



UTILIZAÇÃO DE LAMA DE ALTO-FORNO PARA FABRICAÇÃO DE PELOTAS CALCINADAS¹

Hermes Joaquim Ferreira Filho²

Ramiro Conceição Nascimento³

Jorge Alberto Soares Tenório³

Felipe Fardin Grillo⁵

Resumo

Este trabalho descreve os resultados obtidos na Fabricação de Pelotas Calcínadas com adição de lama de alto-forno, em substituição parcial e total do Carvão na mistura de pelotamento, com o objetivo de aplicação em processos siderúrgicos. Esta Lama é um resíduo gerado no processo de Alto-forno e não tem aplicação economicamente viável (somente 2% para indústrias de cerâmica) e gera grande passivo ambiental. Ela possui altos teores de carbono e Ferro, o que proporciona a utilização como combustível e fonte metálica. Uma das alternativas para reciclagem deste resíduo é a utilização em processos de aglomeração e queima. A fabricação de Pelota com adição de lama gera um produto versátil para a siderurgia, sendo possível sua utilização nos processos siderúrgicos tais como Alto-forno e processos de Aciaria.

Palavras-chave: Lama de alto-forno; Pelotamento; Processos siderúrgicos.

UTILIZATION BLAST FURNACE MUD FOR MANUFACTURING CALCINED PELLETS

Abstract

This paper describes the results obtained in the Production of Calcined pellets with the addition of blast furnace mud, in partial and total substitution of coal in the pellet mixture, with the goal of application in steelmaking processes. This Mud is a waste generated in the Blast Furnace process and have no use economically viable (only 2% for ceramic industries) and large generates environmental liabilities. It has high levels of carbon and iron, which provides use as a source fuel and metal. An alternative to recycling this waste is to use the agglomeration processes. The manufacturing of pellet with the addition of mud creates a versatile product for employed in the reduction processes in Blast Furnace and Steelmaking processes.

Keywords: Blast furnace mud; Pelleting process; Steelmaking processes.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro, Mestrando em Engenharia de Metalurgia e Materiais no Instituto de Educação Tecnológica do Espírito Santo (IFES) em parceria com Escola Politécnica da USP.

³ Engenheiro Ph.D, Professor do Departamento de Metalurgia e Materiais do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – IFES.

⁴ Engenheiro, Ph.D, Professor do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.

⁵ Tecnólogo, Mestrando em Engenharia de Metalurgia e Materiais do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – IFES.



1 INTRODUÇÃO

O setor siderúrgico gera uma diversidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas nas suas diversas etapas de processamento. Nos resíduos sólidos, podem-se destacar as escórias, pós, lamas e carepas. Dependendo do tipo de resíduo, ele pode ser retornado ao processo, como fonte de energia ou como matéria-prima para a produção de aço, ou ainda comercializada como co-produto para outras atividades industriais.⁽¹⁾

No processo de redução do minério de ferro em altos-fornos, um fluxo de ar quente é insuflado pelas ventaneiras, a uma pressão constante, para prover de oxigênio o processo. Este fluxo gasoso ascendente arrasta as partículas de matérias primas com granulometria muito fina para a parte superior do reator. No topo do Alto-forno sai uma mistura de gás combustível, com cerca de 35% de monóxido de carbono, e partículas sólidas. Esta mistura gás-sólido é separada no equipamento de controle ambiental. O gás combustível é usado internamente na geração de energia termoelétrica e a lama gerada na etapa de lavagem do gás vai para as bacias de decantação.

A Figura 1 exemplifica o processo de alto-forno e seus equipamentos auxiliares.

