

# AVALIAÇÃO EM ALTA TEMPERATURA DE BRIQUETES COMPOSTOS POR CAREPA E PÓ DE BALÃO\*

*Rubia Teodoro Silva<sup>1</sup>  
Thiago Luiz Arcebispo Fernandes<sup>2</sup>  
Ismael Vemdrame Flores<sup>3</sup>  
Maurício Covcevich Bagatini<sup>4</sup>*

## Resumo

Desenvolver novas matérias-primas e tecnologias que forneçam alternativas para o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos é importante tanto do ponto de vista econômico quanto para a sustentabilidade do setor. Devido ao rico teor de ferro e carbono de alguns desses resíduos, a reciclagem via briquetes autorredutores em reatores de redução é uma rota considerada por diversos especialistas. No entanto, para consolidar tal aplicação, é fundamental conhecer o comportamento desses aglomerados em condições próximas daquelas presentes na prática industrial. O presente trabalho buscou avaliar o desempenho de aglomerados autorredutores compostos por pó de balão de alto-forno e carepa em altas temperaturas. Briquetes com diferentes proporções de pó de balão e carepa foram produzidos em laboratório, usando cimento e água como ligantes. Esses aglomerados foram submetidos a ensaios de redução não isotérmica em atmosfera de CO/CO<sub>2</sub> nas temperaturas de 300, 600, 900 e 1100°C e os produtos foram avaliados por meio de perda de massa e resistência mecânica. Os resultados obtidos mostraram as variações de resistência mecânica em função da perda de massa e das diferentes proporções de resíduos dos aglomerados. Por fim, visando o uso desses aglomerados em alto-forno, a melhor proporção entre pó de balão de alto-forno e carepa foi identificada.

**Palavras-chave:** Resíduos Siderúrgicos; Autorredução; Pó de Balão; Carepa.

High-Temperature Evaluation of Blast Furnace Flue Dust and Mill Scale Briquettes

## Abstract

Developing new technologies that provide alternative ways to reuse metallurgical waste is important for the industry and the environment. Due to the rich iron and carbon content of some of those wastes, many researchers suggested their potential for the production of self-reducing agglomerates targeted for reduction reactors. However, to consolidate such applications, it is fundamental to know the behavior of these agglomerates in conditions close to those present in the industrial practice. The present work aimed to evaluate the performance of self-reducing agglomerates composed of blast-furnace flue dust and mill scale at high temperatures. Briquettes with different proportions of blast furnace dust and mill scale were produced in laboratory scale, using cement and water as binders. These agglomerates were subjected to non-isothermal reduction tests in CO/CO<sub>2</sub> atmosphere at temperatures of 300, 600, 900 and 1100°C and the products obtained were evaluated by mass loss and mechanical strength. The obtained results showed the variations of mechanical strength as a function of the mass loss and the different ratios of residues of the agglomerates. Finally, aiming to use such agglomerates at the blast furnace, the best ratio between blast furnace dust and mill scale was identified.

**Keywords:** Metallurgical Waste; Self-Reduction; Blast Furnace Flue Dust, Mill Scale.

\* Contribuição técnica ao 18º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

- <sup>1</sup> *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal de Minas Gerais, BeloHorizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Metalúrgicos, Universidade Federal de Minas Gerais, BeloHorizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM) da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Dr. Professor, coordenador do Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Nos diferentes processos utilizados para a obtenção de ferro e no seu refino até a obtenção do aço, diversos resíduos são gerados, levando a perdas de ferro e custos relacionados à destinação e armazenagem. Vários desses resíduos, como o pó de balão de alto-forno e a carepa, contém quantidades de ferro suficientes para incentivar seu reaproveitamento. A carepa é um resíduo originado da oxidação superficial do aço quando em altas temperaturas, principalmente nos processos de lingotamento e laminação. Já o pó de balão é gerado pelo despoeiramento do gás de saída dos altos-fornos. O desenvolvimento de novas matérias-primas e tecnologias que apresentem soluções para a reutilização desses resíduos é importante tanto do ponto de vista econômico quanto para a sustentabilidade do setor.

