



MINÉRIO DE FERRO

Geologia e Geometalurgia

FARID CHEMALE JUNIOR
LUCY TAKEHARA

Blucher



MINÉRIO DE FERRO

Geologia e Geometalurgia



Blucher



FARID CHEMALE JUNIOR
LUCY TAKEHARA

MINÉRIO DE FERRO

Geologia e Geometalurgia

Projeto Ciência e Engenharia dos Materiais
Série Fundamentos

Minério de ferro, geologia e geometalurgia

© 2013 Farid Chemale Junior

Lucy Takehara

Editora Edgard Blücher Ltda.

A fotografia da capa é um itabirito dobrado da Mina de Conceição, Distrito Ferrífero de Itabira, Quadrilátero Ferrífero, que apresenta uma mineralogia simples (quartzo e hematita) com relações estruturais e texturais complexas. Esses aspectos, que são abordados no presente livro, são cada vez mais importantes na geração dos produtos metalúrgicos.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-012 - São Paulo - SP - Brasil
Tel 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios, sem autorização escrita da Editora

Todos os direitos reservados a
Editora Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Chemale Junior, Farid
Minério de ferro: geologia e geometalurgia /
Farid Chemale Junior, Lucy Takehara. - São Paulo:
Blucher, 2013. (Coleção de Livros Metalurgia,
Materiais e Mineração. Série Fundamentos)

Bibliografia
ISBN 978-85-212-0741-2

1. Minérios de ferro 2. Geologia I. Título
II. Takehara, Lucy

13-0198

CDD 669.1

Índice para catálogo sistemático:
1. Minérios de ferro

Aos nossos pais, por serem nossos exemplos.

Aos nossos filhos Iara, Yuri e Yasmin, para sermos seus exemplos.

Agradecimentos

A preparação do livro demandou um esforço significativo de muitas pessoas do meio acadêmico (professores e alunos de graduação e pós-graduação) e de profissionais de empresas de mineração e metalurgia, da ABM e a da editora Blucher. Aos nossos colegas de academia Carlos Alberto Rosière (UFMG) e Fernando Flecha de Alkmim, Issamu Endo e Claudio Batista Vieira (UFOP), pelo desenvolvimento de trabalhos conjuntos e discussões proveitosas sobre a formação de depósitos de ferro e estudos de geometalurgia. Ao prof. Horst Quade (Technische Universität Clausthal), por sua orientação em nossos primeiros estudos de minério de ferro. O nosso conhecimento sobre os depósitos de minério de ferro foi, sem sombra de dúvidas, ampliado pelos trabalhos integrados com empresas de mineração, como Vale, MBR e Samitri, em situações distintas de orientação de trabalhos de graduação e pós-graduação e projetos de pesquisa individualizados. Profissionais dessas empresas, como Fernando Carbonari Santana, Nelson Borges, Oscar Tessari, Leandro Amorim, entre outros, apoiaram muito nos estudos de minério de ferro tanto para facilitar o acesso às informações das diversas minas de ferro no Brasil, como nas discussões técnico-científicas sobre depósitos de ferro. Os estudos de interação de geologia e metalurgia tiveram um forte apoio da USIMINAS, com especial atuação dos engenheiros Hamilton Porto Pimenta, Edilson Honorato e Luís Scudeller, em especial naqueles estudos de sinterização em escala de laboratório no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da USIMINAS. Na parte da confecção das ilustrações devemos agradecer Janaína Nunes Ávila, Klaus Castro Ferreira e Danilo Lima e Silva por terem redesenhado ilustrações de forma que fossem publicadas com qualidade. Em termos da finalização da diagramação do livro a partir do manuscrito inicial, devemos ressaltar o trabalho incansável de revisão formal do Fernando Alves e sua equipe da Editora Blucher, que viabilizaram a versão final do presente livro. Devemos também destacar a dedicação da ABM para tornar real projeto tão importante para áreas de metalurgia e geologia. Em especial agradecemos aos membros de editoração Raquel Maria Giancolli Sturlini, Cristina Fleury Pereira Leitão e José Carlos D'Abreu.

