

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

**“AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DO PELLET FEED, UMIDADE E  
CAL, NOS PARÂMETROS DE UMA SINTERIZAÇÃO PILOTO”**

Autor:

Fernando Gustavo Corrêa de Melo

Orientador: Dr. Leandro Rocha Lemos

Coorientador: Dr. Roberto Tavares Parreiras

Dezembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Fernando Gustavo Corrêa de Melo

**“AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DO PELLET, UMIDADE E CAL,  
NOS PARÂMETROS DE UMA SINTERIZAÇÃO PILOTO”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Dr. Leandro Rocha Lemos

Coorientador: Dr. Roberto Tavares Parreiras

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

16/12/2019

M528a Melo, Fernando Gustavo Corrêa de.  
Avaliação do efeito da adição do pellet, umidade e cal, nos parâmetros de uma sinterização piloto [recurso eletrônico] / Fernando Gustavo Corrêa de Melo. - 2019.  
1 recurso online (27 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Leandro Rocha Lemos.  
Coorientador: Roberto Tavares Parreiras.


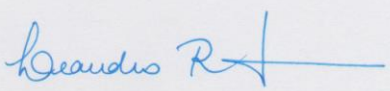
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 16-27.

Bibliografia: f. 26-27.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Cal - Teses. 4. Sinterização - Teses. I. Lemos, Leandro Rocha. II. Tavares, Roberto Parreiras. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 669(043)

	<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS</b> PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS/MP	UF
<b>ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO FERNANDO GUSTAVO CORRÊA DE MELO</b>		
<p>Realizou-se, no dia 16 de dezembro de 2019, às 09:00 horas, Sala 2633, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada <i>AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DO PELLET, UMIDADE E CAL, NOS PARAMETROS DE UMA SINTERIZAÇÃO PILOTO</i>, apresentada por FERNANDO GUSTAVO CORRÊA DE MELO, número de registro 2017721071, graduado no curso de ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Leandro Rocha Lemos - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Parreiras Tavares (UFMG).</p>		
<p>A Comissão considerou a dissertação:</p>		
<p><input checked="" type="checkbox"/> Aprovada</p>		
<p><input type="checkbox"/> Reprovada</p>		
<p>Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão. Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2019.</p>		
 Prof(a). Leandro Rocha Lemos (Doutor)		

Dedicatória  
A minha linda mãe Nilda Regida, amada  
esposa Paula Amanda e ao querido filho Theo  
Rocha de Melo.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à CSN pela oportunidade concedida.

Ao Professor Leandro Rocha Lemos pela confiança, orientação e sugestões.

**SUMÁRIO**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	vi
<b>LISTA DE APÊNDICES</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	12
<b>3. CONCLUSÕES</b> .....	13
<b>4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	14
<b>APÊNDICES</b> .....	15

## **LISTA DE APÊNDICES**

APÊNDICE I – Artigo ‘Avaliação do Efeito da Adição do Pellet, Umidade e Cal, nos Parâmetros de uma Sinterização Piloto’.



## RESUMO

A adição de pellet feed nas sinterizações convencionais tornou-se uma prática comum devido ao aumento do teor de sílica dos sinter feeds, sendo necessárias adaptações nas rotas de processo de sinterização. Nesse cenário a CSN instalou misturadores intensivos na rota de aglomeração nas sinterizações 3 e 4, permitindo a elevação da utilização de pellet feed, diminuindo o teor de sílica no sínter. Neste contexto, foi avaliado o efeito da elevação da participação do pellet feed na mistura a sinterizar de 15% para 20%, com a utilização de misturador intensivo na rota de aglomeração no processo de sinterização piloto, alterando parâmetros de processo umidade e cal. Os resultados indicaram variação na produtividade, rendimento do sínter, propriedades mecânicas e metalúrgicas do sínter conforme apresentado no presente estudo

Palavras-chave: Sinterização; Misturador intensivo; Pellet feed; Cal.

## **ABSTRACT**

The pellet feed addition in conventional sintering has become a common practice due to the increased sinter feed silica content, requiring adjustments to the sintering process routes. With the acquisition of the intensive mixer, CSN increased the share of pellet feed in the mix to sinter in its industrial process. In this context, the effect of increasing the participation of the pellet feed in the mixture to be sintered from 15% to 20% in the pilot sintering process was evaluated using the intensive mixer. The results indicated variation in productivity, sinter yield and sinter mechanical properties as presented in the present study.

**Key words:** Sintering; Intensive mixer; Pellet feed

## 1. INTRODUÇÃO

Com a piora gradativa dos minérios de ferro utilizados na siderurgia, o aumento do teor de sílica e conseqüentemente, do *fuel rate* nos altos-fornos, as usinas siderúrgicas têm buscado materiais e tecnologias alternativas para manter os níveis de qualidade do sinter produto, minimizando os prejuízos à produtividade na sinterização. Uma alternativa utilizada atualmente é a adição de *pellet feed* na sinterização, visando reduzir o teor de sílica no sinter e elevar o teor de ferro. Contudo, esse ganho químico tende a ocorrer, acarretando perda de produtividade no processo de sinterização.

Diante desse cenário, têm-se avaliado projetos que permitam a utilização de *pellet feed* sem que haja prejuízo produtivo. Entre eles, destacam-se a alteração na etapa de aglomeração a frio da sinterização, utilizando equipamentos de aglomeração (misturador intensivo horizontal e vertical, disco pelletizador e alongamento do tambor) e de suas configurações (*Hybrid Pelletized Sinter, Mosaic Embedding Iron Ore Sintering*, granulação seletiva e outras).

