



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE GRANULADOS DE
MINÉRIO DE FERRO PARA ALTOS-FORNOS”

Edna Mônica da Silva

Ouro Preto, Junho de 2022

Edna Mônica da Silva

“Caracterização Tecnológica de Granulados de Minério de Ferro para Altos-Fornos”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira

Coorientador: Prof. Dr. Jefferson Mendes

Ouro Preto, Junho de 2022.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586c Silva, Edna Monica da.
Caracterização tecnológica de granulados de minério de ferro para altos-fornos. [manuscrito] / Edna Monica da Silva. - 2022.
45 f.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira.
Coorientador: Prof. Dr. Jefferson Januário Mendes.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Minérios de Ferro. 2. Materiais granulados. 3. Altos-fornos. I. Vieira, Cláudio Batista. II. Mendes, Jefferson Januário. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Edna Mônica da Silva

Caracterização Tecnológica de Granulados de Minério de Ferro para Altos-fornos.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em 24 de Junho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira [Titulação] - Orientador - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr Jefferson Januário Mendes - IFMG Ouro Preto
Engenheira Adriana Carla Vieira - Fundação Gorceix

Prof. Cláudio Batista Vieira, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Batista Vieira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/07/2024, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0750052** e o código CRC **A3FC8734**.

RESUMO

As propriedades intrínsecas das cargas metálicas de altos-fornos têm forte influência sobre a produtividade e eficiência da marcha operacional desses reatores. A carga metálica dos altos-fornos a carvão vegetal das usinas siderúrgicas não integradas do Brasil é composta majoritariamente por diferentes tipos de granulados de minérios de ferro, como exemplo de granulado de minério de ferro temos a “hematitinha”, comercializada no mercado brasileiro e muito utilizada por pequenos produtores de ferro gusa da região metropolitana de Belo Horizonte. Neste contexto, será realizado no presente trabalho um estudo de caracterização tecnológica de quatro amostras de granulados de minério de ferro de diferentes regiões. Serão realizados ensaios químicos, físicos e metalúrgicos dessas amostras nos laboratórios da Fundação Gorceix. Este estudo propiciará uma melhor análise técnica referente ao uso desses minérios em altos-fornos. Os resultados obtidos mostraram que os tipos de granulados analisados apresentam diferentes características, de uma maneira geral, o que apresentou os melhores índices dentro das faixas especificadas pela literatura foi justamente o granulado D que possui uma composição química inferior aos demais com o mais baixo teor de ferro e teor de fósforo mais elevado.

Palavras-chave: Minério de ferro. Granulado. Alto-forno.

ABSTRACT

The intrinsic properties of blast furnaces metallic burden a strong influence on the productivity and efficiency of the operational reactor indexes. The metallic charge of charcoal blast furnaces from non-integrated steel mills in Brazil is composed mainly by different types of lump iron ore, as an example of lump iron ore we have the “hematitinha”, commercialized in the Brazilian market and widely used by small pig iron producers in the metropolitan region of Belo Horizonte. In this context, this work will do a study of technological characterization of four samples of lump iron ore from different regions. Chemical, physical and metallurgical tests will be carried out samples in the laboratories of the Gorceix Foundation. This study will provide a better Technical Analysis of the use of these ores in blast furnaces. The results show there are the types of lump iron ore analyzed have different characteristics, in general, the one that presented the best indexes within the ranges specified by the literature was precisely the lump iron ore D that has a lower chemical composition than the others with the lowest iron content and higher phosphorus.

Keywords: Iron Ore, Lump Ore, Blast Furnace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Principais zonas do alto-forno	17
Figura 3.2	Foto e desenho esquemático do forno de amolecimento	23
Figura 4.1	Fluxograma da metodologia	29
Figura 4.2	Forno para testes de RI e RDI. À direita esquema do funcionamento do forno	32
Figura 4.3	Tambor padronizado para tamboramento após ensaio RDI. À direita, detalhe do seu interior	33
Figura 4.4	Tambor padronizado para o ensaio de tamboramento	34
Figura 5.1	Curva granulométrica dos granulados de minério de ferro	37
Figura 5.2	Minérios Granulados A e B. À direita, imagem da amostra após o ensaio de RDI.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Reações principais, requisitos operacionais e de qualidade nas zonas granular e coesiva do alto-forno	18
Tabela 3.2	Características comerciais dos produtos granulados utilizados no alto-forno	19
Tabela 3.3	Principais produtos de minério de ferro	21
Tabela 3.4	Composição química, em porcentagem, dos materiais contendo ferro	26
Tabela 3.5	Propriedades metalúrgicas das cargas metálicas	27
Tabela 5.1	Distribuição granulométrica - granulado A	35
Tabela 5.2	Distribuição granulométrica - granulado B	35
Tabela 5.3	Distribuição granulométrica - granulado C	36
Tabela 5.4	Distribuição granulométrica - granulado D	36
Tabela 5.5	Composição química dos granulados de minério de ferro	38
Tabela 5.6	Índice de redutibilidade dos granulados de minério de ferro	39
Tabela 5.7	Índice de desintegração por redução a baixa temperatura dos granulados de minério de ferro	39
Tabela 5.8	Índice de tamboramento e abrasão dos granulados de minério de ferro	40

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta P_{\text{máx}}$ - queda máxima de pressão

ΔT - estimativa da espessura da zona coesiva

LISTA DE SIGLAS

RI – Índice de Redutibilidade

RDI – Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura

DI – Índice de Crepitação

TI – Índice de Tamboramento

AI – Índice de Abrasão

ISO – International Organization for Standardization

DEPEC – Departamento de Pesquisa e Engenharia Continuada

DEPAI – Departamento de Análises e Inovações

DETEMM- Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia

PPC – Perda por Calcinação

mmca – Milímetro coluna de água

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Alto-forno	16
3.2 Minério de Ferro Granulado	18
3.3 Análise Granulométrica	19
3.4 Análise Química	20
3.5 Ensaios Físicos e Metalúrgicos	21
3.5.1 Ensaio de tamboramento	21
3.5.2 Ensaio de amolecimento e fusão	22
3.5.3 Ensaio de crepitação	23
3.5.4 Ensaio de desintegração por redução a baixa temperatura	24
3.5.5 Ensaio de redutibilidade	25
3.6 Efeito da Geração de Finos e Redutibilidade do Material de Carga	25
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
4.1 Análise Química	29
4.2 Análise Granulométrica	30
4.3 Índice de Redutibilidade	30
4.4 Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura	31
4.5 Índice de Tamboramento	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 Análise Granulométrica	35
5.2 Análise Química	38
5.3 Índice de Redutibilidade	38
5.4 Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura	39
5.5 Índice de Tamboramento	40
6 CONCLUSÃO	42
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43

1 INTRODUÇÃO

Na operação de um alto-forno, ter cuidado no preparo da carga que alimentará o forno, utilizar a proporção adequada de cada constituinte que integrará a carga, sendo essa composta por: carga metálica (minério granulado, sínter ou pelotas), fundentes e combustível (carvão vegetal ou coque) e saber como cada material se comportará durante o transporte, manuseio, carregamento e funcionamento do forno são fundamentais para garantir um processo produtivo e eficiente para a produção do gusa. Para isso, é essencial fornecer uma carga em que cada constituinte esteja com a granulometria adequada e que a composição desses elementos permita obter no final um gusa com parâmetros e teores aceitos para aplicações posteriores, como lingotamento ou aciaria.

Para se ter esse controle, é necessário que se tenha um sistema eficaz e consistente para análise química e granulométrica, em que, periodicamente, amostras de cada constituinte da carga devem ser coletados para a realização de testes e ensaios que vão permitir avaliar se esses estão adequados para o processo.

Conhecer as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da carga metálica torna-se cada vez mais importante para o processo. Foram e estão sendo desenvolvidos vários procedimentos para determinar e quantificar diversas dessas propriedades em que, a partir de diversos ensaios, é possível simular como será o comportamento desses, durante o processo siderúrgico no alto-forno. Como exemplo, tem-se o ensaio de redutibilidade, em que obtém-se o índice de redutibilidade que permite saber se o minério ou aglomerado é mais ou menos facilmente reduzido pelas fases gasosas, CO, H₂ ou CO + H₂ e o ensaio de RDI, a partir do qual obtém-se o índice de desintegração por redução a baixa temperatura que ocorre principalmente pela redução da hematita a magnetita ou wustita, a baixas temperaturas, na faixa de 550°C (LU et al., 2009).

Um cuidado que se deve ter é com a geração de finos durante o processo, pois esses finos podem adentrar nos espaços vazios existentes entre as partículas maiores, reduzindo os espaços vazios e a permeabilidade, dificultando a passagem dos gases, afetando o funcionamento e eficiência do processo. Os finos gerados também podem gerar uma maior perda de ferro pela poeira de combustão dentro do forno.

O minério granulado ainda é muito utilizado em altos-fornos a carvão vegetal. Por apresentar um preço bem inferior ao das pelotas, em muitos casos, utiliza-se um *blend* de cargas metálicas como sínter e granulados. Essa quantidade utilizada tende a aumentar para ajudar a equilibrar a química da escória e reduzir os custos da matéria-prima para o alto-

forno, pois o granulado de minério de ferro, além de possuir um menor custo, ele também contém muito menos alumina do que os finos de minério de ferro (LU et al., 2009).