Coleção de Livros Metalurgia, Materiais e Mineração



Editor Chefe

Nelson Guedes de Alcântara

Editor Série Produtos e Aplicações

Carlos de Moura Neto

Editor Série Matérias-Primas e Processos

José Carlos D'Abreu

Editor Série Gestão

Sérgio Sodré da Silva

Editor Livros de Referência

Cyro Takano

Editor Obras de Difusão

Ronaldo Barbosa

Editor Livros de Atualização

Antônio Cezar Faria Vilela

Editor Série Fundamentos

Claudemiro Bolfarini

Membros

Sérgio Neves Monteiro

Stephan Wolyneç

Valdomiro Roman da Silva

José Adilson de Castro

Paulo Roberto Cetlin

Amauri Garcia

Virginia Ciminelli

Coordenador Editorial

Raquel Maria Giancolli Sturlini

Assistente Editorial

Cristina Fleury Pereira Leitão

Nota sobre os autores

Farid Chemale Junior

Possui graduação em Geologia pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (1978), mestrado em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1982) e doutorado em Ciências Naturais pela Technische Universität Clausthal, Alemanha (1987). Trabalhou na Docegeo-CVRD e no DNPM-RS, na área de pesquisa mineral. Atuou na Unisinos (1980-1982 e 1991-1994), na Escola de Minas da UFOP (1987-1991) e no Instituto de Geociências da UFRGS (1994-2009), nas áreas de Geologia e Engenharia de Minas. Atualmente, é pesquisador, professor titular no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB) e professor do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geotectônica, atuando principalmente nos seguintes temas: geologia estrutural, geologia isotópica, tectônica de bacias sedimentares e metalogênese, com desenvolvimento de projetos de cunho científico e tecnológico em mineração, siderurgia e indústria de petróleo.

Lucy Takehara

Possui graduação em Engenharia Geológica (1989) pela Universidade Federal de Ouro Preto e mestrado (1998) e doutorado (2004) em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atuou como profissional no Laboratório de Microsonda Eletrônica da UFRGS (1994-1996 e 2002-2004) e no Instituto de Física (2005-2008) e Geociências da UFRGS (2008-2009) como pesquisadora pós-doutora pelo CNPq e Capes. De 2007 a 2008, atuou como professora do curso de engenharia de biotecnologia e bioprocessos na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). No doutorado e pós-doutorado (Institutos de Geociências e Física da UFRGS) desenvolveu tese sobre caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – Fração *sinter feed* – e tem produção científica sobre geologia do minério de ferro e geometalurgia. De 2009 a 2010, atuou no Núcleo de Geologia da Universidade Federal de Sergipe, como professora adjunta nas áreas de mineralogia e geologia econômica. Desde 2010 atua como pesquisadora em geociências na Companhia de Recursos Minerais (CPRM).

Conteúdo

Prefácio	17
1 Introdução	19
2 Gênese dos depósitos de minério de ferro	23
2.1 Depósito do tipo sedimentar acamadado ou formação ferrífera bandada (FFB)	24
2.1.1 Origem das formações ferríferas bandadas.....	28
2.2 Relacionados a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentar (tipo Kiruna e Lahn-Dill)	35
2.2.1 Depósito de Kiruna	35
2.2.2 Depósito de Lahn-Dill	38
2.3 Formados por metamorfismo de contato (tipo <i>Skarn</i>)	40
2.4 Sedimentares oolíticos e pisolíticos (tipo Clinton-Minette)	42
2.5 Resultantes de alteração e acúmulo em superfície	43
3 Geologia dos depósitos de minério de ferro	45
3.1 Considerações iniciais	45
3.2 Depósitos de minérios de ferro tipo BIF	46
3.2.1 Depósitos da América do Sul	46
3.2.1.1 Complexo Imataca – Venezuela	46
3.2.1.2 Quadrilátero Ferrífero	48
3.2.1.3 Serra dos Carajás	55
3.2.1.4 Depósito de Urucum	60

