

AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO USO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS NA SINTERIZAÇÃO – PARTE I*

Victor Freire de Oliveira¹
Maurício Covceovich Bagatin²

Resumo

A exaustão das reservas mundiais de minérios de ferro de qualidade, bem como o progressivo avanço das legislações ambientais, são tendências que têm motivado pesquisas acerca do uso de resíduos ricos em ferro e carbono para a fabricação de sinter metalúrgico para uso em alto-forno. Para tal, é necessário que se verifique o comportamento desses materiais nas condições termodinâmicas e cinéticas do processo de sinterização, bem como o seu efeito sobre a qualidade do sinter e sobre os parâmetros de processo da sinterização. Com esse objetivo, em uma primeira etapa do presente projeto de pesquisa, misturas representativas da prática operacional das usinas brasileiras, bem como misturas visando à maximização da reciclagem de resíduos foram testadas em laboratório em condições próximas às da sinterização. Os resultados de análises químicas e mineralógicas obtidos experimentalmente foram comparados com predições termodinâmicas de um modelo de equilíbrio multicomponente, havendo concordância satisfatória.

Palavras-chave: Sinterização; Resíduos; Minério de Ferro; Reciclagem

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE USAGE OF RESIDUES FOR SINTERMAKING – PART I

Abstract

The exhaustion of global reserves of quality iron ore, as well as the progressive advances in environmental legislations, are tendencies that have motivated researches on the usage of iron and carbon-bearing residues in blast furnace sintermaking. In that sense, it is necessary to verify the behaviour of these materials in the thermodynamic and kinetic conditions of the sintering process as well as their effect on sinter quality and on sintering process parameters. With this goal, in a first step of the current research project, mixtures representing the operational practice of Brazilian plants, as well as mixtures aiming at maximizing the recycling of residues were tested in a laboratory in conditions close to those of the sintering process. The experimental results of chemical and mineralogical analysis were compared with the thermodynamic predictions of a multi-component equilibrium model, with good agreement.

Keywords: Sintermaking; Residues; Iron Ore; Recycling.

¹ Engenheiro Químico, Engenheiro de Projetos, Tecnologias de Injeção, Paul Wurth SMS Group, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Dr., Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil..

1 INTRODUÇÃO

Para a operação do alto-forno, é de suma importância a estabilidade da qualidade das matérias-primas. Entretanto, os minérios de ferro que alimentam as siderúrgicas ao redor do mundo vêm sofrendo progressivo empobrecimento em ferro, aumento de elementos de ganga e diminuição da granulometria das frações mais ricas em ferro, com correspondente oscilação dos preços da matéria-prima (1), (2). Torna-se essencial, portanto, a mistura (blendagem) de minérios de ferro, visando a uma qualidade média de matéria-prima adequada à operação (1). Nesse contexto, processos de aglomeração como sinterização e pelotização assumem papéis centrais, pois permitem o aproveitamento de minérios finos oriundos dos processos de beneficiamento mineral. A sinterização permite, também, certa proporção de reaproveitamento de resíduos siderúrgicos como pós e lamas de altos-fornos e aciarias como substitutos parciais de materiais ferrosos e carbonosos. O uso dessas matérias-primas, mais baratas que minérios de alta gradação, associado à possibilidade de ganhos de produtividade no alto-forno oriundos da permeabilidade promovida pelo sinter apontam para um ganho significativo de competitividade para os produtores mundiais de aço (3). Adicionalmente, eliminam-se passivos ambientais de central importância para a obtenção de métodos sustentáveis de produção.

Entretanto, o uso de resíduos na sinterização também traz, segundo a literatura, alguns desafios relacionados ao processo e operação tanto da sinterização quanto do alto-forno. Um teor elevado de álcalis e cloretos pode causar problemas na sinterização, devido ao comprometimento da eficiência do sistema de lavagem de gases (4). Especialistas da área (5) indicam que a granulometria fina dos resíduos pode reduzir a produtividade da máquina de sinterização devido à redução da permeabilidade do leito. No alto-forno, o sinter deve atender parâmetros controlados de qualidade química e metalúrgica, que incluem também teores limitados de elementos recirculantes como zinco e álcalis. A presença descontrolada desses elementos pode gerar severo comprometimento do escoamento gasoso no reator, bem como de sua descida de carga, gerando perda de produtividade e até mesmo disponibilidade do equipamento. Essa limitação faz com que, ainda hoje, uma proporção apreciável de resíduos seja descartada em aterros, solução insustentável do ponto de vista ambiental e também dispendiosa em termos de investimentos.

