

# AGLOMERAÇÃO E SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO GOETHÍTICO E MINÉRIO DE FERRO HEMATÍTICO VISANDO A UTILIZAÇÃO EM PEQUENOS ALTOS FORNOS A CARVÃO VEGETAL

Igor Jurandir Ubaldo Viana Pereira<sup>1</sup>  
Víctor de Andrade Alvarenga Oliveira<sup>2</sup>

## Resumo

O desenvolvimento de matérias primas para sinterização de minério de ferro é fundamental para garantir a produção de ferro gusa com parâmetros físicos, químicos e morfológicos dentro das especificações do alto forno. Neste sentido, o presente trabalho visa estudar a viabilidade da utilização de finos de minério de ferro itabirítico goethítico (SF\_IG), em um leito de sinterização composto predominantemente por finos de minério de ferro hematítico (SF\_H). As matérias primas utilizadas e os sínters produzidos neste trabalho foram caracterizadas através das técnicas de fluorescência de raio X (FRX); análise granulométrica, difratometria de raios X (DRX) e análise mineralógica utilizando o método de Rietveld. O índice de granulação (IG) para os diferentes leitos de sinterização foi medido e a qualidade do síter produzido foi avaliada através do teste Shatter. O estudo permitiu concluir a oportunidade de substituição de até 30 % de SF\_H pelo SF\_IG na mistura de sinterização.

**Palavras-chave:** Sinterização; Aglomeração; Goethita; Hematita

## AGGLOMERATION AND SINTERIZATION OF ITABYRITIC GOETHYTIC IRON ORE AND HEMATITIC IRON ORE FOR USE IN SMALL CHARCOAL BLAST FURNACES

### Abstract

The development of raw materials for iron ore sintering is essential to guarantee the production of pig iron with physical, chemical and morphological parameters within blast furnace specifications. In this sense, the present work aims to study the opportunity of using goethitic itabiritic iron ore fines (SF\_IG), in a sintering mixture composed predominantly of hematite iron ore fines (SF\_H). The raw materials used and the sinters produced in this work were characterized using X-ray fluorescence (XRF) techniques; granulometric analysis, X-ray diffractometry (XRD) and mineralogical analysis using the Rietveld method. The granulation index (GI) for the different sintering mixture was measured and the quality of the sinter produced was evaluated using the Shatter test. The study concluded the opportunity to replace up to 30% of SF\_H with SF\_IG in the sintering mixture.

**Keywords:** Sintering; Crowd; Goethite; Hematite

<sup>1</sup> Mestrando, Engenheiro Metalúrgico, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor, Professor do Laboratório de Análise Térmica e Metalurgia Extrativa de Não Ferrosos/ Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Grandes quantidades de finos de minérios são geradas em processos de mineração. Com a tendência natural de redução granulométrica do minério de acordo com o decorrer da exploração, o desafio para destino destes materiais se torna ainda maior [1]. Deve-se ressaltar que o principal reator siderúrgico para redução de minério de ferro é o Alto Forno. Estes reatores metalúrgicos verticais funcionam em contracorrente, i.e., as matérias primas sólidas abastecidas no topo do alto-forno descem, enquanto os gases redutores, gerados pela queima dos combustíveis, percolam entre a carga sólida em sentido ascendente [2]. Este fato inviabiliza a alimentação de particulados finos ( $<4,5$  mm) uma vez que influencia diretamente na permeabilidade deste equipamento.

Os processos de aglomeração de minérios de ferro têm como objetivo principal unir os finos de minério de ferro, visando a produção de um material de engenharia (sinter, pelota ou briquete) com propriedades físicas e químicas (granulometria, resistência mecânica, porosidade, redutibilidade, etc.) ideais para a sua utilização em reatores siderúrgicos (altos-fornos). Os três principais processos de aglomeração utilizados são: sinterização, pelotização e briquetagem.

O processo da sinterização consiste na aglomeração a quente de uma mistura de matérias primas, normalmente constituída de finos de minérios do metal de interesse ( $0,15\text{mm} < \phi < 6,3 \mu\text{m}$ ), finos de fundentes e finos de combustível. Os leitos criados a partir de misturas dessas matérias primas são sinterizados em máquinas de sinterização, e, posteriormente, beneficiados mediante parâmetros físicos requeridos pelo mercado.

