

TF
R696
R.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO RECURSO DE FERRO DA
FORMAÇÃO PUGA NA REGIÃO DE BODOQUENA – MS.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Co-orientadora: Dr. Maria Manuela Tassinari

Aluno: Rafael Rodrigues

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF/09-23)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900026797

SÃO PAULO

2009

TF
R696
R.C



*Dedico este trabalho aos meus pais,
Valdemir Augusto Rodrigues e
Ondina Dota Rodrigues*

Agradecimentos

Este trabalho pôde se concretizar não só pelo esforço dedicado ao longo do último ano de graduação, mas também pela superação dos obstáculos encontrados em cada etapa vivenciada até o momento e as amizades firmadas ou realizadas.

Agradeço à Empresa de Mineração Horii Agroindustrial de Minérios Ltda, na pessoa de Kazuto Horii, pelo estágio concedido e custeio das atividades de mapeamento e amostragem envolvidas. Aos funcionários Lenier, Hélio e Simei que tiveram especial atenção com a logística envolvida na pesquisa mineral, assim como os queridos companheiros Bodoquenenses Tonhão, Claudião, "seu" Adelino, Bel, e tantos outros que tive a felicidade de conhecer e trabalhar junto.

Ao Professor Jorge Kazuo Yamamoto pela orientação e confiança depositada neste projeto.

À Dra. Maria Manuela Maia Lé Tassinari co-orientadora, a qual se mostrou muito atenciosa e paciente por todo o estudo de caracterização tecnológica.

Agradeço ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP (LCT-EPUSP) pela disponibilidade de equipamentos e de sua equipe técnica (os geólogos(as) Juliana, Daniel e André, químicos(a) Giuliana e Freud e os técnicos Ailton, Erílio, Juscelino, Rafão, Vavá, etc).

Agradeço especialmente a Talitha Guerrero Duarte pela compreensão e amizade, sem a qual meus caminhos não seriam os mesmos.

Aos amigos geológicos Amadeu (boquetero), Marcelo (troxa), Matheus (saidera) Cezinha (fechadura), Viviane (jebinha), Paulo (potranca) e ao pessoal da saudosa república "Casa da Arvóre", Balan, Zé, Osama, Baby.

Por fim a todos que de forma direta ou indireta contribuíram em minha formação.

Obrigado!

Resumo

Na região da Serra da Bodoquena - MS ocorrem os metadiamictitos da Formação Puga, os quais apresentam porções mineralizadas em ferro, objeto de estudo do presente trabalho.

Realizou-se o mapeamento geológico de uma área de aproximadamente 40 km² requerida para pesquisa mineral de ferro, sendo identificadas suas principais unidades constituintes, além de suas formas e distribuições em superfície.

Foram identificadas no mapeamento duas unidades mineralizadas que ocorrem como corpos alongados, de direção N-S e com larguras geralmente inferiores a 1 km. Estas unidades foram amostradas através da abertura de trincheiras realizadas no local, perpendiculares à estruturação geral observada e forneceram o material representativo para os estudos subsequentes de caracterização tecnológica.

Estas amostras foram nomeadas pela sigla MF e FC correspondentes às suas unidades.

Os estudos de caracterização realizados tiveram por objetivo avaliar a possibilidade de obtenção de produtos enriquecidos em ferro de acordo com as especificações usuais de mercado. Para tal, foram executadas comunições nas diversas granulometrias de produtos para a indústria siderúrgica, seguidas de classificações granulométricas e separações minerais em escala de bancada. Dentre as principais técnicas analíticas envolvidas destacam-se as identificações mineralógicas realizadas por difração de raios X (*DRX*) e os estudos relativos às associações minerais e de microanálises químicas, efetuados por microscopia eletrônica de varredura (*MEV/EDS*).

Após os ensaios de beneficiamento verificou-se a possibilidade de geração de um produto final com teor médio de ferro de 25% (42% de sílica e 0,18% de P) para a amostra MF e de um produto final com teor médio de 55% de ferro (18,6% de sílica e 0,12% de P) para a amostra FC.

Abstract

In the region of the mountain range of the Bodoquena-MS there are metadiamictites of the Puga Formation, which present mineralized amounts of iron, object of study of the present work.

It was carried out the geological mapping of an area of about 40 km², required for mineral research of iron, such that it was identified not only its main constituent units but also its shapes and distributions on surface.

Two mineralized units that occur as elongated bodies, in the N-S direction had been identified in the mapping - with widths usually inferior to 1 km. These units have been showed through the trench opening carried out in the place, perpendicular to the observed general structure and provided the representative material to the subsequent studies of technological characterization.

These samples had been nominated by corresponding acronym MF and FC to its units.

The studies of characterization had the purpose of evaluating the possibility of obtaining products enriched by iron according to the usual market specifications.

In order to this, reduction in the different size of products for the Steel Industry has been executed, followed of grain sized classifications and mineral separations in group of benches scale. Among the main involved analytical techniques are the mineralogical identifications done through X-rays diffraction (DRX) and the studies related to the mineral associations and chemical microanalyses, carried out by scanning electron microscope (MEV/EDS).

After improvement assays it was verified possibility of generation of an end item with average contents of iron of 25% (42% of silica and 0.18% of P) in sample MF and of an end item with average contents of 55% of iron (18.6% of silica and 0.12% of P) in sample FC.

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS.....	VII

ÍNDICE

1. APRESENTAÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. JUSTIFICATIVAS.....	3
4. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	5
5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	6
5.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	6
5.2. GEOLOGIA LOCAL.....	8
5.3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	9
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
6.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO	13
6.2. AMOSTRAGEM.....	14
6.3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	16
7. ATIVIDADES REALIZADAS	20
8. RESULTADOS OBTIDOS.....	21
8.1. MAPA GEOLÓGICO	21
8.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA DOS FRAGMENTOS COLETADOS NOS AFLORAMENTOS.....	21
8.3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	24
9. CONCLUSÕES	50
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ANEXO I - TABELAS COMPLEMENTARES DAS SEPARAÇÕES MINERAIS EFETUADAS