Produtores de aço ao redor do mundo já pesquisaram o uso de resíduos específicos e, comumente, se realizam estudos acerca das propriedades do sinter em escala piloto (ensaio de *pot grate*). Modelos matemáticos são capazes de simular os perfis térmicos e fluidodinâmicos do leito de sinterização, bem como a composição química do sinter. Entretanto, pouca atenção é dada à partição de elementos como zinco e álcalis no processo, à formação de fases mineralógicas ou ao estado de oxidação do ferro, mesmo que esses fatores sejam de central importância para o potencial de utilização do sinter produto no alto-forno. Tendo em vista as informações apresentadas, o presente trabalho visa a investigar, através de ensaios de laboratório e de um modelo de equilíbrio multicomponente, o potencial de reciclagem de resíduos através do processo de sinterização. Nessa primeira parte, o enfoque é dado ao comportamento das misturas em temperaturas elevadas, sendo que o comportamento na fase de resfriamento do sinter e os impactos sobre a permeabilidade do leito de sinterização serão avaliados em fases posteriores.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização das matérias-primas e dos resíduos siderúrgicos utilizados no estudo é apresentada na presente seção. São detalhadas também as misturas de sinterização, bem como a metodologia para que fossem testadas em condições de temperaturas elevadas. Enfim, se descreve o modelo termodinâmico utilizado para predição das composições químicas dos produtos.

2.1 Obtenção e Caracterização de Matérias-Primas

10kg de amostras representativas de cada um dos seguintes materiais foram obtidos em uma usina siderúrgica integrada: sínter feed, carepa de laminação, pó de aciaria da lavagem a seco, lama fina de aciaria, lama de alto-forno, pó de coletor de alto-forno, calcário, dolomita e cal. A composição química das matérias-primas ferrosas utilizadas é apresentada na tabela 1. Observam-se teores de ferro apreciáveis nos resíduos. Embora os teores de sílica dos resíduos sejam bastante elevados, pode-se dizer que não diferem muito dos valores atualmente encontrados no sínter feed utilizado em algumas das usinas brasileiras. Nota-se, também, a presença de zinco em teores mais expressivos no pó e lama de alto-forno, bem como na lama fina de aciaria. Isso está possivelmente associado ao uso de sucatas galvanizadas no convertedor LD, enquanto sua presença no pó de alto-forno é atribuída à carga ferrosa empregada no reator. O conteúdo de álcalis dos resíduos é semelhante ao do sínter feed, bem como o conteúdo de enxofre e fósforo. Ressalta-se, também, que o pó de coletor e a lama de alto-forno possuem teores expressivos de carbono, que atua como combustível na sinterização.

Tabela 1. Composição mássica percentual das matérias-primas ferrosas obtidas

Parâmetro	Sínter feed	Carepa	Pó de aciaria	Lama de alto-forno	Lama fina de aciaria	Pó de coletor de alto-forno
Fe _T	63,59	73,84	53,85	43,66	71,65	34,56
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	46,09	0,00
Fe ₂ O ₃	89,09	38,79	73,22	60,42	0,00	44,82
FeO	1,65	60,09	3,40	1,81	32,88	4,13
SiO ₂	7,56	0,60	7,13	6,38	1,10	7,80
Al ₂ O ₃	1,170	0,078	1,372	3,107	0,107	2,365
Mn	0,155	0,159	0,168	0,076	0,158	0,054
P ₂ O ₅	0,146	0,052	0,115	0,125	0,208	0,117
CaO	0,034	0,107	5,932	0,599	15,294	5,632
MgO	0,069	0,016	0,617	0,347	3,019	0,522
TiO ₂	0,001	0,000	0,000	0,305	0,000	0,164
Na ₂ O	0,027	0,033	0,016	0,037	0,061	0,035
K ₂ O	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005
S	0,02	0,02	0,03	0,22	0,05	0,41
ZnO	0,004	0,000	0,021	0,213	0,430	0,321
Cd	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,14	< 0,01
Cr	0,002	0,010	0,003	0,005	0,014	0,009
Pb	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,04	< 0,01	< 0,09
C	0,00	0,00	7,89	26,09	0,00	33,21
Umidade	10,874	2,606	9,641	16,949	29,941	9,074