Finos de minério de ferro de diferentes tipologias, como: especularíticos, martíticos, granulares, microgranulares, magnetíticos e goethíticos podem ser encontrados no quadrilátero ferrífero [3]. A utilização de minérios goethíticos consiste em um grande desafio para as usinas de sinterização, pois esses minérios normalmente possuem baixos teores de ferro ( $< 55\%$ ), aumentam o consumo de combustível da usina e possuem teores de elementos deletérios (ex. P, S, Ti, etc.) maiores que os encontrados em minérios de ferro de outras tipologias [4]. Esses fatores são críticos e, muitas vezes, inviabilizam a utilização desses como matéria prima constituinte de leitos de sinterização.

Sendo assim, estudou-se neste trabalho a viabilidade da utilização de finos de minério de ferro itabirítico goethítico (SF\_IG), em um leito de sinterização composto predominantemente por finos de minério de ferro hematítico (SF\_H), visando a produção de um sínter com propriedades físicas e químicas compatíveis com as necessárias para a alimentação de pequenos altos-fornos (350 t de gusa/dia) a carvão vegetal.

As matérias primas utilizadas e os sínters produzidos neste trabalho foram caracterizados através das técnicas de fluorescência de raio X (FRX); análise granulométrica, difratometria de raios X (DRX) e análise mineralógica utilizando o método de Rietveld. O índice de granulação (IG) para os diferentes leitos de sinterização foi medido e a qualidade do sínter produzido foi avaliada através do teste Shatter.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise química dos minérios, calcário e sínter produto (Fe, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, CaO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, P, S, e MgO), foram realizadas análises de fluorescência de raio x pelo método de pastilha prensada em um equipamento da marca Thermo Scientific modelo ARL Quant'x .

Os teores de Fe(II) nos sínters produzidos foram feitos utilizando 1,000 grama de cada amostra. A massa foi transferida para erlenmeyer de 500ml, com 3 gramas de carbonato de sódio P.A. e a mistura foi homogeneizada adicionando 30 ml de HCl concentrado. A digestão da amostra foi feita em chapa aquecedora e, após o ataque químico, foram adicionados 30 mL de ácido fosfórico 50 % v/v. A amostra digerida foi titulada com solução de dicromato de potássio 0,1 N utilizando difenilamina como indicador.

O cálculo para a determinação do teor de Fe(II) foi feito utilizando a Equação 1.

$$\% FeO = \frac{\text{Volume gasto} \times \text{Normalidade} \times 5,584 \times 1,29}{\text{Peso da amostra}} \quad [\text{Equação 1}]$$

A determinação do Perda Por Calcinação (PPC) foi feita em forno mufla à temperatura de 900 °C por 1 hora utilizando 1,000 g de amostra. Os valores de PPC foram obtidos utilizando a Equação 2.

$$PPC = 100 - \frac{(\text{Peso do resíduo} \times 100)}{\text{Peso da amostra}} \quad \text{[Equação 2]} \quad \text{Para}$$

determinação do teor de umidade dos combustíveis, inicialmente, pesou-se um cadinho de porcelana vazio e anotou-se o seu respectivo peso (P1). Foi adicionado ao cadinho 1,0000g da amostra de combustível pulverizado (P1), o cadinho foi levado à estufa a 150 °C durante 12 minutos. Retirou-se o conjunto e o mesmo foi armazenado em dessecador. Após resfriado, pesou-se o conjunto e foi anotada a massa final (P3). Após procedimento, o teor de umidade (UM) foi calculado através da Equação 3.

$$UM = \frac{(P2-P3)}{(P2-P1)} \times 100 \quad \text{[Equação 3]}$$

Para a determinação do teor de material volátil dos combustíveis, Inicialmente, pesou-se um cadinho de porcelana vazio e anotou-se a sua respectiva massa (P1). Foi adicionado ao cadinho 1,0000 g da amostra de combustível pulverizado e anotou-se a massa do cadinho mais amostra (P2). O cadinho foi tampado e levado à mufla por 5 minutos e o mesmo foi armazenado em dessecador para resfriar. Após resfriado, pesou-se o conjunto e foi anotada a massa final (P3). O percentual de material volátil (MV) foi calculado utilizando-se da Equação 4.

$$MV = \left( \frac{P2 - P3}{P2 - P1} \times 100 \right) - UM \quad \text{[Equação 4]}$$