O estudo de aglomerados autorredutores, de acordo com Coelho *et al.* [1] e Gudenau *et al.* [2], se enquadra nesse perfil, uma vez que essa tecnologia possibilita a reutilização de finos em processos alternativos para produção de ferro ou como carga complementar para processos siderúrgicos já consolidados. Nesse tipo de aglomerado, o agente redutor é adicionado diretamente na mistura visando um contato íntimo entre os óxidos de ferro e o carbono. Em temperaturas adequadas, o material carbonoso propicia a formação de gases redutores com elevada pressão parcial no interior do aglomerado, favorecendo a cinética de redução.

Para que esse tipo de aglomerado seja considerado adequado para uso em reatores de redução, o mesmo deve apresentar uma resistência mecânica que permita manter a sua integridade nas altas temperaturas presentes no decorrer do processo [3]. A degradação dos aglomerados e a consequente formação de finos podem comprometer a permeabilidade da carga e a eficiência dos reatores. Sendo assim, avaliar o comportamento dos aglomerados autorredutores (redução e resistência) quando submetidos a altas temperaturas é fundamental para determinar se o mesmo está apto ou não para ser utilizado em processos industriais.

Tendo em vista os fatores mencionados acima, esse estudo foi desenvolvido com o objetivo de fornecer subsídios teóricos e experimentais para a reciclagem de pó de balão e carepa na forma de briquetes autorredutores. O comportamento de redução e a resistência mecânica dos briquetes foram avaliados visando às condições de temperatura observadas na prática industrial.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

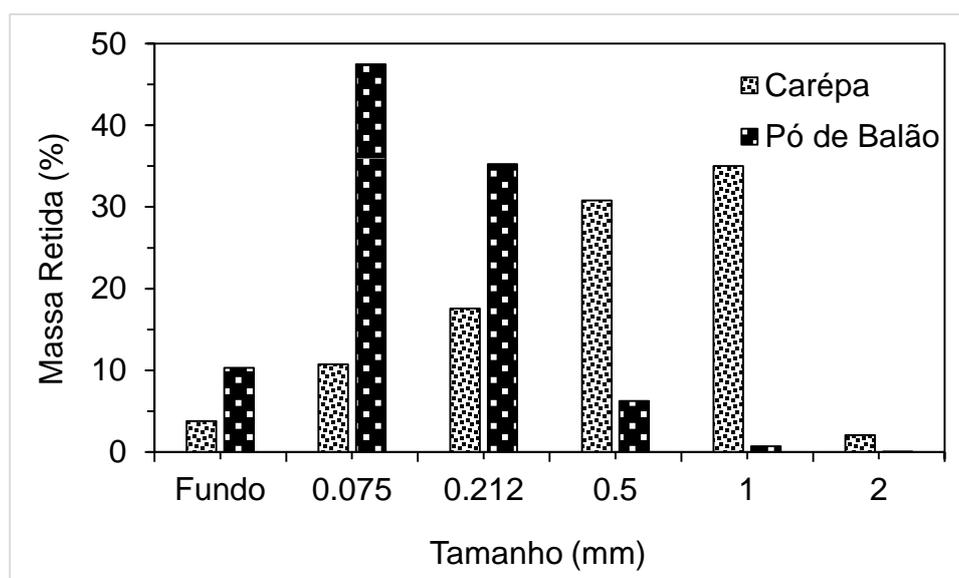
#### 2.1.1 Matérias-primas

Os briquetes utilizados nesse estudo foram produzidos a partir de carepa e pó de balão de alto-forno, usando cimento e água como ligantes. Ambos os resíduos são conhecidos por seus teores consideráveis de óxidos de ferro, além da presença de finos de coque no pó de balão. Esses materiais foram fornecidos por uma usina siderúrgica integrada localizada em Minas Gerais e sua caracterização química encontra-se na Tabela 1. Cimento Portland ARI-CP-V e água para sua hidratação foram utilizados para conferir resistência mecânica aos aglomerados. A Figura 1 apresenta a análise granulométrica dos resíduos utilizados no estudo, onde observa-se que no caso da carepa, a maior parcela encontra-se abaixo de 2mm e acima de

212 $\mu$ m, enquanto para o pó de balão a maior parte está concentrada entre 75 e 212 $\mu$ m.