2.2 Preparo de Misturas

A geração de resíduos indicada por especialistas da área (5) foi usada como referência da geração e da prática comum de reciclagem de resíduos na sinterização das usinas brasileiras. Três misturas foram, então, planejadas: o caso 1 como experimento controle sem nenhum resíduo siderúrgico, o caso 2 tomando-se um extremo de 100% de reciclagem dos resíduos siderúrgicos pela rota de sinterização e o caso 3 analisando-se a prática comum de reciclagem indicada por (5). Para cada um dos casos, realizou-se um balanço de massas englobando a sinterização e o alto-forno, de modo a adequar a química do sinter (ferro total, basicidade binária e MgO) à prática comum na usina de origem dos resíduos, bem como à proporção de sinter na carga tipicamente utilizada na mesma usina. Um conteúdo de ferro de 94,04% foi assumido no ferro-gusa e de 99,97% foi assumido para o aço. Com base nesses valores, o consumo específico de sinter para uso no alto-forno pôde ser calculado, bem como o percentual que os resíduos siderúrgicos representavam na mistura a sinterizar. O balanço de ferro do sinter foi fechado utilizando-se sinter feed e a basicidade foi ajustada com calcário, contabilizando-se 4% de cal para representar a aglomeração a frio da mistura. Dolomita foi usada para ajustar o conteúdo de MgO do sinter. Como os testes a temperaturas elevadas seguiram a referência de (6), (7) e (8), não foi utilizado coque *breeze* nas misturas, uma vez que a metodologia prevê o uso de uma mistura de gases representativa do potencial de oxigênio requerido para que se obtenham as mesmas fases mineralógicas de um sinter industrial. As misturas calculadas são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Composição das misturas de teste em percentual de massa

Parâmetro	Caso 1 0% de reciclagem	Caso 2 100% de reciclagem	Caso 3 Prática comum de reciclagem
Pó de coletor de alto-forno	0.00	0.55	0.55
Lama de alto-forno	0.00	0.75	0.37
Pó de aciaria	0.00	0.50	0.08
Lama fina de aciaria	0.00	1.42	0.21
Carepa	0.00	1.67	1.39
Sinter feed	81.86	77.99	79.68
Cal	3.41	3.45	3.43
Calcário	10.79	9.88	10.34
Dolomita	3.94	3.78	3.96
TOTAL DA MISTURA	100.00	100.00	100.00
Percentual de resíduos	0.00	4.90	2.60
Percentual de sinter na carga do AF	70.26	71.11	70.69
B2 do sinter (%CaO/%SiO ₂)	1.77	1.77	1.77
%Fe alvo do sinter	56.95	56.95	56.95

Os componentes previamente secos de cada uma das misturas foram dosados em balança analítica para completar 200g de cada uma delas. Conforme a metodologia proposta por (9), (10) e (11), cada uma das misturas foi submetida a 6 minutos de rotação a 26RPM em um misturador horizontal. Em seguida, os materiais foram umidificados e homogeneizados por 6 minutos em disco pelotizador com 32° de

inclinação e velocidade de 26RPM. Durante o processo, água foi adicionada à mistura almejando-se 8% de umidade final, conforme a referência de (7). Finalizada a umidificação, a mistura era deixada em repouso por 20 minutos a fim de garantir que toda a cal adicionada ao processo já tivesse reagido. Com base nas tabelas 1 e 2, as composições químicas das misturas resultantes são conforme exposto na tabela 3.

Tabela 3. Composição química resultante das misturas em percentual de massa

Parâmetro	Caso 01	Caso 02	Caso 03
Fe	0.00	0.65	0.10
Fe ₂ O ₃	72.05	70.38	71.18
FeO	1.33	2.78	2.22
SiO	6.40	6.25	6.32
Al ₂ O ₃	1.03	1.03	1.03
Mn	0.13	0.13	0.12
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.12
CaO	3.80	4.07	3.89
Ca(OH) ₂	0.49	0.49	0.49
CaCO ₃	12.79	11.83	12.36
MgO	0.09	0.13	0.10
MgCO ₃	1.63	1.56	1.63
TiO ₂	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.03	0.03	0.03
K ₂ O	0.03	0.02	0.03
S	0.02	0.02	0.02
ZnO	0.00	0.02	0.01
Cd	0.01	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.41	0.28
H ₂ O	8.00	8.00	8.00

As misturas foram, então, prensadas sob a forma de pastilhas de 20g de massa, com 24,8mm de diâmetro, a uma pressão de 10MPa, aplicada por 1 min em uma prensa de 15ton de capacidade, seguindo a metodologia sugerida pela literatura (6), (7) e (8).