Na CSN, optou-se pela instalação de um misturador intensivo na rota de aglomeração a frio das Sinterizações 3 e 4, em Volta Redonda-RJ.

O presente estudo tem por objetivo investigar o efeito da substituição parcial de *sinter feed* por *pellet feed*, alterando parâmetros de controle como a umidade da mistura a sinterizar e consumo de cal, avaliando os efeitos nos indicadores do processo de sinterização e na qualidade físico-química e metalúrgica do sinter produzido em escala piloto.

## 2. OBJETIVOS

Investigar o efeito da substituição parcial de *sinter feed* por *pellet feed*, alterando parâmetros de controle como a umidade da mistura a sinterizar e consumo de cal, avaliando os efeitos nos indicadores do processo de sinterização e na qualidade físico-química e metalúrgica do sínter produzido em escala piloto.

### 3. CONCLUSÕES

A análise e discussão dos resultados, deste trabalho, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- A produtividade está associada a velocidade de sinterização, sendo influenciada pela permeabilidade do leito. A elevação do pellet feed de 15% para 20%, aumentou a fração de finos ( $<0,150\text{mm}$ ) na mistura a sinterizar, reduzindo a permeabilidade. Ao alterar comitadamente a participação de cal de 2,3% para 2,8% e a umidade da mistura de 6,5% para 7,5% (sínter 4), favoreceu a permeabilidade, permitindo que as partículas mais finas da mistura, intermediárias e aderentes, participem da formação de micropelotas, elevando a velocidade de frente de queima e conseqüentemente a recuperação da produtividade.
- O aumento do pellet feed prejudicou o rendimento e a resistência mecânica, em função da redução de aproximadamente 7% do volume de escória. A combinação do misturamento intensivo com adição de pellet feed na sinterização indica ser uma das formas para se evitar perda de produtividade e elevação de slag rate nos altos-fornos, entretanto a resistência mecânica sínter deverá ser menor que o sínter produzido na forma convencional, exigindo esforços de pesquisa e desenvolvimento para melhoria do processo.
- A elevação do pellet feed na mistura a sinterizar, reduziu os teores de alumina do sínter, em função dos menores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presentes no pellet feed. A intensidade de degradação granulométrica dos sínteres, durante redução em baixas temperaturas, é fortemente influenciada pelos tipos de constituintes microestruturais e pela presença de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na rede cristalina das hematitas secundárias.
- O menor índice de redutibilidade apresentado pelos sínteres produzidos com a utilização de 20% de pellet feed, quando comparado ao sínter referência, foi influenciado pelos menos teores de  $\text{FeO}$ .

#### **4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar ensaios de amolecimento de fusão
- Avaliar os impactos da substituição do sinter feed pelo pellet feed, elevando a participação de pellet feed na mistura de minérios em 25%, 30% e 40% e os impactos na produtividade, rendimento do sinter, propriedades mecânicas e metalúrgicas
- Avaliar novas tecnologias como o granulador intensivo e os impactos na substituição sinter feed pelo pellet feed.

## **APÊNDICES**

APÊNDICE I – “Avaliação do Efeito da Adição do Pellet, Umidade e Cal, nos Parâmetros de uma Sinterização Piloto”. Contribuição técnica ao 50º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 8º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week 2020, a ser realizada de 01 a 03 de outubro de 2020, São Paulo, SP, Brasil.

## AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DO PELLET FEED, UMIDADE E CAL, NOS PARAMETROS DE UMA SINTERIZAÇÃO PILOTO\*

*Fernando Gustavo Corrêa de Melor<sup>1</sup>*

*Leandro Rocha Lemos<sup>2</sup>*

### **Resumo**

A adição de pellet feed nas sinterizações convencionais tornou-se uma prática comum devido ao aumento do teor de sílica dos sinter feeds, sendo necessárias adaptações nas rotas de processo de sinterização. Nesse cenário a CSN instalou misturadores intensivos na rota de aglomeração nas sinterizações 3 e 4, permitindo a elevação da utilização de pellet feed, diminuindo o teor de sílica no síter. Neste contexto, foi avaliado o efeito da elevação da participação do pellet feed na mistura a sinterizar de 15% para 20%, com a utilização de misturador intensivo na rota de aglomeração no processo de sinterização piloto, alterando parâmetros de processo umidade e cal. Os resultados indicaram variação na produtividade, rendimento do síter, propriedades mecânicas e metalúrgicas do síter conforme apresentado no presente estudo

**Palavras-chave:** Sinterização; Misturador intensivo; Pellet feed; Cal.

## EVALUATION OF THE EFFECT OF PELLET FEED ADDITION BY CHANGING HUMIDITY AND LIME CONSUMPTION PARAMETERS IN A PILOT SYNTERIZATION

### **Abstract**

The pellet feed addition in conventional sintering has become a common practice due to the increased sinter feed silica content, requiring adjustments to the sintering process routes. With the acquisition of the intensive mixer, CSN increased the share of pellet feed in the mix to sinter in its industrial process. In this context, the effect of increasing the participation of the pellet feed in the mixture to be sintered from 15% to 20% in the pilot sintering process was evaluated using the intensive mixer. The results indicated variation in productivity, sinter yield and sinter mechanical properties as presented in the present study.