**Tabela 1.** Composição química da carepa e do pó de balão utilizados

Parâmetro	Carepa	Pó de balão
Fe <sub>t</sub>	71,11	36,55
FeO	57,87	4,37
SiO <sub>2</sub>	0,58	8,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,075	2,501
Mn	0,153	0,057
P	0,022	0,054
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,050	0,124
CaO	0,103	5,956
MgO	0,015	0,552
Na <sub>2</sub> O	0,032	0,037
K <sub>2</sub> O	0,001	0,005
S	0,02	0,43
C	0,00	35,12



**Figura 1.** Análise granulométrica da carepa e pó de balão.

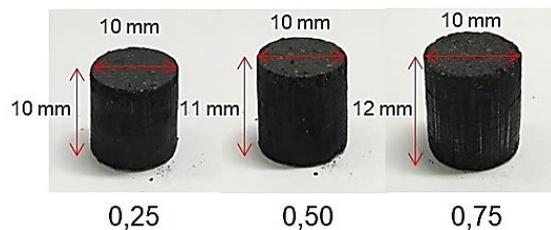
### 2.1.2 Confeção dos briquetes autorredutores

Diferentes tipos de briquetes foram confeccionados para investigar a influência da relação carbono/oxigênio (C/O) sobre seu comportamento. A Tabela 2 apresenta a composição utilizada para a confecção dos briquetes obtendo as relações de C/O de 0,25; 0,5 e 0,75, as quais foram adquiridas variando a proporção entre a carepa e pó de balão nos aglomerados. A quantidade de cimento Portland adicionada foi de 10% em massa com uma quantidade igual de água para a sua hidratação e cura. As misturas para briquetagem foram pesadas e homogeneizadas manualmente por 10 minutos. Para cada briquete, 3 g de mistura foram adicionadas a uma matriz

cilíndrica ( $D = 10 \text{ mm}$ ) e posicionada em mesa vibratória (8 Hz) por 1 minuto para o assentamento das partículas. A seguir, a briquetagem foi realizada em uma prensa hidráulica utilizando carga de 5 toneladas, a qual foi mantida por 1 minuto. A cura dos briquetes foi realizada durante 7 dias à temperatura ambiente. A Figura 2 apresenta o tamanho final dos briquetes, que variou de acordo com a relação de C/O utilizada, tendo-se como diâmetros de 10 mm e alturas de 10, 11 e 12 mm, para as composições de 0,25, 0,5 e 0,75 respectivamente.

**Tabela 2.** Composição dos briquetes em porcentagem de massa

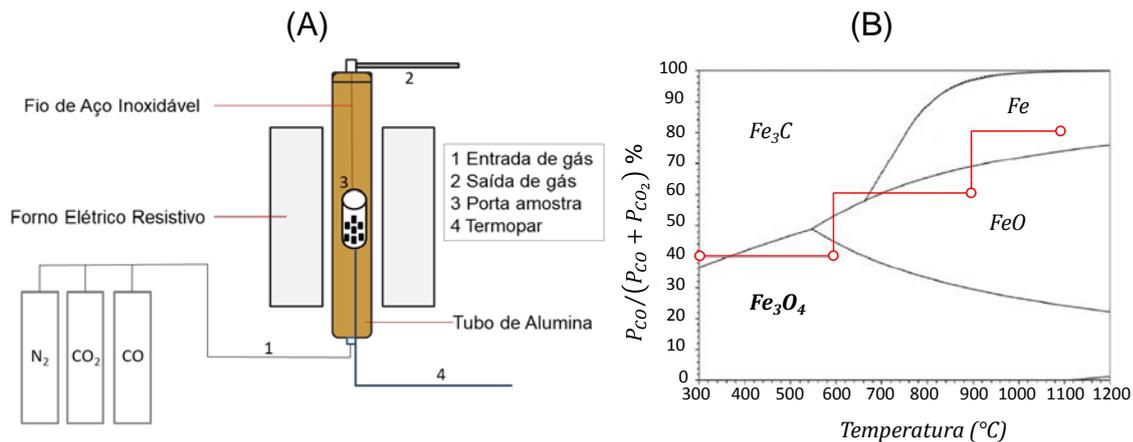
Razão C/O	0,25	0,5	0,75
Carepa	67,08	55,62	45,38
Pó de Balão	12,92	24,38	34,62
Ligante	10	10	10
Água	10	10	10