2.3 Ensaios de Alta Temperatura

Ensaios de alta temperatura foram realizados a fim de avaliar experimentalmente o comportamento das três misturas preparadas, em condições próximas à da sinterização industrial (6), (7) e (8). Nesta primeira etapa do projeto, buscou-se simular as etapas de aquecimento da mistura (e não de resfriamento), tendo em vista que elementos deletérios como zinco e álcalis têm, normalmente, baixos pontos de fusão, ebulição ou sublimação (12). Dessa forma, a maior probabilidade é que, se eliminados no processo de sinterização, o fossem nessa etapa. Nesses ensaios, as amostras foram aquecidas em forno resistivo tubular (Lindberg 54459, T_{máx} 1500°C, 12,6W, 240V 50/60Hz), representado na figura 1 (a), seguindo o perfil

térmico ilustrado no gráfico da figura 1 (b). Um termopar tipo S com termoelementos isolados por capilar cerâmico foi usado, com uma luva de AISI 310.

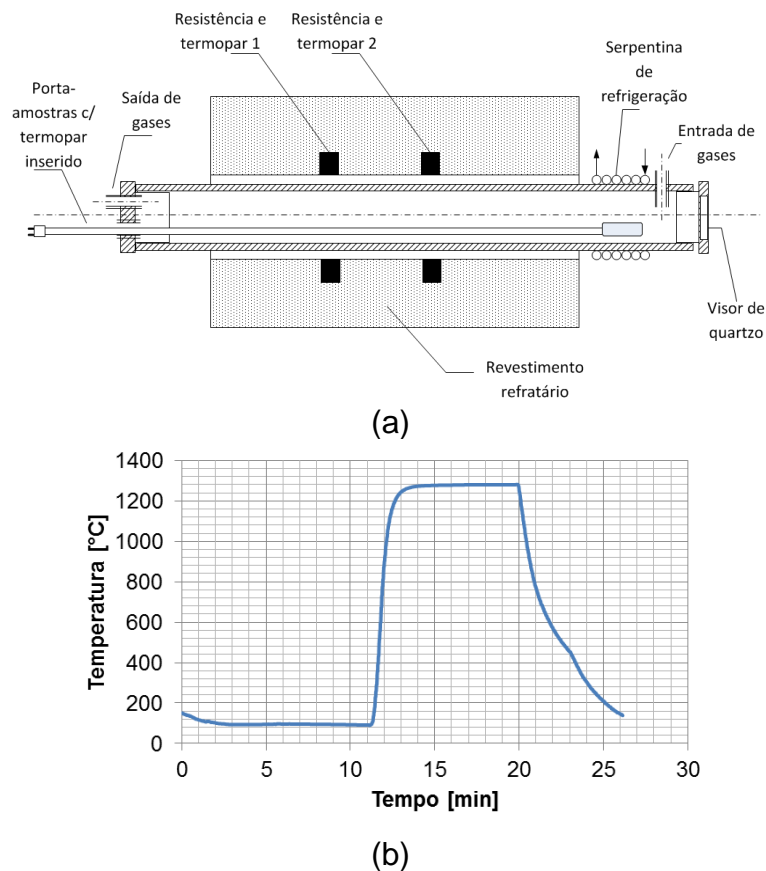


Figura 1. Ensaios de alta temperatura (a): forno resistivo tubular (b) perfil térmico dos ensaios

Para a realização desses ensaios, o forno era pré-aquecido até a temperatura de 1290°C, e ambientado por 8 minutos com a mistura de reação (1% CO, 24% CO₂ e 75% N₂) na vazão de trabalho de 2,5L/min. A amostra era, então, movida da zona de resfriamento (serpentina de refrigeração) para a zona de reação (resistência e termopar 1 e 2), onde permanecia por 8 minutos. Ao fim desse tempo, a amostra era movida novamente para a zona de resfriamento, onde permanecia por 2 minutos enquanto o forno era inertizado com nitrogênio na vazão de 2,5L/min, a fim de evitar vazamento de monóxido de carbono durante a abertura do tubo do forno. O visor de quartzo era, então, aberto e a amostra era resfriada ao ar atmosférico. O produto obtido nos ensaios foi caracterizado por DRX para identificação das fases mineralógicas presentes e também por análises químicas análogas às realizadas para as matérias-primas (via úmida, gravimetria, espectrometria de absorção atômica e fluorescência de raios-X).

