont	% dist Fe
Alíquota Processo				50,00	100,00	23,89	23,89	100,00
Total				50,00			23,89	
I- Britador a úmido de Barras Bolas				50,00	100,00	23,89	28,00	100,00
II- Peneiramento a úmido malha 400#				50,00		23,89		
Fração < 400#				45,00	90,00	23,89	21,50	89,98
Fração > 400#				5,00	10,00	23,94	2,39	10,02
Total				50,00	100,00		23,90	100,00
III- Separação Magnética Tambor Baixa Intensidade				45,00	100,00	23,89	23,89	100,00
Magnético 400 gauss				3,05	6,77	46,05	3,12	13,05
Magnético 800 gauss				5,31	11,77	55,34	6,51	27,26
Magnético 1300 gauss				5,84	12,95	48,00	6,21	26,01
Não-Mag. Baixa intensidade				1,50	3,33	44,71	1,49	6,22
Over-flow				29,40	65,19	10,06	6,56	27,45
Total				45,10	100,00		23,89	100,00
Total Magnético				14,20				
IV- Desmagnetizar				14,20		50,33		
V- Flotação Rougher				14,20		50,33		
Flotado Rougher				4,23	29,81	37,91	11,30	21,71
Afundado Rougher				9,97	70,19	58,06	40,75	78,29
Total				14,20	100,00		52,05	100,00
VI- Flotação Cleaner				9,97		58,06		
Flotado Cleaner				4,78	47,95	53,74	25,77	43,53
Afundado Cleaner				5,19	52,05	64,22	33,43	56,47
Total				9,97	100,00		59,20	100,00
VII- Flotação Recleaner				5,19		64,22		
Flotado Recleaner				2,02	38,95	57,00	22,20	35,92
Afundado Recleaner				3,17	61,05	64,86	39,60	64,08
Total				5,19	100,00		61,80	100,00
VIII Flotação Scavenger				4,23		37,91		
Flotado Scavenger				0,73	17,24	24,89	4,29	10,83
Afundado Scavenger				3,50	82,76	42,71	35,35	89,17
Total				4,23	100,00		39,64	100,00

DOAÇÃO _____
<i>IGC-USP</i>
Data: <i>02/02/52</i>

FLUXOGRAMA PREPARAÇÃO