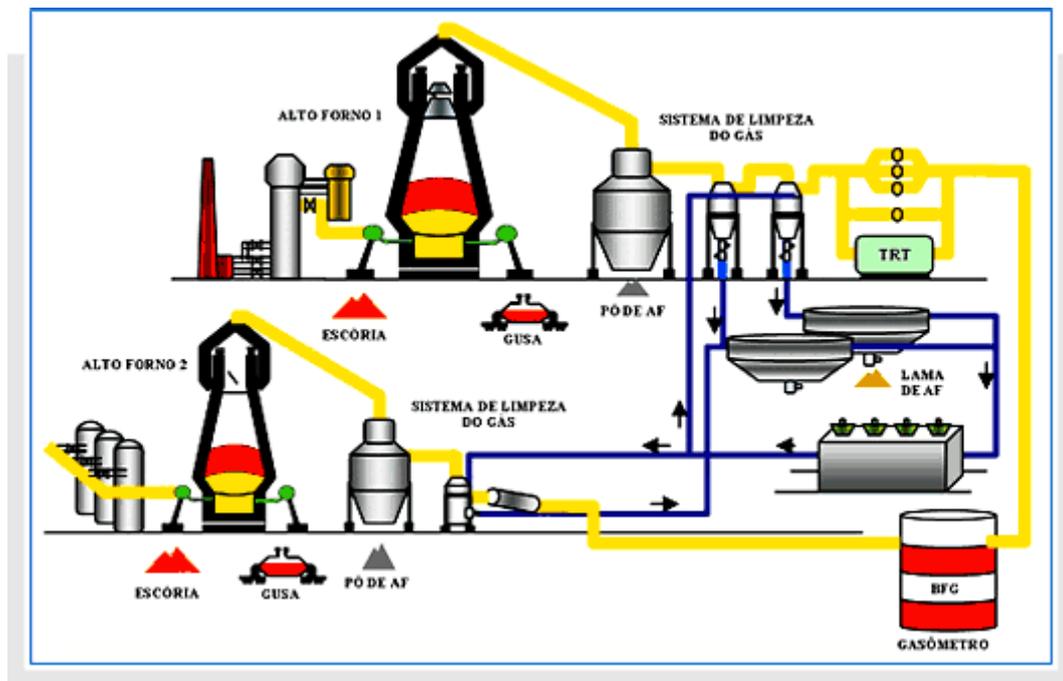


Figura 1. Vista do sistema de lavagem de gases de um Alto-Forno.⁽²⁾

A lama gerada durante o processo de fabricação do gusa, é composta de finos de minério, finos de carbono (coque, carvão mineral ou vegetal), finos de óxido de cálcio e finos de sílica. Os pós-finos são coletados por sistemas de lavagem. Estes rejeitos industriais causam um alto grau de degradação ambiental se não tiverem disposição adequada ou aplicação industrial.⁽³⁾

Uma das formas mais comuns de reaproveitamento de resíduos no processo siderúrgico é o processo de sinterização. A reciclagem da maior parte dos resíduos industriais sólidos ricos em Ferro (80%) é feita via este processo. Esta prática é comum na siderurgia devido, principalmente, às características granulométricas dos resíduos gerados (alta porcentagem de particulados com granulometria inferior a



0,105 mm). O processo de Sinterização consiste na aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sinter, apresente características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno. O aumento da quantidade de resíduo na carga de mistura gera perda de permeabilidade do leito da mistura, causando queda na produtividade da máquina de sinterização.^(4,5)

Semelhante ao processo de sinterização, a pelletização é um processo de aglomeração onde as características químicas, físicas e metalúrgicas do produto são imprescindíveis para a aplicação direta em fornos siderúrgicos. A utilização de resíduos na aglomeração de pelotas é uma das formas de reciclagem em constante estudo, pois as mesmas constituem uma das matérias primas básicas mais utilizadas na siderurgia.⁽⁶⁾

As pelotas normalmente são utilizadas em processos de redução via altos-fornos, porém podem ser utilizadas como fonte metálica no processo de Aciaria, em adições nos convertedores e/ou carros torpedos. A utilização das pelotas nesta etapa do processo de produção do aço se dá pelo processo de auto-redução, ou seja, colocam-se as pelotas em contato com o banho e o metal em forma de óxido reduz pelas reações de redução, agrega o ferro ao aço e as impurezas à escória.⁽⁷⁾

A fabricação de pelotas com adição de lama de alto-forno em substituição ao carvão combustível na mistura de pelotamento, com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas suficientes para suportar as variáveis dos processos siderúrgicos, é uma alternativa de reciclagem de resíduos e redução de custos neste processo.