3.2.2	Depósitos da Austrália	64
3.2.2.1	Depósitos do Oeste Australiano	64
3.2.2.2	Província de Hamersley	67
3.2.2.3	Depósitos de Yampi Sound – Bacia de Kimberley	73
3.2.2.4	Depósito de Middleback Range – Estado South Australia.....	74
3.2.2.5	Depósitos tipo Rapitan: Holowilena e Braemar	76
3.2.3	Depósitos da África	77
3.2.3.1	Depósitos da África do Sul	77
3.2.3.2	BIFs da Sequência de Transvaal	82
3.2.3.2.1	Depósito de Sishen e Sishen South	85
3.2.3.2.2	Depósito de Thabazimbi.....	88
3.2.3.3	Depósito da Libéria.....	89
3.2.3.4	Depósitos de Minério de Ferro da Mauritânia.....	90
3.2.4	Depósitos da Rússia.....	93
3.2.4.1	Depósito de minério de ferro Kostomusha	94
3.2.4.2	Depósitos de minérios de ferro na Península Kola...	95
3.2.4.3	Depósito de Kirovogorsk.....	96
3.2.4.4	Depósito de Olenegorsk	97
3.2.5	Depósitos da Ucrânia	97
3.2.6	Depósitos da América do Norte	103
3.2.6.1	Depósitos dos Estados Unidos.....	103
3.2.6.1.1	Depósito de Mesabi Range	105
3.2.6.2	Canadá.....	107
3.2.6.2.1	Labrador Trough.....	107
3.2.6.2.2	Depósito de Snake River (tipo Rapitan)	110
3.3	Relacionados a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentares (tipo Kiruna e Lahn-Dill)	113
3.3.1	Depósito de minério tipo Kiruna	113
3.3.1.1	Depósitos da Suécia	113
3.3.1.1.1	Depósito de Kiruna.....	113
3.3.1.1.2	Depósito de Malmberget.....	114
3.3.1.2	Depósitos Andinos	117
3.3.2	Depósito de Lahn-Dill	121
3.3.3	Depósitos complexos de minérios de ferro na Cadeia Andina	123
3.3.4	Depósitos tipo <i>Skarn</i>	128
3.3.4.1	Depósitos de ferro do México	128
3.3.4.2	Depósito tipo <i>Skarn</i> de ferro do Cinturão Andahuaylas-Yauri – Peru	129
3.3.4.3	Depósito da região de Um Nar, Egito.....	132

3.4	Depósitos sedimentares oolíticos e pisolíticos	134
3.4.1	Tipo Clinton-Minette.....	134
3.4.2	Depósito de Rob River Mesa “J” (Austrália).....	134
3.4.3	Roper Bar e Constance Range (Austrália).....	135
3.5	Depósitos de Fe resultantes de alteração e acúmulos de superfícies	136
3.5.1	Depósito de Beeshoek – África do Sul (tipo conglomerático)	136
4	Caracterizações dos minerais de ferro	139
4.1	Minerais de ferro.....	139
4.1.1	Ferro nativo	143
4.1.2	Óxidos – Magnetita.....	144
4.1.3	Óxidos – Hematita	145
4.1.4	Goethita	148
4.1.5	Limonita.....	149
4.1.6	Carbonato – Siderita.....	152
4.1.7	Sulfetos – Pirita.....	153
4.1.8	Pirrotita	154
5	Preparação de amostra para estudos geometalúrgicos	157
5.1	Considerações iniciais	157
5.2	Amostragem de minério geológico	157
5.2.1	Como coletar?	158
5.2.2	Onde coletar?.....	158
5.2.3	Quanto coletar?	159
5.3	Amostragem do minério de ferro metalúrgico.....	160
5.4	Preparação das amostras geológicas	162
5.4.1	Lâminas delgadas.....	163
5.4.2	Seções polidas	163
5.4.3	Moagem da amostra.....	164
5.5	Preparação do minério metalúrgico.....	164
6	Caracterização do minério de ferro.....	165
6.1	Caracterização geológica do minério	166

6.1.1	Características das partículas de minério.....	167
6.1.2	Características dos minerais de ferro.....	169
6.1.3	Características geológicas dos minérios de ferro.....	171
6.2	Características metalúrgicas dos minérios de ferro.....	178
6.2.1	Granulados.....	179
6.2.2	<i>Sinter feed</i>	179
6.2.3	<i>Pellet feed</i>	179
6.2.4	Indicadores de qualidade.....	180
6.2.5	Sínter.....	181
6.3	Abordagem geometalúrgica.....	187
Referências Bibliográficas		189

Prefácio

O minério de ferro é uma das matérias-primas de uso mais antigo e, desde a sua descoberta, durante o Período Neolítico, tem ampliado o seu leque de aplicação. Atualmente, é um produto essencial para a indústria moderna, visto que a indústria do aço continua a ser a espinha dorsal do desenvolvimento industrial de um país.