Entretanto, deve-se atentar para a quantidade de granulado presente na carga, visto que, os minérios granulados possuem propriedades inferiores, principalmente nas propriedades de amolecimento e fusão e no fenômeno de crepitação, podendo afetar o funcionamento do alto-forno e aumentar o consumo de coque, tornando o processo inviável. No leste da Ásia, uma carga típica de um alto-forno moderno contém cerca de 10% a 20% de minério granulado (LU et al., 2009).

Para conhecer a proporção adequada do minério granulado a ser utilizado no alto-forno em determinado processo é de extrema importância conhecer as propriedades e o comportamento dos constituintes metálicos, tanto individualmente quanto em conjunto e para isso é fundamental realizar a caracterização tecnológica que permitirá estudar e avaliar o comportamento desses elementos no processo.

O presente trabalho visa realizar a caracterização tecnológica de diferentes tipos de granulados de minério de ferro para aplicação em altos-fornos através da análise química, granulométrica, ensaios de redutibilidade (RI), desintegração por redução a baixa temperatura (RDI), tamboramento (TI) e abrasão (AI).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar a caracterização tecnológica de granulados de minério de ferro para uso em alto-forno.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização química dos granulados.
- Realizar a análise granulométrica dos minérios granulados
- Realizar ensaios metalúrgicos e físicos dos granulados, por meio dos testes de RI, RDI e tamboramento.
- Avaliar e comparar 4 tipos de granulados de minério de ferro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alto-forno

O alto-forno é um reator cilíndrico vertical que trabalha a contracorrente, onde a alimentação com a carga a ser reduzida entra pelo topo e os gases redutores sobem da base para o topo do forno em regime permanente. Suas dimensões são da ordem de 10m a 14m por diâmetro por 60m a 70m de altura. Para o seu funcionamento de maneira eficaz, é necessário equipamentos auxiliares como: regeneradores, onde para cada alto-forno se tem 3 a 4 regeneradores, cuja função é recuperar o calor latente dos gases que saem do topo do alto-forno, aquecendo o ar que será injetado no alto-forno; turbo soprador, que é uma turbina multiestágio que permite ter alta vazão a pressões elevadas; sistema de limpeza de gases, fundamental para impedir o entupimento das tubulações e regeneradores, devido à alta quantidade de particulados nos gases que saem do alto-forno (MOURÃO et al., 2007).

Após a dosagem de matérias-primas: carga metálica (minério granulado, sinter, pelotas), fundentes e combustível (coque ou carvão vegetal), é realizado o carregamento dessas matérias-primas no topo do equipamento, o carregamento é realizado que tal forma que fique intercalados em camadas as matérias-primas ferrosas e o combustível. Durante o carregamento, o ar aquecido nos regeneradores é injetado pelas ventaneiras na parte inferior do forno, na zona de combustão, onde o carvão injetado e o combustível utilizado entram em contato com o ar aquecido gerando gases a temperaturas elevadas. Esses gases ao subir, entra em contato com a carga metálica que desce e reagem, reduzindo e fundindo a carga metálica originando o ferro gusa e escória que são separados através da diferença de densidade e são vazados em furos diferentes situados na base do alto-forno (FONTE).

No alto-forno, são definidas cinco zonas principais: zona granular, zona de amolecimento e fusão, homem morto, zona de gotejamento e zona de combustão (MOURÃO et al., 2007).

- Zona granular: Região onde a carga ferrífera se mantém sólida e granular. Nela a carga metálica e o combustível mantêm a sua configuração inicial da maneira que foram carregadas, em camadas alternadas.
- Zona de amolecimento e fusão (zona de coesão): É constituída de camadas de coque e camadas coesivas alternadas que são formadas por massa semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo de gás, que preferencialmente passa através das camadas de coque.

- Zona de gotejamento: Região constituída de coque no estado sólido onde o metal e a escória, no estado líquido, gotejam através dos interstícios. Essa zona pode ser subdividida em duas zonas: zona de coque ativo e coque inativo (homem morto). No cadinho e em parte da rampa, a carga sólida é composta apenas por coque. Essa porção será dividida em duas zonas: zona de coque ativo que compreende a porção de coque que rola na direção das ventaneiras para ser queimado e a zona de coque inativo, também conhecido como homem morto, onde não há o rolamento do coque para as ventaneiras, sendo consumido pela incorporação do carbono ao gusa.
- Zona de Combustão: Região localizada à frente das ventaneiras, onde se tem a queima do coque ou carvão vegetal, gerando o gás redutor e energia.
- Cadinho: É preenchido com coque granulado, onde o gusa e a escória atravessam pelos interstícios e se depositam no fundo do cadinho, sendo separados em duas camadas devido a diferença de densidade.

A Figura 3.1 mostra as principais zonas presentes no interior do alto-forno.

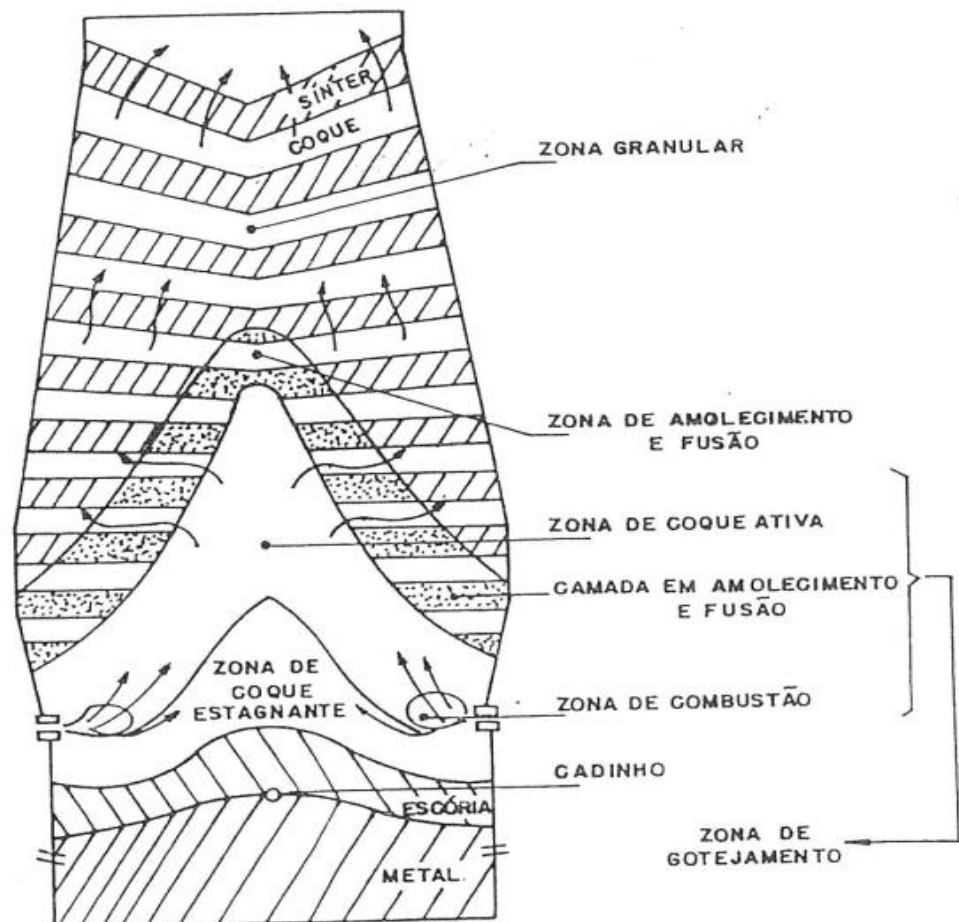


Figura 3.1. Estrutura interna de um alto-forno (CAMPOS, 1984 apud OLIVEIRA, 2010).

As condições às quais a carga está sujeita como temperatura, composição do gás e a carga compressiva variam muito no processo de redução no alto-forno tanto verticalmente quanto radialmente. Devido a isso, a carga metálica deve atender diferentes requisitos de qualidade, como, por exemplo, o minério granulado em diferentes zonas do alto-forno. A Tabela 3.1 mostra as principais reações que ocorrem nas zonas granulares e coesivas e os requisitos operacionais para essas duas zonas, que determinam os requisitos de qualidade para a carga metálica. Abaixo da zona de amolecimento e fusão, o granulado perde a sua identidade devido ao processo de amolecimento e fusão, não tendo um impacto significativo nos processos que ocorrem abaixo dessa zona (LU et al., 2009).

Tabela 3.1 Reações principais, requisitos operacionais e de qualidade nas zonas granular e coesiva do alto-forno

Zonas	Reações principais	Requisitos Operacionais	Requisitos de qualidade	Propriedades físicas
Granular	Pré-aquecimento e secagem Redução indireta do minério de ferro Reação de solução de carbono	Permeável a gás	Distribuição de tamanho adequada. Resistência à ruptura durante o carregamento e a compressão sofrida no forno. Resistência a crepitação devido ao choque térmico. Resistência a desintegração devido à redução em baixas temperaturas. Alta redutibilidade	Distribuição de tamanho e tamanho médio das partículas. Índice de queda. Índice de crepitação. Índice de desintegração de redução. Índice de redutibilidade.
Coesiva	Redução indireta de FeO Carburação do Fe por CO Reação de solução de carbono	Mais estreito possível e a origem da zona coesiva precisa ser o mais baixo possível.	Alta temperatura de amolecimento Baixa temperatura de gotejamento.	Temperatura de amolecimento Temperatura de fusão Largura da zona coesiva Valor de S

Fonte: (LU et al., 2009).

