



ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE PELotas FABRICADAS COM ADIÇÃO DE LAMA DE ALTO-FORNO¹

Hermes Joaquim Ferreira Filho²
Felipe Fardin Grillo³
Ramiro Conceição Nascimento⁴
Jorge Alberto Soares Tenório⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é mostrar os resultados obtidos na análise de pelotas fabricadas com adição de lama de alto-forno em substituição parcial e total do carvão na mistura de pelotamento. Esta lama é um resíduo gerado no processo de alto-forno, não tem aplicação economicamente viável 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. Nos testes realizados nas pelotas foi observado queda de resistência e variação de propriedades metalúrgicas com a substituição do carvão pela lama.

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

ANALYSIS OF PROPERTIES OF PELLETS MANUFACTURED WITH ADDITION BLAST FURNACE MUD

Abstract

The objective of this paper is describes the results obtained in the analysis of pellets manufactured with addition blast furnace mud, in partial and total substitution of coal in the pellet mixture. This Mud is a waste generated in the Blast Furnace process, have no use economically viable 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. In tests it was performed on the pellets observed to decrease resistance and variation of metallurgical properties with the substitution of coal by mud.

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

¹ *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, 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 *Tecnólogo, Mestrando em Engenharia 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 do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – IFES.*

⁵ *Engenheiro, Ph.D, Professor do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP.*

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.

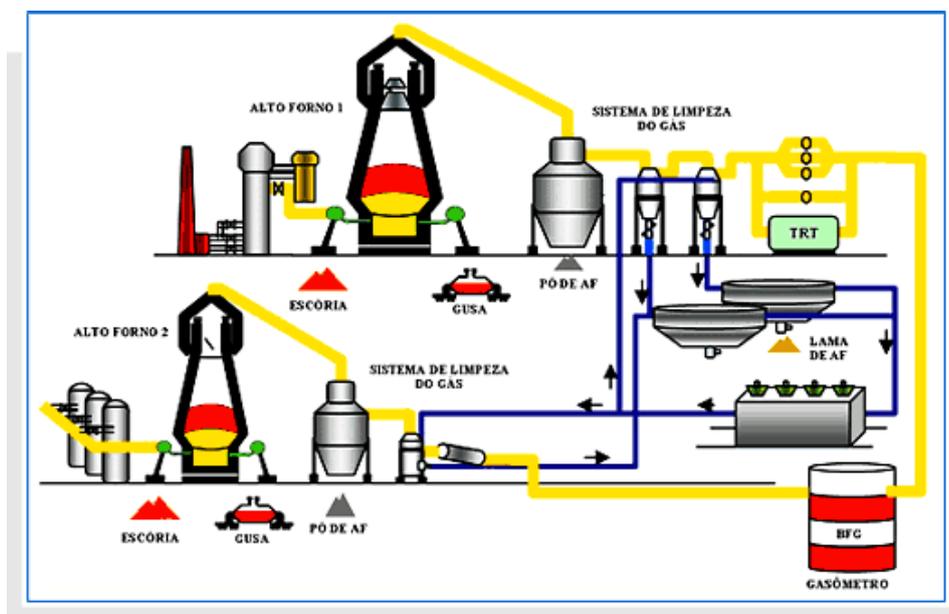


Figura 1. Vista do sistema de lavagem de gases de um Alto-Forno.⁽²⁾

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, apresenta 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 pelotização 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 ferro na forma de óxido é reduzido agregando 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 de Pelotamento

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 pelotização.

