

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES METALÚRGICAS DE MINÉRIOS DE FERRO APÓS SECAGEM PARA USO EM ALTOS-FORNOS*

Adilson Souza Lopes¹
Luiz Fernando Andrade de Castro²

Resumo

Os minérios de ferro empregados nos altos-fornos possuem propriedades distintas que são influenciadas por diferentes aspectos. Para se obter uma melhor performance na operação do alto-forno, é necessário o emprego de uma carga metálica com propriedades metalúrgicas adequadas. Neste trabalho foram avaliadas as influências do tempo e da temperatura de secagem de quatro amostras de diferentes minérios de ferro em suas propriedades metalúrgicas (crepitação, redutibilidade e índice de degradação sob redução). Foram definidos os seguintes parâmetros para realização dos ensaios: tempo – 4, 12 e 24 horas e temperatura – 200°C, 350°C e 500°C. Após os ensaios, as amostras foram avaliadas quanto às suas propriedades metalúrgicas. Os resultados demonstraram que o tempo e a temperatura de secagem não afetam os minérios da mesma forma, com relação às propriedades metalúrgicas.

Palavras-chave: Alto-forno; Secagem; Minério de ferro; Propriedades metalúrgicas.

CHARACTERIZATION OF METALLURGICAL PROPERTIES OF IRON ORE AFTER DRYING FOR USE IN BLAST FURNACES

Abstract

The iron ores used in blast furnaces have distinct properties that are influenced by various aspects. For a better performance in blast furnace operation, it is necessary the use of a metal load with suitable metallurgical properties. In this work we evaluated the influences of time and drying temperature of four samples of different iron ores in their metallurgical properties (crepitation, reducibility and degradation index under reduction). The following parameters have been defined for conducting the tests: time – 4, 12 and 24 hours and temperature – 200°C, 350°C and 500°C. After the tests, the samples were evaluated as to their metallurgical properties. The results showed that the drying time and temperature do not affect the ores in the same way, with respect to metallurgical properties.

Keywords: Blast furnace; Drying; Iron ore; Metallurgical properties.

¹ Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

² Professor titular do Departamento de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As características metalúrgicas dos minérios de ferro, utilizados como matérias-primas para produção de ferro-gusa em altos-fornos de pequeno porte, não são usualmente consideradas ou são pouco avaliadas para definição da composição da carga metálica. As propriedades físicas dos minérios de ferro fornecem uma indicação do comportamento desse material durante seu manuseio e descida dentro do alto-forno, enquanto as propriedades metalúrgicas definem o seu comportamento durante o processo de redução [1]. Sendo assim, maximizar o desempenho operacional do alto-forno através do emprego de minérios de ferro com características metalúrgicas adequadas, ou buscar formas de minimizar impactos dessas características na operação, pode se tornar um diferencial na busca por melhores resultados em altos-fornos de pequeno porte. Desde a sua formação, os minérios de ferro possuem características geológicas que podem distingui-los, como por exemplo: composição mineralógica, tamanho de grão, textura, estrutura cristalina, porosidade [2].

As características geológicas afetam diretamente a forma como se manifestam as características metalúrgicas nos minérios de ferro, existindo uma correlação entre estas propriedades. Varajão et al. [3] estudaram a correlação entre a porosidade de um minério e sua redutibilidade, onde observaram que a porosidade pode atingir até 30% em minérios friáveis. Para hematita compacta, os valores encontrados foram de 2% a 11%.

Alguns estudos têm sido conduzidos de forma a aumentar o conhecimento da correlação entre o comportamento dos minérios de ferro durante processo de redução e suas características, contribuindo para melhorar as formas de otimizar esses processos. Muwanguzi et al. [4] realizaram testes para caracterização de minérios de ferro quanto às propriedades químicas, microestruturais, físicas e metalúrgicas para seis tipos de minérios diferentes. Apesar de observar pouca variação na composição química destes minérios, foram avaliadas diferenças significativas em suas microestruturas.

