

ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS QUE AFETAM O PROCESSO DE AUTO-REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO*

Cyro Takano¹
Marcelo Breda Mourao²
José Adilson de Castro³

Resumo

A degradação durante o processo de redução de minérios de ferro é bastante conhecida pelos fenômenos de crepitação e inchamento. Em aglomerados a frio, auto-redutores utilizando cimento como aglomerante, há também degradação pela decomposição de hidratos que conferem resistência a frio, além de aumentar os vazios deixados pelo consumo do redutor. Outro fenômeno que afeta na velocidade da reação de redução é a formação de escória. Esses aspectos são analisados neste trabalho e principalmente em processos de auto-redução.

Palavras-chave: Auto-redução; Inchamento, Degradação

PHENOMENOLOGICAL ASPECTS AFFECTING SELF-REDUCING PROCESS OF THE IRON ORE AGGLOMERATES

Abstract

The degradation during the reduction of iron ores is well known by the phenomena of decrepitation and swelling. In cold bonded self-reducing agglomerates using cement as binder, there is also the degradation due to decomposition of hydrates. These hydrates are that confer strength to cold bonded agglomerates. During reduction carbon particles are consumed and contributes to increase the voids. Another phenomenon that affects the speed of reduction reaction is the formation of dross. These aspects are examined in this paper and especially in self-reduction processes.

Keywords: Self-reducing; Swelling; Degradation.

¹ Eng. Metalurgista, MSc e Livre-Docente, Prof. Sênior, Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil,

² Eng. Metalurgista, Mestre, Doutor e Livre-Docente, Prof. Associado, Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil,

³ Eng. Metalurgista, Mestre, PhD, Prof. Associado, Depto. De Eng. Mecânica da EEIVR, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Pelotas tradicionais de minérios de ferro para produção de ferro primário e ferro esponja são aglomeradas com 0,7% de bentonita sódica e são sinterizadas a altas temperaturas, em atmosferas oxidantes, a aproximadamente 1300°C. A Figura 1 mostra a evolução da resistência mecânica durante o processo de queima (sinterização em condições oxidantes). Pelotas verdes com 19N/pelota praticamente dobra de resistência após a secagem e abaixa a 20N/pelota, a 300oC[1]. Após esta temperatura a resistência aumenta gradativamente pelos efeitos da bentonita e da oxidação da magnetita. A resistência à compressão após a queima deve ser maior que 1500 (normalmente 2500) N/pelota, pelos mecanismos de sinterização (formação incipiente de fase líquida, dissolução de certos óxidos, recristalização) para atingir as especificações (ISO 4700).

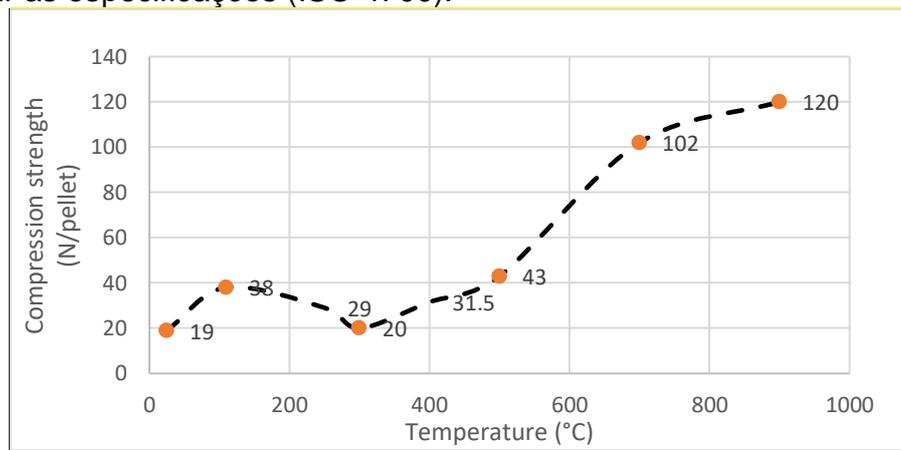


Figura 1. Evolução da resistência à compressão de pelotas convencionais de minério de ferro magnetítico com 0,67% de bentonita[1]

Pelotas convencionais mantêm boa resistência durante o aquecimento até o início da redução. Um comportamento bem didático está mostrado na Figura 2. Os autores[2] utilizaram pelotas queimadas de minério hematítico contendo 91% de Fe_2O_3 e elas foram reduzidas à temperatura de 1000°C e com: CO puro; 50%CO+50%H₂; e H₂ puro.

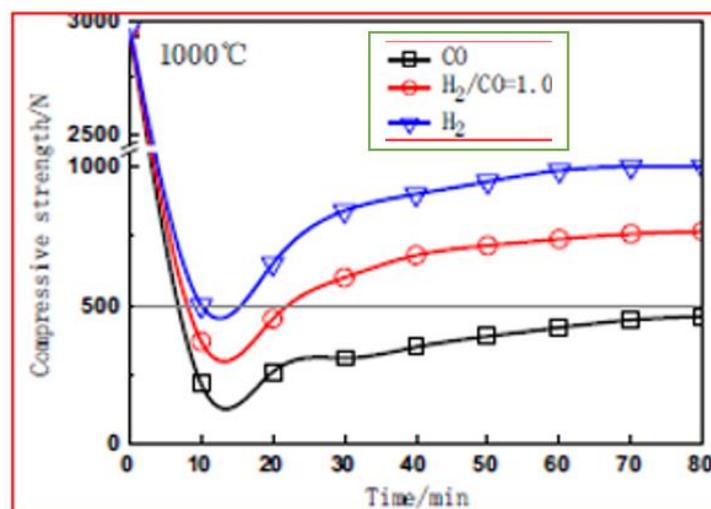


Figura 2. Resistência à compressão de pelotas de hematita (91% Fe_2O_3) com a redução[2]