1.1 Preparação da Mistura

A mistura das matérias primas é etapa fundamental para obtenção de pelotas com boas propriedades. A intensidade da mistura depende do número de constituintes presentes, sua granulometria e grau de molhamento. Uma distribuição uniforme dos componentes por toda a pelota é muito importante para a uniformidade das reações que ocorrem durante a calcinação da pelota.⁽⁸⁾

1.2 Formação das Pelotas Cruas

O processo de pelotamento baseia-se no princípio da geração contínua de núcleos que crescem até o tamanho desejado. A coesão das partículas se dá pela força capilar do conjunto material-água, em que a água atua como agente de ligação entre as partículas.⁽⁹⁾

Na mistura de pelotamento, a água aloja-se nos interstícios dos grãos à medida que ocorre a mistura. Esses interstícios, que antes estavam preenchidos com Ar, gradualmente são substituídos pela água da mistura. Em maiores concentrações, a água penetra através da área de contato entre as partículas, separando-as. Neste caso ocorre o comportamento plástico excessivo destes corpos.⁽¹⁰⁾

A Figura 2 ilustra o processo de formação de pelotas nos discos de pelletização.

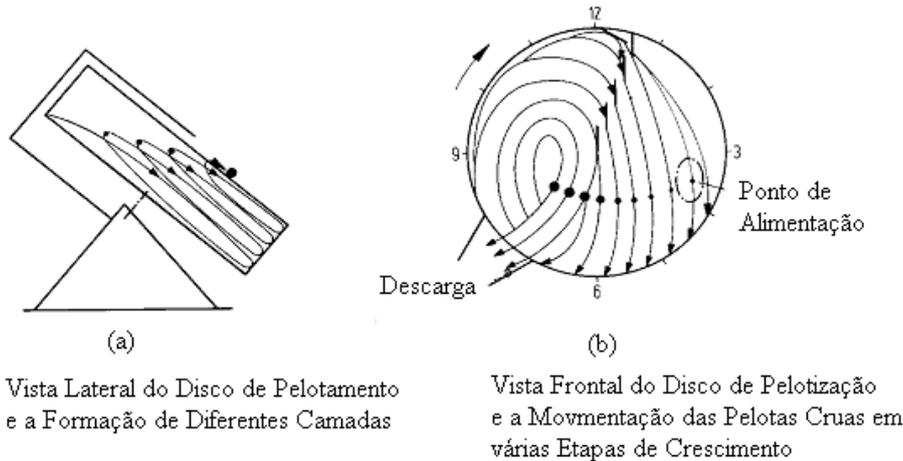


Figura 2. Formação das Pelotas Cruas em um disco pelotizador.⁽¹¹⁾

1.3 Formação das Pelotas Calcinadas

O processo de queima é essencial para que as pelotas adquiram resistência física e mecânica para as posteriores operações de manuseio, estocagem, carregamento, embarque, transporte e descarga no navio e para as pelotas suportem as pressões e os choques térmicos. Dentre os fornos utilizados para o processo de queima das pelotas o forno de grelha, exemplificado na Figura 3, é o mais comum devido suas características permitirem que os perfis de temperatura sejam ajustados devido à grande quantidade de queimadores nas zonas de queima e pré-queima localizados ao longo de todo forno.⁽¹²⁾

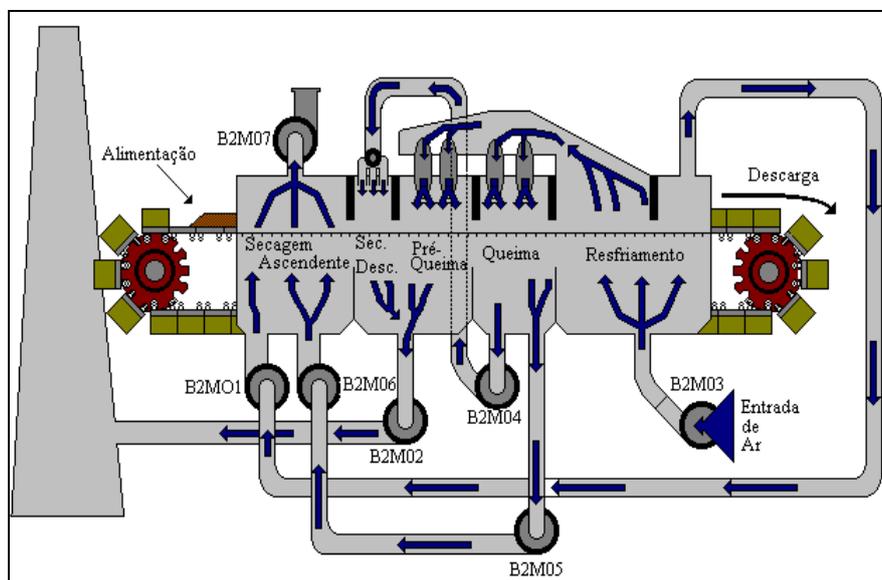


Figura 3. Etapas do processo de pelotização e os principais fluxos gasosos ao longo de em um Forno de Grelha.⁽¹³⁾