3.2 Minério de Ferro Granulado

As características metalúrgicas dos produtos granulados estão associadas à consistência dos tipos litológicos. Em produtos derivados de itabiritos, a redutibilidade e RDI são mais elevados e os índices de crepitação e tamboramento são menores. Já nos minérios

hematíticos médios e macios, a redutibilidade, RDI e os índices de crepitação e tamboramento possuem valores intermediários e os minérios hematíticos compactos possuem índices menores de redutibilidade e RDI e possuem maiores índices de crepitação e tamboramento (FERNANDES, 2008).

Na indústria siderúrgica, os granulados do minério de ferro podem ser utilizados no processo de redução direta e no alto-forno. Souza (1998, apud FERNANDES, 2008) em seu trabalho, relata as características comerciais dos produtos granulados utilizados no processo de redução indireta no alto-forno.

Tabela 3.2 Características comerciais dos produtos granulados utilizados no alto-forno

Propriedade Metalúrgica, Química e Granulométrica	Granulado Alto-forno
Redutibilidade (% de redução)	≥ 45%
RDI (% < 2,8mm)	≤ 25%
Índice de Crepitação (<6,3mm)	≤ 10%
Tamboramento (TI: % > 6,3mm)	≥ 75%
Abrasão (AI:% < 0,5mm)	≤ 10%
Teor Fe total	64,8% a 66%
Teor SiO ₂	1,8% a 2,4%
Teor Al ₂ O ₃	1,5% a 2,1%
Teor P	0,06% a 0,07%
Teor Mn	0,25% a 0,45%
Perda por calcinação (PPC)	1,6% a 2,2%
Over Size (% > 31,50 mm)	6% a 8%
Under Size (% < 6,3 mm)	6% a 10%

Fonte: (SOUZA, 1998 apud FERNANDES, 2008).

Os produtos granulados de minério de ferro para serem utilizados como carga metálica no alto-forno devem estar em uma faixa granulométrica adequada, com granulometria entre 31,5 a 6,3mm, o teor de ferro total deve variar entre 66% a 67,5% e com baixo teor de

impurezas, principalmente sílica, alumina e fósforo (SOUZA, 1998 apud FERNANDES, 2008).

3.3 Análise Granulométrica

A granulometria das partículas é muito importante para o processo de produção de gusa no alto-forno, visto que, essa propriedade irá influenciar diretamente na distribuição dos gases dentro do alto. Definindo um tamanho médio adequado, essa faixa granulométrica deve ser com a menor variação possível. Minérios granulados com grandes quantidades de finos prejudica a permeabilidade do leito, entretanto, minérios com frações grosseiras em grandes quantidades tendem a ter a sua redutibilidade dificultada. Para não prejudicar o processo e se ter uma maior eficiência deve-se buscar um equilíbrio entre essas partículas com faixa granulométrica indesejáveis (LEMOS et al.,1978 apud FERNANDES, 2008).

3.4 Análise Química

Com a análise química feita nos granulados podemos obter uma previsão quanto à condição de utilização através de parâmetros químicos, cujos principais são: Fe total, SiO₂, Al₂O₃, P, Mn, MgO, CaO e TiO₂ (LEMOS et al.,1978 apud FERNANDES, 2008).

- Teor de ferro total: Deve estar entre 66% a 67,5%, se a concentração de ferro no granulado for baixa, terá uma grande quantidade de impurezas sendo carregadas para o alto-forno, podendo prejudicar a composição e as propriedades finais do produto.
- Teor de sílica: Está diretamente relacionada ao volume de escória. Grandes quantidades de SiO₂ acarretará em um consumo maior de calcário e coque.
- Teor de fósforo: O fósforo é um elemento fragilizador do aço. Cerca de 90% a 95% do fósforo que entra no alto-forno é incorporado ao gusa, sendo necessário a realização de desfosforação na aciaria, abrangendo operações auxiliares difíceis e de custo elevado.
- Teor de enxofre: O enxofre é muito prejudicial ao aço. Parte do enxofre é eliminado na escória do alto-forno, sendo necessário, posteriormente, realizar uma etapa de dessulfuração do gusa, para remoção do enxofre presente.
- Álcalis e Zinco: São elementos que prejudicam a operação do alto-forno, pois apresentam baixo ponto de fusão e vaporização, fazendo com que fiquem

circulando dentro do forno. Esses elementos não se concentram de forma homogênea no forno, a zona coesiva é a região em que fica a maior concentração. Eles afetam a temperatura de amolecimento e contribuem para a formação de cascão no alto-forno.

Na Tabela 3.3 estão representadas as principais especificações químicas e granulométricas dos principais produtos de minério de ferro.

Tabela 3.3 Principais produtos de minério de ferro

Produtos	Tamanhos (mm)	%Fe	%P	Umidade (%)
“Lump” Comum	12,5 – 152,4 15% < 12,5	68 - 69	0,045	1
“Lump”	12,5 – 152,4 10% < 12,5	68 - 69	0,045	4 – 7
“Pebble”	10 – 75 20% < 10	66 - 68	0,050	2 – 4
“Natural Pellet Ore”	5– 25 10% < 5	66 - 68	0,060	2 – 4
“Standart Sinter Feed”	< 6,35 Máx. 10% > 6,35 Máx. 42% < 0,15	64,5	0,070	4 – 6
“Pellet Feed Fines”	< 0,15 Min. 80 – 90% < 0,044	67,5	0,018	8

Fonte: (LIMA, 1997).

3.5 Ensaios Físicos e Metalúrgicos

3.5.1 Ensaio de tamboramento

No ensaio de tamboramento, os finos medidos são proporcionais aos finos gerados durante o processo de redução. Quanto menor o índice de tamboramento, menor será a quantidade de finos gerados na redução (FERNANDES, 2008). O teste de tamboramento simula as forças experimentadas pelo produto granulado durante o manuseio de baixo impacto e eventos durante o transporte (DUKINO et al., 2000).

A degradação do minério granulado durante o transporte pode reduzir significativamente a quantidade de minério granulado disponível para carregar no alto-forno e, se ao carregar o alto-forno ocorrer degradação, a operação poderá ser prejudicada (LU et al., 2009).

O impacto e abrasão podem ser os principais responsáveis pela degradação mecânica de granulados no alto-forno. Caso a partícula individual não seja capaz de acomodar a energia gerada pelo impacto no carregamento, bem como à abrasão entre as partículas e entre as partículas e a parede do forno, essa partícula tenderá a se quebrar e gerará finos que irão preencher os vazios na carga compactada, reduzindo a permeabilidade do leito, dificultando a passagem dos gases (LU et al., 2009).

3.5.2 Ensaio de amolecimento e fusão

O ensaio de amolecimento e fusão nos permite identificar diversos parâmetros que são diretamente relacionados aos fenômenos que ocorrem dentro do alto-forno. Esses parâmetros são (CARVALHIDO, 2019):

- T_s = Temperatura de início da zona coesiva: correspondente ao instante em que a queda de pressão atinge 200mmca durante o aquecimento da amostra.
- T_e = Temperatura de final de fusão: correspondente ao instante em que a queda de pressão retorna a 200mmca após pico de pressão.
- ΔT = estimativa da espessura da zona coesiva: corresponde ao aumento de temperatura experimentado pela carga metálica na região de queda de pressão mais significativa do alto-forno.
- $\Delta P_{m\acute{a}x}$ = queda máxima de pressão, indica a perda de carga no leito
- S = área sob o pico de perda de pressão do gás: é um indicador global da permeabilidade do leito.
- R_{s200} e $R1200$ = grau de redução no início do amolecimento e a 1200°C, respectivamente.

Para o ensaio de amolecimento e fusão não há nenhuma norma que padroniza esse ensaio. De acordo com o procedimento realizado pelo Centro de Pesquisa & Desenvolvimento Usiminas, as amostras são aquecidas sob um fluxo de 34Nl/min de N_2 a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Na temperatura de 800°C, aplica-se na amostra uma pressão de 98kPa e inicia a passagem do gás redutor, mantendo o mesmo fluxo. Ao atingir a temperatura de 1000°C a taxa de aquecimento superior é reduzida para 5°C/min até atingir a temperatura de 1550°C, já para o aquecimento do forno inferior mantém-se a taxa de

10°C/min até 1650°C. Ao final do ensaio, é realizada uma refrigeração controlada até 800°C com um fluxo de N₂ de 15Nl/min. Para reproduzir a resistência mecânica a que o material é submetido no alto-forno, o ensaio é feito aplicando-se uma carga no topo da superfície da amostra por um pistão de grafite (CARVALHIDO, 2019). A Figura 3.2 mostra a foto e desenho esquemático do forno de amolecimento.