**Figura 2.** Dimensões dos briquetes.

### 2.1.3 Ensaios de alta temperatura interrompidos

O comportamento em alta temperatura dos diferentes briquetes foi avaliado através de ensaios não isotérmicos interrompidos. A Figura 3 (A) apresenta um esquema do forno utilizado para a realização desses ensaios. Estes foram realizados a uma taxa de aquecimento de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $900^\circ\text{C}$ , a qual foi mantida por 30 minutos. Após esse patamar, o aquecimento foi retomado até  $1100^\circ\text{C}$  sob a mesma taxa. A Figura 3 (B) apresenta no diagrama de Baur-Glaessner a atmosfera utilizada nos ensaios, a qual foi controlada por fluxômetros de massa para obter diferentes relações de monóxido e dióxido de carbono ( $\text{PCO}/(\text{PCO}+\text{PCO}_2)$ ). Uma vazão total de gás de  $3\text{L}/\text{min}$  foi empregada, sendo 60% composta por nitrogênio e 40% pelas diferentes relações de CO e  $\text{CO}_2$ . Para investigar a evolução das propriedades dos briquetes com a temperatura, os testes foram interrompidos em  $300$ ,  $600$ ,  $900$  e  $1100^\circ\text{C}$  e resfriados rapidamente em atmosfera de nitrogênio. Em cada teste, utilizou-se 10 briquetes e os produtos obtidos foram analisados por perda de massa e resistência mecânica a compressão.



**Figura 3.** (A) Esquema do equipamento utilizado nos ensaios e (B) da atmosfera gasosa empregada sobre diagrama de Baur-Glaessner.

### 2.1.4 Resistência Mecânica à Compressão

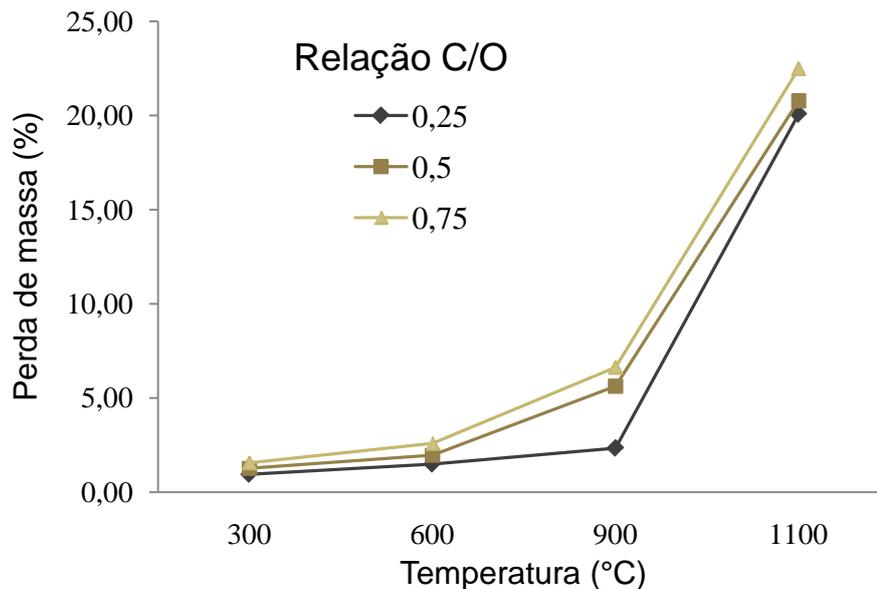
Para avaliar como a resistência mecânica dos briquetes se altera com a temperatura e o conseqüente desencadeamento das reações, ensaios de resistência à compressão foram realizados. Para cada temperatura, 5 briquetes foram submetidos a compressão em uma máquina universal de ensaio Shimadzu modelo AGS-X 300kN, com velocidade de avanço de 0,01 m/s. A carga máxima aplicada por compressão axial até a ruptura dos briquetes foi tomada como resultado.