O fenômeno da crepitação proporciona um parâmetro para quantificar o quão resistente esse minério é à geração de finos, quando esse é submetido a um aquecimento, seja durante processo de redução ou em um pré-tratamento. A utilização de mecanismos de secagem ou tratamento térmico para preparação dos minérios antes de ser utilizado nos altos-fornos já é bastante empregada nas usinas brasileiras. Estudos da utilização de dispositivos de secagem e sua influência na manifestação do fenômeno da crepitação foram conduzidos comprovando melhora na permeabilidade no interior do alto-forno e conseqüentemente, em sua produtividade [5]. Strezov et al. [6] investigaram a deterioração térmica de partículas de minérios de ferro durante o aquecimento para dois tipos de minérios, goethita e hematita. A amostra de goethita apresentou mudanças físicas pronunciadas enquanto as mudanças na amostra de hematita foram insignificantes. A maior contribuição da deterioração da partícula, foi a evolução da água produzida durante o processo de decomposição da hidroxila.

Apesar da geração de finos que apresenta uma partícula de minério quando aquecida, devido às mudanças físicas ocorridas, o início da formação de trincas auxilia no aumento do grau de redutibilidade dos minérios, pois facilita a penetração do gás redutor no interior da partícula [7].

No presente estudo, foram realizados testes de secagem de amostras de quatro tipos diferentes de minérios, variando-se a temperatura e tempo de exposição da

amostra para avaliação das alterações nas propriedades metalúrgicas. Posteriormente foram determinadas as composições mineralógicas e porosidade de cada um dos minérios para avaliação da influência nos resultados.

2 DESENVOLVIMENTO

Para realização dos ensaios de secagem foram definidos quatro tipos de minérios distintos, denominados como: Minério A, Minério B, Minério C e Minério D. Após a definição dos lotes destinados à realização dos estudos, foram realizadas amostragens das pilhas conforme NBR ISO 3082 [8] para separação de quatro amostras globais, uma para cada tipo de minério, que foram utilizadas para compor as amostras parciais necessárias para realização das etapas seguintes dos ensaios. Para cada tipo de minério, foram coletadas aproximadamente 250kg de massa para compor a amostra global. Com a utilização de um quarteador tipo Jones, foram retiradas um total de nove amostras parciais de aproximadamente 13kg cada. Além disso, uma amostra de aproximadamente 20kg para cada tipo de minério, foi separada para realização das demais análises de caracterização.

Inicialmente, para cada uma destas amostras de 20kg, foram realizadas análises para determinação da composição química, utilizando espectrômetro de emissão por plasma, marca Perkin Elmer Optima 5300 DV; composição mineralógica, utilizando microscópio óptico da marca Leica DM4P com câmera Leica MC170HD, para captura de imagens e software de imagens LAS Software versão 4.8.0; e porosidade das amostras, através da técnica de porosimetria por intrusão de Hg, utilizando um porosímetro da marca Micromeritics, modelo Auto-Pore III.

Para realização dos ensaios de secagem foram definidos três níveis de tempo e temperatura de exposição das amostras, conforme tabela 1.

Tabela 1. Níveis das variáveis de testes

Variável	Nível I	Nível II	Nível III
Tempo (h)	4	12	24
Temperatura (°C)	200	350	500

Para cada tipo de minério, foram realizados ensaios de secagem em cada nível de tempo e temperatura, em todas as combinações possíveis. Sendo assim, foram realizados um conjunto de nove ensaios de secagem para cada minério. Os ensaios de secagem foram realizados em um forno tipo mufla. Como recipiente para realização dos ensaios, foram confeccionadas duas caixas de 6x10-3 m³ cada, feitas de aço carbono 1020, com chapas de espessura de ½". Para cada amostra ensaiada, foram realizadas análises do IC-6,3mm, do IR180 e do RDI-2-2,8mm, com objetivo de avaliar o impacto da secagem nestas características.

O IC-6,3mm foi determinado conforme NBR ISO 8371 [9]. A equação 1 foi utilizada para o cálculo dos valores.

$$I_{-6,30mm} = 100 \frac{m_1^{(6,30)}}{m_2^{(6,30)}} \quad (1)$$

Os valores das variáveis m1 se referem ao material passante da peneira respectiva, após o choque térmico. Os valores de m2 se referem às massas totais utilizadas para cada ensaio.