ObsERVE que a resistência inicial maior que 2500N/pelota, cai bruscamente nos primeiros 10 a 12 minutos de redução. A queda mais intensa foi pela redução com 100%CO, cuja resistência à compressão caiu para 100N/pelota. Os resultados do grau de redução com o tempo, indicaram que os mínimos correspondem a um grau de redução entre 20 a 40%, cujo valor médio de 30% corresponde, teoricamente, à redução de hematita para wustita ("FeO") no minério. Difratoograma mostrou também que para a menor resistência, por redução por CO, indicou presença de 88% de "FeO" e 12% de Fe(2). A Figura 3 (2) mostra também as correlações entre grau de redução e índice de inchamento máximo para diversas temperaturas de redução em atmosfera de CO, 50%CO+50%H₂; e H₂ puro. Confirma portanto que um dos principais fenômenos associados ao inchamento, dito normal, é a transformação de fase de uma estrutura mais compacta da hematita (trigonal-hexagonal escalonoedral) [3] para uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) da wustita, podendo chegar à expansão volumétrica de mais de 25%. Os resultados na Figura 3 mostram também que às temperaturas maiores os índices de inchamento foram maiores, isto é, quanto mais rapidamente forma o "FeO" maior é o índice de inchamento. O aparente comportamento não coerente com os resultados mostrados na Figura 2, onde a redução por H₂, apesar de apresentar uma velocidade maior de redução, apresentou uma resistência mínima 4,5 vezes maior que a reduzida por CO, é explicado pela redução mais rápida também para Fe, na periferia da pelota, mesmo antes de toda transformação da magnetita para "FeO" na parte mais interna.

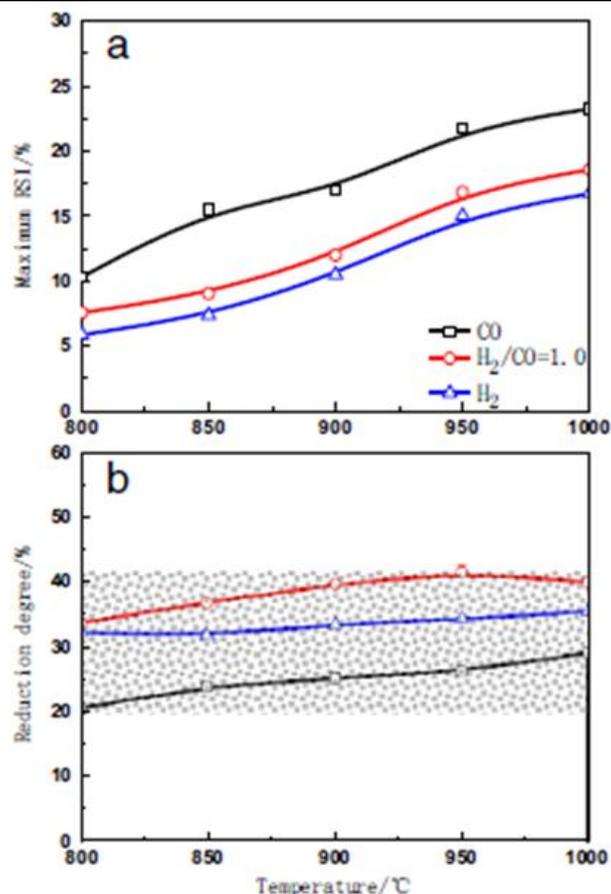


Figura 3. Correlações entre índice de inchamento máximo e o grau de redução para temperaturas de 800 a 1000°C e redução por CO puro, 50%CO+50%H₂; e H₂ puro[2].

O inchamento durante a redução é o fenômeno que mais afeta na degradação da resistência de pelotas de minérios de ferro. Este inchamento depende da mineralogia, da porosidade, teores e composição da ganga, da natureza dos redutores e suas composições, da cinética de redução, do teor de óxido de cálcio, da resistência antes da redução, entre outros.

Assim, minério hematítico apresenta maior inchamento por redução do que o minério magnetítico [4]. Experiências realizadas, pelos mesmos autores (4), com hematita pura (grau químico) mostrou um inchamento catastrófico, com índice de inchamento maior que 45%, para redução com CO a 950°C, provocando degradação quase completa do briquete.

A Figura 4 mostra que na redução da pelota de minério hematítico ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 6.86\%$ and $\text{MgO} + \text{CaO} = 1.17\%$) (2), após atingir o inchamento máximo, com grau de redução entre 20 a 40%, o índice de inchamento com a evolução da redução manteve-se praticamente constante ou até houve contração para temperaturas maiores 900°C. Este resultado está indicando que neste minério o mecanismo de inchamento por crescimento de “whiskers” de Fe não foi atuante.