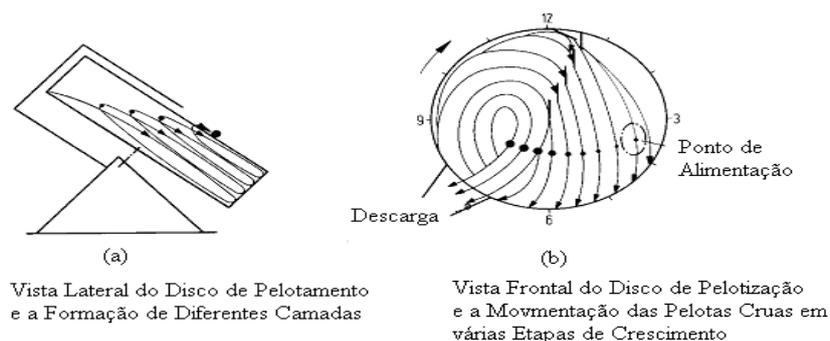


Figura 2. Formação das Pelotas Cruas em um disco pelotizador.⁽¹¹⁾

1.3 Formação das Pelotas Calcinadas

O processo de queima é essencial para que a 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⁾

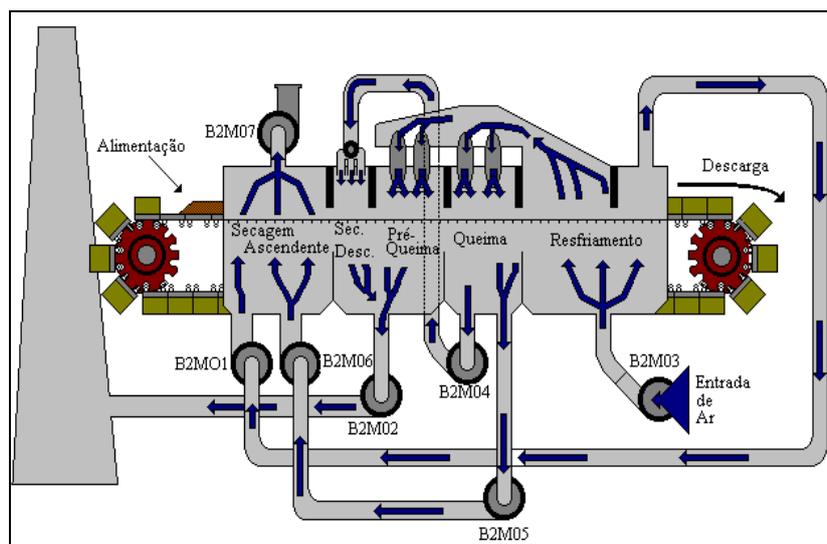


Figura 3. Etapa do processo de pelotização: principais fluxos gasosos ao longo de em um Forno de Grelha.⁽¹³⁾

1.4 Mecanismo de Endurecimento das Pelotas

O endurecimento das pelotas durante o processo de queima ocorre pelo processo de sinterização das partículas. Este processo ocorre por difusão atômica e/ou por formação de fases líquidas. No processo de difusão, quando as pelotas são aquecidas e a temperatura fica próxima ao ponto de fusão os átomos difundem de uma partícula para outra formando pontes entre elas. Na formação de fases líquidas o endurecimento ocorre devido o reagrupamento das partículas (diminuição do volume da pelota), reações químicas e precipitação de soluções.⁽¹⁴⁾

A Figura 4 mostra a micrografia por MEV da formação dos pescoços (ou pontes) durante a sinterização de duas partículas esféricas.

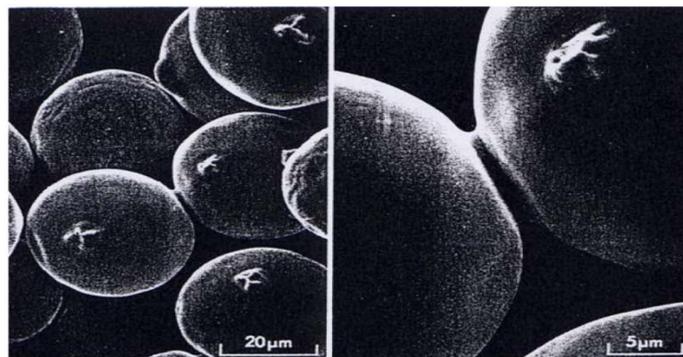


Figura 4. Micrografia obtida em MEV da formação de pontes entre partículas esféricas de mesmo tamanho induzidas pelo processo de sinterização.⁽¹⁵⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas pelotas produzidas no laboratório da empresa Samarco Mineração. As matérias primas combustíveis para produção das pelotas foram o carvão mineral e o resíduo lama de alto-forno. As pelotas produzidas foram analisadas em ensaios físicos e metalúrgicos.