Para determinação da redutibilidade das amostras ensaiadas, foram realizados testes conforme NBR ISO 7215 [10]. A equação 2 foi utilizada para cálculo dos valores.

$$IR_{180} = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_0(0,430w_2 - 0,111w_1)} \right] \times 10^4 \quad (2)$$

Os valores de m_0 , m_1 e m_2 são respectivamente: a massa da porção do ensaio, a massa da porção do ensaio imediatamente antes do início da redução e a massa da porção do ensaio após 180 minutos de redução. Os valores de w_1 e w_2 são respectivamente: o teor de óxido de ferro da porção do ensaio antes do ensaio e o teor de ferro total da porção do ensaio antes do ensaio.

Para o cálculo do índice de desintegração estática das amostras, foram realizados ensaios conforme NBR ISO 4696-2 [11]. A equação 3 foi utilizada para cálculo dos valores.

$$RDI - 2_{-2,8mm} = 100 - \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

Os valores de m_0 e m_1 , são respectivamente: a massa da porção de ensaio após a redução e antes do tamboramento e a massa da fração retida na peneira de 2,8mm. Para interpretação dos resultados obtidos nos testes de secagem, foi elaborado um experimento fatorial completo para análise dos efeitos dos fatores tempo e temperatura, em três níveis cada, nas variáveis respostas: IC -6,3mm, IR180 e RDI-2 -2,8mm. Os dados obtidos foram analisados através da utilização do software Minitab versão 16.0, onde foram empregadas análises de variância das médias, a um nível de confiança de 95% [12].

Para realização dos testes estatísticos foram formuladas, duas hipóteses:

H0: média das variáveis respostas (IC -6,3mm, R180 e RDI-2 -2,8mm) são iguais

H1: média das variáveis respostas (IC -6,3mm, R180 e RDI-2 -2,8mm) são diferentes

Caso a hipótese nula H0 seja comprovada como verdadeira, assumimos que os fatores tempo e temperatura não exercem influência nas variáveis respostas. Porém, caso a hipótese nula seja rejeitada, podemos considerar a hipótese alternativa H1 como aceitável, comprovando que os fatores tempo e temperatura exercem influência sobre as variáveis respostas.

Os resultados obtidos, foram divididos em duas partes para facilitar a interpretação dos dados. Inicialmente são apresentados os resultados referente à caracterização inicial das quatro amostras dos minérios. Por último, os resultados com relação aos testes de secagem.

2.1 Caracterização inicial das amostras

As caracterizações iniciais dos minérios mostraram a diferença existente entre os mesmos. A tabela 2 mostra os resultados para composição química das quatro amostras de minério.

Tabela 2. Composição química das amostras de minérios expressas em percentual de massa

	Minério A	Minério B	Minério C	Minério D
FeT	60.47	66.44	57.67	61.81
SiO ₂	6.20	1.01	15.46	5.31
Al ₂ O ₃	1.92	1.63	1.14	3.24
MnT	0.08	0.17	0.04	0.34
P	0.06	0.05	0.05	0.05
CaO	0.11	0.39	0.16	0.14
MgO	0.09	0.10	0.07	0.06
FeO	0.88	0.75	0.73	4.23
TiO ₂	0.05	0.07	0.05	0.29
PPC	5.13	1.82	1.04	2.13

Quimicamente, os quatro minérios se apresentaram de forma bastante distintas. O minério A, apresentou um valor mais elevado de PPC que os demais. O minério B apresentou % de Fe mais elevado. O minério C apresentou % de SiO₂ bem elevado. O minério D apresentou % de Al₂O₃ bem acima dos demais.

As composições mineralógicas encontradas, também apresentaram diferenças entre os minérios. A figura 1 mostra algumas fotomicrografias encontradas nas análises.