Já para a determinação das cinzas, pesou-se um cadinho de porcelana vazio e anotou-se a sua massa (P1). Adicionou-se ao cadinho 1,0000g de amostra de combustível pulverizado e anotou-se a massa do cadinho mais amostra (P2). O conjunto foi levado à mufla à temperatura de 900°C durante uma hora. Após resfriar a amostra foi pesada (P3). O teor de cinzas (CZ) foi determinado utilizando a Equação 5.

$$CZ = \frac{P3 - P1}{P2 - P1} \times 100 \quad \text{[Equação 5]}$$

Por fim, para calcular o teor de carbono fixo (CF), foi utilizada a Equação 6:

$$CF = 100 - UM - MV - CZ \quad \text{[Equação 6]}$$

Os difratogramas de raios X foram obtidos utilizando um difratômetro da marca Shimadzu modelo XRD-6100. Utilizou-se uma fonte de cobre que operou a 45 kV e 40 mA, a velocidade de varredura foi de 0,4 °/min. A identificação das principais fases presentes nas amostras foi feita através da comparação dos difratogramas gerados com difratogramas padrões (ICSD patterns) utilizando o software DIFFRAC.EVA. O software TOPAS 5.0 foi utilizado para a quantificação das fases minerais presentes na amostra através do método de Rietveld.

Os testes de sinterização foram realizados em planta piloto (Pot Grate). A planta piloto é constituída por uma panela de 0,022 m<sup>3</sup> de volume. O equipamento possui sistema de medição de temperatura com termopar tipo K e uma coluna d'água para medir a depressão do sistema. Todos os dados dos experimentos foram coletados manualmente.

Para realização do presente trabalho, foram realizados 5 experimentos conforme descrito na Tabela 1. Os experimentos de sinterização foram feitos utilizando quatro matérias primas, são elas: i) Sinter feed de minério de ferro itabirítico goethítico (SF\_IG); ii) Calcário (Fundente); iii) Sinter feed de Minério de ferro hematítico (SF\_H) e iv) Coque (combustível).

**Tabela 1.** Quantidade de matérias primas por experimento

Experimento	Coque	SF		Calcário
	(Kg)	SF_H (Kg)	SF_IG (Kg)	(Kg)
SF_0%	5	89	0	6
SF_10%	5	79	10	6
SF_20%	5	69	20	6
SF_30%	5	59	30	6
SF_40%	5	49	40	6

Para realização dos testes, cada material foi pesado em balança calibrada. O teor de umidade em todas as matérias primas foi determinado utilizando um analisador de umidade MA 50.R série MAR da marca Toledo do Brasil.

Para realização dos processos de homogeneização e aglomeração da mistura, foi utilizada uma betoneira CSM de 400L, com motor de 2cv, rotação de tambor equivalente a 30 rpm e 5 estágios de posicionamento. O estágio 1 é aquele onde o bocal de abertura da betoneira se encontra paralelo ao solo, enquanto o estágio 5 é aquele que se encontra a 90 ° do solo. O estágio 2 está a 30° do estágio 1. O estágio 3 está a 45° do estágio 1. E por fim, o estágio 4 está a 60° do estágio 1. A

fim de otimizar a etapa de homogeneização, a betoneira foi ligada e foi estabelecida a seguinte sequência para carregamento das matérias primas:

$$SF_H \rightarrow SF_{IG} \rightarrow \text{Calcário} \rightarrow \text{Coque}.$$

Tal procedimento permitiu reduzir a segregação das matérias primas devido ao teor de umidade e também minimizar a perda por poeira (PPP) do coque. Para realização da homogeneização da mistura a ser sinterizada, o equipamento permaneceu ligado por um período de 4 minutos no estágio 1 após adição do coque. Para a etapa de aglomeração, a betoneira foi ajustada para o estágio 2 e água foi adicionada ao sistema. O teor de umidade foi monitorado por analisador de umidade e mantido entre 6 % e 7 %.

Para todos os testes foi utilizado 2 Kg de minério granulado como *bedding*. Após a distribuição do material no fundo da panela, a altura de camada de *bedding* utilizada foi de aproximadamente 10 mm.

Após adição do *bedding*, a mistura a ser sinterizada foi pesada e colocada na panela. Para realizar a ignição, foi padronizado a utilização de 0,5 kg de moinha de carvão vegetal sobre a mistura a ser sinterizada. Foi utilizado um maçarico manual para ignizar a moinha de carvão vegetal. Após a realização da ignição, o *dumper* da planta piloto foi aberto e medidas da temperatura e depressão do sistema foram feitas de 2 em 2 minutos. Ao atingir a temperatura de pico o *dumper* foi fechado após 4 minutos e o sínter basculado.