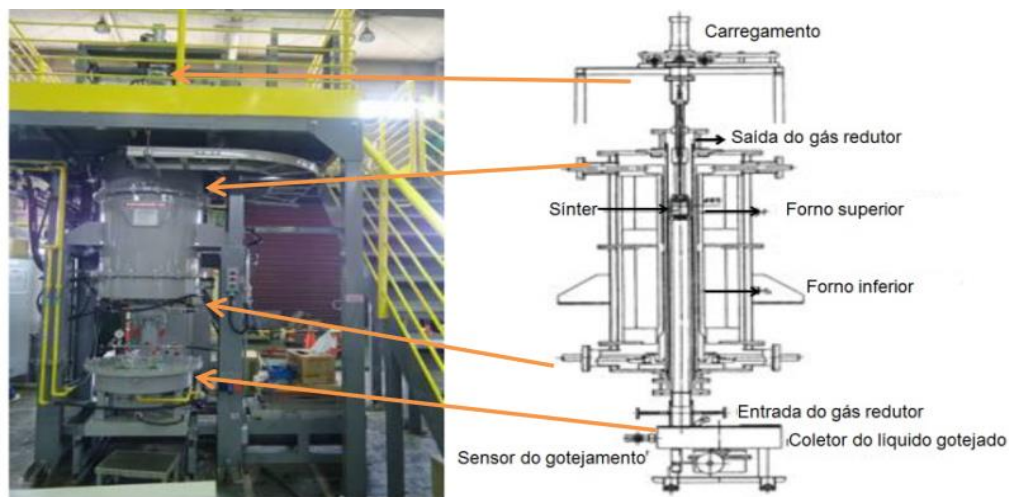


Figura 3.2. Foto e desenho esquemático do forno de amolecimento (CARVALHIDO, 2019).

3.5.3 Ensaio de crepitação

A crepitação consiste em um fenômeno que ocorre devido ao aquecimento brusco gerando uma degradação granulométrica no granulado do minério de ferro que é indesejável nos processos de redução (FARIA, 2008).

À medida que a carga fria pousa no topo da carga quente no forno e desce, ocorrerá o choque térmico que poderá ocasionar a ruptura das partículas granuladas. O índice de crepitação determina a resistência do minério granulado à degradação térmica. Um alto índice de crepitação resulta em mais perda de ferro através da geração de poeira, tendo um impacto negativo na permeabilidade do alto-forno (LU et al., 2009).

Vieira (1996) em seu trabalho, avaliou a influência do índice de crepitação com a realização de um tratamento térmico prévio ao choque térmico, onde, ele observou que há uma forte influência entre eles, concluindo que a crepitação pode ser bastante reduzida quando se aplica técnicas de secagem e tratamentos térmicos nos granulados de minério de ferro, como o que ocorre nos silos de minério de usinas siderúrgicas brasileiras à carvão vegetal.

Um exemplo desta aplicação está no silo de minério projetado pela J.B. Consultoria, onde observou-se melhoria na permeabilidade do leito e melhor estabilidade de marcha do reator, gerando uma produtividade maior e um menor consumo de carvão vegetal, com uma redução de 5% a 10% , devido ao tratamento térmico aplicado no silo, condizendo com o trabalho de Vieira (1996), pois o autor mostra que com o tratamento térmico tem-se um alívio de tensões no interior da partícula, gerando uma drástica redução na intensidade de crepitação em todos os diferentes tipos de minérios de ferro situados no Brasil que foram testados em seu trabalho (VIEIRA et al., 2007; VIEIRA, 1996).

Segundo a ISO 8371, para determinar o índice de Crepitação a amostra é rapidamente aquecida da temperatura ambiente até 700°C, sendo mantida nessa temperatura por 30 minutos e, então é resfriada até a temperatura ambiente. Após o resfriamento é feito um peneiramento da amostra com a peneira que possui a abertura da malha de 6,3mm.

A Equação 3.1 mostra como se obtém o índice de crepitação expresso pela % em massa:

$$DI_{-6,3} = 100x \frac{m_2}{m_1} \quad (3.1)$$

Em que:

m_1 = massa em gramas da amostra após o tratamento térmico.

m_2 = massa em gramas da fração da amostra menor que 6,3mm.

3.5.4 Ensaio de desintegração por redução à baixa temperatura (RDI)

A desintegração do minério granulado geralmente está associada à variação de volume que ocorre na redução da hematita em magnetita e à incapacidade dos grãos de hematita não conseguir acomodar as deformações decorrentes de mudanças no volume e na estrutura cristalina. O Fe_2O_3 pertence ao sistema de cristal hexagonal e tem uma densidade de $5,255g/cm^3$, já o Fe_3O_4 tem uma estrutura espinélica octaédrica com uma densidade teórica de $5,2g/cm^3$. Portanto, a redução da hematita para a magnetita, gera mudanças tanto na estrutura cristalina quanto na expansão do volume, criando tensões que podem ocasionar rachaduras que se formam inicialmente nos contornos de grãos, levando a degradação das partículas de minério (LU et al., 2009).

3.5.5 Ensaio de redutibilidade (RI)

Acima da zona coesiva, ocorre a redução indireta, onde os óxidos de ferro são reduzidos principalmente pelos gases redutores, incluindo CO e H₂, para wustita (FeO). Já a redução adicional para ferro ocorre em contato com o combustível sólido ou coque dentro e abaixo da zona coesiva através da redução direta. O índice de redutibilidade foi criado para quantificar até que ponto o oxigênio pode ser removido do minério de ferro em um período fixo quando reduzido em condições semelhantes à zona de redução indireta do alto-forno (LU et al., 2009).

A alta redutibilidade favorece a redução indireta, gerando uma queda no consumo do combustível, espera-se com uma alta redutibilidade a diminuição a quantidade de fundido formado na redução, ocasionando características melhores de amolecimento e fusão (LU et al., 2009).

Segundo os autores, na redução indireta, a redução dos óxidos de ferro ocorre através de um mecanismo entre reações sólido/ gás. Em temperaturas intermediárias, é esperado que a taxa de redução possa ser controlada pela difusão de gases mistos e reações químicas nas superfícies dos poros presentes no sólido. Devido a isso, é de se esperar que a porosidade da fase sólida afete a cinética da reação, uma vez que altera a área da superfície disponível para a reação química (LU et al., 2009).

3.6 Efeito da Geração de Finos e Redutibilidade do Material de Carga

Em um leito compactado, os finos tendem a ocupar as frações de vazios entre as partículas maiores, reduzindo os espaços vazios e a permeabilidade, dificultando a passagem dos gases. Espera-se uma menor permeabilidade para materiais com menor índice de tamboramento e maior RDI, visto que, é esse tipo que gera mais finos à medida que desce, podendo afetar a distribuição e volume do gás, assim como a geração de poeira de combustão dentro do forno e, conseqüentemente, afetar a produtividade e estabilidade de operação do forno (LU et al., 2009).

A redutibilidade pode afetar a taxa de coque no alto-forno, reduzindo o potencial de CO e H₂ no forno e, portanto, reduzir o consumo de coque no forno. O minério com alta redutibilidade resultará também em menos FeO na carga à medida que desce para a região de maior temperatura e, dessa forma, melhorará a propriedade de amolecimento do material de carga (LU et al., 2009).

Wu et al. (2010), avaliaram o aumento da proporção de minérios granulados no alto-forno, estudando como esse material interage com os outros tipos de carga metálica como os sínters e pelotas. Foram realizados ensaios de redutibilidade (RI), amolecimento e fusão e crepitação.

Em seu trabalho, realizado na China, foram utilizados sínter, pelotas e granulados. O sínter utilizado possui alta basicidade, utilizou-se dois tipos de pelotas importados do Brasil, três tipos de granulados da Austrália e um de Hainan da China para corrigir a basicidade. Na Tabela 3.4, tem-se a composição química desses materiais, onde S-A é o sínter, P-A e P-B são as pelotas vindos do Brasil, L-A, L-B e L-C são os granulados da Austrália e o L-D é o granulado oriundo de Hainan.

Tabela 3.4 Composição química, em porcentagem, dos materiais contendo ferro

Material	Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	MnO
S-A (Sínter A)	58,42	8,33	8,70	4,80	1,65	1,92	0,08	0,120	0,010	0,32
P-A (Pelota A)	66,01	0,67	2,68	2,36	0,63	0,09	0,05	0,056	0,005	0,13
P-B (Pelota B)	66,85	0,30	1,61	2,32	0,82	0,17	0,03	0,076	0,006	0,12
L-A (Granulado A)	64,41	0,40	0,01	2,60	1,26	0,05	0,01	0,144	0,016	0,48
L-B (Granulado B)	64,34	0,48	0,11	2,18	1,44	0,15	0,03	0,151	0,019	0,26
L-C (Granulado C)	63,28	0,53	0,01	2,46	1,21	0,05	0,02	0,116	0,023	0,10
L-D (Granulado D)	56,87	1,83	0,36	14,42	0,53	0,12	0,09	0,048	0,270	0,10

Fonte: (WU et al., 2010).