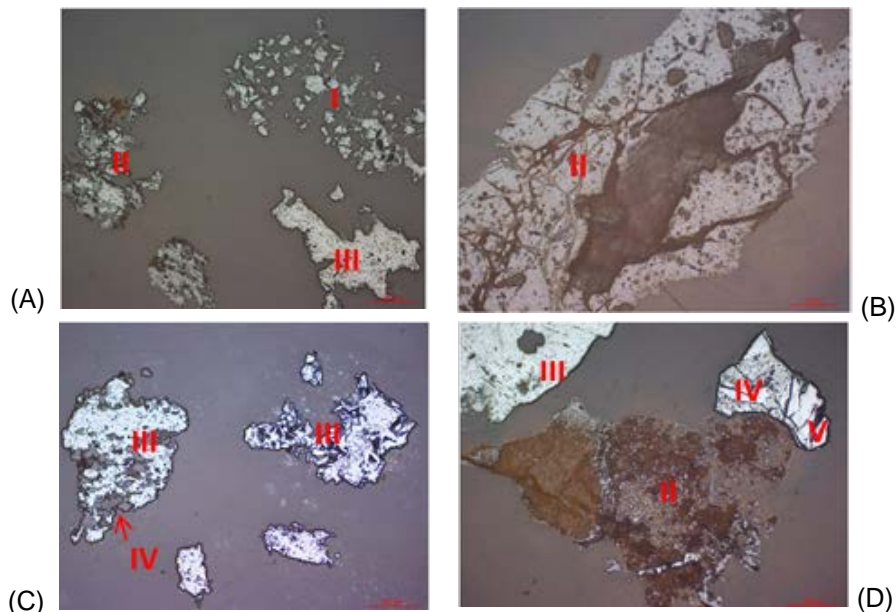


Figura 1. Fotomicrografia dos minérios A, B, C e D respectivamente. Componentes mineralógicos encontrados estão identificados conforme legenda: I – Martita; II – Goethita terrosa; III – Hematita lobular; IV – Quartzo misto; V – Magnetita; VI – Hematita martítica.

A composição mineralógica encontrada para cada tipo de minério, está apresentada na figura 2. A denominação do tipo mineralógico de cada minério foi realizada a partir dos valores encontrados de forma significativa, ou seja, valores percentuais > 9,0%. O minério A apresentou predominantemente em sua composição 40% de hematita martítica e 33% de goethita terrosa, podendo ser classificado como minério martítico-goethítico com hematita. O minério B, apresentou 75% de hematita tabular, podendo ser denominado como minério hematítico. O minério C, apresentou 60% de hematita lobular, 12% de hematita especular e 11% de quartzo, podendo ser classificado como minério hematítico-quartzítico. O minério D, apresentou 34% de

hematita lobular, 29% de hematita martítica, 18% de magnetita e 10% de goethita terrosa, podendo ser classificado como minério hematítico-martítico-magnetítico-goethítico. O minério D foi o que apresentou composição mais heterogênea entre as amostras.

Os resultados obtidos de porosidade são apresentados na tabela 3. Nota-se que o minério A apresentou porosidade mais elevada que as demais amostras, que está associado à maior presença de goethita terrosa em sua composição. Os minérios B e D, apresentaram os menores valores de porosidade, que está associado à presença predominante de hematita no caso do minério B, e à presença da magnetita, no caso do minério D.