2.4 Modelo Termodinâmico de Equilíbrio Multi-Componente

O modelo termodinâmico de equilíbrio multi-componente proposto por (13) foi programado em uma planilha do Microsoft Excel® a fim de que se predissesse a composição química do sinter produzido. O modelo baseia-se na minimização da energia livre de Gibbs global do sistema usando a equação 2 como função objetivo e variando-se o quantitativo de espécies disponíveis no sistema (n_i da equação 1). Nela, G_i^0 é a energia livre de Gibbs padrão de formação [J/kg] de cada espécie i do

sistema. T é a temperatura absoluta do sistema [K], R é a constante universal dos gases ideais [8314J/kmol.K] e N é o número total de possíveis espécies do sistema.

$$n_i = e^{n'_i} \quad (1)$$

$$n \frac{G}{RT} = \sum_{i=1}^N e^{n'_i} \frac{G_i^0}{RT} + \left\{ \sum_{i=1}^N e^{n'_i} \left[e^{n'_i} - \ln \left(\sum_{i=1}^N e^{n'_i} \right) \right] \right\}^g \quad (2)$$

O processo de sinterização começa à temperatura ambiente, passa por uma etapa de elevada temperatura na qual ocorrem calcinação e desidratação, além da formação de ferro-silicatos de cálcio (14). O processo ocorre em condições de não-equilíbrio, sendo dominado por aspectos cinéticos e de transferência de massa (15), (8). Entretanto, um cálculo de equilíbrio oferece uma composição limite do meio, logo permite a estimativa teórica de coeficientes de partição e rendimentos de reação (16). Foram realizados cálculos, portanto, da composição de equilíbrio de cada um dos casos de estudo, tomando-se a atmosfera e a temperatura de cada teste. Os resultados do modelo Excel foram confrontados com aqueles obtidos nas análises químicas e mineralógicas das amostras de sinter produzidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados, a seguir, os resultados experimentais obtidos no forno tubular resistivo e com o modelo termodinâmico de equilíbrio multicomponente adotado.

3.1 Ensaios de Alta Temperatura e Predições Termodinâmicas

As amostras resultantes do aquecimento das misturas dos casos 01 a 03 é apresentado nas fotos das figuras 2 (a) a 2 (c), respectivamente. Observou-se, macroscopicamente, aspecto bastante homogêneo e poroso para todas as amostras produzidas, sem diferença sensível em seu aspecto.

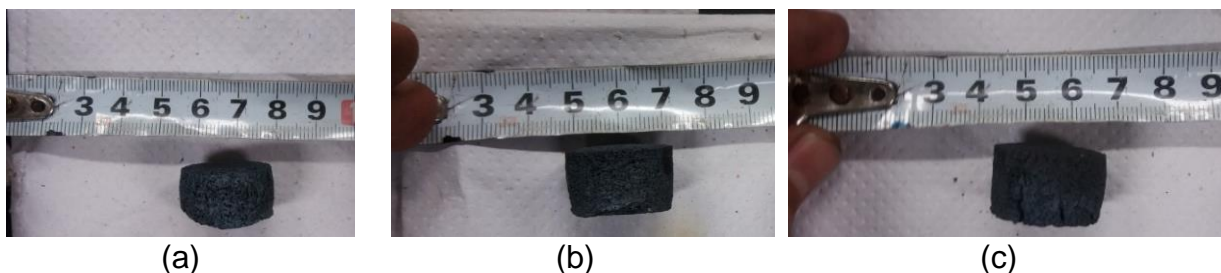


Figura 2. Amostras resultantes (a): caso 01 mistura sem resíduos (b): caso 02 mistura representativa de 100% de reciclagem de resíduos (c): caso 03 mistura representativa de prática industrial

As análises químicas das amostras produzidas nos testes de temperatura elevada são confrontadas com as predições do modelo termodinâmico de equilíbrio multicomponente na tabela 4.