**Keywords:** Sintering; Intensive mixer; Pellet feed.

<sup>1</sup> *Engenheiro Metalurgista, Msc, Engenheiro de Processos Sênior, Gerência Sinterizações Redução. CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, Dr, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil. 3 Engenheiro Metalurgista, Dr, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



## 1 INTRODUÇÃO.

### 1.1 Utilização de Pellet Feed na Mistura a Sinterizar e Utilização De Misturadores Intensivos em Sinterizações.

Segundo Reideschlaeger *et al* [1], uma das tendências globais é o constante desafio dos produtores de aço em relação ao empobrecimento dos minérios de ferro. Os minérios de ferro produzidos diretamente das minas não possuem mais a mesma pureza do passado, em especial a sílica que requer processamento posterior para ser removida. Com isso, uma grande quantidade de minério de ferro deverá ser processada e concentrada resultando em uma quantidade significativa de *pellet feed* disponível no mercado.

Hsieh [2] avaliou o efeito de concentrados associados a diferentes rotas de aglomeração a frio nos indicadores da sinterização, em escala piloto. Na etapa de aglomeração a frio, foram utilizados misturador convencional, tambor e misturador intensivo, individualmente e combinados, totalizando três rotas diferentes. Ademais, o uso do misturador intensivo associado ao tambor e no modo separado permitiu ganhos de 2% a 3% na produtividade, em relação à aglomeração convencional (somente tambor).

Pereira [3] fabricou micropelotas em uma rota separada e comparou o efeito da substituição do sinter feed pelo pellet feed remoído Samarco (84% <0,040 mm), sem e com pré-aglomeração. Os resultados mostraram que a substituição do sinter feed pelo pellet feed sem a pré-aglomeração implicou em perdas produtivas ao passo que aquele com a pré-aglomeração (micropelotas) na mistura Ocidental, não. Já na Asiática, houve perda produtiva independente da presença do processo de pré-aglomeração, exceto na mistura com 20% de pellet feed pré-aglomerado que não alterou significativamente a produtividade.

Silva e Honorato [4] investigaram dois casos de substituição do pellet feed coarse por pellet feed e concentrado no processo de sinterização em escala piloto. Em termos de processo de sinterização, a substituição elevou consideravelmente a produtividade, por outro lado houve redução do rendimento de sinter e da resistência mecânica. Condição comum para sinterizações que buscam melhores produtividades. O uso de minério de ferro fino, pellet feed, na sinterização será uma vertente nos próximos anos para as siderúrgicas mundiais, exigindo alterações dos parâmetros de processo e inovação tecnológica para recuperar ou minimizar perda produtiva na sinterização. A combinação do misturamento intensivo com adição de pellet feed na sinterização indica ser uma das formas para se evitar perda de produtividade e elevação de slag rate nos altos-fornos, entretanto a resistência mecânica do sinter deverá ser menor que o sinter produzido na forma convencional.

Na CSN, optou-se pela instalação de misturador intensivo na rota de aglomeração a frio das Sinterizações 3 e 4, em Volta Redonda-RJ.

### 1.2 Fatores Influenciadores do RDI (Índice de Redução Sob Degradação) no Sinter.

Vyver [5] cita que a mineralogia do minério de ferro afeta o comportamento da degradação, durante a redução, como por exemplo: maiores tamanhos de grãos, baixa porosidade, direcionalidade da estrutura de grãos e contornos de grãos, poros largos interconectados, finas camadas de poros e água contida no mineral. Todos esses itens contribuem para o aumento dos valores de RDI.

Para garantir uma estabilidade ao escoamento gasoso no alto-forno o valor de RDI < 30% é tomado como padrão para se utilizar cargas ferríferas no alto-forno. Para valores deste índice abaixo de 35 a 40%, a performance do alto-forno não é afetada (Loo, [6]; Jouhari, [7]; Kinnunen, [8]). Para Umedevi [9], os valores de RDI < 27% são aceitáveis para uma boa marcha operacional do alto-forno. Nesse trabalho será objetivado valores de RDI < 30%.

Segundo Loo [6] a fase vítrea é extremamente fraca e está bem dispersa no sinter. Ferritas de cálcio, silício e alumínio possuem baixa tenacidade à fratura, apresentando, assim, valores mais altos de RDI. No entanto, elas podem ser um pouco mais resistentes à propagação de trincas devido à presença de poros. A tenacidade à fratura, que é uma medida da resistência do material à propagação de trinca é, portanto, um importante fator na determinação do RDI. De acordo com Dwarapudi [10], o aumento no teor da alumina no sinter de minério de ferro aumenta a área dos poros e o formato dos mesmos se torna irregular. A alumina, dissolvida na fase, difunde no cristal da hematita durante o processo de sinterização e reduz a resistência da mesma. Durante a redução a baixa temperatura, a hematita que contém alumina gera uma fase de magnetita com estrutura cristalina distorcida, gerando e propagando trincas.

O presente estudo tem por objetivo investigar o efeito da substituição parcial de sinter feed por pellet feed, alterando parâmetros de controle como a umidade da mistura a sinterizar e consumo de cal, avaliando os efeitos nos indicadores do processo de sinterização e na qualidade físico-química e metalúrgica (RI e RDI) do sinter produzido em escala piloto.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS.

### 2.1 Caracterizações das Matérias- Primas.

As amostras de todas as matérias-primas utilizadas nos testes foram coletadas e preparadas de acordo com os procedimentos da norma ISO 3082. Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das análises químicas e granulométricas de todas as matérias-primas utilizadas nos testes de sinterabilidade.

Tabela 1. Análise química e granulométrica das matérias primas

Matéria Prima	Análise Química (% em massa)							
	FeT	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	P	PPC	CF
Sinter Feed	61,45	1,45	6,82	1,58	0,06	0,66	2,65	-
Pellet Feed	66,52	1,25	2,59	0,55	-	0,32	1,32	-
Calcário	0,16	52,13	0,81	0,32	2,89	-	43,54	-
Dolomita	0,37	37	2,03	0,45	14,03	0,01	45,02	-
Cal Calcítica	0,17	86,9	0,9	0,22	6,5	0,01	2,32	-
Coque	-	11,2	1,29	4,01	0,17	-	-	78,4

Onde PPC (perda por calcinação) e CF (carbono fixo).