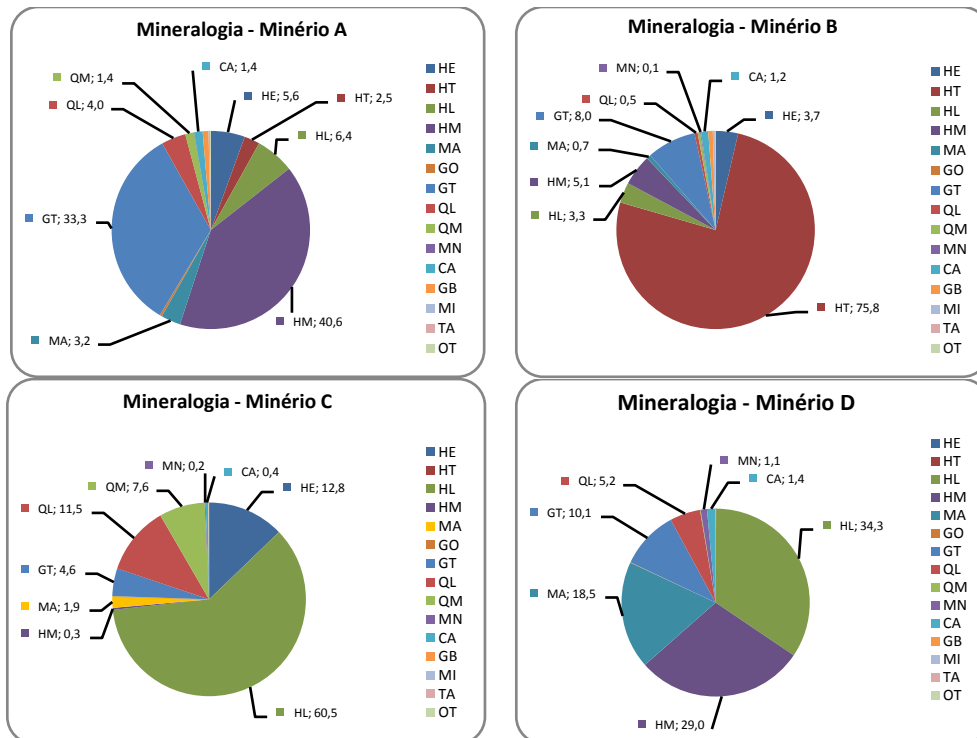


Figura 2. Composição mineralógica encontrada para os minérios A, B, C e D. Legenda: HE – Hematita especular; HT – Hematita tabular; HL – Hematita lobular; HM – Hematita martítica; MA – Magnetita; GO – Goethita; GT – Goethita terrosa; QL – Quartzo livre; QM – Quartzo misto; MN – Manganês; CA – Caulinita; GB – Gipsita; MI – Mica; TA – Talco; OT – Outros.

Tabela 3. Resultados de porosidade por intrusão de mercúrio

Minério	Porosidade (%)
A	32,86
B	21,89
C	26,82
D	22,81

2.2 Testes de secagem das amostras

As figuras 3, 4 e 5 apresentam os resultados obtidos de IC-6,3mm, IR180 e RDI-2-2,8mm, respectivamente, após a realização dos testes de secagem das amostras.