O Brasil possui 6,4% (21 bilhões de toneladas) das reservas mundiais e está em 5º lugar entre os países detentores de maiores quantidades de minério. Porém, os altos teores de ferro em seus minérios (60% a 67% nas hematitas e 50% a 60% nos itabiritos e jaspilotos, em termos de ferro contido no minério) levam o Brasil a ocupar um lugar de destaque no cenário mundial.

A produção mundial de minério de ferro tem ao longo das últimas décadas crescido sensivelmente, quando já em 2002 a produção era de 1,1 bilhões de toneladas/ano; enquanto em 2008 a produção anual atingiu mais de 2 bilhões de toneladas. Destaca-se que a participação da produção brasileira representou em torno de 20% da produção mundial. No Brasil, o minério de ferro é o metal explorado mais importante, tanto por sua reserva quanto por sua importância econômica na balança comercial. Nas últimas décadas, o Brasil se tornou um dos maiores produtores de ferro do mundo.

Em virtude da importância do minério de ferro no Brasil, faz-se necessária a publicação de um livro, em língua portuguesa, que discorra sobre os seguintes assuntos: (i) tipos de depósitos de minério de ferro; (ii) exemplos de depósitos de minérios de ferro de classe mundial; (iii) caracterização dos minerais de ferro; (iv) caracterização e comportamento geometalúrgico dos minérios de ferro brasileiro. Neste contexto, o livro abrange os diversos conhecimentos sobre minério de ferro, desde a sua formação até os procedimentos necessários para caracterizar, de forma adequada, o minério de ferro metalúrgico.

A disponibilização de uma obra sobre os temas mencionados aqui é fundamental para engenheiros de metalurgia, minas e geologia, bem como para tecnólogos

que trabalham com minério de ferro nos seus diversos processos, ou seja, exploração, lavra e siderurgia. Como ainda não há livro que abranja esses conhecimentos de forma conjunta, este livro auxiliará os engenheiros e tecnólogos, de forma substancial, no desenvolvimento de suas atividades diárias, bem como atenderá os professores e alunos de cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia e Geologia em relação ao tema minério de ferro.

1 Introdução

O aço é um produto essencial para a civilização moderna, cuja produção é considerada a espinha dorsal do desenvolvimento industrial de um país. O minério de ferro é uma das matérias-primas de uso mais antigo, tendo sido descoberto no período Neolítico e, desde então, ampliado o seu leque de aplicação.

A produção mundial do minério de ferro vem aumentando nos últimos anos e encontra-se bem distribuída entre os continentes (ver Tabela 1.1). A produção mundial de ferro atingiu 2,8 bilhões de toneladas, com grande contribuição da produção chinesa, que se tornou o maior produtor mundial, seguido da Austrália com 480 milhões de toneladas e em terceiro encontra-se o Brasil com 390 milhões de toneladas (USGS, 2011). A exportação brasileira de minério de ferro e pelotas vem aumentando nos últimos anos, em 2010 totalizaram 310,9 Mt, comparado com 2009 teve aumento de 16,9% na quantidade e 118,3% no valor (DNPM, 2011).

Os depósitos brasileiros e australianos são importantes, tanto por seu volume, quanto pelos altos teores médios de seus minérios, que são superiores a 62% de ferro, contra os 51,6% verificados pela média mundial (BDMG, 2002), o que os coloca como os dois maiores produtores de ferro contido no mundo. Além disso, essas reservas apresentam vantagens por suas características tecnológicas naturais, cujas jazidas são de fácil extração, produzindo grandes volumes a custos baixos.