Tabela 4. Resultados experimentais e predições termodinâmicas da composição química do produto dos testes (composição percentual mássica)

Parâmetro	Caso 01		Caso 02		Caso 03	
	Exp.	Teórico	Exp.	Teórico	Exp.	Teórico
FeT	57,41	56,06	58,03	56,78	57,81	56,55
SiO ₂	6,36	6,98	6,64	6,82	6,47	6,93
Al ₂ O ₃	1,93	1,12	1,82	1,12	1,94	1,13
Mn	0,07	0,00	0,12	0,00	0,09	0,00
P ₂ O ₅	0,016	0,00	0,053	0,00	0,014	0,00
CaO	11,22	12,36	11,21	12,08	11,05	12,26
Ca(OH) ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaCO ₃	<0,10	0,00	<0,10	0,00	<0,10	0,00
MgO	0,96	0,95	0,88	0,96	0,97	0,96
MgCO ₃	<0,10	0,00	<0,10	0,00	<0,10	0,00
TiO ₂	0,06	0,00	0,06	0,00	0,05	0,00
Na ₂ O	<0,10	0,00	<0,10	0,00	<0,10	0,00
K ₂ O	<0,01	0,00	<0,01	0,00	<0,01	0,00
S	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
ZnO	0,101	0,00	0,109	0,03	0,109	0,01
Cd	<0,02	0,00	<0,02	0,00	<0,02	0,00
Cr	0,0058	0,00	0,0053	0,00	0,0104	0,00
Pb	<0,02	0,00	<0,02	0,00	<0,02	0,00

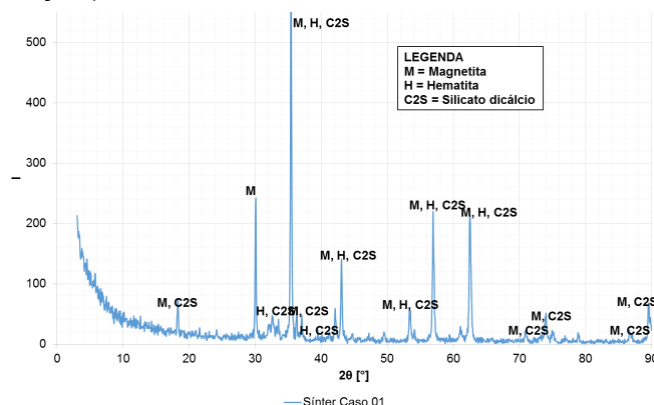
Experimentalmente, não foi observado impacto apreciável da adição de resíduos à mistura no tocante à qualidade química do sinter produzido. Inclusive, os resultados de zinco e álcalis se mantiveram no mesmo patamar da mistura sem resíduos. Os resultados de partição de elementos traço como álcalis e zinco não puderam ser diretamente comparados com as predições teóricas, pois os álcalis aferidos experimentalmente estavam abaixo do limite de detecção dos métodos quantitativos empregados, conforme observado na tabela 5. Os resultados experimentais para o zinco não seguiram a expectativa teórica, inclusive foi observado aumento do conteúdo de zinco em relação aos teores iniciais. Isso pode estar relacionado a algum componente do forno resistivo que pode ter transferido zinco às amostras. É interessante observar que, em concordância com o trabalho de (12), a predição termodinâmica é de que a maior parte do zinco se concentra no sinter produto. Os resultados previstos pelo modelo são resumidos na tabela 5. O resultado para zinco no caso 01 se explica pelo fato de que, conforme exposto na tabela 3, não era esperado que se encontrasse zinco no sistema, uma vez que a mistura a sinterizar não possuía resíduos em sua composição.

Tabela 5. Resultados de partição de elementos deletérios como álcalis e zinco

Parâmetro	Caso 01		Caso 02		Caso 03	
	Exp.	Teórico	Exp.	Teórico	Exp.	Teórico
%Na ₂ O inicial	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
%Na ₂ O final	<0,10	0,00	<0,10	0,00	<0,10	0,00
%K ₂ O inicial	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
%K ₂ O final	<0,01	0,00	<0,01	0,00	<0,01	0,00
%Zn inicial	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01
%Zn final	0,08	0,00	0,09	0,004	0,09	0,001
Fração retida de Na ₂ O no sólido (%)	*	0,00	*	0,00	*	0,00
Fração retida de K ₂ O no sólido (%)	26,35	0,00	41,91	0,00	27,87	0,00
Fração retida de Zn no sólido (%)	*	0,00	*	67,36	*	60,65

*Resultados maiores que 100% ou não quantificáveis. Para o K₂O, assumiu-se o pior caso de 0,01% no resultado experimental