De acordo com a Tabela 3.4, ao comparar a composição química das pelotas com o granulado, observa-se que a diferença do teor de ferro e teor de ganga não é grande, enquanto o teor de S e P é maior que o das pelotas, no entanto, o efeito disso na operação do alto-forno é mínimo e, com a grande diminuição de carbonato e o baixo teor de SiO₂ (com exceção do granulado de Hainan) nos granulados reduzirá os efeitos indesejáveis na

redutibilidade e permeabilidade do alto-forno (WU et al., 2010). As propriedades metalúrgicas das cargas metálicas obtidas nos ensaios realizados, são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Propriedades metalúrgicas das cargas metálicas

Material	RI (%)	RDI-6,13 mm (%)	Temperatura inicial de amolecimento (°C)	Temperatura final de amolecimento (°C)	Intervalo de amolecimento (°C)
S-A (Sínter A)	81,2	-	1208	1305	97
P-A (Pelota A)	67,4	-	1030	1256	226
P-B (Pelota B)	68,6	-	1033	1258	225
L-A (Granulado A)	70,7	4,93	1016	1218	202
L-B (Granulado B)	73,4	6,16	995	1252	257
L-C (Granulado C)	82,3	5,46	1034	1319	285
L-D (Granulado D)	68,9	0	1006	1144	138

Fonte: (WU et al., 2010).

A partir dos dados obtidos pelo ensaio de redutibilidade (RI), o sínter apresentou um valor relativamente alto, o que está de acordo com as características do sínter que apresenta alta basicidade, os das pelotas foram os que apresentaram menores valores, os RIs dos granulados da Austrália foram maiores que os das pelotas e o granulado LC apresentou uma redutibilidade maior que a do sínter. Já o granulado do minério de Hainan apresentou um valor um pouco maior que o índice de redutibilidade das pelotas (WU et al., 2010).

Pelos resultados do índice de crepitação pode-se observar que os índices de crepitação do minério da Austrália são relativamente altos, enquanto o do minério de Hainan não houve crepitação. Porém o maior índice de crepitação 6,13% ainda está abaixo de 6,2%, sendo inferior a proporção de pó gerado a partir da redução da temperatura de degradação dos sínteres e redução da expansão das pelotas. O bom funcionamento do alto-forno não será

influenciado pela crepitação do granulado, portanto, o aumento da proporção de granulados no alto-forno não pode ser impedido devido à crepitação dos granulados (WU et al., 2010).

Através do ensaio de amolecimento e fusão, pode-se verificar que as propriedades de amolecimento do sinter com alta basicidade são as melhores, seguido do granulado de Hainan, as pelotas, sendo um pouco melhor que os granulados da Austrália. Como as propriedades de amolecimento das pelotas são apenas um pouco melhor do que as dos granulados da Austrália, ao substituir parte das pelotas por granulados não se tem muitas mudanças nas propriedades de amolecimento durante o processo (WU et al., 2010).

Wu et al. (2010), verificaram as propriedades de amolecimento da carga metálica composta por minério granulado e sinter, pelota e sinter e pelota e granulado. Nas cargas compostas por minério granulado e sinter, e pelota e sinter, as diferentes cargas metálicas interagem em altas temperaturas e as extensões das interações são discrepantes. Já na carga composta por pelota e minério granulado, não ocorre a interação entre elas em altas temperaturas, elas apenas se misturam fisicamente, visto que, nessa situação, o ímpeto da reação química está em falta, pois o minério granulado e a pelota são ácidos.

Em uma das etapas da parte experimental do trabalho, foram projetadas estruturas de cargas com diferentes proporções de minério granulado. Ao aumentar a proporção de minério granulado de 17% para 23%, observou-se que as propriedades de amolecimento foram melhoradas, o intervalo de temperatura de queda diminuiu gradativamente, indicando que as propriedades de amolecimento e queda melhoraram com o aumento da proporção de granulados ao invés de piorar. Segundo WU et al. (2010, p.693), isso ocorreu porque:

o aumento de dois minérios granulados com forte reatividade em alta temperatura e a diminuição das pelotas com reatividade fraca é útil para melhorar as propriedades de amolecimento pobres do minério granulado e pelotas. Com a proporção do minério granulado aumentando de 23 para 27%, a temperatura inicial de amolecimento diminuiu, o intervalo de temperatura de amolecimento aumentou. Mas as propriedades de amolecimento e queda da carga integrada ainda eram relativamente boas, ainda melhores do que a da carga com 20% de minérios granulados.

Com uma mistura com proporções de diferentes granulados de minério de ferro adequados, ainda se tem propriedades de amolecimento e queda da carga integrada boas para o processo e utilizando a proporção de granulados de 23% pode-se alcançar bons índices econômicos e técnicos na produção industrial (WU et al., 2010).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia aplicada neste trabalho consistiu na seleção de amostras representativas de diferentes tipos de granulados de minério de ferro para a caracterização química, física e metalúrgica dos mesmos.

No presente trabalho utilizou-se 4 diferentes tipos de granulados de minério de ferro. Os minérios de ferro analisados pertencem ao estado de Minas Gerais, porém estão fora da região do Quadrilátero Ferrífero, logo, apresentam propriedades distintas do Quadrilátero Ferrífero. Para cada um dos ensaios e análises, foram coletadas 1 amostra de cada material. Totalizando no final 5 amostras para cada tipo de granulado. As amostras foram fornecidas pela Fundação Gorceix e todos os ensaios realizados nas dependências dos laboratórios do Departamento de Pesquisa e Engenharia Continuada – DEPEC, Departamento de Análises e Inovações – DEPAI e no Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia – DETEMM, todos pertencentes a Fundação Gorceix.

A Figura 4.1 ilustra esquematicamente a metodologia que será utilizada no trabalho.

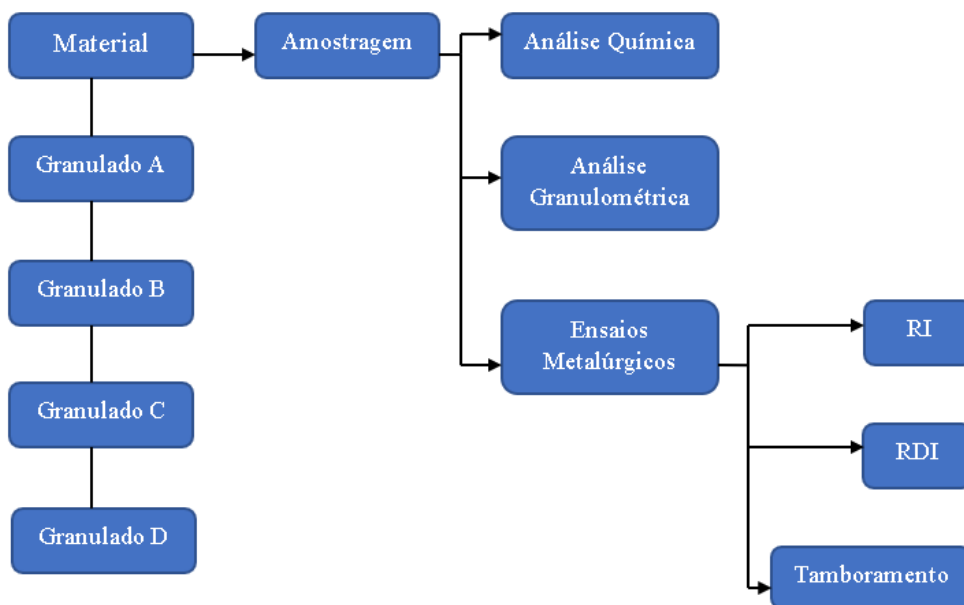


Figura 4.1. Fluxograma da metodologia.

4.1. Análise Química

A análise química dos granulados foi realizada por meio do método de Fluorescência de Raio X, utilizando um espectrômetro de marca *Panalytical Zetium* em conjunto com o

software SuperQ pelo DEPAI - Departamento de Análises e Inovações pertencente à Fundação Gorceix. Já o teor de ferro total foi obtido por análise química via úmida (titulometria), seguindo as normas e metodologia do próprio DEPAI.

4.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica das amostras A, B, C e D foram obtidas a partir do peneiramento, onde, utilizou-se as peneiras com as seguintes aberturas de malha: 37,5mm, 25mm, 19mm, 16mm, 12,5mm e 10mm para as amostras A e B e 25mm, 19mm, 16mm e 12,5mm para as amostras C e D.

4.3. Índice de Redutibilidade

O ensaio para determinar o índice de redutibilidade foi realizado conforme a norma ISO 7215.

Segundo a ISO 7215, a amostra é reduzida isotermicamente a 900°C, em leito fixo, usando um gás redutor composto por CO e N₂, por 180 minutos. O grau de redução é calculado a partir de perda em massa de oxigênio após esse tempo de 180 minutos.

Para a realização desse ensaio em minérios granulados, a faixa granulométrica da amostra deve estar entre 20mm e 18mm. Antes de iniciar o ensaio, deve-se secar a amostra à temperatura de 105°C ± 5°C até a massa se manter constante e realizar o resfriamento à temperatura ambiente.

Deve-se passar um fluxo de N₂ na amostra com a vazão de 5L/min e iniciar o aquecimento. Quando a temperatura se aproximar de 900°C, deve-se aumentar a vazão para 15L/min e continuar aquecendo, mantendo o fluxo de N₂ até que se atinja a temperatura de 900°C ± 10°C e, essa seja alcançada por 30 minutos. Após, deve-se introduzir o gás redutor a uma vazão de 15L/min ± 0,5L/min para substituir o N₂ por 180 minutos. Em seguida, deve-se parar fluxo do gás redutor e introduzir N₂ a uma vazão de 5L/min por 5min ou mais para eliminar o gás redutor do tubo.