As reservas brasileiras representam 6,4% (21 bilhões de toneladas) das reservas mundiais, ocupando o quinto lugar entre as maiores do mundo. Essas reservas estão distribuídas da seguinte maneira: Minas Gerais (70%), Pará (7,3%), Mato Grosso do Sul (21,5%) e outros estados (1,2%). Se considerarmos também as reservas inferidas, o Brasil tem o seu potencial significativamente aumentado, totalizando 62 bilhões de toneladas de minério de ferro. A produção brasileira vem acompanhando o crescimento mundial, conforme pode ser observado na Figura 1.1.

Tabela 1.1 – Os maiores produtores de Minério de Ferro em 2010-2011. (*) produção estimada. A produção chinesa é representada pelo minério não processado.

País	Produção (106 t)		
	2010	2011*	Teor de Fe
China	1.070	1.200	7.200
Austrália	433	480	17.000
Brasil	370	390	16.000
Índia	230	240	4.500
Rússia	101	100	14.000
Ucrânia	78	80	2.100
África do Sul	59	55	650
Estados Unidos	50	54	2.100
Canadá	37	37	2.300
Irã	28	30	1.400
Suécia	25	25	2.200
Cazaquistão	24	24	1.000
Venezuela	14	16	2.400
México	14	14	400
Mauritânia	11	11	700
Demais países	48	50	6.000
Total mundial	2.590	2.800	80.000

Fonte: USGS, 2011.

O minério de ferro é o mais importante metal explorado, tanto por sua reserva quanto por sua importância econômica na balança comercial brasileira (DNPM, 2008). O fato de o Brasil ser privilegiado com grandes depósitos de minério de alto teor de ferro faz que seja interessante a sua comparação com depósitos semelhantes encontrados em outros continentes, bem como conhecer as peculiaridades dos principais tipos de depósitos, tais como gênese, características dos minérios e formas de exploração. Esse conhecimento permite que seja alcançado um melhor entendimento da inserção do minério de ferro brasileiro dentro do contexto de produção do mercado mundial.

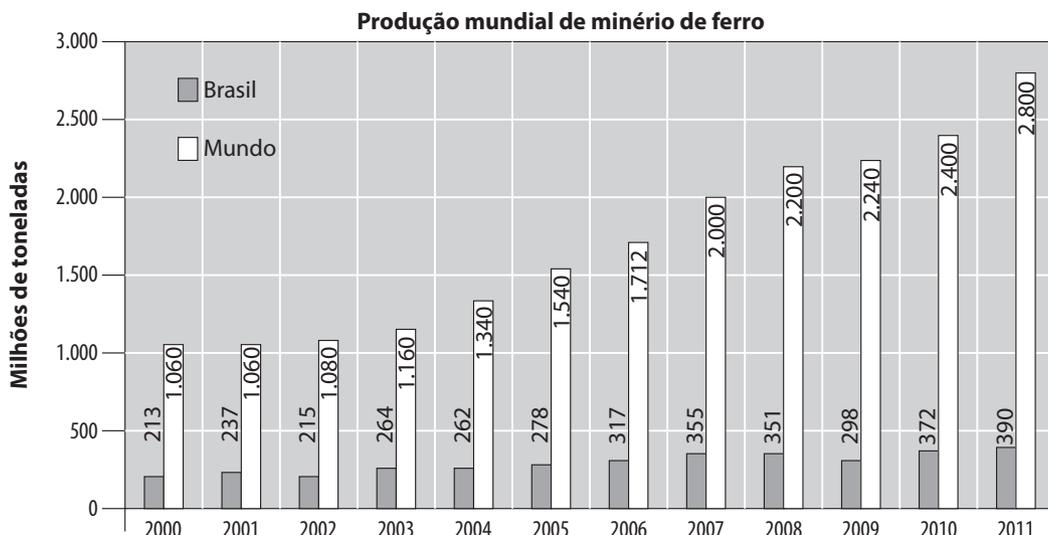


Figura 1.1 – Evolução da produção mundial e brasileira de minério de ferro entre 2000 e 2011.

Fonte: DNPM, 2011.

A característica do minério de ferro brasileiro faz que nosso produto entre no mercado de ferro mundial com grande vantagem competitiva, em razão de aspectos genéticos (minérios com alto teor de ferro e baixo teor de elementos deletérios) e de exploração (minas a céu aberto).