ANEXO 2 - DIFRAÇÕES DE RAIOS X

ANEXO 3 - FOTOMICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV

ANEXO 4 - MAPA DE PONTOS E MAPA GEOLÓGICO

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação do ferro na exportação mineral de 2007, extraído do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM).....	3
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo com os principais acessos.....	5
Figura 3 - Mapa geológico da Faixa Paraguai, modificado de Alvarenga et al. 2000 e extraído de Piacentini et al. 2007, com a localização aproximada da área de estudo (Fazenda São Cristóvão).....	7
Figura 4 - Feição macroscópica do metadiamictito da Formação Puga.....	8
Figura 5 - Clasto de gnaisse deformado.....	8
Figura 6 - Aspecto macroscópico da unidade enriquecida em ferro.....	9
Figura 7 - Presença de fina laminação e clasto de quartzo deformado.....	9
Figura 8 - Localização da área mapeada requerida para pesquisa de ferro. Coordenadas UTM em metros.....	13
Figura 9 - Trincheira relativa à amostra MF.....	15
Figura 10 - Trincheira relativa à amostra FC.....	15
Figura 11 - Aspecto da amostra MF.....	15
Figura 12 - Detalhe do metadiamictito ferruginoso com clastos variados (MF).....	15
Figura 13 - Aspecto da amostra FC.....	15
Figura 14 - Detalhe da subunidade com ferro concentrado, de aspecto maciço e clasto granítico (MF).....	15
Figura 15 - Procedimento experimental adotado no estudo.....	17
Figura 16 - Amostra FC. Produto cominuído a -38 mm, mostrando níveis milimétricos de sílica intercalados com óxidos de ferro.....	25
Figura 17 - Amostra FC. Detalhe dos fragmentos, ressaltando os níveis de sílica.....	25
Figura 18 - Amostra FC, produto flutuado da fração -0,044+0,037 mm. Presença de quartzo, muscovita, hematita e magnetita.....	34
Figura 19 - Amostra FC, produto magnético da fração -0,074+0,037. Presença de quartzo, hematita e magnetita.....	34
Figura 20 - Amostra FC, produto não magnético da fração -0,074+0,037. Observam-se quartzo e hematita.....	34
Figura 21 – Amostra MF, produto flutuado fração -0,044+0,037 mm. Presença de quartzo, muscovita e albíta.....	46
Figura 22 – Amostra MF, produto magnético da fração -150+0,105 mm. Presença de quartzo, magnetita, hematita, muscovita e, mais raramente, albíta.....	46
Figura 23 – Amostra MF, produto não magnético da fração -0,150+0,105 mm. Presença de quartzo, albíta, hematita e muscovita.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações padrão dos principais produtos comercializados pela Vale	2
Tabela 2 - Cronograma das atividades exercidas no projeto	20
Tabela 3- Composição química das amostras estudadas.....	25
Tabela 4- Resultados da cominuição a -6,35 mm da amostra FC	26
Tabela 5 - Composição química do produto magnético obtido na separação em ímã de mão	27
Tabela 6 - Análise granulométrica após cominuição a -1,19 mm.....	27
Tabela 7 - Distribuição de teores nos produtos de separação mineral após cominuição a -1,19 mm	29
Tabela 8 - Análise granulométrica da amostra FC após cominuição a -0,15 mm.....	30
Tabela 9 -	32
Tabela 10 - Estimativa da composição mineralógica - amostra FC.....	33
Tabela 11 - Estimativa da partição do P nas fases portadoras	37
Tabela 12 - Resultados da cominuição a -6,35 mm da amostra MF	38
Tabela 13 - Composição química do produto magnético obtido na separação em ímã de mão	39
Tabela 14 - Distribuição de teores por fração após cominuição a -1,19 mm.....	39
Tabela 15 - Distribuição dos teores nos produtos da separação magnética após cominuição a -1,19 mm – amostra MF.....	41
Tabela 16 - Análise granulométrica da amostra MF após cominuição a -0,15 mm	42
Tabela 17 - Resultados das separações efetuadas para a mostra MF após cominuição a -0,15 mm	44
Tabela 18 - Estimativa da composição mineralógica - amostra MF	45
Tabela 19 - Estimativa da partição do P nas fases portadoras	48

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

- Fotomicrografia 1** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 4X.
Textura milonítica, com lentes de quartzo recristalizadas e porfiroclasto granítico estirado na porção superior da foto. A matriz apresenta-se muito fina com predominância de sericita e muscovita, além de biotita. 22
- Fotomicrografia 2** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 4X.
Clivagem de crenulação evidente, e porfiroclastos de quartzo rotacionados e com sombra de pressão. Os opacos estão por toda matriz de textura grano-lepidoblástica e em granulometria muito fina. 22
- Fotomicrografia 3** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 10X.
Textura milonítica com cristais opacos subidiomórficos a idiomórficos segundo a foliação S1 e em trilhas oblíquas em estágio pré-crenulação (S2). 22
- Fotomicrografia 4** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 10X.
Rocha de matriz muito fina a fina composta por sericita e muscovita. Observam-se porções recristalizadas de quartzo e cristais opacos idiomórficos orientados segundo a foliação principal. 23
- Fotomicrografia 5** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 1,25X.
Rocha foliada, de granulometria muito fina, com bandamentos característicos constituídos pela alternância de níveis enriquecidos em cristais opacos e níveis quartzosos. 23
- Fotomicrografia 6** - Nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Aumento 10X.
Detalhe da rocha apresentando textura granoblástica, com cristais de quartzo recristalizados e contornos suturados a lobados. Observa-se a regularidade dos cristais opacos e presença de mica detritica. 23
- Fotomicrografia 7** - Nicóis descruzados. Aumento de 4X (esquerda) e 10X (direita).
Aspectos gerais de bandas enriquecidas em óxidos e ferro (notadamente magnetita). 24
- Fotomicrografia 8** - Nicóis descruzados. Aumento de 50X. Detalhe para os cristais de magnetita, com alteração do tipo martitização, nas faces octaédricas dos cristais. À esquerda observa-se alteração moderada, com finas lamelas cinza claro de hematita substituído a magnetita. À direita, o processo em estágio mais avançado. 24
- Fotomicrografia 9** - Amostra FC; fração -6,35+1,19 mm. Detalhe da associação óxidos de ferro/sílica. 26
- Fotomicrografia 10** - Amostra FC; fração -1,19+0,42 mm. Observa-se a existência de minerais de ganga liberados. 28

Fotomicrografia 11 - Amostra FC; fração -0,42+0,15 mm. Detalhe das partículas de quartzo liberada.....	28
Fotomicrografia 12 - Amostra FC, fração -0,149+0,105 mm. Aspecto geral. Predominância de quartzo (tom cinza escuro), além de muscovita em tons de cinza médio e óxidos de ferro (cinza claro). Os óxidos de ferro estão comumente mistos, sendo rara sua presença liberada.....	35
Fotomicrografia 13 - Amostra FC, fração -0,149+0,105 mm. Detalhe de partícula sob a forma mista apresentando cristais de magnetita em tons cinza claro (1 e 2) e goethita (4) em tons de cinza médio. Observa-se nas fraturas dos cristais da magnetita a atuação de alteração para goethita. Este mineral, por sua vez, apresenta teor de P da ordem de 1%, o que confere como teor médio para esse agregado um valor da ordem de 0,4% (5).	36
Fotomicrografia 14 - Amostra FC, fração -0,149+0,105 mm. Detalhe da partícula de quartzo (5) (cinza escuro), com inclusões de magnetita (1 a 3) e apatita (4). Observa-se pelas análises químicas pontuais executadas que os óxidos de ferro são isentos de P.....	37
Fotomicrografia 15 - Amostra MF; fração -6,35+1,19 mm. Detalhe da associação óxidos de ferro/sílica.....	38
Fotomicrografia 16 - Amostra MF; fração -1,19+0,42 mm. Partículas de minerais de ganga liberadas.....	40
Fotomicrografia 17 - Amostra MF; fração -1,19+0,42 mm. Detalhe do óxido de ferro.....	40
Fotomicrografia 18 - Amostra MF, fração -0,15+0,105 mm. Aspecto geral. Predominância de minerais de ganga (quartzo, muscovita e apatita) em tons de cinza médio e escuro além de agregados com diminutos cristais de óxidos de ferro (cinza claro).....	47
Fotomicrografia 19 - Amostra MF, fração -0,15+0,105 mm. Óxidos de ferro intimamente associados com minerais de ganga; a magnetita/hematita mostra-se como diminutas "inclusões" com dimensões inferiores a 0,010 mm e com fraturas preenchidas por goethita.	48
Fotomicrografia 20 - Amostra MF, fração -0,044+0,037 mm. Detalhe da associação comumente observada. Cristais de hematita (1 a 3) associados com mica, apresentando alteração para goethita. Nota-se também a presença de apatita.....	49

1. APRESENTAÇÃO

Esta monografia de trabalho de formatura apresenta os resultados do mapeamento geológico realizado em escala de semidetalhe, na localidade de Bodoquena, MS, em áreas requeridas pela Empresa de Mineração Horii Agroindustrial de Minérios Ltda para pesquisa mineral de ferro. Estudos de caracterização tecnológica também foram executados em amostras provenientes dos corpos mineralizados identificados durante o mapeamento.