O grau de redução final, expresso em porcentagem em massa é obtido a partir da Equação 4.1:

$$R_{180} = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_0(0,430w_2 - 1,111w_1)} \right] \times 10^4 \quad (4.1)$$

Em que:

m_0 = massa da amostra, em gramas;

m_1 = é a massa da porção de ensaio imediatamente antes do início da redução, em gramas;

m_2 = é a massa da porção de ensaio após 180min de redução, em gramas;

w_1 = é o teor de óxido de ferro (II), como porcentagem em massa, da amostra antes do ensaio;

w_2 = o teor de ferro total, como uma porcentagem em massa, da amostra antes do ensaio.

4.4. Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura

O ensaio para determinar o índice de redução – desintegração foi realizado obedecendo as instruções da norma ISO 4696-2.

De acordo com a ISO 4696-2, a amostra é reduzida isotermicamente em um leito fixo a 550°C, por um gás redutor composto por N₂ e CO no período de 30 minutos. A porção de ensaio reduzida é colocada em um tambor específico e sofre 900 rotações. Em seguida, é realizado o peneiramento com uma peneira com a abertura de 2,8mm. O índice de redução-desintegração RDI é obtido com a fração da amostra menor que 2,8mm.

Para a realização desse ensaio em minérios granulados, a faixa granulométrica da amostra deve estar entre 20mm e 16mm. Antes de iniciar o ensaio, deve-se secar a amostra à temperatura de 105°C ± 5°C até a massa se manter constante e realizar o resfriamento à temperatura ambiente.

Deve-se passar um fluxo de N₂ na amostra com a vazão de 5L/min e iniciar o aquecimento e continuar aquecendo mantendo o fluxo de N₂ até atingir a temperatura de 550°C ± 10°C. Deixar por um período de 15 minutos para alcançar o equilíbrio térmico à 550°C. Após, deve-se introduzir o gás redutor a uma vazão de 15L/min ± 0,5 L/min para substituir o N₂ por 30 minutos. Em seguida, deve-se parar fluxo do gás redutor e introduzir N₂ a uma vazão de 5L/min e resfriar a amostra para uma temperatura abaixo de 100°C.

Em seguida a amostra é removida do tubo de redução, mede-se a massa da amostra (m_0) e coloca-se a amostra na caçamba do tambor. Deve-se rotacionar o tambor por um total de 900 rotações a uma taxa de 30rpm ± 1rpm.

Retira-se o material do tambor e, em seguida, faz-se o peneiramento da amostra com a peneira de 2,8mm. Anota a massa do material que ficou retido na peneira de 2,8mm e o material menor que 2,8mm é obtido pela diferença entre a massa da amostra (m_0) e o

material que ficou retido na peneira de abertura de 2,8mm (m_1), pois o material perdido no tamboramento e no peneiramento são considerados parte da fração menor que 2,8mm.

O índice de redução – desintegração (RDI), expresso em porcentagem em massa, é calculado a partir da Equação 4.2:

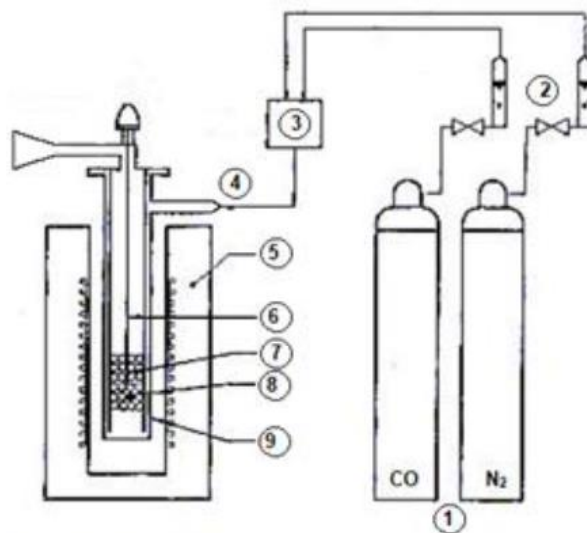
$$RDI - 2_{2,8} = 100 - \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Em que:

m_0 = massa, em gramas, da amostra após a redução e antes do tamboramento.

m_1 = massa, em gramas, da fração da amostra maior que 2,8mm.

A Figura 4.2 mostra esquematicamente o forno que será utilizado para os ensaios de RI e RDI no presente trabalho.



1. Cilindros de gás com manômetro e válvula de redução; 2. Medidores de vazão de gás;
3. Misturador de gases; 4. Entrada de gases; 5. Forno aquecido eletricamente; 6. Termopar
7. Amostra; 8. Camada de pelotas refratárias; 9. Retorta de parede dupla com placa perfurada como porta-amostra

Figura 4.2. Forno para testes RI e RDI. À direita, esquema do funcionamento do forno. Adaptado da ISO 4696-2 (FIGUEIREDO, 2018).

A Figura 4.3 ilustra o tambor padronizado para o tamboramento após o ensaio de RDI.



Figura 4.3. Tambor padronizado para tamboramento após ensaio RDI. À direita, detalhe do seu interior (FIGUEIREDO, 2018).

4.5. Índice de Tamboramento

O ensaio de tamboramento é um ensaio que avalia a resistência a degradação por impacto e abrasão do minério de ferro através do índice de tamboramento e índice de abrasão.

O ensaio para determinar o índice de tamboramento foi realizado obedecendo as instruções da norma ISO 3271. Por meio desse ensaio, também é possível determinar o índice de abrasão do material.

O índice de tamboramento é expresso em porcentagem em massa da fração da amostra maior que 6,3mm após o ensaio de tamboramento. Já o índice de abrasão é expresso em porcentagem em massa da fração da amostra menor que 500 μ m após o ensaio de tamboramento.

Para a realização desse ensaio, a faixa granulométrica da amostra deve estar entre 10 e 40mm. Antes de iniciar o ensaio, deve-se secar a amostra à temperatura de 105°C \pm 5°C até a massa se manter constante e realizar o resfriamento à temperatura ambiente.

Para o ensaio de tamboramento com granulados, deve-se providenciar 60kg de material com a faixa granulométrica entre 10mm e 40mm. A amostra deve ser separada em 4 porções de acordo com a granulometria através do peneiramento, nas faixas de 25mm, 16mm e 10mm. A quarta porção será constituída de acordo com a proporção de cada uma das três partes presentes em todo o material. Essa quarta porção da amostra que será utilizada para o ensaio de tamboramento.

A amostra é então, colocada no tambor de queda que é rotacionado por um total de 200 rotações a uma taxa de $25\text{r/min} \pm 1\text{r/min}$. Após retirar o material do tambor, realiza-se um peneiramento para determinar a fração da amostra maior que 6,3mm, entre 6,3mm e $500\mu\text{m}$, e menor que $500\mu\text{m}$.

A fim de melhorar a eficiência do processo e facilitar o peneiramento, pode-se ser vantajoso, adicionar no peneiramento mais uma peneira com a abertura da malha maior que 6,3mm, como por exemplo, a peneira com abertura de 8 ou 10mm.

O índice de tamboramento (TI) e o índice de abrasão (AI), expresso em porcentagem em massa, são obtidos pelas Equações 4.3 e 4.4, respectivamente:

$$TI = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (4.3)$$

$$AI = \frac{m_0 - (m_1 + m_2)}{m_0} \times 100 \quad (4.4)$$

A Figura 4.4 corresponde ao tambor padronizado que foi utilizado no ensaio de tamboramento para determinar o índice de tamboramento e abrasão no presente trabalho.



Figura 4.4. Tambor padronizado para o ensaio de tamboramento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise Granulométrica

Nas tabelas 5.1,5.2,5.3 e 5.4 são apresentados os valores obtidos a partir do peneiramento das amostras A, B, C e D.

Tabela 5.1 Distribuição Granulométrica – Granulado A

Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
37,5	0	0	0	100
25	193,96	1,61	1,61	98,39
19	1113,03	9,22	10,83	89,17
16	967,49	8,01	18,84	81,16
12,5	1315,98	10,90	29,74	70,26
10	889,27	7,36	37,10	62,9
<10	7593,9	62,90	100,00	
Total	12073,63	100,00		

Tabela 5.2 Distribuição Granulométrica – Granulado B

Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
37,5	0	0,00	0,00	100,00
25	317,62	3,21	3,21	96,79
19	787,41	7,95	11,16	88,84
16	747,9	7,55	18,72	81,28
12,5	1679,33	16,96	35,68	64,32
10	692	6,99	42,67	57,33
<10	5676	57,33	100,00	
Total	9899,71	100,00		

Tabela 5.3 Distribuição Granulométrica – Granulado C

Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
25	3724,30	76,71	76,71	23,29
19	937,71	19,31	96,02	3,98
16	150,52	3,10	99,12	0,88
12,5	29,57	0,61	99,73	0,27
<12,5	12,86	0,27	100,00	
Total	4854,96	100,00		

Tabela 5.4 Distribuição Granulométrica – Granulado D

Abertura(mm)	Massa retida (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
25	2893,45	14,74	14,74	85,26
19	6629,83	33,76	48,50	51,50
16	3434,78	17,49	65,99	34,01
12,5	3303,10	16,82	82,82	17,18
10	1522,09	7,75	90,57	9,43
<10	1852,21	9,43	100,00	
Total	19635,46	100,00		

Com os dados obtidos na tabela, a partir do tamanho das partículas e % de material passante em cada peneira, gerou-se as curvas granulométricas das amostras A, B, C e D.