O *Shatter test* foi realizado conforme norma NBR 10633. Uma amostra de 20 Kg  $\pm$  0,2 Kg (m) de sínter seco com granulometria entre 9,5 mm e 50 mm foi submetida a quatro quedas de 2 metros. Após as quedas, o material foi coletado e peneirado em uma peneira de 9,5 mm. O material retido na peneira foi pesado e a massa registrada ( $m_1$ ). Os ensaios foram realizados em duplicata. O *índice de Shatter* foi calculado a partir da Equação 7.

$$ST = m_1 \div m \quad [\text{Equação 7}]$$

Para a realização do teste de granulação (GI) inicialmente foi coletada uma amostra de 2 Kg de mistura homogeneizada em betoneira. Após coletadas, cada amostra foi quarteada em quarteador Jones, a fim de preparar 8 alíquotas de aproximadamente 250 g. Após quarteamento, uma alíquota foi escolhida, seca e peneirada em uma peneira de abertura de 1mm. Após peneirado, o material foi pesado e o índice de granulação foi determinado utilizando a Equação 8.

$$GI = \frac{R}{M} \times 100 \quad \text{[Equação 8]}$$

Onde R é a massa de material retida e M é a massa total de amostra.

## 2.2 RESULTADOS

A composição química das amostras de minério de ferro SF\_IG e SF\_H são apresentadas na Tabela 2.

Os resultados mostram que o SF\_IG possui teor de ferro de 54,8 %, o que permite classificar o mesmo como um minério de ferro de baixo teor quando comparado aos minérios tipicamente utilizados em processos sinterização [5]. Os teores de P e S na amostra sugerem que, independentemente do tipo de gusa a ser produzido (aciaria, cinzento e/ou nodular), será possível obter um ferro gusa com teores desses elementos abaixo dos limites máximos exigidos pelos diferentes consumidores. Vale destacar que esse minério pode ainda ser “blendado”, no leito de sinterização, para utilização na fabricação de ferro gusa especial, tal como o ferro gusa nodular triple five que requer teor máximo de 0,05 % de P. O teor medido de manganês (0,9 %) é considerado alto para fabricação de ferro gusa de tipos especiais, como o ferro gusa nodular (0,05 % de Mn), mas considerado ideal para fabricação de ferro gusa cinzento (1 % de Mn).

Os resultados de análise química para amostra SF\_H é possível inferir que o teor de ferro na mesma é de 60,3 % e, por isso, esse minério pode ser classificado como um minério de ferro de alto teor [6]. Esse minério será utilizado como carga no processo de sinterização visando a garantir a base metálica do sinter a ser fabricado, i. e., para garantir que o sinter a ser produzido neste trabalho, utilizando a amostra SF\_IG, tenha teor de ferro > 58 %, torna-se necessária a produção de um blend dos minérios SF\_IG e SF\_H, onde a amostra SF\_H será responsável por garantir que os teores de ferro no sinter produzido sejam superiores aos valores mínimos necessários para a alimentação do alto-forno.

Além disso, pode-se destacar que os teores de Mn na amostra a tornam uma ótima matéria prima para a fabricação de ferro gusa nodular (Mn < 0,05 %). A amostra também se destaca por possuir baixos teores de S (0,042%) e de P (0,04), quando comparado aos valores típicos para os minérios de ferro do quadrilátero ferrífero [7].

Tabela 2 - Composição química da amostra SF\_IG

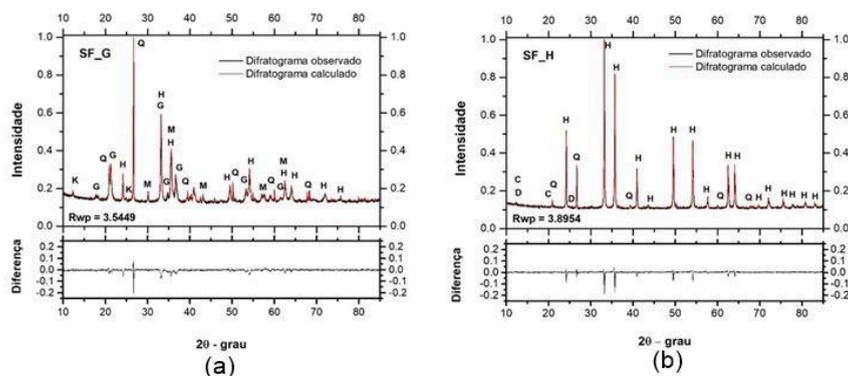
Material	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SF_IG	54,8 %	13,9 %	2,7 %	0,9 %	0,02 %	0,3 %
SF_H	60,3 %	6,3 %	1,4 %	0,05 %	0,11 %	0,32 %