### 2.2 Teste de Sinteribilidade.

Testes na máquina piloto de sinterização da CSN foram realizados para avaliar o efeito da substituição parcial do sinter feed por pellet feed no processo. As características da

panela e do processo são apresentadas na Tabela 2. O processo foi iniciado pela homogeneização da mistura no misturador intensivo, com posterior aglomeração no tambor e, finalmente, o carregamento na panela piloto de sinterização. O sinter produzido foi submetido à abrasão com 50 voltas em um tambor, visando simular a degradação do sinter industrial, conforme norma ISO 3082.

O sinter degradado foi classificado em peneira 5 mm, sendo a faixa maior que 5 mm considerada o sinter produto.

Tabela 2. Parâmetros da panela e do processo de sinterização piloto

Parâmetro	Sinterização Piloto
Altura da camada	370mm
Diâmetro da panela	300mm
Relação Ar/GN (Gás Natural)	10/1
Altura do bedding	20mm
Tempo de ignição	1min
Depressão durante a ignição	800 mmH <sub>2</sub> O
Depressão durante a queima	1400 mmH <sub>2</sub> O
Tempo de residência (misturador intensivo)	1 min
Rotação Misturador Intensivo	150 rpm
Tempo de residência (tambor)	3 min
Rotação do tambor	20 rpm
Adição de água	30% misturador intensivo 70% misturador tambor

Os experimentos foram planejados substituindo parcialmente na mistura de minérios o sinter feed pelo pellet feed e alterando parâmetros de cal e umidade, conforme apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Planejamentos dos experimentos na sinterização piloto

Sinter Fabricado	Pellet Feed (%)	Sinter Feed (%)	Umidade (%)	Cal (%)
Sinter 1 (referência)	15	85	6,5	2,3
Sinter 2	20	80	6,5	2,3
Sinter 3	20	80	7,5	2,3
Sinter 4	20	80	7,5	2,8
Sinter 5	20	80	6,5	2,8

Uma mistura com 70 kg de matérias-primas, cujo leito de fusão é apresentado nas Tabelas 4.

Tabela 4. Leito de fusão

Material	Mistura Total (%)				
	Sínter 1 (*)	Sínter 2	Sínter 3	Sínter 4	Sínter 5
Sinter Feed	44,8	42,5	42,5	42,8	42,8
Pellet Feed	7,9	10,6	10,6	10,6	10,6
Cal Calcítica	2,3	2,3	2,3	2,8	2,8
Combustível	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Calcário	6,1	5,7	5,7	4,9	4,9
Dolomito	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
FSD(*)	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1

Carepa	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Pó Coletor	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Retorno	20	20	20	20	20
Total	100	100	100	100	100

(\*) Onde FSD é finos de sinter degradado.

O FeO e FeT foram avaliados através de análise química via úmida, utilizando a técnica volumetria por ataque e titulados com dicromato de potássio, norma ISO9035. As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas da CSN, em Volta Redonda-RJ, com equipamento Espectrômetro de Raio-X Panalytical, e a técnica utilizada foi a espectrometria de fluorescência de raio-x, sendo analisados os percentuais de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, CaO e MgO. e gravimetria por calcinação (PPC - Perda Por Calcinação).

A resistência mecânica do sinter foi avaliada por meio de teste de abrasão (Tumbler Test), conforme norma ASTM E-279-92, realizados no Centro de Pesquisa da CSN em Volta Redonda-RJ.

Os ensaios de RDI (degradação sob redução) e RI (redutibilidade) foram realizados na CSN, no Laboratório de Matérias Primas, Volta Redonda-RJ e foram utilizadas as normas ISO (4696-1) e ISO (4695), respectivamente.

Para quantificar as fases mineralógicas do sinter, foi utilizado um microscópio óptico motorizado e controlado por computador ZeissAxioplan 2 ie e foram realizados no laboratório de petrografia do Centro de Pesquisas da CSN em Volta Redonda – RJ.

Fotomicrografias foram realizadas para conhecer qualitativamente os constituintes do sinter, com equipamento MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), fabricante FEI Company, modelo QUANTA 3D FEG.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Os resultados obtidos a partir dos testes realizados, além de algumas interpretações dos mesmos, são apresentados a seguir. A caracterização química dos sínteres produzidos e os principais parâmetros de sinterização observados são analisados no item 3.1 e o item 3.2 apresenta os resultados metalúrgicos e dos microconstituintes.

#### 3.1 Apresentação dos Resultados da Caracterização Química dos Sínteres e Indicadores Operacionais.

Na tabela 5 são listados os resultados da caracterização química dos sínteres.

Tabela 5. Composição química dos sínteres (% em peso)

	FeT	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	P	Mn	IB	VE	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Sínter 1	56,23	9,80	1,55	1,56	6,39	10,73	0,06	0,32	1,68	17,12	0,05	0,03
Sínter 2	57,12	9,90	1,38	1,43	5,97	10,15	0,06	0,30	1,70	16,12	0,04	0,03
Sínter 3	57,67	9,40	1,46	1,42	5,67	10,22	0,06	0,30	1,80	15,89	0,05	0,02
Sínter 4	56,98	9,10	1,39	1,39	5,86	10,05	0,06	0,30	1,72	15,91	0,04	0,03
Sínter 5	56,86	9,20	1,64	1,41	5,62	10,32	0,06	0,28	1,84	15,94	0,05	0,02

Onde: \*referência, IB (Índice de Basicidade) e VE (Volume de Escória).