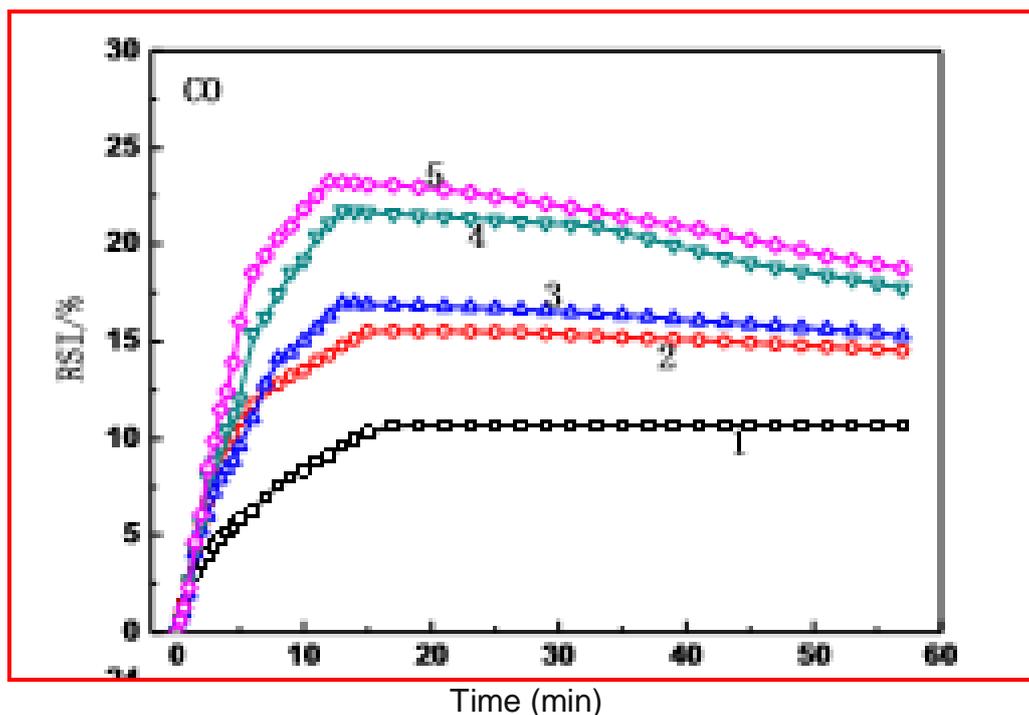


Figura 4. Índice de inchamento das pelotas sinterizadas de minério de ferro hematítico, reduzidas por CO, a temperaturas de: 1-800; 2-850; 3-900; 4-950; e 5-1000°C(2).

2. ANÁLISE DOS FENÔMENOS DE INCHAMENTO/REDUÇÃO E FORMAÇÃO DE FASE LÍQUIDA NOS PROCESSOS DE AUTO-REDUÇÃO

Nos processos de auto-redução os aglomerados (compósitos minério-carbono) necessitam conseguir resistência mecânica suficiente para o processo de redução e duas são as variantes que se destacam: a tradicional é com a utilização de cimento ou equivalente, como aglomerante que endurece com “cura a frio”; e a outra variante

é a denominada “binderless”, isto é o próprio carvão age para conferir resistência ao aglomerado.

2.1 Aglomerados auto-redutores com cimento

Nos aglomerados auto-redutores de minérios de ferro, com cimento, a quantidade de redutor carbonáceo, para redução completa, é de 15 a 18% e até 10% de cimento Portland. Deve-se considerar que a adição de cimento eleva a quantidade de escória prejudicando parcialmente os benefícios decorrentes da alta velocidade de redução. O mecanismo de endurecimento é semelhante ao de concreto onde os componentes do cimento reagem com a água hidratando e formando um gel que envolve as partículas. Após a cura normal, de até 28 dias, consegue-se boa resistência mecânica a frio.

Comparativamente às pelotas sinterizadas convencionais, as pelotas auto-redutoras são mais susceptíveis de se degradarem pelo fenômeno de inchamento durante a redução. Os principais fatores serão analisados a seguir.

2.1.1. Efeito do redutor carbono contido na pelota.

O teor de 15 a 18% de carbono contido na pelota afeta em diversos aspectos na resistência mecânica da mesma: i) o carvão/coque é hidrofóbico, e portanto é mais difícil de obter uma boa resistência a verde; ii) convertendo o teor (% em peso) em porcentagem volumétrica chega-se, dependendo da natureza do redutor e da densidade, a até 40% em volume da pelota e conseqüentemente com o consumo deste durante a redução aumenta-se os vazios; iii) a porosidade após a cura, antes da redução, é alta chegando a mais de 50% (Tabela I) [5]; iv) o cimento contém cerca de 60% de CaO. A Tabela 1 mostra as resistências e porosidades das pelotas de um minério hematítico específico (baixo teor de ganga: $Al_2O_3+SiO_2+Na_2O+K_2O+CaO=4,4\%$) (5) e com teores de coque de petróleo de alta pureza para 100% (P-100) e 50% (P-50) de redução. A porosidade das pelotas auto-redutoras curadas é bem maior que as pelotas convencionais. A Figura 5 [5] mostra as resistências das mesmas pelotas medidas após os ensaios de redução, mantidas durante 30 minutos nas respectivas temperaturas. Esta figura mostra que praticamente a resistência após a cura é mantida até aproximadamente 400-500°C e partir daí a resistência cai e com maior intensidade após 700°C, com a evolução da reação de redução.

Tabela 1 Porosidade e resistência à compressão de pelota auto-redutora produzida em laboratório, com minério de ferro hematítico de baixo teor de ganga aglomerada com coque de petróleo de alta pureza (P-100, contendo coque para 100% de redução e P-50 para 50% de redução) [5]

	Pelota convencional sinterizada (referência)	Pelota auto-redutora curada (P-100) [5]	Pelota auto-redutora curada (P-50) [5]
Porosidade (%)	>18	52	45
Resistência (N/pelota)	>1500	60 a 85(*)	100-125

(*) resistência maior que 300N pode ser atingida dependendo do minério e do teor e composição da ganga.