1.4 Mecanismo de Endurecimento das Pelotas

A sinterização é um processo de união de partículas quando aquecidas às altas temperaturas. Em uma escala microestrutural, esta ligação ocorre quando os “pescoços” crescem nos pontos de contato entre partículas. Este crescimento provoca importantes mudanças nas propriedades associadas à sinterização.⁽¹⁴⁾



A sinterização das partículas se dá pelos movimentos atômicos que agem para eliminar a elevada energia superficial associada com um pó não sinterizado. A energia superficial por unidade de volume é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. Assim, partículas menores possuem mais energia e sinterizam mais rapidamente do que as partículas maiores. Ou seja, partículas menores de minério de ferro possuem maior energia e quando submetidas a elevadas temperaturas sinterizam mais rápido do que partículas maiores.

A Figura 4 mostra a micrografia por MEV da formação dos pescoços durante a sinterização de duas esferas.

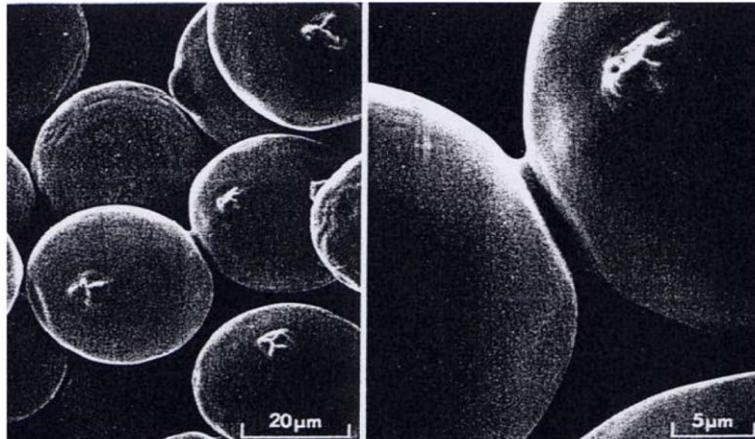


Figura 4. Micrografia obtida em MEV da formação de pescoço entre duas partículas esféricas de mesmo tamanho induzidas pelo processo de sinterização.⁽¹⁴⁾

1.5 Forno de Queima Piloto

Para fabricação de pelotas não convencionais para análises em pequenas proporções, são utilizadas as usinas pilotos de pelletização. Esta usina piloto nada mais é do que um laboratório de simulação de uma usina pelletizadora de grande porte. Na Samarco Mineração os testes de pelletamento e queima são realizados no laboratório chamado Pot Gate. Os principais constituintes do forno podem ser observados na Figura 5.