Os trabalhos de mapeamento efetuados compreenderam etapas tradicionais usadas neste tipo de pesquisa, como o reconhecimento de campo, realizado através de caminhamentos, descrições de afloramentos e amostragens, adotando-se para este caso uma sistemática baseada em linhas transversais à estruturação geral observada na área (N-S), com intuito de melhor individualizar as unidades mineralizadas.

Os estudos de caracterização foram efetuados em amostras obtidas a partir de trincheiras abertas nas duas unidades identificadas no mapeamento e tiveram por objetivo determinar as características do material, com vistas à verificação da forma de ocorrência dos óxidos de ferro presentes e de suas associações com a ganga contida, com enfoque nos minerais portadores de sílica, alumínio e de fósforo, de modo a definir a granulação de moagem adequada para a sua posterior concentração, visando gerar produtos dentro das especificações granulométricas e químicas requeridas.

Na área da referida ocorrência mineral, são observados litotipos referentes aos diamictitos da Formação Puga, apresentando characteristicamente matriz cinza esverdeada com aproximadamente 15% de clastos estirados de composição granítica, quartzítica e gnáissica, além de uma xistosidade bem definida, de direção N-S, imposta pelos eventos deformacionais do Ciclo Brasiliiano (Piacentini, 2008). A idade de sedimentação máxima de 706 Ma, datada através de zircões detriticos presentes nesta formação, pode ser correlacionada com os eventos glaciais Marinoano (635 Ma) ou Gaskieriano (580 Ma) (Babinski et al., 2008).

Após a descoberta de ferro por funcionários da Mineração Horii Agroindustrial de Minérios LTDA no ano de 2005, próximo à sede da fazenda São Manuel em Bodoquena, MS, iniciaram-se os trabalhos de pesquisa para a substância metálica encontrada, resultando em uma reserva/recurso medida de aproximadamente 142,3 milhões de toneladas com teor médio 28,07% de Fe (Rampazzo, 2007).

Piacentini (2008) através da integração de dados geofísicos, geológicos, geoquímicos e de sensoriamento remoto, pôde melhor delinear o corpo de minério, sendo este alinhado em uma faixa de direção geral N-S, estendendo-se a norte e a sul da fazenda. O autor, na avaliação regional dos recursos através do método dos perfis padrão, obteve em torno de 1 bilhão de toneladas de recursos de ferro que, após ensaio de beneficiamento, apresentou teor médio de 55% de Fe total a uma recuperação de 86% de ferro contido.

2. OBJETIVOS

Os objetivos propostos neste trabalho de formatura e que foram apresentados no projeto inicial são:

- Mapeamento geológico de semi-detalhe da ocorrência mineral de maneira a se reconhecer a distribuição do corpo mineralizado em superfície, selecionando locais onde haverá amostragens subsuperficiais para os estudos de caracterização tecnológica.
- Estudos de caracterização tecnológica dos principais tipos de materiais identificados, a fim de se avaliar as possibilidades de obtenção de produtos enriquecidos em ferro dentro das especificações requeridas (tipo Granulado, "Pellet Feed" e "Sinter Feed"), como demonstrado na Tabela 1, a qual exibe a composição química dos principais produtos de ferro comercializados pela empresa Vale, em seu sistema de produção Sudeste.

Tabela 1: Especificações padrão dos principais produtos comercializados pela Vale

Produto	Características	Teores (%)					
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	S
Granulado	Produtos com granulação entre 6,35 a 50 mm de diâmetro. Pode ser utilizado como carga direta nos altos-fornos.	65	2,50	2,00	0,20	0,065	0,006
Sinter Feed	Produtos com granulação entre 0,15 mm e 6,35 mm de diâmetro. Utilizado para sinterização.	66	3,60	0,70	0,20	0,027	0,005
Pellet Feed	Partículas de minério de ferro finas e ultrafinas (inferiores a 0,10 mm) geradas pela mineração, classificação, manipulação e transporte de minério de ferro, sem aplicação prática direta na indústria siderúrgica, exceto quando o material é agregado em pelotas através de um processo de aglomeração.	67,80	1,40	0,40	0,15	0,035	0,005

Referência: dados obtidos no Booklet Anual de 2006

3. JUSTIFICATIVAS

O elemento ferro, quando encontrado na natureza na forma de óxidos e após sofrer extração e processos de beneficiamento, é a principal matéria-prima metálica utilizada na fabricação de aços. O aço, em grande extensão, é um insumo insubstituível, aplicado nos diversos setores da indústria (construção civil, automobilística e aeronáutica).

Atualmente, mesmo em face do cenário de retração econômica mundial, a China, principal país produtor de aço bruto do mundo, manteve seu forte ritmo de produção, com estimativas da Associação de Ferro e Aço Chinesa, de produzir 517 milhões de toneladas para o ano de 2009 frente aos 500,48 milhões de toneladas registrados em 2008 (<http://br.ibtimes.com>; consultado em 03/2009). O mercado brasileiro neste cenário registrou queda de aproximadamente 42% da produção de aço bruto no primeiro bimestre de 2009, porém o bom desempenho em 2007 e 2008, com uma média anual de 33,7 milhões de toneladas, posicionaram-no em 9º lugar do ranking mundial (www.ibs.org.br; consultado em 03/2009).

A soma das reservas medidas e indicadas de ferro no mundo é da ordem de 340 bilhões de toneladas, sendo que 9,8% estão no Brasil. Tal fato corrobora a potencialidade do país neste recurso, sendo o 2º maior produtor mundial, com significativa participação no setor mineral brasileiro (Figura 1), o qual junto aos demais produtos minerais incrementou 5,1% do PIB nacional no ano de 2007.

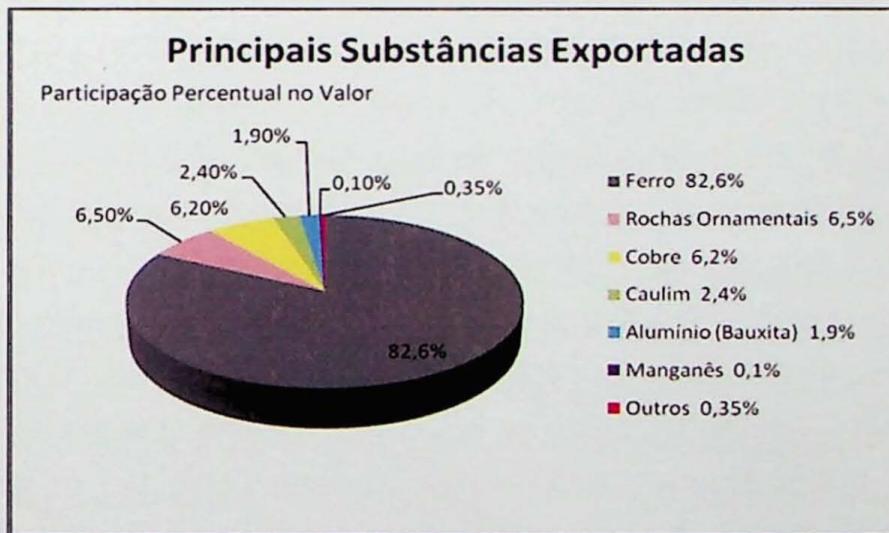


Figura 1 - Participação do ferro na exportação mineral de 2007, extraído do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM).