Material	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P	S	MgO	PPC
SF_IG	0,10 %	0,01 %	0,07 %	0,04 %	0,09 %	4,5 %
SF_H	0	0	0,04 %	0,02 %	0,04 %	0

Os difratogramas de raios x da caracterização mineralógica do SF\_IG e SF\_H são apresentados na Figura 1. A Tabela 3 mostra os teores calculados para esses minerais onde é possível observar que o principal constituinte é a goethita (FeO.OH). Ainda de acordo com os resultados de caracterização mineralógica, observa-se que o teor de ferro na amostra é 52,2 % distribuídos entre os minerais goethita (22,3 %), hematita (23,3 %) e magnetita (6,6 %). Os resultados mostram que o teor de ferro total calculado através da análise mineralógica foi próximo ao encontrado na análise via por FRX (54.8 %). Por outro lado, uma maior diferença foi obtida para os teores de silício calculados a partir das duas técnicas, i. e., 6,5 % por FRX e 8,7 % pelo método de Rietveld.

A Tabela 4 apresenta os teores calculados para os principais minerais identificados na amostra. Os resultados mostram que a hematita é o único mineral portador de ferro presente na amostra e que, de acordo com a análise mineralógica, o teor de ferro total na amostra será de 62,70 %. Esse valor está de acordo com o medido por FRX (60,3 %).



**Figura 1.** (a)Difratograma observado e difratograma calculado para a amostra SF\_IG. (K) caulinita; (G) goethita; (Q) quartzo; (H) hematita e (M) magnetita. (b) Difratograma de raios X observado e

calculado para a amostra SF\_H. (D) diquita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ); (C) chabazita ( $(\text{Ca},\text{K}_2,\text{Na}_2)_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ); (H) hematita e (Q) quartzo.

**Tabela 3.** Teores dos principais constituintes minerais da amostra SF\_IG

Mineral	Hematita	Goethita	Magnetita	Quartzo	Kaolinita
Teor (%)	33,3	35,5	9,1	18,7	3,4

**Tabela 4.** Composição mineralógica da amostra SF\_H

Mineral	Hematita	Quartzo	Chabazita	Diquita
Teor (%)	89,6	8,4	1,1	0,8

A Tabela 5 apresenta a composição granulométrica das amostras SF\_IG e SF\_H. Os resultados mostram que a amostra SF\_IG possui uma grande porcentagem de partículas aderentes (82,54 % wt. -  $\phi < 0,3$ ) e intermediárias (14,06 % wt. -  $0,3 < \phi < 0,85$ ) mas, por outro lado, a porcentagem de partículas nucleantes é baixa (3,41 % wt. -  $\phi > 0,85$ ). Além disso, a amostra possui uma alta quantidade de partículas intermediárias que, de acordo com a literatura, devem ser evitadas, uma vez que o material nessa faixa granulométrica não funciona nem como nucleante, nem como aderente e, por isso, prejudica a formação de micro pelotas durante o processo de sinterização [4]. A amostra SF\_H consiste em um sinter feed que pode ser considerado com granulometria próxima à ideal para a sinterização. O minério possui 7,43 % wt. de material acima de 6,35 mm, o que é considerado um valor aceitável. Na faixa de 0,7 mm a 6,35 mm, a amostra possui 39,09 % wt., apresentando valores um pouco abaixo do ideal (> 45 % wt.). Vale ainda destacar que o minério estudado possui 5,03 % wt. a mais do que o considerado ideal (<15%) para faixa granulométrica abaixo de 0,150 mm.