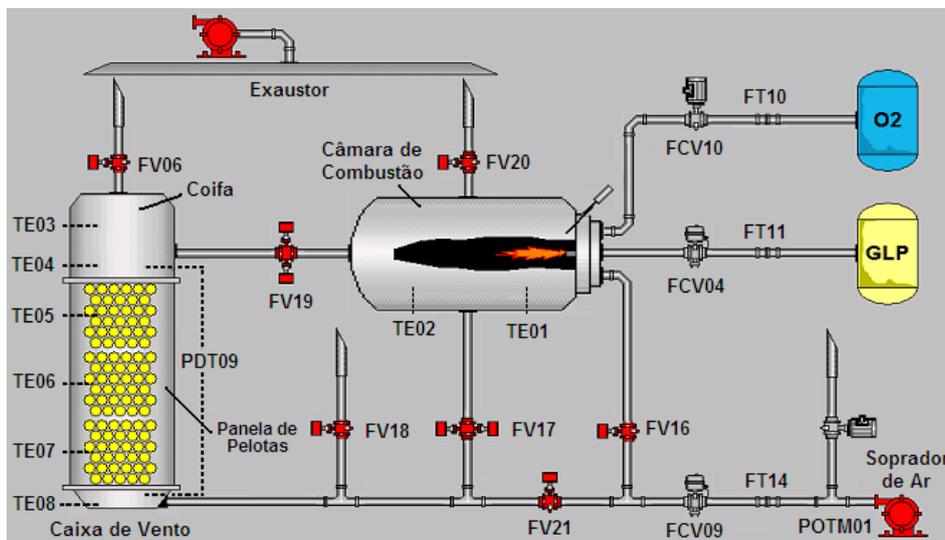


Figura 5. Forno Pot Gate da Samarco Mineração.⁽¹⁵⁾



1.6 Utilização de Pelotas em processos de Aciaria

A incorporação do ferro através da utilização de concentrados de óxidos em processos de Aciaria se dá pela reação do óxido do elemento principal (Ferro) com o redutor dissolvido em um banho metálico (Carbono). O carbono contido no banho metálico atua como o agente redutor do óxido de ferro, incorporando o ferro no banho e liberando o oxigênio combinado com o Carbono.

Reis⁽⁷⁾ utilizou um concentrado de ferro (56% de Fe) e um concentrado de carbono (65% de C) obtido através da separação e concentração da lama de alto-forno da CSN para a fabricação de pelotas calcinadas.

Na Figura 6 é mostrado o fluxo de produção das pelotas na planta piloto de pelletização de resíduos da CSN.



(a) Disco pelletizador



(b) Pelotas secas



(c) Pelotas incandescentes



(d) Pelotas Calcinadas

Figura 6. Produção de pelotas auto-redutoras em Planta piloto da CSN.⁽⁷⁾

Estas pelotas foram produzidas e adicionadas em bateladas de 1000 Kg cada em cada carro-torpedo após o processo de vazamento do gusa. O rendimento mássico foi de 50%, isto é, para cada 1.000 kg de pelotas obtém-se 500 kg de metal. Segundo Reis⁽⁷⁾ com a produção em escala piloto, o preço do metal obtido equivale a 70% do valor com o obtido com sucata externa adquirida para Aciaria LD. Aumentando-se a escala de produção, esta relação se tornará cada vez mais atrativa.

Na Figura 7 apresentam-se fotografias da estação de adição das pelotas no interior do carro-torpedo.



(a) Posicionamento do Carro Torpedo

(b) Pelotas no Fundo do Carro Torpedo

Figura 7. Detalhes da estação de adição das pelotas auto-redutoras nos Carros Torpedos.⁽⁷⁾

Reis⁽⁷⁾ realizou testes de adição destas pelotas em conversores LD, porém a degradação das pelotas durante os processos de armazenagem e manuseio inviabilizou sua utilização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram consideradas as seguintes etapas: Aquisição do resíduo lama de alto-forno; Caracterização química, física e microestrutural deste resíduo; Preparação da mistura de pelotização; Pelotamento da mistura; Primeira fase de testes com parte das pelotas cruas; Queimas das pelotas produzidas; Segunda fase de testes com as pelotas calcinadas; Análise dos resultados e Conclusão.

2.1 Análise do Resíduo

A lama utilizada para o teste foi coletada no pátio de estocagem de resíduos da empresa Arcelormittal Tubarão, homogeneizada e amostrada. As análises feitas para caracterização da Lama foram granulometria, análise química, umidade, MEV e EDS. A caracterização foi realizada no Laboratório do Instituto Federal de Educação tecnológica do Espírito Santo - IFES e no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP.

2.2 Preparação das Misturas

Para comparação dos resultados obtidos no testes de pelotamento com lama de alto-forno, preliminarmente foi efetuado um teste com uma mistura padrão (Pellet feed, bentonita, calcário e Carvão) e dois testes com adição de lama em substituição parcial e total do carvão mineral na mistura de pelotamento. O parâmetro de substituição adotado para cálculo de quantidade de lama a ser adicionada em substituição ao carvão foi à manutenção da quantidade de carbono na mistura.

2.3 Misturas de Pelotamento

Os testes realizados para fabricação das pelotas com adição de lama foram realizados no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Novos Processos e Produtos da empresa Samarco Mineração chamado Pot Grate. Na formação das



misturas de pelotamento a lama foi adicionada em substituição ao carbono da mistura na proporção de 50% de carvão + 50% de lama e 0% de carvão + 100% lama.

2.4 Ensaios nas Pelotas Calcinadas

Os testes realizados nas pelotas produzidas foram o de Tamboramento, Inchamento, Resistência a Compressão antes e após Redução, Porosidade, LTD (Low Temperature Degradation), Redutibilidade e Análise Química. Estes testes são realizados para determinar o comportamento das pelotas calcinadas no manuseio até o carregamento do forno e dentro do reator.