No tocante às espécies ferrosas, as observações dos difratogramas de raios-X apresentaram boa concordância com as previsões do modelo termodinâmico, conforme apresentado na figura 3 e na tabela 6. Observa-se a presença majoritária de magnetita, havendo também hematita e silicato dicálcico. Vale observar que diagramas de oxi-redução indicam que, para o nível de temperatura testado nos três casos e uma atmosfera de 1% CO, 24% CO₂ e 75% N₂, tem-se o campo de estabilidade da magnetita (17). No processo industrial de sinterização, a magnetita se forma em temperaturas elevadas e se tem certo grau de re-oxidação da magnetita a hematita durante o resfriamento do sinter, que se dá em ambiente oxidante (14). Entretanto, conforme previamente mencionado, o forno foi inertizado com nitrogênio por 2min com a amostra na zona de resfriamento, onde as temperaturas caem rapidamente para níveis inferiores a 600°C. Dessa forma, o primeiro resfriamento foi feito em atmosfera inerte e, durante o resfriamento com ar, as temperaturas já eram relativamente baixas para que ocorresse re-oxidação da magnetita. Portanto, as fases encontradas nesses experimentos se referem apenas ao estágio de máxima temperatura atingida pela mistura, antes da etapa de resfriamento (re-oxidação).



(a)

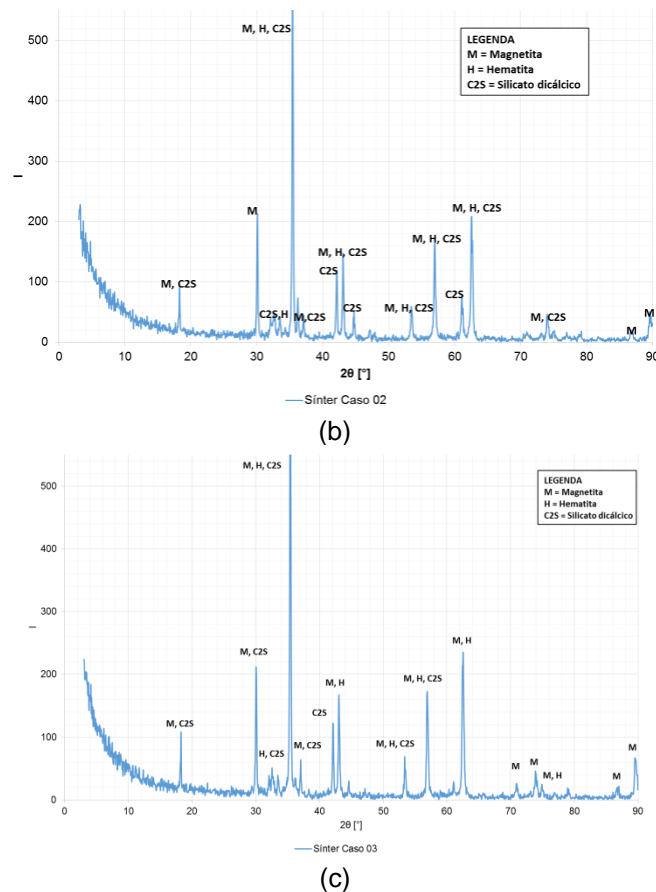


Figura 3. Resultados de DRX para as amostras de sínter produzidas (a): caso 01, (b): caso 02 e (c): caso 03

Tabela 6. Previsão termodinâmica de fases mineralógicas majoritárias (composição percentual mássica)

Espécies	Caso 01	Caso 02	Caso 03
Fe-γ	0,00	0,06	0,06
Fe ₂ O ₃	33,66	15,53	15,53
FeO	0,00	0,38	0,38
SiO ₂ - quartzo - β	0,36	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	1,12	0,53	0,53
MgO	0,95	0,95	0,95
ZnO	0,00	0,01	0,01
ZnFe ₂ O ₄	0,00	0,07	0,07
Al ₂ O ₃ .SiO ₂ - andalusita	0,00	0,94	0,94
2CaO.SiO ₂ - β	18,94	18,52	18,52
Fe ₃ O ₄	44,82	62,82	62,82