**Tabela 5.** Classificação granulométrica das amostras SF\_IG e SF\_H

Faixa Granulométrica (mm)	>6,3	> 1	>0,71	>0,3	>0,150	<0,150
Massa SF_IG (%)	0	3,41	14,06	32,43	23,93	26,18
Massa SF_H (%)	7,43	22,66	16,43	17,11	16,34	20,03

A Tabelas 6 apresenta a composição química da amostra de calcário utilizados como matéria prima para sinterização dos minérios. O calcário é utilizado como fundente em diversos trabalhos na literatura [8, 9, 10, 11]. Entre os elementos químicos presentes no fundente, a presença dos elementos Mn, S e P pode contribuir para

que o ferro gusa produzido possua teores desses elementos fora das especificações exigidas pelo consumidor, principalmente quando se tem como objetivo a fabricação de ferro gusa especial. No entanto, como os teores desses elementos no calcário são baixos e a quantidade de fundente adicionada nos processos de sinterização também é baixa (< 10 %), será o teor desses elementos no minério de ferro utilizado no processo de sinterização o principal responsável pela incorporação de S, P e Mn no ferro gusa produzido.

**Tabela 6.** Composição Química da amostra de calcário

<b>Materia</b>	<b>Fe</b>	<b>SiO2</b>	<b>Al2O3</b>	<b>Mn</b>	<b>CaO</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>MgO</b>
<b>I</b>								
Calcário	3,7 %	2,5 %	1,0 %	0,1 %	56,0 %	0,12 %	0,07 %	1,0 %

A Tabela 7 apresenta a composição química da amostra de coque utilizada como combustível nos testes de sinterização. O coque utilizado no trabalho possui teor de cinzas de 6,73 % wt., 78,35 % wt. de carbono fixo, 9,48 % wt. de voláteis e 5,44 % wt. de umidade (Tabela 5.12). Esse material possui ótimo custo benefício quando comparado com outros materiais combustíveis disponíveis na região do quadrilátero ferrífero. O teor de umidade medido para o material é considerado um valor alto (5,44% wt.).

**Tabela 7.** Composição Química da amostra de coque

<b>Material</b>	<b>C(fixo)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Voláteis</b>	<b>Umidade</b>
Coque	78,4 %	6,7 %	9,5 %	5,4 %

As curvas de sinterização Depressão x Tempo e Temperatura x Tempo dos 5 testes realizados são apresentadas na Figura 2. Os valores de depressão inicial e final mostram que para todos os experimentos de sinterização realizados, a permeabilidade do leito aumentou após a sinterização da carga, i.e., os valores de depressão medidos após a sinterização da carga foram sempre menores que os valores iniciais.

Devido aos altos teores de partículas aderentes (50,11 %) no SF\_IG, espera-se que a permeabilidade do leito diminua à medida que a quantidade desse material no mesmo seja aumentada, i.e., espera-se que as partículas mais finas prejudiquem as etapas de homogeneização e aglomeração e, assim, prejudiquem a permeabilidade

do leito de sinterização. No entanto, os valores de depressão inicial mostram que o aumento na quantidade de SF\_IG no leito de sinterização aumentou a permeabilidade do mesmo. Isso ocorre porque durante a etapa de aglomeração o aumento nos teores de SF\_IG promoveram um aumento no índice de granulação (IG), ou seja, por ser um minério mais higroscópico e devido a presença de argilominerais no SF\_IG, a etapa de aglomeração da mistura foi consideravelmente melhorada. Sendo assim, uma vez que a mistura mais rica em SF\_IG é melhor aglomerada, a permeabilidade da carga é aumentada, e, conseqüentemente, o ar percola de forma mais eficiente através do leito a ser sinterizado acarretando assim na redução dos valores de depressão.