3 RESULTADOS

No teste de pelotamento não houve qualquer dificuldade na aglomeração e formação das pelotas com adição de lama. O produto obtido neste teste foi uma pelota crua homogênea e de granulometria normal, conforme Figura 8.



Figura 8. Pelotas cruas produzidas com adição de lama de alto-forno.

Nos ensaios de resistência à compressão, apresentados nos gráficos da figura 9 notam-se um ganho nas propriedades mecânicas das pelotas de maior granulometria, porém na parcela de granulometria menor nota-se uma perda gradativa com a substituição do carvão pela lama de alto-forno.

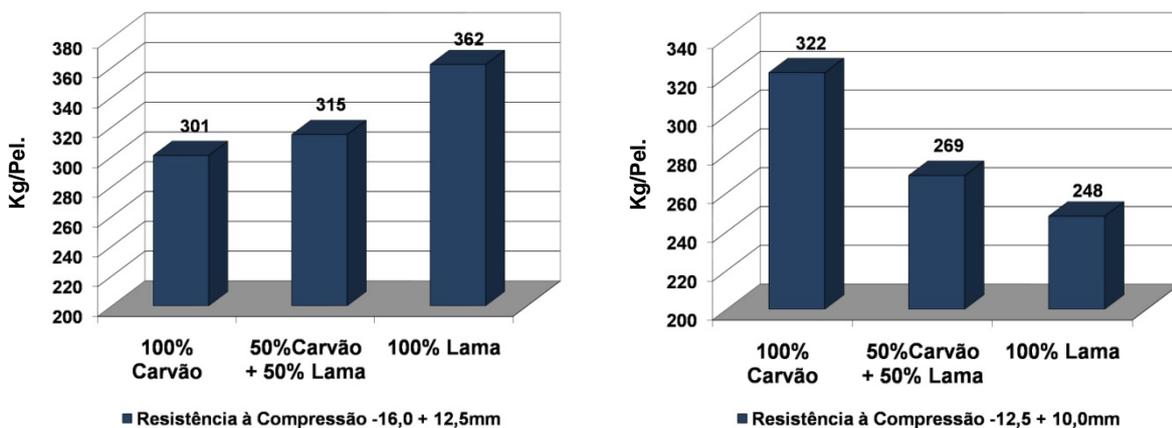
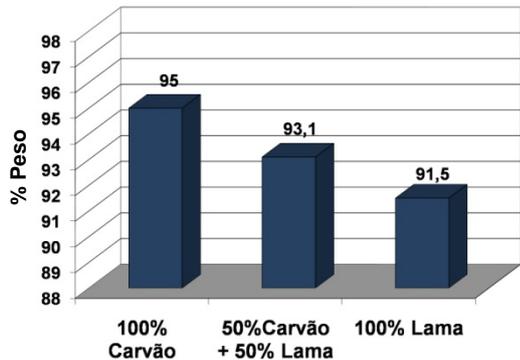


Figura 9. Variação da resistência à compressão das pelotas calcinadas em relação à quantidade de lama de alto-forno na mistura de pelotamento.

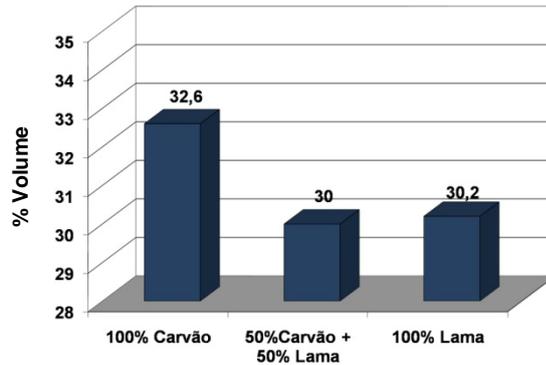


A Figura 10(a) apresenta os resultados do ensaio de Tamboramento que corroboram com os resultados de resistência a compressão de -12,5 mm a 10,0 mm e mostram a tendência de queda das propriedades mecânicas com o aumento da participação da Lama de Alto-forno na mistura de pelotamento.