## 2.2 Resultados e discussão

### 2.2.1 Perda de massa

A Figura 4 apresenta o comparativo de perda de massa dos briquetes quando submetidos a ensaios de altas temperaturas, considerando-se as diferentes relações de C/O dos briquetes. De modo geral, observou-se um aumento da perda de massa dos briquetes com o aumento de temperatura e potencial redutor do gás utilizado no ensaio. Para 300 e 600°C, todos os briquetes se comportaram de forma semelhante, onde a perda de massa foi atribuída à saída de umidade de superfície e da desidratação do cimento [4]. Devido à baixa temperatura, acredita-se que a redução dos óxidos de ferro teve pouca contribuição.

A partir da temperatura de 900°C, nota-se um aumento significativo da perda de massa comparado às temperaturas anteriores. Esse fato pode ser atribuído a uma perda de massa advinda principalmente das reações de redução dos óxidos de ferro pela atmosfera do ensaio, a qual até 900°C favorece a formação de FeO ( $P_{CO}/(P_{CO} + P_{CO_2}) = 0,6$ , Figura 2 – A). Além disso, uma pequena parcela das perdas observadas pode ser oriunda do consumo de carbono pela reação de Boudouard, a qual tem início em temperaturas próximas a 900°C [5]. Em relação às diferentes relações de C/O, o briquete de 0,25 apresentou uma menor perda de massa. Acredita-se que esse fato se deve as maiores concentrações de carepa que esse briquete possui em sua composição (vide Tabela 2). De acordo com Bagatini *et al.* [6], a redutibilidade dos óxidos da carepa é lenta e necessita de elevadas temperaturas. Além disso, grande parte dos óxidos da carepa se encontram na forma de FeO (Tabela 1), a qual permanecerá em equilíbrio com a atmosfera gasosa utilizada, conforme aponta o diagrama de Baur-Glaessner.



**Figura 4.** Perda de massa dos briquetes em relação à temperatura dos ensaios interrompidos.

Após o patamar de temperatura de 30 minutos em 900°C e o subsequente aquecimento das amostras até 1100°C, todos os briquetes apresentaram um aumento considerável de perda de massa. Nessa temperatura, o consumo de carbono pela reação de Boudouard aumenta significativamente. Assim, a redução dos óxidos de ferro ocorreu segundo duas frentes, (1) pela atmosfera gasosa externa, nesse momento com  $PCO / (PCO + PCO_2)$  igual a 0,8 e (2) pelo monóxido de carbono formado no interior do briquete devido à reação de Boudouard. Estimando-se a perda total esperada dos briquetes considerando apenas o consumo total de carbono e a total redução (remoção de oxigênio) dos óxidos de ferro (Tabela 1), as seguintes perdas de massa totais são esperadas: 24,04; 27,84 e 30,85 % para os briquetes com C/O de 0,25; 0,5 e 0,75, respectivamente. Com isso, pode-se dizer que pelos ensaios realizados até 1100°C, os briquetes estudados obtiveram perda máxima em torno de 75% do total, indicando uma perda de massa significativa com a possível formação de ferro metálico.

### 2.2.2 Resistência Mecânica

Os resultados de máxima resistência à ruptura (compressão axial) e seus respectivos desvios-padrões são apresentados na Figura 5 para os briquetes a temperatura ambiente, 300, 600, 900 e 1100°C. Observa-se que à temperatura ambiente os briquetes apresentaram resistência entre 160 e 190 N, sendo o briquete com relação C/O de 0,25 mais resistente que os demais. Esse fato, provavelmente está relacionado à maior quantidade de carepa em sua composição. As amostras de relação 0,5 e 0,75 não apresentaram diferença significativa entre elas. De acordo com Balajee *et al.* [7], sendo a carepa um resíduo relativamente grosseiro, pode haver uma maior compactação da mistura e aumentar a resistência do briquete.