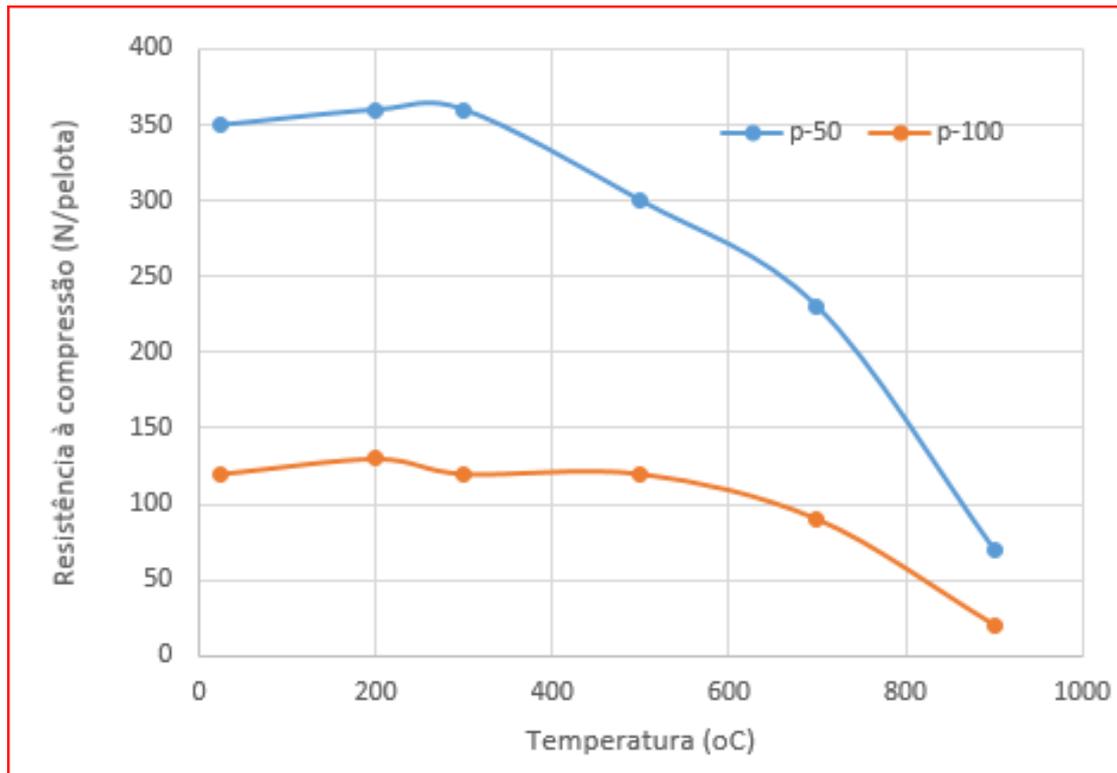


Figura 5. Resistência das pelotas auto-redutoras com minério de ferro hematítico, de baixo teor de ganga, aglomerada com coque de petróleo de alta pureza (P-100, contendo coque para 100% de redução e P-50 para 50% de redução) após ensaios de redução, mantidas às temperaturas durante 30 minutos, em atmosfera de nitrogênio [5].

2.1.2. Efeito da Resistencia antes da redução

A Figura 6 [6] mostra resultados da resistência à compressão depois de submetidas às temperaturas de redução, em atmosfera de nitrogênio, de pelotas auto-redutoras, com coque siderúrgico, de poeira de sinterização com alto teor de “ganga” (P1) e de minério hematítico (P2), aglomeradas com cimento Portland. As resistências à compressão com tempos de cura de 28 dias foram 180N/pelota para minério hematítico e 460N/pelota para poeira de sinterização. Após redução delas a 950°C, as resistências caíram para praticamente 10% das resistências originais. A pelota P1 com tempo de cura longo atingiu 940N e, após a redução a 950°C, houve queda de resistência também para aproximadamente 10% da inicial. Há indicação de que quanto maior a resistência da pelota aglomerada com cimento, curada a frio, maior é a sua resistência após a redução, a temperatura crítica de 950°C.

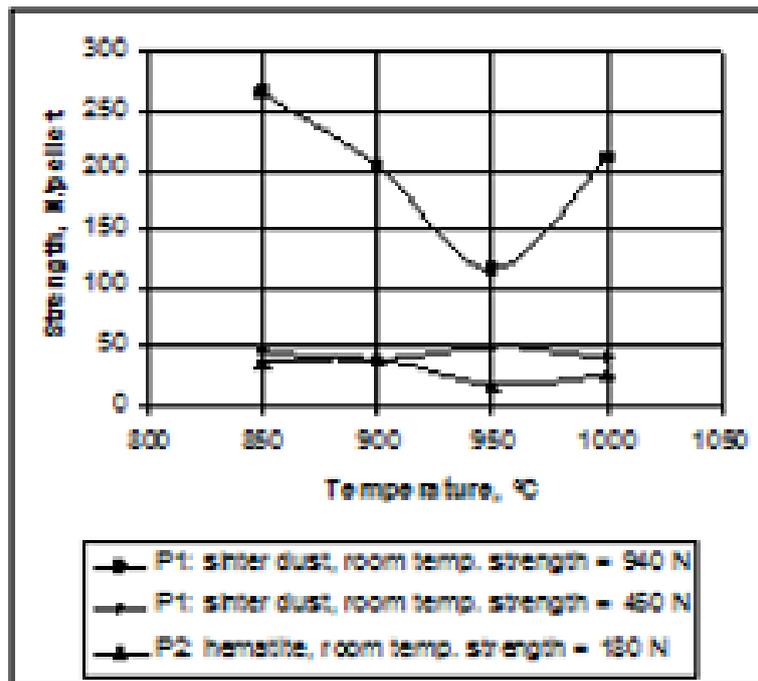


Figura 6..Resistência à compressão de algumas pelotas auto-redutoras com resistências iniciais diferentes submetidas às temperaturas de redução., visando redução completa de ferro[6].