Na figura 1 são apresentados os resultados de *post teste* do sínter, produtividade e velocidade de sinterização (*FFS – Flame Front Speed*).

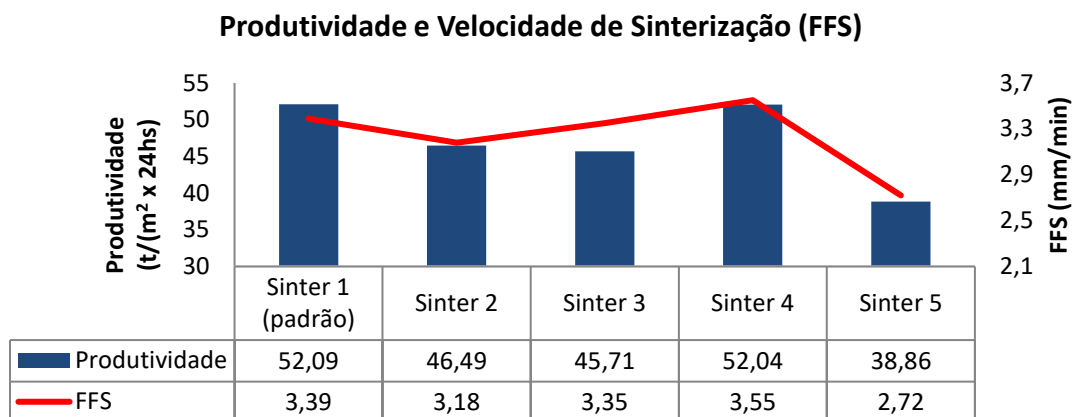


Figura 1. Resultados de *post test* do sínter.

A produtividade e a velocidade da frente de queima (*FFS – Flame Front Speed*) foram reduzidas pela adição do pellet feed em comparação ao sínter referência, exceto para o sínter 4, que não houve perda de produtividade e elevação da velocidade de sinterização. No caso do sínter 4, foi elevado comitadamente a umidade (de 6,5% para 7,5%) e a dosagem de cal (de 2,3% para 2,8%), em comparação a referência (sínter 1).

Conforme Najjar [11], o controle de umidade está relacionado com a granulometria da mistura, pois quando a mistura a sinterizar apresenta maiores concentrações granulométrica na faixa inferior a 150mesh, o acréscimo na adição de água em conjunto com a ação do misturador, permite maior formação de micro-pelotas, melhorando com isto, a permeabilidade da mistura. E sobre a cal, Najjar [11] discorre que adição de agentes aglomerantes na mistura a sinterizar visa acelerar a união das partículas no misturador, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade de retenção do aglomerado e evita a desintegração dos grânulos no ato de compactação e secagem do material na esteira. A quantidade de partículas aderidas é diretamente proporcional ao percentual usado do agente aglomerante.

A produtividade está associada com a velocidade de sinterização (*FFS*), conforme mostra a figura 2, apresentando forte correlação  $R^2=0,859$ .

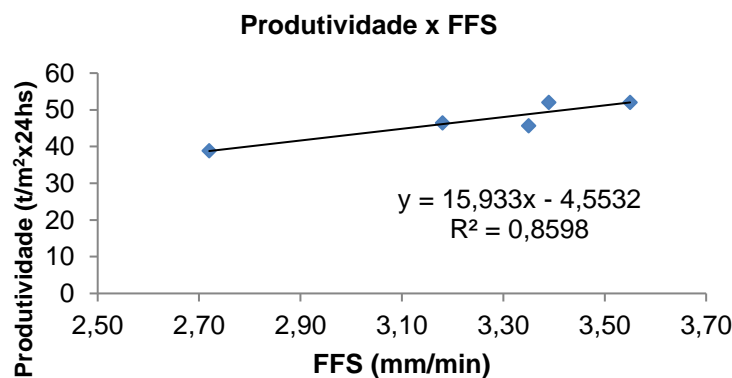


Figura 2. Influência da velocidade de sinterização na produtividade.

LOO [6] indicou que a permeabilidade do leito influencia a velocidade da frente de chama, o que altera a velocidade com que o aquecimento das partículas reagentes se dá. Há influência também sobre a formação de fase líquida, diretamente influente sobre a resistência mecânica final do sínter.

Na figura 3, são apresentados os resultados de rendimento e resistência mecânica (Tumbler Test)

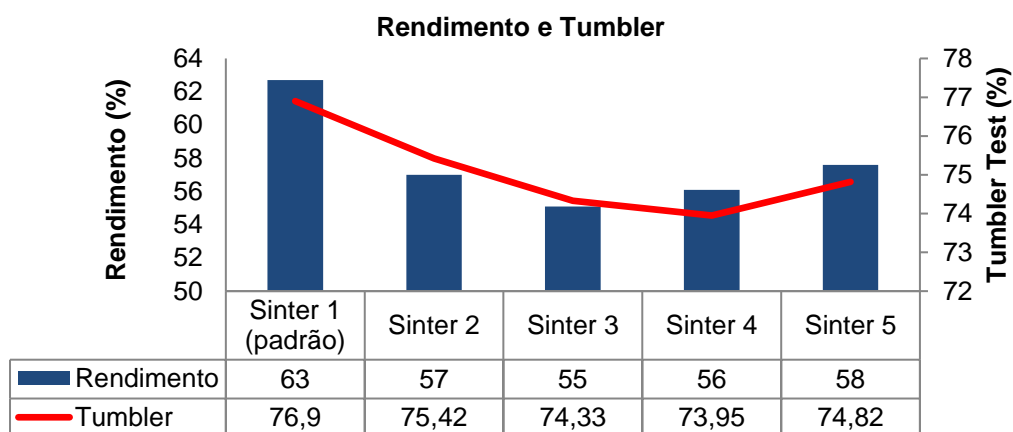


Figura 3. Resultados de rendimento de sínter (sínter/(sínter + retorno) e Tumbler Test.