Em relação à Porosidade, as pelotas produzidas com 50% de Lama e 50% de carvão sofreram uma queda no volume de poros que praticamente não se alterou com a substituição total do carvão, conforme Figura 10(b).



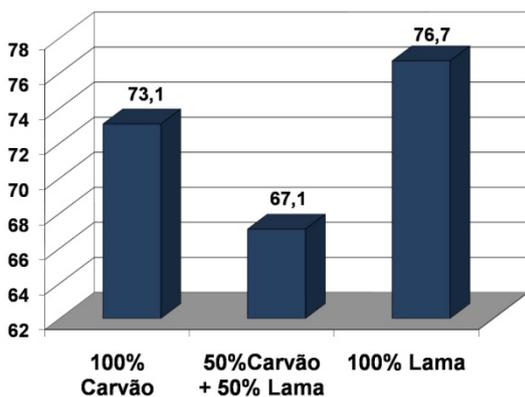
(a) Índice de Tamboramento



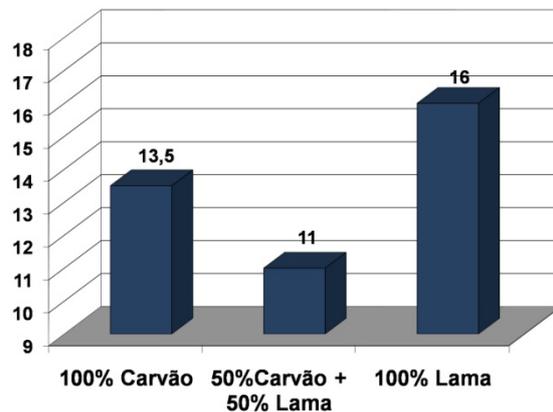
(b) % de Porosidade das Pelotas

Figura 10. Variação das propriedades físicas das pelotas calcinadas em relação à quantidade de lama de alto-forno na mistura de pelotamento.

A queda no volume de poros dificulta a reação com o gás redutor quando as pelotas estão no interior do reator, entretanto as pelotas produzidas com substituição de todo o carvão pelo resíduo aumentaram seu grau de redução e também a resistência à compressão após redução, conforme exemplificado nos gráficos das Figuras 11(a) e 11(b).



(a) Grau de Redução



(b) Resistência a Compressão após Redução (Kgf)

Figura 11. Variação das propriedades de redutibilidade das pelotas calcinadas em relação à quantidade de lama de alto-forno na mistura de pelotamento.

No teste de queima das pelotas houve dificuldade na separação de alguns “cachos” de pelotas calcinadas, foi observado um excesso de sinterização na região periférica o que indica uma concentração excessiva de lama nesta região causada pela heterogeneidade granulométrica do resíduo.



4 DISCUSSÃO

Os ensaios de resistência a compressão e tamboramento mostraram o aumento da Tendência de degradação no manuseio das Pelotas calcinadas com o aumento da adição de lama e retirada do carvão mineral.

A queda da porosidade não afetou os resultados nos ensaios de redutibilidade que tiveram um aumento considerável com a substituição total da lama pelo carvão. Estes resultados podem ser associados a um aumento no número de trincas e tensões internas na pelota devido à alta umidade da lama e heterogeneidade granulométrica, entretanto a resistência a compressão após a redução aumentou com a substituição total da lama pelo carvão.

Segundo Geerdes, Toxopeus e Van der Vliet⁽⁹⁾ e Biswas⁽¹⁶⁾ para utilização de pelotas em altos-fornos o grau de redutibilidade das pelotas deve ser acima de 70% entretanto o percentual de tamboramento na granulometria acima de 6,3mm deve ser maior que 95%. As pelotas obtidas que tiveram os melhores resultados foram 76,7% de redutibilidade com 100% de lama de alto-forno e 93,1% de tamboramento com 50% de lama e 50% de carvão mineral.

Para utilização em Aciaria como fonte metálica, em substituição parcial da sucata, estes resultados de resistência mecânica podem não ser suficientes. Reis⁽⁷⁾ efetuou a adição em convertedor de pelotas calcinadas produzidas com concentrados de ferro e carbono, obtidos através da lama de alto-forno da CSN, e não percebeu nenhum ganho em volume de aço, devido provavelmente, a degradação da pelotas nas operações de manuseio sendo succionadas pelo sistema de exaustão de partículas do convertedor.