2.1.3. Efeito do teor e natureza da ganga.

Minérios com alto teor de ganga reduzem também a quantidade de redutor nas pelotas e isso contribui para melhorar a sua resistência mecânica (Figura 5). Além disso dependendo da natureza da ganga pode também auxiliar na hidratação e ainda com formação de FeO durante a redução podem formar sítios líquidos que se consolidam diminuindo o inchamento pelo mecanismo com formação de “whiskers”. Observe na Figura 6 os comportamentos das pelotas P1 (com poeira de sinterização) e P2 (com minério hematítico), com resistência após a cura de 28 dias, de 450N/pelota e 180N/pelota, respectivamente. Pelotas auto-redutoras de poeiras de sinterização de minério de ferro não apresentaram inchamento, possivelmente pelo teor elevado de “ganga”. Este mesmo comportamento tem-se verificado nas pelotas com poeira de aciaria elétrica.

2.1.3. Efeito da natureza do redutor e presença de cal.

A Figura 7 [6] mostra o comportamento de inchamento de pelotas auto-redutoras aglomeradas a frio com cimento e reduzidas em atmosfera de nitrogênio, à 950°C. Nota-se nesta figura que na faixa de até 30% de redução o inchamento não ultrapassou 20% (inchamento normal), para nenhuma das 3 composições. Indica, portanto, que a variação volumétrica pela transformação de fase foi acomodada provavelmente pela porosidade maior em pelotas auto-redutoras comparadas às pelotas sinterizadas, principalmente nas pelotas com coque. O inchamento catastrófico (acima de 30%) só ocorreu pelo mecanismo de crescimento de “whiskers” (ferro filamentar) e foram intensas com a utilização de carvão vegetal e incrementadas com adição de cal.

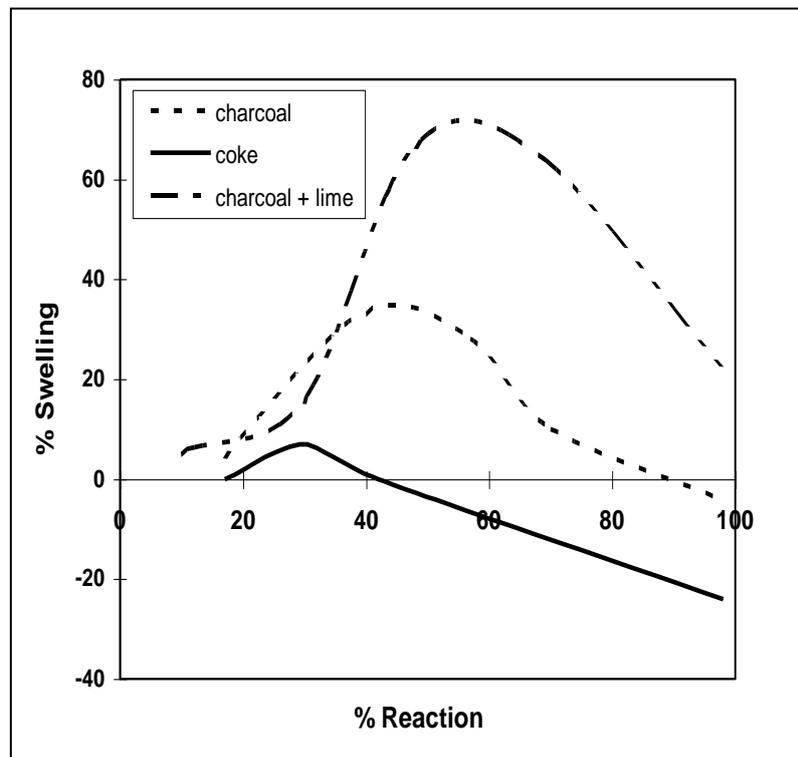


Figura 7. Inchaço das pelotas auto-redutoras de minério de ferro utilizando-se coque, carvão vegetal e carvão vegetal mais cal, reduzidas a 950oC em atmosfera inerte [7].

2.1.4. Outros efeitos, principalmente os aspectos cinéticos

Os resultados de ensaios dinâmicos (não isotérmicos) de redução, simulando os perfis térmicos e composições dos gases de um alto forno, tem mostrado que há diferenças significativas nos comportamentos de inchaço comparado com ensaios isotérmicos. A degradação mecânica pode ser menor que os indicados em ensaios estáticos onde há exposição direta ao gás redutor mostrando que há outros aspectos que necessitam ser considerados [7] (Figura 8).