O rendimento e a sua resistência mecânica (Tumbler Test) apresentaram redução pela adição do pellet feed em comparação ao sínter referência. O rendimento de sínter apresenta forte correlação com o volume de escória do sínter ( $\text{CaO} + \text{SiO}_2$ ), conforme figura 4. Isto deixa clara a dependência entre o rendimento e a matriz de escória do sínter.

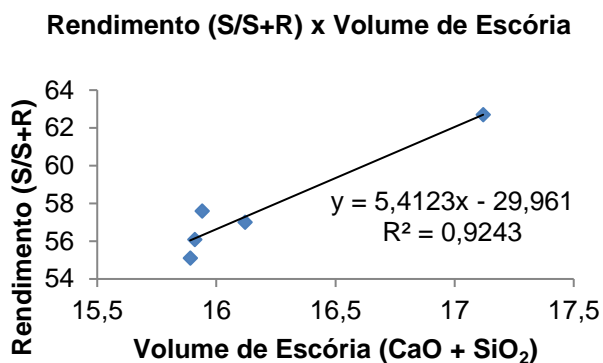


Figura 4. Influência do volume de escória do sinter no rendimento (S/(S+R)).

A diminuição do volume de escória apresentou forte correlação à resistência mecânica do sínter, conforme apresentado pela figura 5.

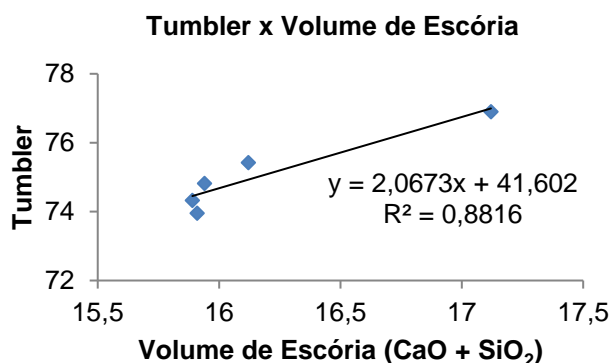


Figura 5. Influência do volume de escória do sinter no Tumbler.

De acordo com Azevedo et al.[12] o rendimento e a resistência mecânica podem ser elevados com o aumento de CaO e SiO<sub>2</sub>, ou seja, do volume de escória na região de partículas aderentes do sinter. Sendo assim, a dissolução da sílica que está presente na hematita primária do sinter na matriz de escória é uma alternativa para a recuperação do seu rendimento e resistência. Para tal, o aumento do aporte térmico é um meio, contudo as propriedades metalúrgicas do sinter podem ser alteradas.

### 3.2 Apresentação dos Resultados Metalúrgicos do Sinter.

A figura 6 apresenta os resultados metalúrgicos RI (Índice de Redutibilidade) e RDI (Índice de Degradação sob Redução).

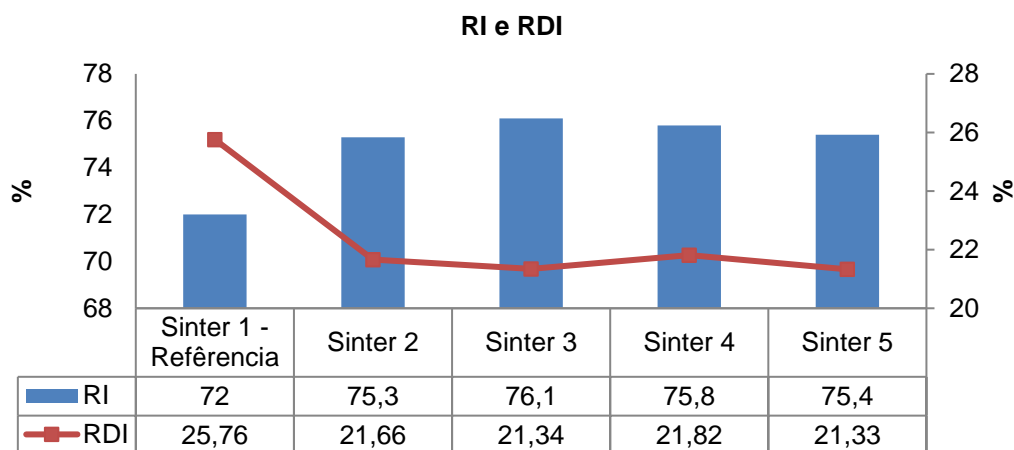


Figura 6. Resultados características metalúrgicas do sinter RI e RDI.

Foram realizados ensaios de Índice de Degradação sob Redução (RDI), de acordo com a norma ISO 4696-1. Todas amostras obtiveram resultados inferiores a 26%. Na literatura foram encontradas divergências entre os valores recomendáveis de RDI (norma ISO4696-1) para sinter utilizados em altos fornos. Loo [6] e Jouhari [7] citam que estes valores devem ser menores que 35 a 40%, enquanto Umedevi [9] afirma que os valores de RDI têm de estar abaixo de 27%, para haver uma boa marcha operacional do alto-forno.