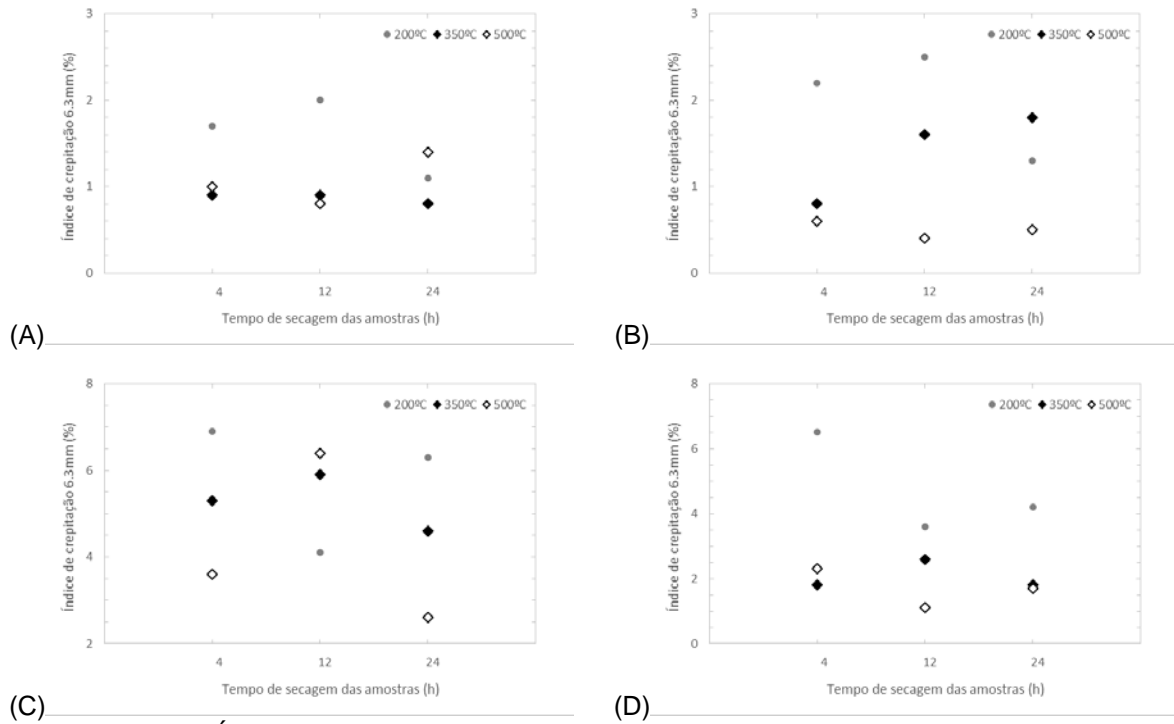


Figura 3. Índice de crepitação (IC_{6,3mm}) para as amostras dos minérios A, B, C e D.

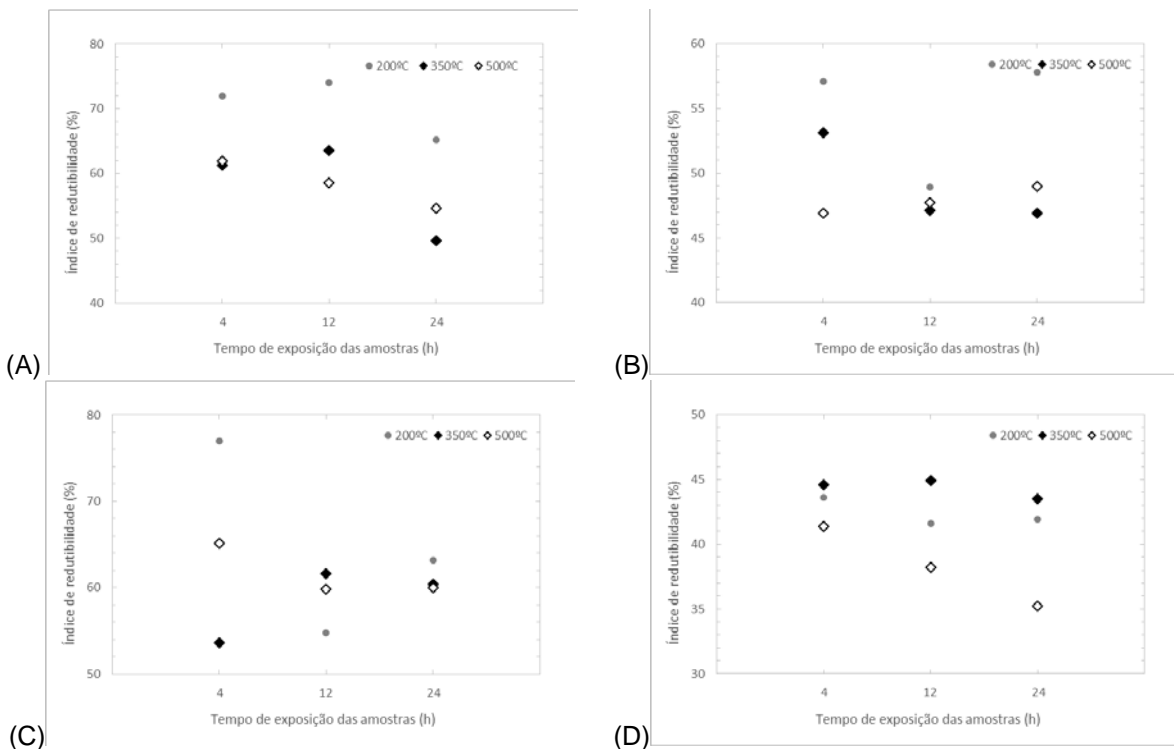


Figura 4. Índice de redutibilidade (IR₁₈₀) para as amostras dos minérios A, B, C e D.