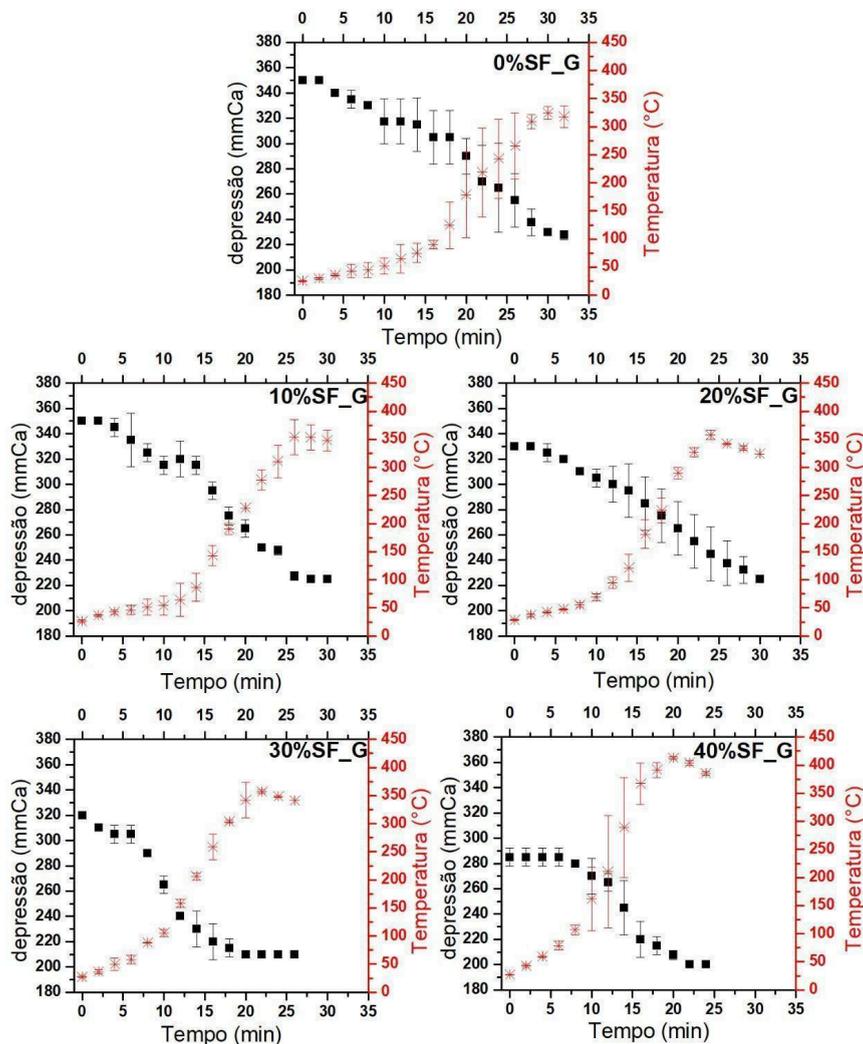


Figura 2. Curvas de sinterização

A Tabela 8 apresenta resultados das análises químicas, análises de custo, índices de granulação e shatter test para os cinco testes realizados. O sínter 0%SF\_IG possui o maior teor de ferro entre os experimentos realizados (59,1 %) isso se deve ao maior teor de ferro no SF\_H. Esse sínter também possui teores de sílica, manganês, titânio, enxofre e fósforo dentro da faixa aceitável/ideal para a produção dos principais tipos ferro gusa no alto forno (Aciaria, Cinzento e Nodular). Por outro lado, o sínter 0%SF\_IG apresentou o segundo maior teor de alumina, e, segundo maior volume de escória em relação aos outros experimentos realizados. O teor de FeO encontrado para os experimentos realizados está dentro dos valores práticos operacionais executados dentro da usina siderúrgica onde este sínter é utilizado. Vale destacar que apesar dos sínters 0%SF\_IG e 10%SF-G possuírem os maiores teores de cromo entre todos estudados, os teores encontrados são considerados baixos (< 0,05 %).

Os resultados mostram uma significativa redução no custo para a matéria prima contendo ferro, caso o SF\_H seja substituído pelo SF\_IG. Foi possível estimar uma redução de até 28 % quando se compara o custo de matéria prima para os experimentos 0%SF\_IG e 40%SF\_IG. Vale destacar que outros custos, como produtividade da usina, o teor de Fe, o consumo de combustível, a resistência mecânica e outros também devem ser analisados.

Os resultados mostram que o após o processo de aglomeração, a presença de SF\_IG no leito de sinterização promoveu o aumento do índice de granulação (IG). Os resultados mostram que o sínter produzido a partir do leito contendo a mistura 40%SF\_IG mostrou valor de IG ~ 20 maior que o leito onde apenas o SF\_H foi utilizado. Muitos autores relatam que a presença de minérios goethíticos no leito de sinterização melhora o índice de granulação do sínter produzido [12]. Essa melhoria é atribuída à presença de argilominerais em minérios goethíticos e também à capacidade dos mesmos em reter umidade [4]. Bhagat (2019) cita que a granulação da mistura a ser sinterizada melhora quando minérios com altos teores de ferro (> 55 %) são misturados com minérios que possuem altos valores de PPC (> 3 %) [4]. Os resultados mostram que ~ 80 % do material permaneceu com granulometria maior que 9,5 mm após os ensaios de queda e que, de uma forma geral, uma pequena redução no *índice shatter* foi observada quando o SF\_IG foi adicionado à mistura de sinterização. Os valores medidos permitem afirmar que, para todas as misturas SF\_IG e SF\_H estudadas, o sínter produzido possui resistência mecânica

para ser transportado dentro da usina. Vale destacar que a amostra 30%SF\_IG possui valor de *índice shatter* semelhante ao valor medido para a amostra 0%SF\_IG. Dessa forma, acredita-se que, analisando apenas esse parâmetro, a adição de 30 % de SF\_IG, na mistura da panela de sinterização, não comprometerá a integridade física do sínter durante o seu transporte dentro da usina.