A prospecção do minério de ferro depende da correlação entre os fatores geológicos, técnicos e econômicos, interligados ao modelo industrial de fabricação do aço. Para isso, devem ser considerados: 1) tipo de minério de ferro disponível; 2) tratamento do minério (beneficiamento); 3) processamento metalúrgico da matéria-prima (preparação da carga para a alimentação no alto-forno e processo de redução); e 4) a infraestrutura regional – sistemas de transporte, mercado e mão de obra disponível (GROSS, 1993; HUNDERTMARK, 1996). Muitas vezes, essa correlação é inexistente, inviabilizando, assim, a extração do minério, em razão do custo de produção muito alto, principalmente, quando há falta de um sistema de transporte eficaz e barato, sendo este último o principal componente no custo do minério. Atualmente, a maior parte das jazidas possui um sistema de transporte mina/ferrovia/porto para viabilizar o escoamento da produção.

Assim, em busca por subsídios para o estudo do minério de ferro nos diversos segmentos de geologia, mineração e metalurgia, serão apresentados neste livro os conceitos de gênese dos principais depósitos de ferro, a distribuição dos principais tipos de depósitos de ferro, os tipos de minerais de ferro e métodos de preparação de amostras para caracterização geometalúrgica do minério de ferro.

Em termos de acumulação de ferro ao longo do tempo geológico, é extremamente importante abordar os processos e as épocas principais da formação dos depósitos de ferro explorados pelo homem. Destaca-se que as reservas de minério de ferro no planeta ocorrem em mais de 92% nas rochas geradas entre 2,7 e 2,0 bilhões de anos atrás. Este fato caracteriza uma situação geológica muito específica para formação de acumulação do ferro, que envolve: atmosfera muito pobre em oxigênio (estima-se que teria uma concentração de 1% quando comparada com a atmosfera atual); presença de um supercontinente (semelhante ao que surgiu no final do Paleozoico, com a formação do Pangea) e atividade excepcional de organismos unicelulares (ou cianobactérias), entre outros aspectos. Mesmo assim, no decorrer do Capítulo 2, que aborda a gênese de depósitos de minério de ferro, são também descritos os demais depósitos de minério de ferro, que, mesmo contendo reservas menores, apresentam aspectos relevantes sobre a geração desses depósitos na Terra.

No próximo capítulo, “Gênese dos depósitos de minério de ferro”, são abordados os principais depósitos desse minério distribuídos no mundo, com a descrição da geologia das encaixantes e do minério de ferro, idade, tipos de minérios e dimensões dos corpos mineralizados e outras características relevantes. A abordagem é feita, em princípio, pelas formações ferríferas bandadas (BIFs), que incluem aqueles depósitos detentores das maiores reservas mundiais; e, na sequência, pelos depósitos relacionados a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentares tipo Kiruna e Lahn Dill, depósitos sedimentares oolíticos e pisolíticos, depósitos de skarn e por alteração e acúmulo superficial. Neste capítulo, consegue-se, portanto, visualizar a complexidade das relações geológicas dos depósitos de minério de ferro pelo mundo afora, bem como ter uma ideia mais detalhada sobre a distribuição das principais reservas mundiais.

As descrições dos minerais de ferro e suas propriedades são apresentadas no Capítulo 4, visto que essas informações são fundamentais para a preparação e caracterização do minério de ferro. No Capítulo 5, há o detalhamento de preparação de amostras para o estudo do minério de ferro nas áreas de geologia e metalurgia, o que é também fundamental para sua caracterização.

O Capítulo 6 do livro discorre sobre a geometalurgia, ou seja, a caracterização do minério de ferro utilizada para estudos geológicos e metalúrgicos, que abrangem uma gama de características e propriedades do minério de ferro geológico e metalúrgico, tais como mineralógicas, texturais, estruturais e químicas, entre outras, as quais são fundamentais para definir e mesmo estabelecer modelos preditivos de comportamento do minério de ferro metalúrgico durante os processos de granulação, sinterização e pelletização, por meio de testes de qualidade dos produtos gerados.