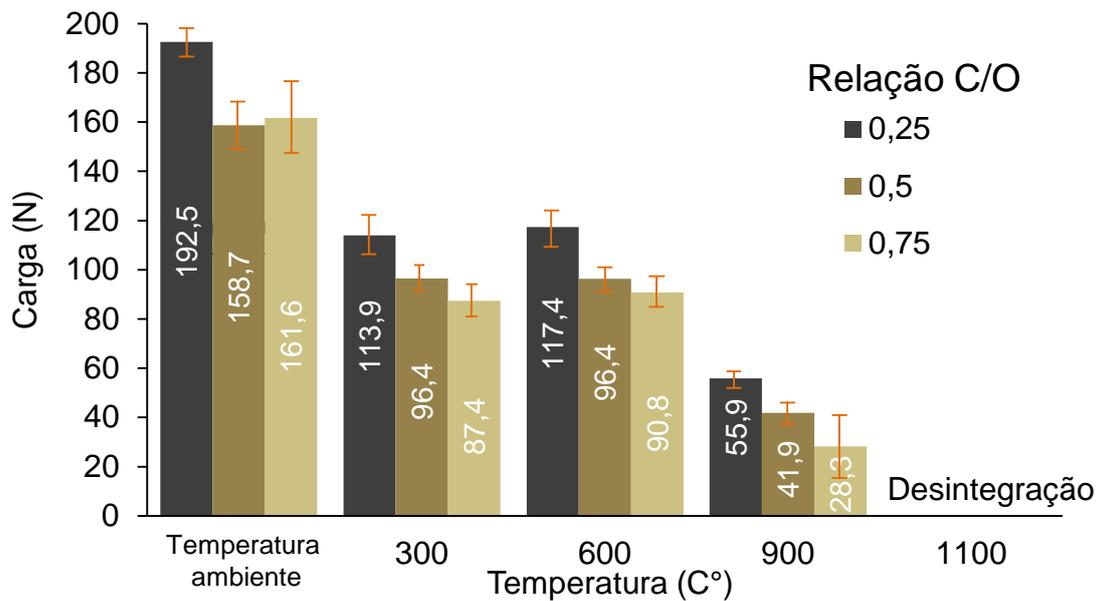
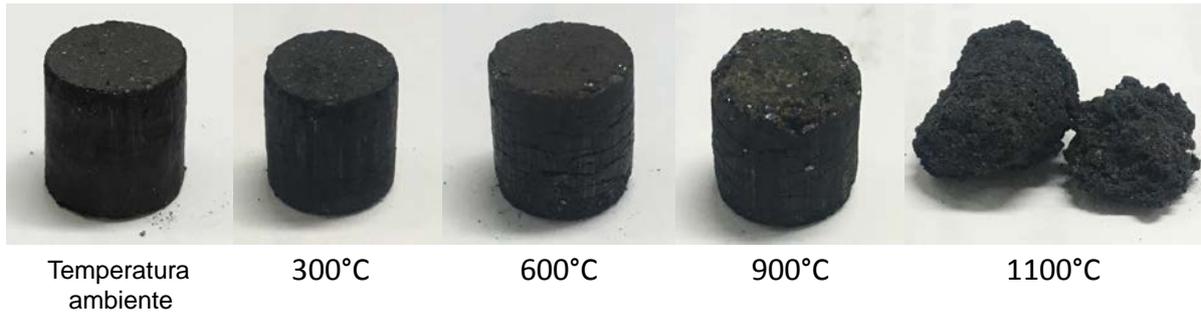


Figura 5. Gráfico de carga máxima aplicada por temperatura

Analisando o comportamento do gráfico para as temperaturas de 300 e 600°C é possível observar que a resistência mecânica não diferiu muito em termos da relação C/O dos briquetes. Isso é afirmado também pelo desvio padrão visto na figura. Em comparação aos valores da temperatura ambiente, a resistência teve uma queda significativa, de aproximadamente 40%, a qual deve estar relacionada à desidratação do cimento nessa faixa de temperatura, como citado anteriormente. A hidratação do cimento leva a formação de compostos de silicato cálcico hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que aumentam a sua resistência e, conseqüentemente, do briquete. No entanto, segundo Zanget. *al* [4], as reações de desidratação desses compostos ocorrem na faixa de temperatura de 105 a 1000°C para o  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  e de 400 a 550°C para o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , levando a uma redução significativa da máxima resistência a ruptura dos briquetes.

Em maiores temperaturas (900°C) os briquetes tiveram sua resistência mecânica reduzida até 40 N, significativamente menor que para as temperaturas anteriores. Isso se deve possivelmente a continuação da desidratação de parte do cimento ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) aliado à perda de massa ocasionada pela redução dos óxidos de ferro, principalmente para os briquetes com relação C/O de 0,5 e 0,75. Semelhante ao observado para a temperatura ambiente, o briquete com maior quantidade de carepa (C/O=0,25) foi mais resistente que os demais.