Os estudos de caracterização tecnológica mostram-se como uma ferramenta extremamente útil e de grande aplicabilidade nos diferentes estágios de desenvolvimento de um empreendimento mineiro, sendo os maiores volumes de trabalho, concentrados na fase de pesquisa mineral. Os resultados obtidos com a caracterização nesta fase, podem agilizar a prospecção, pois, fornecem parâmetros sobre o material analisado, alertando para as

dificuldades tecnológicas esperadas para o seu aproveitamento além de se evitar desperdícios de esforços e recursos empregados na pesquisa (Sant'Agostino, 1996).

O recurso mineral estudado está localizado em uma região servida por transporte ferroviário, podendo ter sua produção escoada para grande parte da região sudeste do Brasil (Ferroban) ou, dirigida para Campo Grande e/ou Corumbá (Ferrovia Novoeste) que possuem indústrias siderúrgicas instaladas.

4. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área objeto de estudo está localizada na porção oeste do estado do Mato Grosso do Sul, no município de Bodoquena, com distâncias aproximadas de 260 km até a capital Campo Grande, 280 km de Corumbá e a 80 km de Bonito (Figura 2). O trajeto pode ser feito através da rodovia federal BR 262, partindo-se da capital, até a cidade de Miranda, onde o percurso deve ser continuado na rodovia estadual MS 339 até o destino.

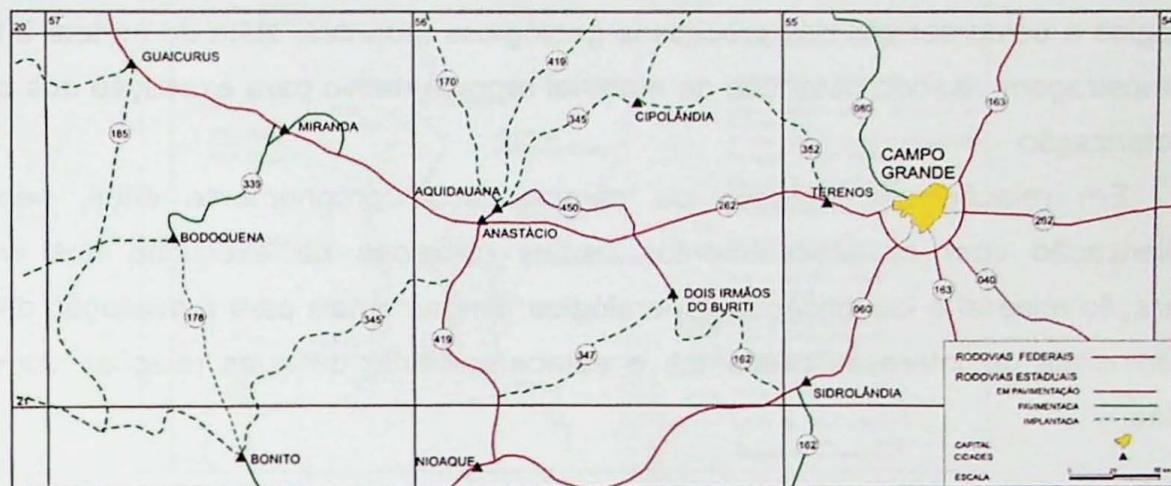


Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo com os principais acessos.
 Referência: extraído e modificado de DNIT 2007

5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A pesquisa bibliográfica realizada, com vistas à execução dos trabalhos de campo, teve como foco principal a inserção da área de estudo no contexto geológico regional, bem como a obtenção das informações existentes para orientar o mapeamento na escala 1: 20.000.

Os trabalhos consultados foram fundamentais para a familiarização com a geologia da região e com as técnicas de mapeamento, necessárias para a confecção do mapa geológico e compreensão dos processos geológicos atuantes, além de nortear a realização de amostragem visando obtenção de material representativo para execução dos estudos de caracterização.

Em relação aos estudos de caracterização propriamente ditos, permitiram a familiarização com os procedimentos usuais utilizados na execução dos ensaios de separação mineral e identificação mineralógica, fundamentais para a avaliação da liberação dos minerais de interesse presentes e estabelecimento de suas relações com a ganga contida.

5.1. Contexto Geológico Regional

A região em estudo está inserida na porção meridional da Faixa Paraguai a qual é compreendida por um cinturão de dobras e empurrões formados no final da orogenia Neoproterozóica (Brasiliana), em contexto tectônico da Província Tocantins (Almeida, 1977), que no Estado do Mato Grosso do Sul margeia a porção sudeste do Cráton Amazônico.

Almeida (1984), em sua estruturação geotectônica do sudeste da Província Tocantins, subdividiu a porção meridional da Faixa Paraguai em *Brasilides* metamórficas e *Brasilides* não metamórficas, baseado no registro deformacional das rochas que tendem a serem menos expressivos em direção ao Cráton Amazônico (Figura 3).

Seus litotipos são representados por rochas metassedimentares depositadas no intervalo do Vendiano ao Cambriano Inferior (600-540 Ma), de baixo a médio grau de metamorfismo, com deformações resultantes de vetores compressivos que deram origem a transcorrências de direção W/NW (Lacerda Fo et al., 2006).

As unidades estratigráficas propostas para a Faixa Paraguai, segundo Alvarenga & Trompette (1992), constituem uma unidade inferior formada por sedimentos gláciais-marinhos (Formação Puga), com turbiditos distais correspondentes ao Grupo Cuiabá que, na porção setentrional, estão recobertos por carbonatos do Grupo ou Formação Araras e na porção meridional pelo Grupo Corumbá, marcando assim o fim da influência glacial e a subida do nível do mar. A unidade mais superior, compostas por rochas siliciclásticas, aflora apenas na parte norte, sendo denominada de Grupo Alto Paraguai.

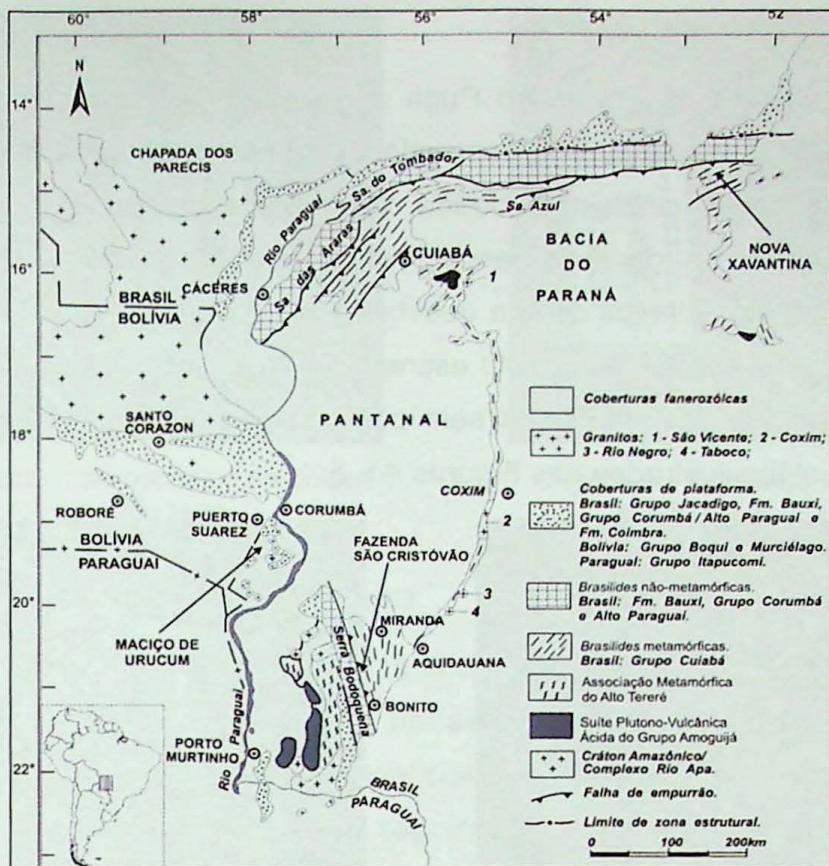


Figura 3 - Mapa geológico da Faixa Paraguai, modificado de Alvarenga et al. 2000 e extraído de Piacentini et al. 2007, com a localização aproximada da área de estudo (Fazenda São Cristóvão).