A elevação do pellet feed na mistura a sinterizar, reduziu os teores de alumina do sinter em função dos menores teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes no pellet feed. Essa redução no teor de alumina do sinter pode estar associada aos menores índices RDI. Park [13] afirma que a alumina contida no minério de ferro diminui a resistência a frio e aumenta o RDI do

sínter. A alumina tende a produzir grãos mais grosseiros da fase de cálcio-ferrita, diminuindo, assim, a resistência mecânica.

A figura 7 mostra uma forte correlação entre o teor da alumina e os resultados de RDI do sínter.

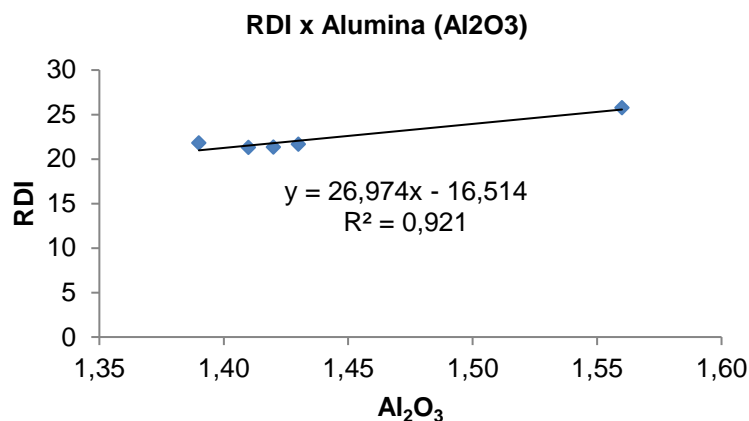


Figura 7. Influência da Alumina no RDI (Degradação sob redução)

A tabela 6 apresenta a quantificação volumétrica das fases minerais presentes em cada um dos cinco tipos de sínter produzidos

Tabela 6. Composição química dos sínteres (% em peso)

Fases	Sínter 1 (*)	Sínter 2	Sínter 3	Sínter 4	Sínter 5
Hematita	36,3	42,3	40,9	41,2	40,8
Magnetita	17,3	21,5	22,3	24,5	21,5
Ferritos	18,9	16,3	17,3	17,5	19
Silicatos	9,1	6,8	7,2	7,8	7,7
Poros	18,4	13,1	12,3	9	11

Houve aumento das fases minerais hematita e magnetita nos sínteres 2,3,4 e 5 em comparação ao sínter 1 (referência).

A figura 8 e 9, são fotomicrografias dos sínteres produzidos com a participação de 15% e 20% de pellet feed na mistura a sinterizar, respectivamente.

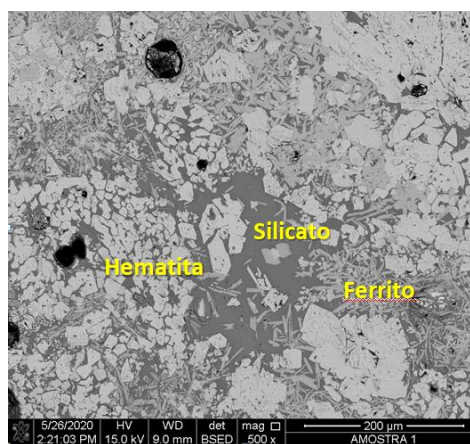


Figura 8. Mineralogia do sínter fabricado com participação de 15% de pellet feed.



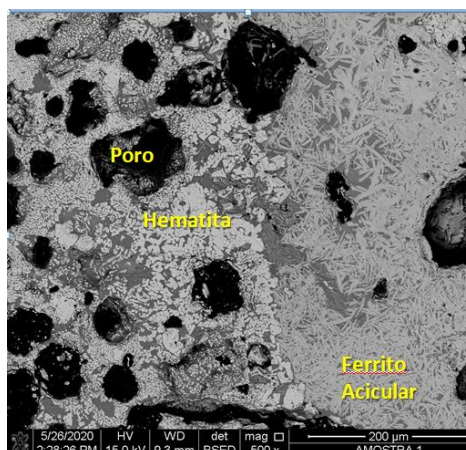


Figura 9. Mineralogia do sinter fabricado com participação de 20% de pellet feed.

A figura 8 apresenta fotomicrografia do sinter com presença de hematita secundária e cálcio ferrita colunar. Já a figura 9 apresenta sinter composto com hematita e ferrita acicular. Segundo Takada [14] o sinter composto de hematita romboédrica esqueletiforme e cálcio-ferrita colunar tem mais altos valores de RDI do que sinter composto de hematita porfirítica e cálcio-ferrita acicular.

Resultados dos estudos de Loo [6] sugerem que a microestrutura dos materiais, fases e associações minerais têm grande influência no mecanismo de degradação à baixa temperatura.

Foram realizados ensaios de Índice de Redutibilidade do sinter (RI), de acordo com a norma ISO (4695), e todos resultados obtidos foram superiores a 65%.

O ensaio de RI, indica a disposição do sinter em liberar o oxigênio pelo agente de redução. Procura-se manter este índice acima de 65% e para isto é necessário que se controle a basicidade, o volume de escória e o teor de FeO. Este índice indica que quanto maior for o seu valor, menor será o volume de escória primária gerada e maior a permeabilidade na zona coesiva dentro de um alto-forno.

Para o RI (Índice de Redutibilidade do Sinter), os resultados dos sinteres 2,3,4 e 5 apresentaram valores mais elevados em comparação ao sinter 1 referência. Essa elevação do RI pode estar associada aos menores valores de FeO apresentados pelos sinteres.