**Tabela 8.** Composição Química do sínter produzido, Custo, Granulação e Shatter Test

Análise	0%SF_IG	10%SF_IG	20%SF_IG	30%SF_IG	40%SF_IG
Fe (%)	59,1	59	58,6	59	56,9
FeO (%)	6,5	6,5	6,5	5,8	5,8
SiO <sub>2</sub> (%)	6,9	5,8	6,7	8,1	6,2
CaO (%)	3,6	3,7	3,5	3,8	3,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,8	1,5	1,8	1,9	1,7
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,3	0,3	0,28	0,27	0,25
Mn (%)	0,08	0,07	0,098	0,22	0,16
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,01	0,011	0,012	0,01	0,01
S (%)	0,03	0,013	0,024	0,014	0,013
P (%)	0,04	0,039	0,062	0,051	0,036
Basicidade (B2)	0,52	0,65	0,52	0,47	0,53
Escória (%)	12,3	11	12	14	11,3
Custo	X	0,93X	0,86X	0,79X	0,72X
Índice de granulação da mistura (GI) (%)	68,43	72,02	76,32	81,15	82,73
Índice Shatter (%)	0,825	0,813	0,811	0,821	0,784 %

### 3 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho mostram que é possível fabricar sínters de minério de ferro utilizando finos de minério de ferro itabirítico goethítico de baixo teor (~ 55 % Fe) visando a utilização do mesmo como matéria prima para pequenos altos-fornos (350 t de gusa/dia) a carvão vegetal.

Por fim, conclui-se, que com a substituição de até 30 % de SF\_H pelo SF\_IG na mistura de sinterização pode-se produzir um sínter com propriedades físicas,

químicas e metalúrgicas semelhantes ao sinter produzido sem a utilização de SF\_IG.

## REFERÊNCIAS

- 1.Carvalho, B.C.L.d., *Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influência no sequenciamento de lavra.*, in *Departamento de Engenharia de Minas*. 2012, Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG. p. 122.
- 2.Rizzo, E.M.d.S., *Processo de fabricação de ferro-gusa em alto forno*. 1 ed. 2009: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 278.
- 3.Vieira, C.B., et al., *Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica*. Rem: Revista Escola de Minas, 2003. **56**
- 4.Bhagat, R.P., *Agglomeration of Iron Ore*. 1st. ed. 2019, Boca Raton: CRC Press. 438.
- 5.Caxito, F. and T.G. Dias, *Ferro*. 2019, Belo Horizonte - MG: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais - CODEMGE. 34.
- 6.Iveson, S. M.; Holt, S.; Biggs, S. Advancing contact angle of iron ores as a function of their hematite and goethite content: implications for pelletising and sintering. *International journal of mineral processing (Print)*, v. 74, n. 1-4, p. 281–287, 1 nov. 2004.
- 7.Rocha, G.M., et al., *Caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de minério de ferro de Brucutu*. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2019. 16: p. 88-94.
- 8.Pereira, H.C., *Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellet feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização*. , in *Departamento de Engenharia Metalúrgica*. 2004, Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte - MG. p. 131.
- 9.Lima, A.J.d.A.S., *Caracterização Tecnológica de uma mistura de sinter feed e pellet feed para uso em processo HPS.*, in *Departamento de Engenharia Metalúrgica (Redemat)*. 2019, Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG. p. 125.
- 10.Han, H.; Lu, L. Effect of ore types on high temperature sintering characteristics of iron ore fines and concentrate. *Minerals engineering*, v. 197, p. 108062–108062, 1 jun. 2023.
- 11.Hsieh, L.-H. and J.A. Whiteman, Effect of Raw Material Composition on the Mineral Phases in Lime-fluxed Iron Ore Sinter. *ISIJ International*, 1993. 33(4): p. 462-473.

12.Coelho, L.H., Rendimento na Sinterização em Função da Mineralogia do Sinter Feed., in Departamento de Engenharia Metalúrgica (REDEMAT). 2002, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP): Ouro Preto. p. 159.