Ocorrências ferríferas na região são conhecidas em Poconé (Da Rosa et al., 1997), situadas no Grupo Cuiabá, possivelmente equivalentes a porções distais da Formação Puga, em Nova Xavantina (Dantas & Martinelli, 2003), associada a uma seqüência metavulcâno-sedimentar e no Maciço do Urucum (Dorr II, 1945) no Grupo Jacadigo, como indicado nas flechas da figura anterior.

Na área de estudo ocorrem os sedimentos com influência glacial da Formação Puga, que a oeste estão em contato tectônico com rochas carbonáticas do Grupo Corumbá, composto, segundo Boggiani (1998), por uma unidade basal conglomerática (Formação Cadieus), sobrepostos por carbonatos dolomíticos de águas rasas ricos em estromatólitos incluindo fosforitos (Formação Bocaina), seguidos por calcários e pelitos carbonosos (Formação Tamengo) e siltitos acinzentados no topo (Formação Guaicurus).

Piacentini (2008) descreve os litotipos da formação Puga como metadiamicríticos de matriz pelítica a arenosa, com xistosidade por vezes crenulada e mergulhos variando de 40° a 70° para leste. Associa também para esta formação, uma subunidade com matriz enriquecida em ferro, contendo porções finamente laminadas, por vezes bandadas, onde a deformação em partes ajudou a concentrá-las.

5.2. Geologia Local

Os metadiamictitos da Formação Puga apresentam estruturação geral dada pelos planos de xistosidade de direção N/S, com valores de mergulho variando de 45° a 90°. A rocha apresenta coloração cinza esverdeada, com matriz pelítica, por vezes com maior porcentagem de quartzo, gerando aspectos de sericita xistos. O litotipo possui aproximadamente 15% de clastos centímetros a decimétricos de gnaisse, granito e quartzito, com formas arredondadas e sub-angulosas. O estiramento dos clastos é notado quase sempre nos afloramentos, formando sínclives sem preferência de movimentação. Os aspectos gerais desta rocha estão ilustrados nas Figuras 4 e 5.

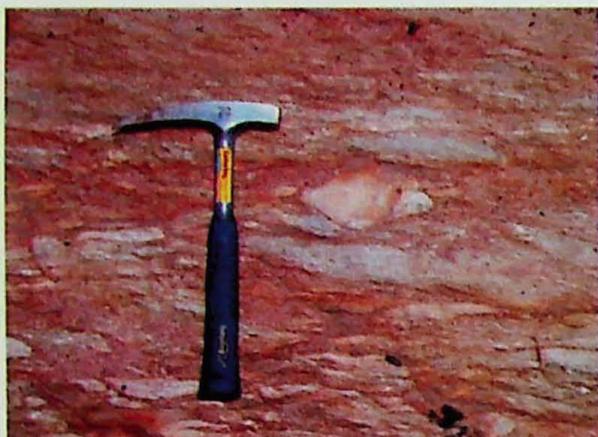


Figura 4 - Feição macroscópica do metadiamictito da Formação Puga.



Figura 5 - Clasto de gnaisse deformado.

Piacentini et. al. (2007) descrevem que a sudoeste da área de estudo, afloram corpos extensos de diamictitos com matriz arenosa a argilosa, com clastos de tamanhos, formas e litologias variadas, os quais não chegam a compor 20% da rocha.

No topo da formação Puga, no Morro do Puga, Boggiani & Coimbra (1996) relatam a existência de uma camada de dolomito de 3 m de espessura possivelmente representante de capa carbonática.

O ferro presente nesta formação distribui-se tanto na matriz do metadiamictito, na forma de magnetita muito fina, como em corpos de material compacto enriquecidos nesse elemento. Nestes corpos enriquecidos observa-se ausência de xistosidade e o surgimento de fina laminação ou bandamentos formados por bandas centimétricas de magnetita, alternadas por lâminas de quartzo, semelhantes às formações ferríferas bandadas (*BIFs*), além da ocorrência de clastos esparsos de quartzo e granito (Figuras 6 e 7).



Figura 6 - Aspecto macroscópico da unidade enriquecida em ferro.



Figura 7 - Presença de fina laminação e clasto de quartzo deformado.

5.3. Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica de matérias-primas minerais é um estudo que tem por finalidade determinar as propriedades físicas, químicas e físico-químicas do material analisado, frente a um processo de beneficiamento ou uso final, não obedecendo a um roteiro único de ensaios ou análises, seguindo, via de regra, diretrizes impostas pela assembléia mineralógica presente, especificações da matéria prima final ou características das operações unitárias a serem empregadas no seu beneficiamento. Significa, em outras palavras, determinar suas composições química e mineralógica, as formas de associação dos minerais presentes e respectivas composições químicas, de modo a sugerir alternativas para o seu beneficiamento ou para a otimização de um processo já existente. Estes estudos permitem, portanto, obter estimativas de recuperação e avaliar a qualidade dos produtos finais gerados nesse processo (Tassinari et al., 1996; Sant'Agostino & Kahn, 1997).

Nos estudos aplicados aos bens minerais, a caracterização pode ser dividida em dois segmentos tecnológicos distintos. Um deles, referente essencialmente ao levantamento de parâmetros geomecânicos/geotécnicos em apoio às atividades de lavra do material e o outro, relativo às atividades de beneficiamento/processamento, com vistas à avaliação dos parâmetros básicos do corpo mineralizado, relacionados às alternativas tecnológicas de tratamento de minérios (Sant'Agostino & Kahn, *op. cit.*).

O segmento da caracterização voltado para o processo recebe internacionalmente as denominações *ore-dressing mineralogy*, *process mineralogy*, *metallurgical mineralogy*, *technological mineralogy* e *mineralurgie*, constituindo-se em uma especialização da mineralogia aplicada. No Brasil, o termo caracterização tecnológica tem sido aplicado para denominar o estudo da matéria prima mineral para fins de beneficiamento.

As amostras preparadas em escala de bancada devem seguir procedimentos compatíveis com o beneficiamento mineral, reproduzindo ou simulando as características físicas e de distribuição de partículas esperadas no processamento da matéria prima mineral.

Basicamente o procedimento experimental adotado em laboratório nos estudos de caracterização compreende a execução de uma etapa de preparação de amostras, constituída por redução e classificação granulométrica, seguida de uma etapa de separações minerais, visando concentrar os minerais presentes, de forma a possibilitar o estudo das associações envolvidas e demais características apresentadas por eles; assim a seqüência de atividades prevê:

- análise textural;
- redução de tamanho dos fragmentos;
- classificação granulométrica;
- separações minerais.

Através da análise textural do material, é possível avaliar a dimensão dos minerais de interesse presentes, de modo a definir a granulação a ser adotada na cominuição, para adequação da amostra aos estudos subsequentes.

A classificação granulométrica dos materiais que ocorrem naturalmente desagregados ou daqueles que foram submetidos a um processo de cominuição, propicia a verificação das distribuições do tamanho das partículas e a partição do elemento útil nesta distribuição, além de individualizar frações para posteriores análises. A atividade comumente empregada neste ensaio consiste de peneiramento manual ou mecanizado em procedimentos a seco ou a úmido abrangendo usualmente granulometrias finas de até 0,037 mm.