Por fim, na temperatura de 1100°C observou-se um inchamento dos briquetes, que perderam a estabilidade estrutural de forma a impossibilitar as medidas compressão e, portanto, sua resistência mecânica foi considerada zero. A Figura 6 mostra o aspecto visual dos briquetes (C/O = 0,5) em diferentes temperaturas, expondo suas modificações estruturais até o inchamento em 1100°C. Nota-se que para as temperaturas entre 600 e 900°C, houve a formação de trincas radialmente distribuídas nos briquetes, possivelmente devido à saída dos gases do seu interior (desidratação do cimento e redução). A reação de *Boudouard* é muito mais favorável cineticamente acima entre 1000 e 1100°C, podendo ter gerado uma pressão interna nos briquetes que levaram ao seu inchamento e conseqüente degradação.



**Figura 6.** Briqueletes de composição 0,5 submetidos a diferentes temperaturas

Com os resultados obtidos tanto pelos ensaios interrompidos em alta temperatura seguidos pelos ensaios de resistência mecânica a compressão, é possível notar que os briqueletes com maior quantidade de pó de balão (0,5 e 0,75) apresentaram uma maior fragilidade em todas as temperaturas testadas. Observou-se uma maior formação de poros em sua superfície e trincas horizontais que favorecem a perda da resistência da amostra. Desta forma, pode-se considerar que o briquelete de composição 0,25 foi o mais resistente em todas as temperaturas e condições de teste avaliadas.

### 3 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível avaliar a influência da relação carepa/pó de balão no comportamento de redução e resistência mecânica dos briqueletes, que levaram as seguintes conclusões:

- Até a temperatura de 600°C pequenas perdas de massa foram observadas, as quais aumentaram significativamente a partir de 900°C e se estenderam até 1100°C;
- Para todas as temperaturas interrompidas, a magnitude das perdas de massa foi uma função da quantidade de carbono nos briqueletes, sendo mais elevadas para as maiores relações C/O, ou seja, aumentou para proporções superiores de pó de balão na mistura;
- Quanto maior a temperatura de ensaio e conseqüentemente a perda de massa dos briqueletes, menor a resistência mecânica observada;
- Para todas as temperaturas testadas, os briqueletes de C/O de 0,25 foram os mais resistentes, enquanto que as relações de 0,5 e 0,75 apresentaram valores similares;
- Independente da relação C/O, todos os briqueletes apresentaram desintegração a 1100°C ao atingir a máxima perda de massa observada nos ensaios.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Gerdau Ouro Branco pelo fornecimento das amostras de pó de balão e carepa, as quais incentivaram a realização desse trabalho. Agradecem também o apoio financeiro pela Coordenação de

Desenvolvimento Pessoal de Nível Superior (CAPES), PROEX-0487, 2016, processo 1584853 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- 1 Coelho LHT, Mol MPG, Assis PS. Seleção de minérios de ferro para utilização nos processos Corex e Far-Tecnored. In: SEMIN. RED. E MAT. PRIM.ABM.Anais...Florianópolis: ABM, 2005. v. 1, p. 434-445.
- 2 Gudenal HW. Research in the reduction of iron ore agglomerates including coal and C-containing dust. ISIJ International, v. 45, n.4, p. 603-608, 2005.
- 3 Singh M. Studies on the cement-bonded briquettes of iron and steel plant by-products as burden material for blast furnaces. University of Technology, Sweden, 2003.
- 4 Zang Q., Guang Y. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. J Therm Anal Calorim. 2012.
- 5 Flores B.D., Flores I. V., Guerrero A., Orellana D. R., Pohlmann J.G., Diez M.A., Borrego A. G., Osório E., Vilela A.C.F. Effect of charcoal blending with a vitrinite rich coking coal on coke reactivity. Federal University of Rio Grande do Sul. 2016.
- 6 BAGATINI, M.C. Estudo de Reciclagem da Carepa através de Briquetes Autorredutores para um em Forno Elétrico a Arco. UFRGS, Brasil, 2011. (Tese de Doutorado).
- 7 Balajee SR, Callaway PE, Keilman LM. Production and BOF recycling of waste oxide briquettes containing steelmaking sludges, grit, and scale at inland steel. Steelmaking Conference Proceedings, p.55-65, 1995.