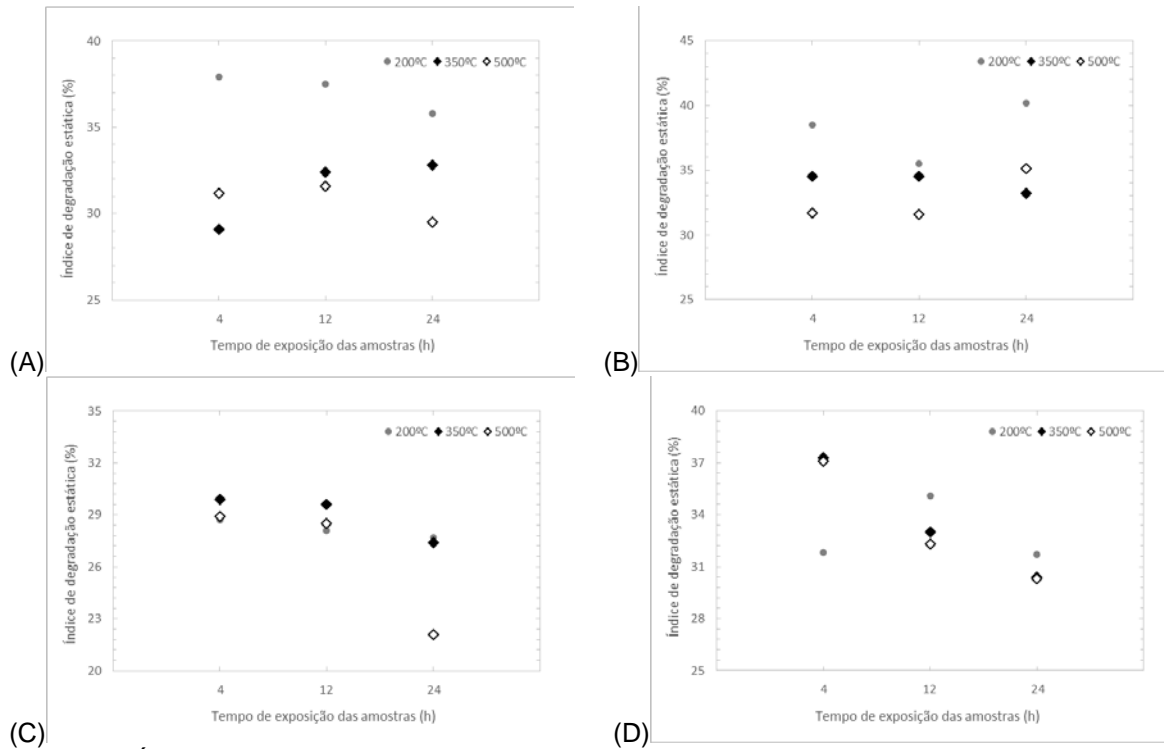


Figura 5. Índice de degradação estática (RDI-2-2,8mm) para as amostras dos minérios A, B, C e D.

Para o minério A, os testes indicaram que o índice de crepitação não é afetado de forma significativa pelos parâmetros de secagem. Foi observado que tanto o tempo quanto a temperatura de secagem, afetam de forma significativa a redutibilidade, de forma a reduzir esse parâmetro à medida que se elevam os tempos e as temperaturas de secagem. Para o índice de degradação sob redução, foi observado que somente a temperatura o afeta de forma significativa, sendo que à medida que elevamos as temperaturas de secagem, diminuimos a degradação sob redução.

Para o minério B, os testes indicaram que tanto o índice de crepitação, quanto o índice de degradação sob redução foram afetadas de forma significativa pela temperatura de secagem, sendo que à medida que se eleva a temperatura de secagem, os dois parâmetros são reduzidos. A redutibilidade não foi afetada de forma significativa.

Para o minério C, os testes indicaram que os parâmetros de secagem não afetam as propriedades do minério de forma significativa.

Para o minério D, os testes indicaram que tanto o índice de crepitação quanto a redutibilidade foram afetadas de forma significativa pela temperatura de secagem, sendo que à medida que se eleva a temperatura de secagem, os dois parâmetros são reduzidos. A degradação sob redução não foi afetada de forma significativa.