Segundo Lopes [6], o teor de FeO é parâmetro de extrema importância para as sinterizações pois valores elevados deste constituinte tendem a diminuir a redutibilidade do sinter, afetando a zona de amolecimento e fusão dos altos-fornos, comprometendo sua estabilidade de processo.

#### 4. CONCLUSÕES.

A análise e discussão dos resultados, deste trabalho, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- A produtividade está associada a velocidade de sinterização, sendo influenciada pela permeabilidade do leito. A elevação do pellet feed de 15% para 20%, aumentou a fração de finos (<0,150mm) na mistura a sinterizar, reduzindo a permeabilidade. Ao alterar comitantemente a participação de cal de 2,3% para 2,8% e a umidade da mistura de 6,5% para 7,5% (sinter 4), favoreceu a permeabilidade, permitindo que as partículas mais finas da mistura, intermediárias

e aderentes, participem da formação de micropelotas, elevando a velocidade de frente de queima e conseqüentemente a recuperação da produtividade.

- O aumento do pellet feed prejudicou o rendimento e a resistência mecânica, em função da redução de aproximadamente 7% do volume de escória. A combinação do misturamento intensivo com adição de pellet feed na sinterização indica ser uma das formas para se evitar perda de produtividade e elevação de slag rate nos altos-fornos, entretanto a resistência mecânica sinter deverá ser menor que o sinter produzido na forma convencional, exigindo esforços de pesquisa e desenvolvimento para melhoria do processo.
- A elevação do pellet feed na mistura a sinterizar, reduziu os teores de alumina do sinter, em função dos menores teores de  $Al_2O_3$  presentes no pellet feed. A intensidade de degradação granulométrica dos sínteres, durante redução em baixas temperaturas, é fortemente influenciada pelos tipos de constituintes microestruturais e pela presença de  $Al_2O_3$  na rede cristalina das hematitas secundárias.
- O menor índice de redutibilidade apresentado pelos sínteres produzidos com a utilização de 20% de pellet feed, quando comparado ao sinter referência, foi influenciado pelos menos teores de FeO.

#### Agradecimentos.

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e à Companhia Siderúrgica Nacional pelo apoio na realização do presente trabalho.

#### REFERÊNCIAS.

- 1 REIDETSCHLAEGER, J.; HOETZINGER S. e FULGENCIO, A. Course: Intensive Mixing and Granulation System: Solutions for Ultra-Fines in Sintering. In: 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar, 12th Brazilian Symposium on Iron Ore and 1st Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore, 2013, Belo Horizonte: ABM
- 2 HSIEH, L. Effect of Using a High Speed Agitating Mixer on Sintering Properties. In: METEC InSteelCon 2011. Sintering: Session 12, Düsseldorf, 27 June-1 July 2011.
- 3 PEREIRA, H. C. Produção de Sinter com Pellet Screenings e Pellet Feed com Emprego de Granulação Intensiva Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. 220 p. (TESE, Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).
- 4 SILVA, T. P. e HONORATO, E. P. Avaliação do Efeito da Adição de Pellet Feed Usando Misturamento Intensivo em Sinterização Piloto. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 43, 2013, Belo Horizonte: Anais São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 2013. p.89-99
- 5 VYVER, W. F. VAN DER, PISTORIOUS, P. C., BRAND, S. A., REID, M. Disintegration of Northern Cape iron ores under reducing conditions. Ironmaking and Steelmaking, v.36, n.5, p. 354-362, 2009.
- 6 LOO, C. E., WAN, K. T., HOWES, V. R. Mechanical Properties of Natural and Synthetic Mineral Phases in Sinters having Varying Reduction Degradation Indices. Ironmaking and Steelmaking, v.15, n.6, p.279-285, 1988.
- 7 JOUHARI, A. K., DATTA, RAY, H. S. Use of Iron and Steel Industry Wastes in Sinter Making. Proceeding of the International Conference on Environmental Management in Metallurgical Industries. Institute of Technology of Banaras Hindu Institute, India, p. 169-172, 2000

- 8 KINNUNEN, K., LAITINEN, P. Investigation of Sinter Plant Production Rate and RDI by Neural Networks. *La Revue de Métallurgie-CIT*, p. 361-371, 2005.
- 9 UMEDEVI, T., BRAHMACHARYULU, A., ROY, A. K., MAHAPATRA, P., PRABHU, M., RANJAN, M. Influence of iron ore fines feed size on microstructure, productivity and quality of iron ore sinter. *ISIJ International*, v.51, n.6, p.922-929, 2011.
- 10 DWARAPUDI, S., RANJAN, M. Influence of Oxide and Silicate Melt Phases on the RDI of Iron Ore Pellets Suitable for Shaft Furnace of Direct Reduction Process. *ISIJ International*, v.50, n.11, p.1581-1589, 2010.
- 11 NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. Curso de Sinterização. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Brasil, p. 32-66,1981
- 12 AZEVEDO, R. N.; ARAÚJO, H. G. V.; GONDIM, E. P. e DUARTE, M. R. Correlação entre Volume de Escória e Parâmetros de Qualidade do Sínter Produto. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.1, n. 4. P. 56-61, abril-junho, 2005.
- 13 PARK, J., SASAKI, Y. High Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Iron Ore Reduction by Effective Use of High Basicity Slag. In: 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012, Rio de Janeiro. P.540-547.
- 14 TAKADA, T., SOMA, H., IRITA, T., KAMISAKA, E., KIMURA, H., ISOYAMA, M., SUZAWA, A. Investigation of Degradation of Sinter in Blast Furnace with a New Vertical Probe. *Transactions ISIJ*, v.26, p.710-716, 1986.