4 CONCLUSÃO

O presente estudo é parte de um projeto maior que visa à identificação do potencial de reciclagem de resíduos siderúrgicos no processo de sinterização. Nesse estudo, o comportamento químico e mineralógico em altas temperaturas de misturas de sinterização contendo resíduos foi investigado experimentalmente e com um modelo termodinâmico de equilíbrio multicomponente. Foi identificado que resíduos

siderúrgicos como carepa de laminação, pó de aciaria da lavagem a seco, lama fina de aciaria, lama de alto-forno, pó de coletor de alto-forno possuem teores de ferro e carbono de interesse para o processo de sinterização. Do ponto de vista da qualidade química do sinter, o uso de resíduos na proporção de 2,6 a 4,9% em massa da mistura a sinterizar não apresentou diferença sensível em relação a uma mistura sem resíduos. O nível de álcalis e zinco, prejudiciais à operação do alto-forno, não demonstrou alteração em relação a uma mistura sem resíduos. Houve discrepância entre a predição termodinâmica de um modelo de equilíbrio multicomponente por minimização de energia livre de Gibbs e os resultados experimentais do conteúdo de elementos deletérios do sinter, como álcalis e zinco. A partição do ferro teve boa concordância entre os resultados de DRX e as predições do modelo termodinâmico, observando-se essencialmente magnetita nas amostras produzidas em temperaturas elevadas, o que era esperado, segundo a literatura consultada. Em desenvolvimentos futuros será avaliado o processo de resfriamento das amostras, de modo a simular a etapa de resfriamento do sinter em atmosfera oxidante. Será avaliada também a permeabilidade a frio das misturas em um permeâmetro, a fim de que se determine o impacto do uso de resíduos sobre a permeabilidade da mistura a sinterizar, parâmetro de correlação direta com a produtividade da máquina de sinterização.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo estímulo e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 CARVALHO RLN. As novas fronteiras da exploração mineral: os desafios na comercialização de minérios antes tratados como estéreis. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- 2 PEREIRA SAC. O Mercado de Minério de Ferro. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- 3 HIGUCHI K, ORIMOTO T, KOIZUMI F, FURUTA H, TAKAMOTO Y, T. S, et al. Quality Improvement of Sintered Ore in Relation to Blast Furnace Operation. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation; 2006.
- 4 REMUS R, MONSONET MAA, ROUDIER S, SANCHO LD. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Luxemburgo: European Commission; 2010. Report No.: ISBN 978-92-79-26475-7.
- 5 TAKANO C, CAPOCCHI JDT, NASCIMENTO RC, MOURÃO MB, LENZ G, SANTOS DM. A Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos Sólidos. In Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais; 2000; São Paulo.
- 6 CLOUT JMF, MANUEL JR. Fundamental investigations of differences in bonding mechanisms in iron ore sinter formed from magnetite concentrates and hematite ores. Powder Technology. 2003: p. 393 - 399.
- 7 HSIEH LH, WHITEMAN JA. Sintering Conditions for Simulating the Formation of Mineral Phases in Industrial Ore Sinter. ISIJ International. 1989; 29(1): p. 24 - 32.
- 8 WARE N, MANUEL J. Fundamental nucleus assimilation behaviour of haematite and goethite containing ores in iron ore sintering. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2016: p. 149 - 155.
- 9 ENGLUND DJ. Development of a Bed Permeability Test for Iron Ore Sintering. Duluth: Natural Resources Research Institute - University of Minnesota Duluth; 2012.

- 10 LWAMBA E, GARBERS-CRAIG AM. Control of the grain size distribution of the raw material mixture in the production of iron sinter. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2008 Maio; 108: p. 293 - 300.
- 11 TELLES VB. Reciclagem da Poeira de Aciaria Elétrica na Sinterização de Minério de Ferro Visando à Eliminação de Zinco. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2010.
- 12 BESTA P, JANOVSKA K, HAVERLAND J. Negative elements in blast furnace process. Metal. 2012; 52: p. 23-25.
- 13 SILVA AL, HECK NC. A Procedure to Compute Equilibrium Concentrations in Multicomponent Systems by Gibbs Energy Minimization on Spreadsheets. In CONAMET/SAM; 2008; Santiago de Chile.
- 14 LOPES MV. Caracterização de Sínter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2012.
- 15 VENKATARAMA R, GUPTA SS, KAPUR PC, RAMACHANDRAN N. Mathematical modelling and simulation of the iron ore sintering process. Tata Search. 1998: p. 25-30.
- 16 FOGLER HS. Elementos de Engenharia das Reações Químicas. 3rd ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; 2002.
- 17 LÚCIO A. Físico-química metalúrgica - Segunda Parte Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica; 1981.