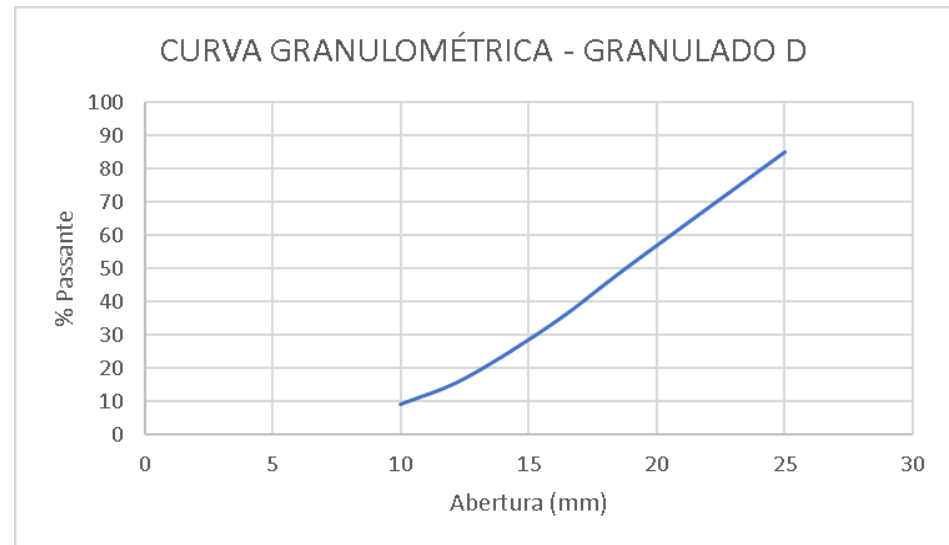
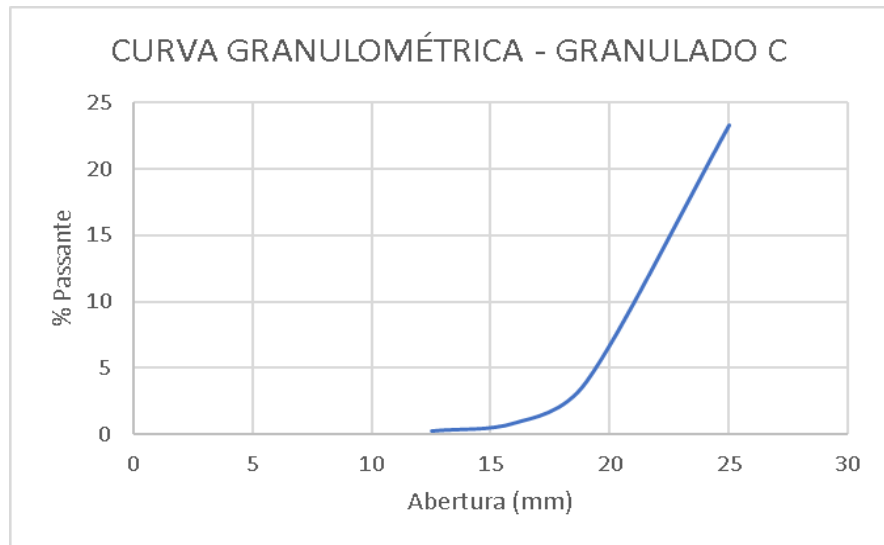
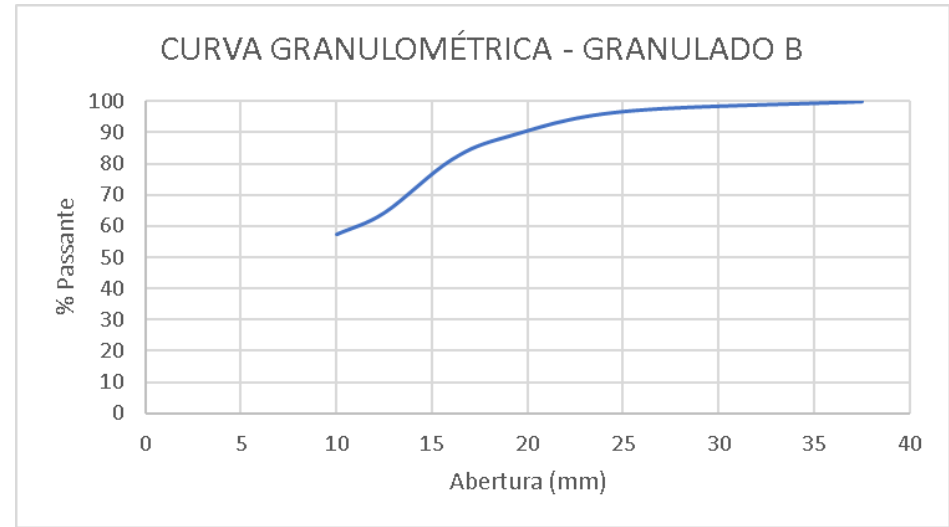
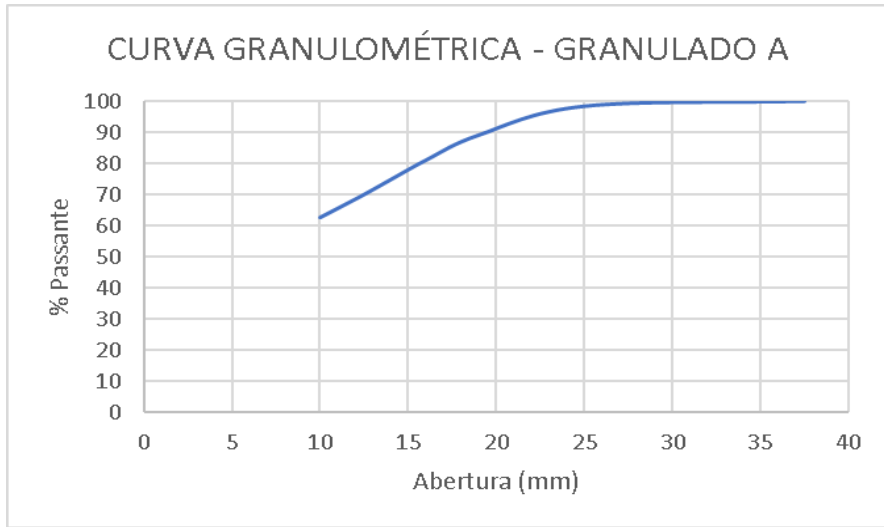


FIGURA 5.1 Curva Granulométrica dos Granulados de Minério de Ferro.

Analisando as curvas da distribuição granulométrica, pode-se observar que para o Granulado A e B a fração do material passante em 10 mm, ou seja, menor que 10mm é muito grande, cerca de 63% e 57% do material, respectivamente. Comparando com a porcentagem indicada na literatura é um valor muito elevado, visto que na literatura, apenas 15% do material deve ser menor que 10mm. Já para o Granulado C e D a fração do material passante na peneira de abertura de 10 mm, está dentro dessa faixa especificada na literatura, com as porcentagens inferior a 0,67% e 9,43%, respectivamente.

5.2. Análise Química

Na tabela 5.5 está representado os resultados da análise química das amostras dos granulados de minério de ferro A, B, C e D, onde observa-se que as amostras A, B e C apresentam alto teores de ferro, com valores acima de 64,8% (valor estabelecido com base na literatura). Todas apresentaram baixo teor de SiO₂ e com exceção da amostra C todas apresentaram alto teor de P, visto que esses valores foram maiores que 0,07%.

Tabela 5.5 Composição química dos granulados de minério de ferro

Amostra	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	PPC (%)
A	68,47	0,43	0,44	0,05	0,170	0,48	0,12	0,04	<0,01	<0,01	0,01	0,11
B	68,49	0,40	0,60	0,12	0,125	0,33	0,34	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,09
C	67,02	1,71	1,19	0,12	0,037	0,04	0,12	0,04	<0,01	0,01	<0,01	0,78
D	56,72	1,41	3,23	0,10	0,766	0,05	0,11	0,15	<0,01	<0,01	0,01	11,70

5.3. Índice de Redutibilidade

Na tabela 5.6 está representado os valores obtidos durante o ensaio de redutibilidade. Analisando os valores do Índice de Redutibilidade das amostras observa-se que as amostras B e C apresentam um índice de redutibilidade inferior ao recomendado na literatura (45%). A amostra D é a que possui maior reatividade, com um índice de redutibilidade de 57,29%.

Tabela 5.6 Índice de Redutibilidade dos granulados de minério de ferro

Amostra	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	FeO (%)	Fe Total (%)	RI (%)
A	499,07	499,07	428,58	1,58	68,47	48,26
B	504,8	504,80	440,87	2,58	68,49	43,42
C	503,11	437,96	383,64	0,72	67,02	37,57
D	501,29	488,86	419,36	1,73	56,72	57,29

5.4. Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura

Na tabela 5.7 está representado os valores obtidos durante o ensaio de desintegração por redução a baixa temperatura.