Os processos envolvidos nos ensaios de separação mineral apresentam como principal objetivo a concentração de espécies minerais, tendo como objetivo isolar os minerais de ganga do mineral útil. A seleção da metodologia/equipamento a ser utilizada com essa finalidade é baseada na granulação desses minerais e nas propriedades físicas diferenciadoras existentes entre os mesmos, sendo as mais comumente utilizadas a diferença de peso específico entre o mineral de interesse e os de ganga presentes, a susceptibilidade magnética, condutibilidade elétrica, hidrofobicidade/hidrofilicidade, cor, solubilidade, etc. As técnicas envolvidas nesses ensaios, baseadas nessas propriedades compreendem flotação, catação manual (*sorting*), dissolução efetiva, separações densitárias e magnéticas, sendo a separação densitária, utilizando-se de líquidos orgânicos densos com densidades entre 1,6 e 4,3 g/cm³ e a separação magnética, a qual submete minerais com diferentes susceptibilidades magnéticas à ação de um campo magnético externo, as mais empregadas. Comumente utiliza-se nas separações magnéticas ímã permanente e separadores Frantz, de uso tradicional na mineralogia, que operam a seco e possuem campo magnético com intensidade variável e ajustável, gerado através de uma bobina elétrica (Sant'Agostino & Kahn, *op. cit.*).

Dentre as atividades da caracterização um aspecto importante é a aferição da qualidade das operações envolvidas nos ensaios. Tal avaliação pode ser realizada através

do balanço de massa, por comparação do peso alimentado nos ensaios e a somatória dos pesos dos produtos, considerando-se as perdas aceitáveis abaixo de 5% da massa total empregada no ensaio (idealmente abaixo de 2%).

Os produtos obtidos nos ensaios (amostra inicial, frações granulométricas e separações minerais) são submetidos a análises químicas, permitindo a comparação entre os teores inicialmente dosados com os teores calculados, obtidos a partir da ponderação das massas dos subprodutos gerados. O limite máximo aceitável para a variação entre os valores dosados e calculados é da ordem de 10% relativos (Uliana, 2006).

As identificações mineralógicas nos estudos de caracterização tecnológica são preferencialmente realizadas em produtos das separações minerais, possibilitando a quantificação das espécies minerais e estimativas da composição mineral.

A difração de raios X, utilizando o método do pó, é uma técnica empregada na identificação mineralógica, permitindo a distinção das fases a partir de espectros gerados por sua estrutura cristalina.

A microscopia óptica é o recurso básico e tradicional de observação direta e identificação de minerais. Nos estudos de caracterização são analisadas montagens correspondentes às diversas frações granulométricas obtidas, com ou sem separações minerais; análises em fragmentos de rocha também podem ser realizadas previamente à etapa de cominuição da amostra, para a avaliação textural (Uliana, 2006).

Com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura é possível obter-se imagens com aumentos de 30 a 100.000 vezes, resultantes da interação de um feixe de elétrons com a amostra, a partir de montagens em seções polidas e recobertas por uma película condutora (usualmente C, Au ou Pt). Em função do detector utilizado, diferentes características do material são observadas: imagens geradas com detector de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons - BSE*) permitem a distinção entre os minerais através de tons de cinza observados, tons estes que refletem a diferença de número atômico médio dos elementos químicos presentes; já as geradas a partir de detector de elétrons secundários mostram informações sobre a topografia das partículas. Nas imagens obtidas com detector de catodoluminescência observam-se diferenças na composição de uma mesma partícula de um determinado mineral. Análises qualitativas e quantitativas de elementos são realizadas com a utilização de detectores de dispersão de energia (EDS) ou de dispersão de comprimento de onda (WDS) acoplados ao MEV, pontualmente ou em áreas específicas de interesse, resultando na composição dos minerais observados.

Para os minérios de ferro, a caracterização deve ser efetuada no sentido de determinar a granulometria e a composição química dos produtos passíveis de serem obtidos, para a sua utilização na indústria siderúrgica (tipo granulado, "pellet feed" e "sinter feed"; Tassinari & Kahn, 1996). O escopo a ser seguido deve contemplar, em função das propriedades inerentes ao material a ser estudado, a realização de sequências de atividades

para avaliação da possibilidade de obtenção de produtos granulométricos a partir das frações mais grossas, após cominuição em 38 mm (limite granulométrico superior para o produto "Granulado"), ou o estudo detalhado dos produtos passíveis de serem gerados a partir da moagem do material, em malha a ser definida, de forma a se atingir as especificações químicas requeridas.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Mapeamento Geológico

O mapeamento geológico foi realizado em uma área com aproximadamente 40 km², compreendida pelas sedes da Fazenda São Cristóvão, Cachoeirinha e Santa Helena, que se apresenta junto ao DNPM sob Alvará de Pesquisa para a substância ferro, publicada no DOU no ano de 2006 em nome de Kazuto Horii (Figura 8).