3 CONCLUSÃO

A partir do trabalho realizado, pôde-se concluir que os fatores de secagem (tempo e temperatura), afetaram as amostras dos minérios de formas diferentes.

Para o minério A os testes indicaram que o fator tempo afeta de forma significativa a variável IR180, sendo que, quanto maior o tempo de exposição à secagem, menor o valor obtido de IR180. Já a temperatura afeta as variáveis IR180 e RDI-2-2,8mm, sendo que, quanto maior os valores de temperatura de secagem, menores serão os valores de IR180 e RDI-2-2,8mm encontrados. Os valores elevados de PPC, % de goethita na composição e porosidade, contribuem para maior sensibilidade do minério A aos testes de secagem.

Para o minério B os testes indicaram que somente o fator temperatura afeta de forma significativa as variáveis IC-6,3mm e RDI-2-2,8mm. Podemos observar que maiores temperaturas, obtemos menores valores de IC-6,3mm e RDI-2-2,8mm. O valor elevado de % de hematita na sua composição associado a baixa porosidade, explica a maior sensibilidade deste minério às variações de temperatura.

Para o minério C, não foram obtidos nos ensaios resultados significativos entre os fatores de secagem e as variáveis. Este fato pode estar relacionado à maior presença de quartzo em sua composição mineralógica.

Para o minério D os testes indicaram que somente o fator temperatura afeta de forma significativa as variáveis IC-6,3mm e IR180, sendo que maiores valores de temperatura levam à menores valores de IC-6,3mm e IR180. Assim como no minério A, a presença de goethita terrosa, afetou diretamente a influência que o fator temperatura apresentou sobre o IR180. De forma semelhante ao minério B, a presença de hematita associada a baixa porosidade, levaram esta amostra a apresentar maior sensibilidade à temperatura com relação à propriedade IC-6,3mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Gerdau e também ao PROEX CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro ao PPGEM.

REFERÊNCIAS

- [1] Neto, A.N.S. et al. Entendendo a especificação de minério de ferro para Alto-Forno. In: Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 3, 2001, Ouro Preto, MG. Anais III Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p.113-123.
- [2] SANTOS, W.K. Rotas de processo para concentração de minérios itabiríticos e hematíticos da mina de fábrica. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2009. 155p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas).
- [3] VARAJÃO, C.A.C et. al. Microporosity of BIF hosted massive hematite ore, Iron quadrangle, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, vol.74, n.1, p.113-126, set. 2002.
- [4] MUWANGUZI, A.J.B. et al. Characterisation of physical and metallurgical properties of natural iron ore for iron production; International Scholarly Research Network, vol.2012, p1-9, jun. 2012.
- [5] NEVES, L.; TEIXEIRA, R.L.P.; GOUVEIA, L.L.A. Estudo do reaproveitamento do gás de topo de Alto-Forno a carvão vegetal para redução do fenômeno de crepitação em granulados de minério de ferro; Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 12, n. 1, p.77-81, jan/mar 2015.
- [6] STREZOV, V. et al. Structural deterioration of iron ore particles during thermal processing; International Journal of Mineral Processing, vol.100, n. 1, p.27-32, abr. 2011.

- [7] MUWANGUZI, A.J.B. et al. Effect of different factors on low temperature degradation on hematite iron ore during reduction; Metallurgical Research and Technology, vol.111, n.1, p57-66, mar. 2014.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT NBR ISO 3082:2011, Minérios de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostra. Rio de Janeiro, 2011, 91p.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT NBR ISO 8371:2007, Minérios de ferro como insumo para alto-forno – Determinação do índice de crepitação. Rio de Janeiro, 2007, 5p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT NBR ISO 7215:2009, Minérios de ferro como insumo para alto-forno – Determinação da redutibilidade pelo índice de grau de redução final. Rio de Janeiro, 2009, 11p.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT NBR ISO 4696-2:2008, Minérios de ferro como insumo para alto-forno – Determinação dos índices de desintegração sob redução a baixa temperatura pelo método estático. Parte 2: Redução com CO e N₂. Rio de Janeiro, 2008, 10p.
- [12] MONTEGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Edição 5ª. Editora: LTC; 2012.