Tabela 5.7 Índice de Desintegração por Redução a Baixa Temperatura dos granulados de minério de ferro

Amostra	m ₀ (g)	massa final (g)	>2,8mm	<2,8mm	RDI
A	508,83	476,95	31,82	445,13	93,3%
B	507,20	503,18	39,02	464,16	92,2%
C	499,55	429,39	274,38	155,01	36,1%
D	504,34	491,84	437,80	54,04	11,0%

Analisando os valores do índice de desintegração por redução a baixa temperatura, observa-se que apenas a amostra D possui um índice menor que o valor recomendado na literatura (25%), ou seja, a amostra D é a que apresenta melhor comportamento, ou seja, é a que possui resistência mecânica superior após um intervalo de tempo em uma atmosfera redutora à 500°C, gerando menos finos no processo.

Os minérios granulados A e B apresentaram valores de RDI elevados de 93,3% e 92,2%, respectivamente, ou seja, após o ensaio de desintegração por redução à baixa temperatura mais de 90% da amostra ficou com uma granulometria menor que 2,8mm.

A Figura 5.2 mostra as características e aspectos dos granulados A e B antes e após o ensaio de RDI.



Figura 5.2. Minérios Granulados A e B. À direita, imagem da amostra após o ensaio de RDI.

Pelas imagens podemos observar que tanto o granulado A e B possui uma aparência porosa que contribuiu para a degradação do material durante o ensaio de RDI gerando uma grande fração de finos (grande parte das partículas menor que 2,8mm), resultando em um valor elevado no índice de RDI dessas amostras.

5.5. Índice de Tamboramento e Abrasão

Na tabela 5.8 está representado os valores obtidos para o índice de tamboramento e abrasão.

Tabela 5.8 Índice de tamboramento e abrasão dos granulados de minério de ferro

Amostra	Tamboramento (%)	Abrasão (%)
A	57,2	22,8
B	62,5	21,0
C	79,5	17,9
D	91,2	4,8

Como pode ser observado na Tabela 5.9, as amostras C e D apresentaram bons índices de tamboramento, com valores de 79,5% e 91,2%, respectivamente. Valores esses superiores ao recomendado na literatura que é de 75%. Já para o índice de abrasão apenas a amostra D apresentou um bom índice de abrasão com valor de 4,8%, visto que a literatura recomenda que o índice de abrasão deve ser menor que 10%.

6 CONCLUSÃO

Como conclusões principais do presente trabalho, pode-se concluir que:

No estudo realizado, os granulados de minérios de ferro apresentaram diferentes propriedades. Em relação a granulometria, os minérios C e D apresentam melhor distribuição granulométrica com menos porcentagem de material passante na peneira com abertura de 10mm. Esses materiais provavelmente possuem menos finos que são prejudiciais ao processo.

Em relação a análise química, todas as amostras com exceção da amostra D apresentaram alto teores de ferro. Porém, analisando o teor de fósforo e sílica, apenas a amostra C se adequa aos dois parâmetros.

Analisando a redutibilidade dos minérios granulados através dos índices de redutibilidade e desintegração por redução à baixa temperatura, as amostras A e D apresentam bons índices de redutibilidade e as amostras C e D possuem bons índices de desintegração por redução à baixa temperatura. Dessa maneira, pode-se inferir que a amostra D possui bons índices de redutibilidade e desintegração por redução à baixa temperatura.

Avaliando o índice de tamboramento e abrasão, as amostras C e D são as que apresentam melhores índices, porém, comparando essas duas amostras o minério granulado D é a que possui os melhores índices de tamboramento e abrasão.

Do ponto de vista das propriedades físicas e metalúrgicas, o minério granulado D foi o que apresentou melhores índices. Porém ao analisar a composição química, a qualidade desse material é inferior, pois é o que possui menor teor de ferro e maior teor de fósforo. Logo, para utiliza-lo no processo siderúrgico no alto-forno deve-se verificar se será viável e se esse granulado de minério de ferro irá fornecer um gusa com parâmetros e propriedades adequados. É importante analisar se realizar uma operação de desfosforação no gusa após o processo será viável neste caso, visto que o teor de fósforo desse granulado é 10 vezes maior que o indicado na literatura.

Os minérios granulados A e B não são indicados para serem utilizados no alto-forno, pois estes apresentam grandes porcentagens de finos e os valores do índice de RDI desses materiais foram muito elevados de 93,3% e 92,2%, respectivamente. Ou seja, após um intervalo de 30 minutos a uma atmosfera redutora à 550°C, praticamente 100% do material ficou abaixo de 2,8mm, gerando muitos finos no processo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a viabilidade da aplicação de algum método de aglomeração para os granulados de minério de ferro A e B, já que os meios de aglomeração aumentam a resistência mecânica do material, diminuindo a quantidade de finos geradas durante o manuseio, transporte e operação da carga ferrífera metálica.

Como o granulado C possui cerca de 99% das partículas maiores que 16mm e apresenta baixo teor de fósforo e teor de ferro considerável (acima de 64,8%), realizar um estudo modificando a granulometria desse material, reduzindo-a para aumentar a resistência desse material e dessa forma, obter uma melhora nos índices de RI e RDI.

Ao modificar a granulometria do granulado C, analisar a viabilidade de blendar o granulado C e D com um outro material granulado para que possa ser utilizado no alto-forno, visto que, ao blendar o material C e D, o C melhorará a química do D e o D melhorará o RI e RDI do C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, V. F. Tecnologia da fabricação de ferro-gusa em alto-forno. Curso UFMG/Fundação Cristiano Ottoni, Belo horizonte, MG, 1984.

CARVALHIDO, A.C. **Utilização do Coque Verde de Petróleo Sob a Forma De Small no Alto-Forno**. 2019. 46 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2019.

DUKINO, R. D., SWAIN, M. V., LOO, C. E. A Simple Contact and Fracture Mechanics Approach to Tumble Drum Breakage. **International Journal of Mineral Processing**, v.59, p.175-183, 2000.

FARIA, G.L. **Estudo da Intensidade de Crepitação de Minérios Granulados de Manganês do Brasil**. 2008. 125 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais – Rede Temática em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2008.

FERNANDES, E. Z. **Caracterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minério de Ferro**. 2008. 329 f. Tese. (Doutorado em Tecnologia Mineral) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008.

FIGUEIREDO, V.C. **Estudo da Adição de Lama de Minério de Ferro no Processo de Pelotização**. 2018. 98 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais – Rede Temática em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2018.

International Organization for Standardization. ISO 3271: Iron ores – Determination of tumble strength. Geneva, SWITZERLAND, 1995.

International Organization for Standardization. ISO 4696-2: Iron ores for blast furnace feedstocks — Determination of low-temperature reduction-disintegration index — Part 2: Static reduction with CO and N₂. Geneva, SWITZERLAND, 2004.

International Organization for Standardization. ISO 7215: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of the reducibility by the final degree of reduction index. Geneva, SWITZERLAND, 2009.

International Organization for Standardization. ISO 8371: Iron ores for blast furnace feedstocks — Determination of the decrepitation index. Geneva, SWITZERLAND, 2004.

LEMOS, M. R. C., AZEVEDO, M. A., LEITE, S. M. F., MARÇAL, T. E. Avaliação Técnica de Matérias-Primas para Sinterização e Alto-forno. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 33., 1978. São Paulo. Anais...São Paulo: ABM, 1978.

LIMA, R. M. F. **Adsorção de amido e amina na superfície de hematita e do quartzo e sua influência na flotação.** 1997. 238 f. Tese. (Curso de Pós – Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Área de Concentração: Tecnologia Mineral), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1997.

LU, L.; HOLMES, R.J.; MANUEL, J.R.; EDENTON, A.; ADAM, M.; SMYTH, R.; HAPUGODA, S. Lump Ore Characteristics and their Impact on Blast Furnace Operation. In: IRON ORE CONFERENCE, v. AUS IMM Iron Ore, 2009, Perth. **Proceedings [...]**, Carlton, Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2009. p. 365-371.

MOURÃO, M.B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C.A.S.; TAKANO, C.; QUITES, E.E.C.; GENTILE, E.F.; SILVA, G.F.B.L; BOLOTA, J.R.; GONÇALVES, M.; FACO, R.J. **Introdução à Siderurgia.** São Paulo: ABM, 2007. 428 p.

OLIVEIRA, V. M. **Estudo da Porosidade de Pelotas de Minério de Ferro para Altos-Fornos Através de Adsorção Física.** 2010. 86 f. Dissertação. (Mestrado de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.

SOUZA, C. C., ALMEIDA, R.M., PEREIRA, J. F. **Histórico das propriedades físico-metalúrgicas do LO alto-forno da MBR.** Relatório técnico interno. Nova Lima, MG. 24 p. 1998.

VIEIRA, C.B. **Estudo Básico da Qualidade Intrínseca de Minérios de Ferro para Altos-fornos.** 1996. 248 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – CPGEM – EEUFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1996.

VIEIRA, C.B.; KRUGER, F.L.V.; ARAÚJO, F.G.S.; VIEIRA FILHO, J.B. Secagem e Tratamento Térmico de Minérios de Ferro para Uso em Reatores de Redução: Aplicação em Usinas Siderúrgicas Brasileiras. In: CONFERÊNCIA DE REDUÇÃO DO INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA, 6., 2007, Rosário, Argentina. Anais...San Nicolás: IAS, 2007.

WU, S.; HAN, H.; XU, H.; WANG, H.; LIU, X. Increasing Lump Ores Proportion in Blast Furnace Based on the High-temperature Interactivity of Iron Bearing Materials. **ISIJ International**, v.50, n.5, p. 686-694, 2010.