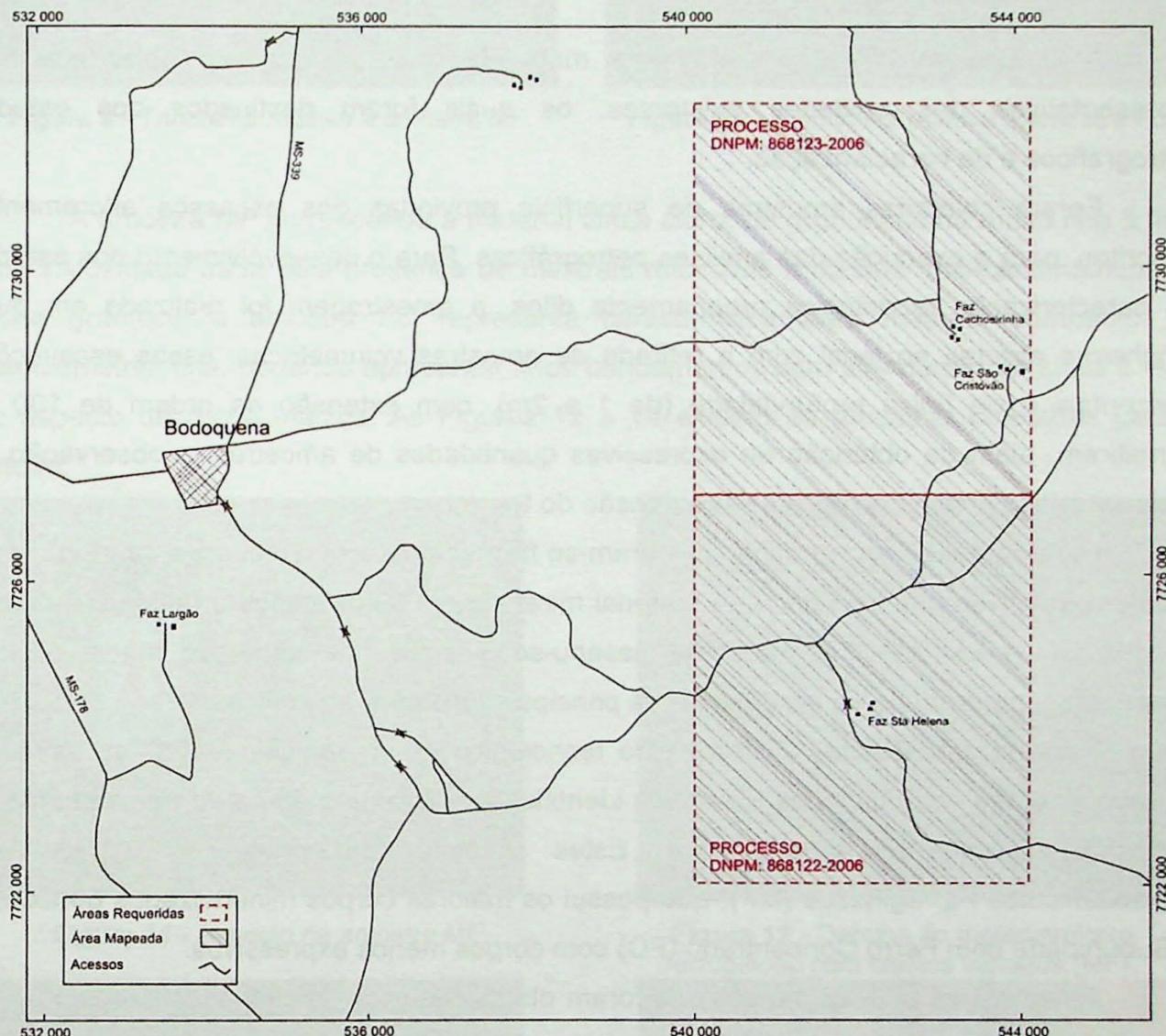


Figura 8 - Localização da área mapeada requerida para pesquisa de ferro.
Coordenadas UTM em metros.

Ao todo executaram-se três etapas de campo cuja metodologia contou com pesquisa bibliográfica, análise de mapas, reconhecimento regional do local e levantamento sistemático de perfis Leste-Oeste, espaçados de 200 m e dispostos transversalmente à estruturação geral dos litotipos presentes na área (N-S).

Para a classificação petrográfica das principais unidades que compõem a área de estudo, realizaram-se análises petrográficas, estudo este que envolveu a descrição de seções delgadas ao microscópio óptico de luz transmitida e seções polidas (microscopia de

luz refletida), observando-se aspectos texturais, estruturais e compostionais da amostra. As seções foram preparadas no setor de laminação do IGc-USP.

Com as descrições macroscópicas de afloramentos, análises petrográficas dos fragmentos relativos aos litotipos observados, medidas estruturais e anotações das coordenadas UTM utilizando GPS, foram confeccionados um mapa de pontos e um mapa geológico utilizando-se o software Arc GIS.

6.2. Amostragem

A amostragem realizada na área mapeada teve por objetivo obter materiais representativos das unidades existentes, os quais foram destinados aos estudos petrográficos e de caracterização.

Foram coletadas amostras de superfície provindas dos escassos afloramentos descritos, para a execução das análises petrográficas. Para o desenvolvimento dos estudos de caracterização tecnológica propriamente ditos, a amostragem foi realizada em duas trincheiras abertas no local com a retirada de amostras volumétricas; essas escavações horizontais e de baixa profundidade (de 1 a 2m), com extensão da ordem de 100 m, permitiram, além da obtenção de expressivas quantidades de amostras, a observação do material *in situ* e ao longo de grande extensão do terreno.

Para a análise petrográfica, coletaram-se fragmentos com dimensões da ordem de 6 a 25 cm, relativos aos dois tipos de material mineralizado identificados e também da rocha encaixante. A escolha dos mesmos baseou-se apenas nos aspectos macroscópicos observados, procurando-se representar as principais unidades presentes.

Para os estudos de caracterização tecnológica foram selecionadas duas amostras correspondentes aos dois tipos litológicos identificados durante a etapa de mapeamento do depósito mineral propriamente dita. Estas amostras referem-se à unidade dos Metadiamicritos Ferruginosos (MF), que possui os maiores corpos mineralizados do local, e à Subunidade com Ferro Concentrado (FC) com corpos menos expressivos.

As amostras para esses estudos foram obtidas a partir de canaletas executadas na base de toda a extensão das trincheiras abertas nos corpos mineralizados, com massas da ordem de 100 kg cada, quantidade esta correspondente ao volume total amostrado, conforme pode ser visualizado nas Figuras 9 e 10. As amostras a serem caracterizadas, foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP (LCT-EPUSP).



Figura 9 - Trincheira relativa à amostra MF.



Figura 10 - Trincheira relativa à amostra FC.

A amostra MF corresponde a material cinza claro, de granulometria muito fina à fina, com xistosidade dada pela presença de minerais micáceos e clastos mili-centimétricos de rocha granítica; a amostra FC representa characteristicamente material compacto, de granulometria fina, podendo apresentar finos bandamentos com alternância de sílica e ferro ou aspecto de rocha maciça. As Figuras 12 a 14 exibem as amostras coletadas para o estudo.



Figura 11 - Aspecto da amostra MF.

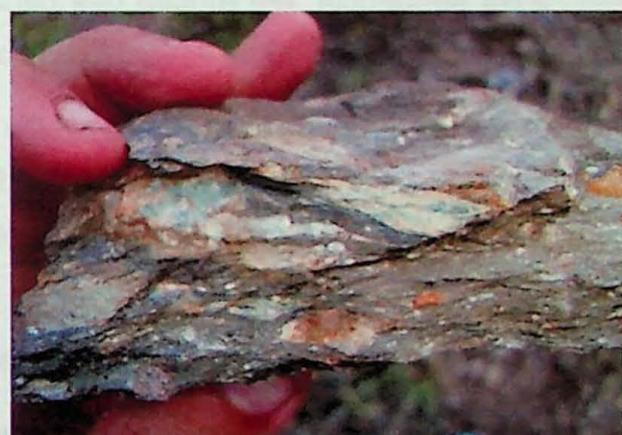


Figura 12 - Detalhe do metadiamictito ferruginoso com clastos variados (MF).



Figura 13 - Aspecto da amostra FC.



Figura 14 - Detalhe da subunidade com ferro concentrado, de aspecto maciço e clasto granítico (MF).

6.3. Caracterização Tecnológica

Os estudos realizados visaram à avaliação preliminar das possibilidades de obtenção dos diversos produtos granulométricos segundo as especificações correntes no mercado (Tabela 1). Todos esses estudos foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica – EPUSP.

6.3.1. Procedimento Experimental

O escopo adotado contemplou a realização uma etapa prévia de preparação das amostras e a posterior avaliação da qualidade dos produtos obtidos em diferentes condições de cominuição, respeitando as especificações granulométricas para aplicação na indústria siderúrgica; a preparação prévia constou das seguintes atividades:

- britagem de todo o material em britador de mandíbula abaixo de 38,0 mm (limite superior do produto Granulado);
- amostragem, com retirada de alíquotas representativas através de pilha alongada para os ensaios de caracterização.

Na seqüência, em função das características macroscópicas dos produtos britados obtidos, realizaram-se três seqüências de atividades para cada amostra, onde:

- ⇒ a primeira visou avaliar a possibilidade de obtenção de produtos granulométricos a partir das frações mais grossas, após cominuição em 6,35 mm (limite granulométrico superior do *Sinter Feed Grosso*);
- ⇒ a segunda, a possibilidade de obtenção a partir da cominuição em 1,19 mm (limite granulométrico superior do *Sinter Feed Fino*);
- ⇒ a terceira, o estudo detalhado dos produtos passíveis de serem obtidos após moagem em 0,149 mm (limite granulométrico superior do *Pellet Feed*), de forma a se atingir as especificações químicas requeridas.

Cada etapa do procedimento foi definida após a análise dos resultados obtidos na atividade anterior (tabelas relativas a cada separação efetuada encontram-se no Anexo 1).