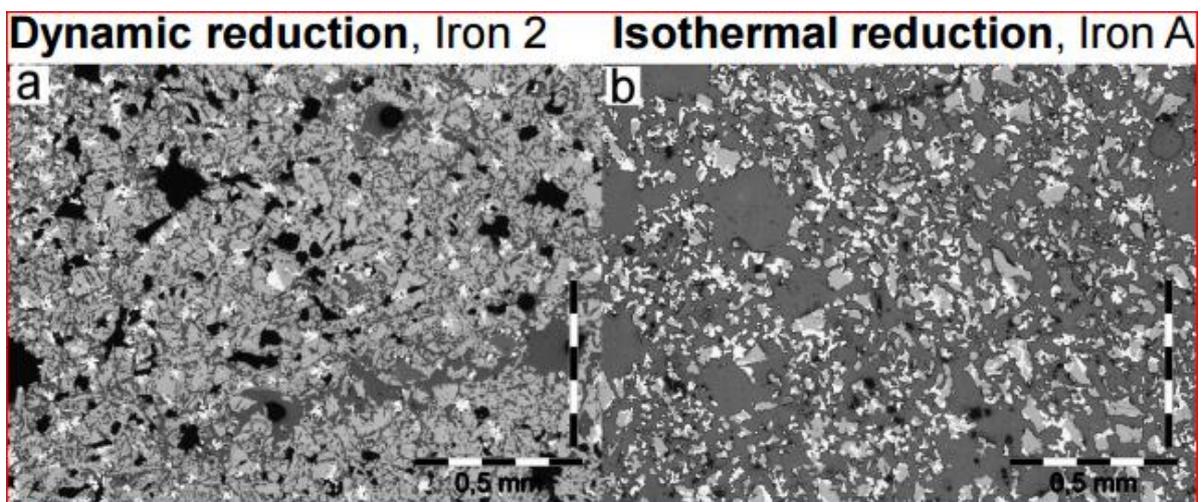


Figura 8. Comportamento ilustrativo de inchaço de pelotas (convencional) de minério de ferro. Inchaço bem maior pelo ensaio isotérmico..[7].

A redução (endotérmica) de pelotas auto-redutoras ocorre com velocidade alta e depende da taxa de fluxo de calor na pelota. Para o perfil térmico de reatores industriais, como observado na Figura 8, pode ocorrer a presença simultânea de ferro (na superfície do aglomerado ou junto às porosidades), wustita e magnetita, antes de completar a reação de redução, minorando portanto o inchamento devido à mudança estrutural. O inchamento durante a fase de redução de wustita para ferro é devido às condições favoráveis de crescimento de ferro filamentar, como “whiskers”. Esse comportamento de inchamento é mais favorável em pelotas auto-redutoras quando se utiliza carvão vegetal como redutor (Figura 7). Há indicações de que quanto maior é a porosidade maior é a facilidade de acomodar as variações volumétricas por mudança estrutural, porém aumenta a facilidade de crescimento de ferro filamentar.

Vários outros experimentos revelaram que os fatores que afetam o inchamento podem ser resumidos como segue: pelotas contendo carvão vegetal como redutor são propensas a maior inchamento; adições de materiais contendo óxidos básicos (cal, carbonato de cálcio, cimento) favorecem o inchamento; pelotas com coque são menos propensas a este fenômeno, pelotas com carvão mineral também são menos suscetíveis a apresentar inchamento catastrófico.

2.2. Carvão como aglomerante na auto-redução (“Binderless”)

O conceito de auto redução “binderless” é que o redutor em si atua também como aglomerante e foi introduzido pela primeira vez por Kasai (2001) [8]. Este conceito provém dos fenômenos que ocorrem durante a coqueificação de carvão mineral, ou sejam [8]: uma fase plástica é formada durante o aquecimento (no intervalo ao redor de 400-800°C) e depois de eliminar a maioria das matérias voláteis, em torno de 1100°C, consolida-se em um coque sólido e resistente. Para aglomerado composto minério de ferro-carbono (cerca de 15 a 18% do teor de C fixo) este carvão mineral consolidaria como um coque cobrindo as partículas de minério de ferro

Carvão de alta fluidez é usado para este processo e necessita ser aquecido (500 – 800°C) antes ou depois de briquetagem para consolidar a resistência. Os benefícios são: não adiciona ligantes; menos escória; boa resistência a altas temperaturas; e as desvantagens são: precisa de carvão metalúrgico com alta fluidez (log (máxima fluidez)) = 3-4); briquetagem a quente (400-600°C) ou briquetagem em temperatura ambiente seguido de tratamento térmico[9].

Embora o processo não seja ainda industrialmente consolidado, excelentes resultados têm sido relatados e podem contribuir para superar o problema de baixa resistência de aglomerados auto-redutores, em altas temperaturas (800-1100°C) [8, 10, 11 e 12], porém ainda não há pesquisas mais detalhadas sobre o fenômeno de inchamento durante a redução desses aglomerados

2.3 Efeito da formação de escória na redução

O objetivo de um processo de redução, extensivo à auto-redução, é completar a redução antes da formação da escória. Minério de ferro é facilmente reduzido carbotermicamente a “FeO” e, dependendo do perfil térmico durante a redução de aglomerado auto redutor e das características dos componentes formadores de

escória (ganga, aglomerante, agente fluxante, cinzas do redutor etc), durante a redução, a wustita pode ser dissolvida na escória antes de completar a redução a ferro. A Figura 9, para uma determinada composição de escória, com a dissolução de ~ 20% "FeO", pode apresentar temperatura "solidus" (início da formação da fase líquida) tão baixo quanto 1175°C [13]. Óxidos de sódio, potássio e boro, em escórias, abaixa mais o início da formação de fase líquida. Quando a fase líquida cobre a superfície do óxido, mecanismo de redução altera da reação gás/sólido (de alta velocidade) para as reações sólido/líquido ou líquido/líquido [14], mais lentas.