5 CONCLUSÃO

A Fabricação de Pelotas Calcinadas em laboratório com Adição de Lama de Alto-forno em substituição parcial e total do combustível carvão mineral é possível sem qualquer dificuldade de processos e equipamentos.

A propriedade mecânica de Resistência a compressão entre 12,5 mm a 10,0 mm pode ter sido afetada pela heterogeneidade granulométrica da lama, causando um acúmulo de lama em determinada faixa granulométrica, já que entre 16 mm e 12,5 mm a resistência a compressão das pelotas calcinadas se elevou.

O índice de tamboramento pode ter sido afetado pela umidade elevada e heterogeneidade granulométrica, gerando trincas e elevadas tensões internas, causadas pela sinterização heterogênea da pelota.

Para aplicações em processos siderúrgicos em larga escala, novos testes devem ser efetuados visando maximizar as propriedades das pelotas obtidas e/ou identificar a possibilidade de uso em processos de menor solicitação considerando a redução de custo de combustível e eliminação de passivo ambiental.

REFERENCIAS

- 1 VIEIRA, A. T.; NASCIMENTO, F. A.; ECHTERNACHT, J. H.; OLIVEIRA, J. R.; REIS, W. L.; CASTRO, E. F.; **Beneficiamento de Lama de Alto-Forno para Obtenção de Concentrados de Carbono e Ferro**. Seminário de Redução de Minério de Ferro. Salvador – BA, 2007.
- 2 ARCELORMITTAL TUBARÃO. Fluxo de produção. Disponível em: <http://www.cst.com.br/usina/fluxo_producao/popfluxo.htm>. Acesso em: 15 nov. 2009.



- 3 NASCIMENTO, R.C.; MOURÃO, M.B.; TAKANO, C. **Caracterização e viabilização para reciclagem de resíduos sólidos siderúrgicos.** CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2000.
- 4 HONORATO, A. P.; **Adequação granulométrica das matérias-primas e do Sistema de segregação contínua (i.s.f), para Melhorias na produtividade e qualidade do sinter Para os altos-fornos.** Dissertação de Mestrado. UFMG,2005.
- 5 TAKANO, C.; CAPOCCHI, J. D.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; LENZ, G.; SANTOS, D. M.; **A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS SÓLIDOS.** Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo, 2000.
- 6 MONTEIRO, A.; BRAGA, A.; CARVALHO, B.; **Modelagem neural de um processo de produção de pelotas de minério de ferro.** VII Seminário de Automação da ABM. Outubro de 2003. São Paulo.
- 7 REIS, W. L.; **Otimização da reciclagem de resíduos siderúrgicos por Redução carbotérmica.** UFSCAR. Tese de Doutorado. São Carlos, 2008.
- 8 SÁ, K. G.; COSTA, G. M.; VIEIRA, C. B.; **Efeito da composição mineralógica na resistência a compressão de pelotas de minério de ferro.** Revista: Tecnologia em Metalurgia e Materiais. São Paulo, 2004.
- 9 GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VAN DER VLIET, C.; **Modern Blast Furnace Ironmaking.** Germany: Verlag Stahleisen GmbH, 2004.
- 10 FONSECA, M.C.; **The influence of pellet feed size distribution in the agglomeration process.** Aistech 2005 iron & steel technology conference and exposition. USA. Charlotte, 2005.
- 11 MEYER, K.; **Pelletizing of Iron Ores.** SPRINGER-VERLONG. Berlin, 1980.
- 12 COSTA, A. G. D.; ROCHA, J. M.; BONFIOLI, L.; VIEIRA, C. B.; **A Importância do modelamento geológico-tipológico no controle de qualidade dos concentrados e pelotas de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.** XXIV Seminário de redução e matérias primas da ABM. Belo Horizonte, 1998.
- 13 ARAÚJO, Luiz A. de. **Manual de siderurgia.** Vol. 1. São Paulo, Ed. Arte & Ciência, 1997.
- 14 GERMAN, R.M.; **Fundamentals of Sintering.** Ceramics and Glasses Handbook, V. 4, 1983.
- 15 GONÇALVES G.; FERREIRA, P.; **Controle inteligente aplicado ao processo de queima de pelotas no forno Pot Grate.** Samarco Mineração S.A. UFES.
- 16 BISWAS, A. K.; **Principles of Blast Furnace Ironmaking.** Australia: Cootha Publishing House, 1981.