O esquema do procedimento experimental adotado para ambas as amostras está exposto na Figura 15 e compreendeu a realização das seguintes atividades:

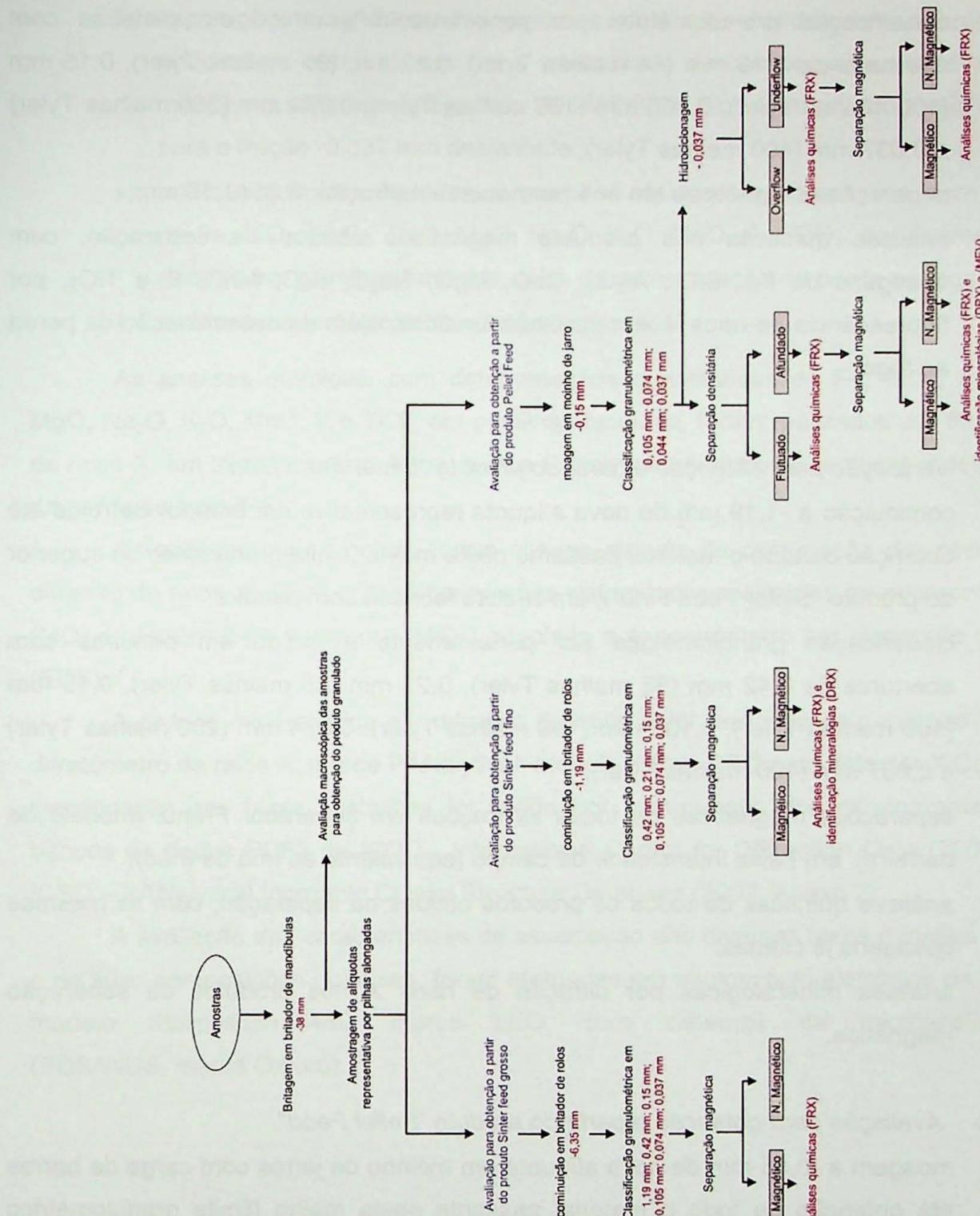


Figura 15 - Procedimento experimental adotado no estudo.

⇒ Avaliação para obtenção a partir do produto “Sinter Feed Grosso”

- cominuição de uma alíquota representativa em britador de rolos até obtenção de todo o material passante em 6,35 mm (limite granulométrico superior do produto “Sinter Feed Grosso”), em circuito fechado com peneira;

- classificação granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 1,19 mm (14 malhas Tyler), 0,42 mm (35 malhas Tyler), 0,15 mm (100 malhas Tyler), 0,105 mm (150 malhas Tyler), 0,074 mm (200 malhas Tyler) e 0,037 mm (400 malhas Tyler);
- separações magnéticas em ímã permanente na fração -6,35+1,19 mm;
- análises químicas dos produtos magnéticos obtidos na separação, com dosagens de Fe, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, P e TiO₂, por fluorescência de raios X, em pastilhas fundidas, além da determinação da perda ao fogo.

⇒ *Avaliação para obtenção a partir do produto "Sinter Feed Fino"*

- cominuição a -1,19 mm de nova alíquota representativa em britador de rolos até obtenção de todo o material passante nesta malha (limite granulométrico superior do produto "Sinter Feed Fino"), em circuito fechado com peneira;
- classificação granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 0,42 mm (35 malhas Tyler), 0,21 mm (65 malhas Tyler), 0,15 mm (100 malhas Tyler), 0,105 mm (150 malhas Tyler), 0,074 mm (200 malhas Tyler) e 0,037 mm (400 malhas Tyler);
- separações magnéticas de todas as frações em separador Frantz (modelo de barreira), em baixa intensidade de campo (equivalente ao ímã de mão);
- análises químicas de todos os produtos obtidos na separação, com as mesmas dosagens já citadas;
- análises mineralógicas por difração de raios X nos produtos da separação magnética.

⇒ *Avaliação para obtenção a partir do produto "Pellet Feed"*

- moagem a -0,15 mm de nova alíquota em moinho de jarros com carga de barras até obtenção de todo o material passante nesta malha (limite granulométrico superior do produto "Pellet Feed Fino"), em circuito fechado com peneira;
- classificação granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 0,105 mm (150 malhas Tyler), 0,074 mm (200 malhas Tyler), 0,044 mm (325 malhas Tyler) e 0,037 mm (400 malhas Tyler);
- deslamagem em hidrociclones com corte aproximado em 0,010 mm do passante em 0,037 mm;
- separação em líquido denso das frações superiores a 0,037 mm, utilizando-se TBE ($d=2,95 \text{ g/cm}^3$);

- separações magnéticas dos produtos afundados obtidos em separador Frantz (modelo de barreira), em baixa intensidade de campo (equivalente ao ímã de mão) e no separador magnético WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separator) para a fração -0,037 mm deslamada;
- análises químicas de todos os produtos obtidos nas separações, com dosagens de Fe, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, P e TiO₂, por fluorescência de raios X, em pastilhas fundidas, além da determinação da perda ao fogo;
- análises mineralógicas dos produtos gerados.

As análises químicas, com determinações quantitativas de Fe, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, P e TiO₂, em pastilhas fundidas, foram realizadas por fluorescência de raios X, em espectrômetro Axios, marca Panalytical; efetuou-se também a determinação da perda ao fogo (PF).

As análises mineralógicas foram obtidas através da conjugação dos resultados de difração de raios X (DRX) e das observações sistemáticas realizadas ao microscópio óptico (MO) e eletrônico de varredura (MEV) acoplado a espectrômetro por dispersão de energia (EDS).

A análise mineralógica por difração de raios X foi realizada pelo método do pó, em difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação dos difratogramas com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007; Anexo 2).

A avaliação das características de associação das diversas fases minerais presentes e de suas composições químicas foram efetuadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo Stereoscan 440, marca LEO, com sistemas de microanálise INCA (EDS/WDS, marca Oxford).