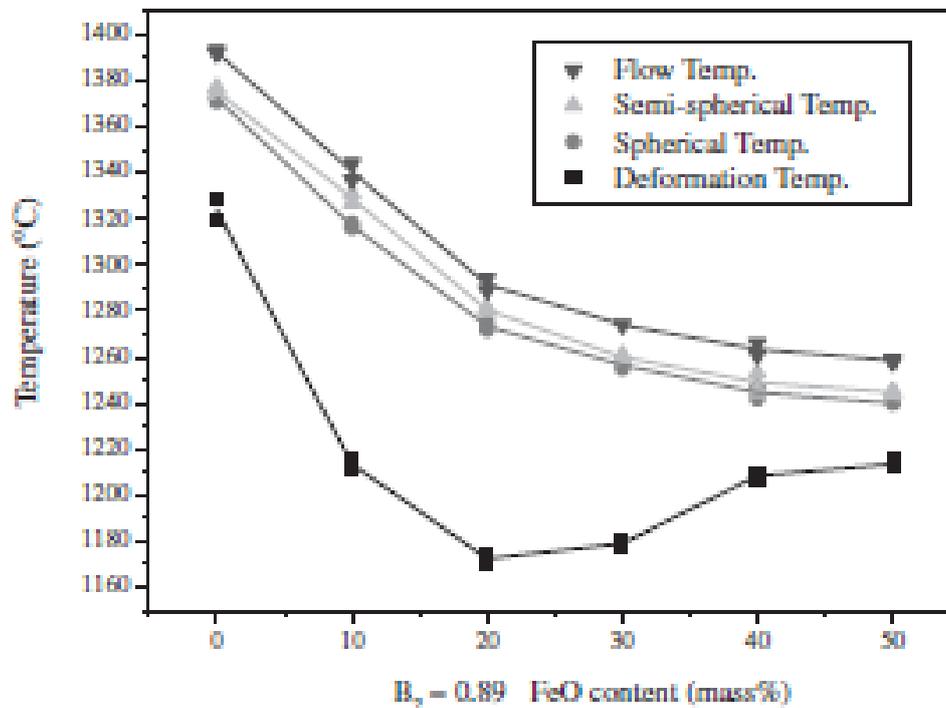


Figura 9 Relação entre teor de "FeO" e temperaturas de amolecimento e fusão, para sistema de escória CaO-SiO₂ - 10% MgO - 5% Al₂O₃ com basicidade binária igual a 0.89 [13].

Na prática, mesmo para aglomerados auto-redutores, que têm a taxa de redução facilitada, pode incorporar "FeO" na escória. A quantidade de "FeO" na escória é uma questão de quão rápidas são as taxas de redução e de dissolução, para um determinado perfil não-isotérmico. A Figura 10 mostra que, para uma determinada ganga do minério, cinzas de redutor e de agentes fluxantes e/ou aglomerantes, à 1623 K (1250°C) a dissolução do "FeO" é mais rápida do que a taxa de redução, como indicado pela fusão da pelota (sem utilização de cimento) antes de atingir fração de redução de 50% [15].

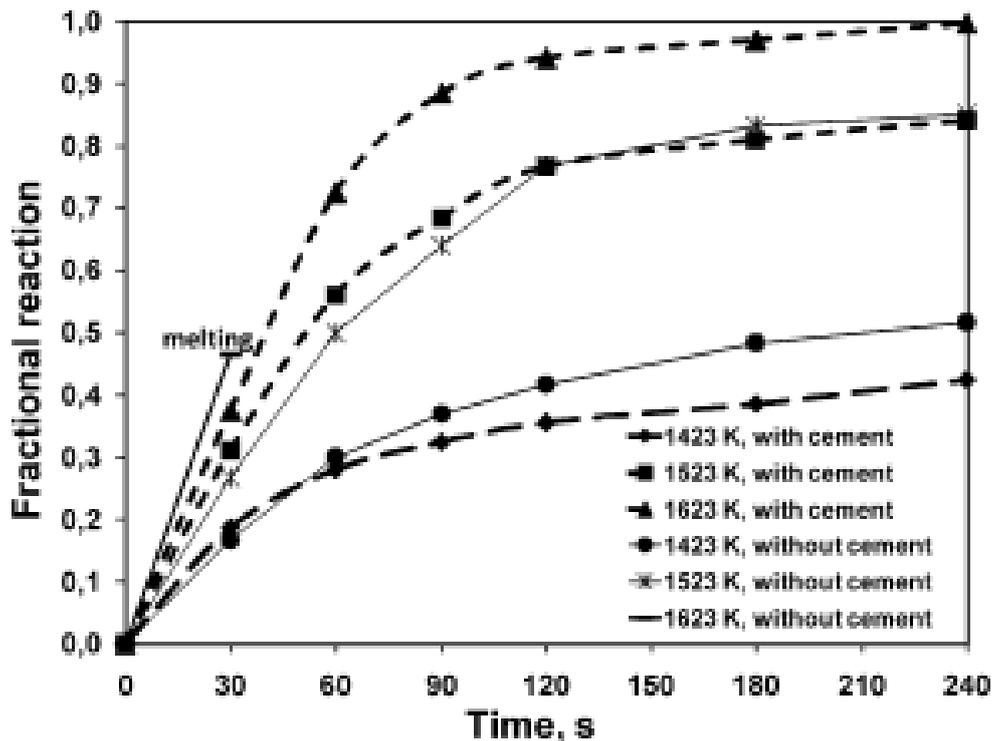


Figura 10. Fração de reação pelota auto-reduzora de minério de ferro com e sem cimento, indicando que houve fusão da pelota (sem cimento), a 1623K, antes de atingir fração de reação de 50% [15].

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fenômenos e características envolvidos na produção de ferro primário pelos processos de auto-redução (aglomerados compostos de minério de ferro e de carbono), apresentam diferenças e peculiaridades com relação aos processos convencionais, que precisam estar cientes para análise dos processos.

1. O inchamento durante a etapa de redução da hematita para wustita, decorrente a transformação de fase de uma estrutura compacta da hematita para a estrutura CCC da wustita, indica que não há diferenças com processos convencionais. A evolução maior de gases em auto-redução pode estar sendo compensada por uma porosidade maior.
2. O inchamento decorrente da formação de ferro filamental ("whisker") é mais propenso em pelotas auto-redutoras aglomeradas com cimento e agravado com a utilização de carvão vegetal como redutor.
3. Minérios pobres e a recuperação de resíduos (por exemplos poeiras de sinterização e de aciaria) contendo óxidos de ferro, por auto-redução, por conter muita impureza ("ganga"), minimiza o efeito da degradação por inchamento durante a redução
4. Pelotas auto-redutoras sem uso de aglomerantes ("binderless") necessitam de mais pesquisas para avaliar a sua degradação durante a redução.
5. A alta velocidade de redução inerente aos processos de auto-redução fica prejudicada quando se forma fase líquida (escória) e a velocidade de

dissolução do monóxido de ferro para escória for maior que a de redução para Fe.

6. Ensaios dinâmicos de redução, simulando as condições dos perfis térmicos e as composições dos gases redutores, estão indicando que na prática a degradação por inchamento pode ser menor que os resultados obtidos em ensaios estáticos

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico -CNP, pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 S L Moraes and S K Kawatra.. Avaliação do uso de combinações de aglomerantes na pelotização de concentrato de magnetita pela tecnologia de aglomeração em tambor (balling drum). *Tecnologia Metalurgica. Materiais e Mineracao*. ABM. Sao Paulo, Brazil, v. 8, no. 3, jul.-set. 2011, p. 168-173.
- 2 L Yi, Z Huang, T Jiangb, L Wang and T Qi. Swelling behavior of iron ore pellet reduced by H₂-CO mixtures. *Powder Technology* 269 (2015) 290–295.
- 3 Webmineral: Mineralogy Database. Consultado em 15 de junho de 2017.
- 4 J Tao, H Guo-qiang, L Guang-hui, F Xiao-hui and C Zhi-xin. Effect of gangue composition on reduction swelling of iron ore pellets. *Iron and Steel*. 2007, vol 42, issue (5):7-0.
- 5 C. P. Maschio, C. Takano, M.B.Mourao, T.R.Ribeiro e S.L Moraes. Resistência mecânica a frio e a quente de pelotas auto-redutoras de minério de ferro. 47º Seminário e Redução e 5º de Aglomeração da ABM Week. São Paulo 2 a 6 de outubro de 2017. Anais ABM. SP.
- 6 C Takano and M B Mourao. Self-Reducing Pellets for Ironmaking: Mechanical Behavior. *Mineral Processing and Extrative Metallurgy Review*. Taylor and Francis. London, GB, 2003, v.24, no 3-4, pp. 233-252.
- 7 Mikko Iljana¹, Olli Mattila², Tuomas Alatarvas¹, Jari Kurikkala³, Timo Paananen² and Timo Fabritius¹ (2012) Dynamic and isothermal reduction swelling behaviour of olivine and acid iron ore pellets under simulated blast furnace shaft conditions, *ISIJ International*, Vol. 52, No. 7, pp. 1265-1273
- 8 A. Kasai, Y. Matsui, F.Noma, F. Iwakiri, and M.Shimizu. Cold strength enhancement mechanism of carbon composite iron ore hot briquette. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2001: p. 313-319.
- 9 C. Y. Narita, M. B. Mourao and C. Takano. Development of composite briquettes of iron ore and coal hardened by heat treatment. *Ironmaking and Steelmaking*. Vol 42, no 7, 2015, p 548-552
- 10 A. Kasai, Y. Matsui, K. Miyagawa, Y. Yamagata and M. Naito. Development of carbon composite iron ore hot briquette and basic investigation on strength enhancing mechanism and reducibility. *Science and Technology of Innovative Ironmaking for aiming at Energy Half Consumption*. MEXT. Tokyo, Japan, 2003, p 119-126.
- 11 C. Man-sheng, L. Zheng-gen, W. Zhao-cai and J. Yagi. Fundamental study on carbon composite iron ore hot briquette used as blast furnace burden. *Steel Research International*. Vol. 82, no 5, 2011, p 521-528.

- 12 H. Yokoyama, K. Higuchi, T. Ito and A. Oshiro. Decrease in the carbon consumption of a commercial blast furnace by using carbon composite iron ore. *ICSTI 6th*, 2012, Rio de Janeiro, Brazil, ABM. p 1031-1042.
- 13 H-C Chuang, W-S Hwang and S-H Liu. Effects of Basicity and FeO Content on the Softening and Melting Temperatures of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ Slag System. *The Japan Institute of Metals. Materials Transactions*, Vol. 50, No. 6 (2009) pp. 1448-1456.
- 14 C Takano, A P Zambrano, A E A Nogueira, M B Mourao and Y Iguchi. Chromites Reduction Reaction Mechanisms in Carbon-Chromites Composite Agglomerates at 1 773 K. *ISIJ International*, vol. 47, n° 11, PP.1585-1589, 2007.
- 15 D M Santos, M B Mourao and C Takano. Reaction Rate and Product Morphology in Carbon composite Iron Ore Pellets with and without Portland Cement. *Ironmaking & Steelmaking*. London. The Institute of Materials, Minerals and Mining. 2010, v.37, no. 5, pp. 334-340 .