2.1 Preparação das Misturas de Pelotamento

Para comparação de resultados foram feitas três misturas de pelotamento com diferentes percentuais do combustível carvão mineral. As misturas foram constituídas de Pellet Feed, Bentonita, Calcário e combustível (Carvão e Lama).

A substituição do carvão pela lama foi efetuada considerando o percentual de carbono presente no resíduo. A primeira mistura de pelotamento foi considerada como Mistura Padrão e foi constituída de 100% de carvão mineral e 0% de lama. A segunda e terceira mistura de pelotamento foram efetuadas substituindo o carvão pela lama em 50% de lama e 50% de carvão, 100% de lama e 0% de carvão, respectivamente.

A lama foi adicionada sem qualquer preparação prévia, ou seja, foi colocada na forma bruta, sem peneiramento ou secagem, com umidade de 18,1%. O carvão mineral continha umidade de 1,5%. O peso de carbono nas 03 misturas de pelotamento foi mantido em 10,5 kg/ton Pel.

2.2 Queima da Pelotas

Para fabricação de pelotas não convencionais para análises em pequenas proporções, são utilizadas as usinas pilotos de pelotização. Esta usina piloto nada mais é do que um laboratório de simulação de uma usina pelotizadora de grande porte. Os testes de queima foram efetuados no forno piloto do laboratório de pesquisa e desenvolvimento de novos processos e produtos da Samarco Mineração, chamado *Pot Grate*.

2.3 Determinação das Propriedades Físicas das Pelotas Cruas

Para análise das propriedades físicas das pelotas cruas, com e sem adição de lama de alto-forno, foram realizados os testes de resiliência e resistência à compressão.

2.3.1 Teste de resiliência

No teste de resiliência ou teste de resistência a quedas um lote de 20 pelotas é retirada de uma amostra, cada pelota é solta de uma altura de 45 cm sucessivas vezes até que ocorra o aparecimento de trincas finalizando o teste. O número de quedas que as pelotas suportam sem apresentar trincas é o valor da resiliência. O valor médio é considerado como o resultado.⁽¹⁶⁾

2.3.2 Resistência à compressão

No teste de resistência à compressão das pelotas cruas é utilizada uma prensa manual. As pelotas são submetidas à ação de uma força compressiva uniaxial. Este procedimento é repetido em 20 pelotas de uma amostra e o resultado é a valor médio dos testes. Para o teste com pelotas secas é necessário que as pelotas passem por uma etapa de secagem em estufa a 100°C durante 2 horas antes da realização do teste.

O teste de compressão é realizado em pelotas cruas úmidas e secas. Em pelotas úmidas o ensaio permite uma avaliação da resistência das pelotas cruas úmidas às etapas de transporte e pontos de transferências do disco de pelotamento até a alimentação na grelha. Nas pelotas secas permite uma avaliação da resistência nas etapas de endurecimento até a queima.⁽¹⁶⁾

2.4 Determinação das Propriedades Físicas das Pelotas Calcinadas

Para análise das propriedades físicas da pelotas calcinadas, com e sem adição de lama de alto-forno, foram realizados os testes de resistência à compressão, tamboramento e porosidade.

2.4.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão a frio possibilita a avaliação da integridade física das pelotas nas etapas de manuseio e transporte após a saída do carro de grelha. A norma referência é a ISO 4700.

O ensaio consiste na colocação, individualmente, de 100 pelotas de uma amostra em prensa submetida à ação de força compressiva uniaxial. A velocidade de aproximação das placas é constante entre 10 a 20 mm/min, até a ruptura da pelota. O valor médio do ensaio é considerado o resultado final.

2.4.2 Ensaio de tamboramento

O ensaio de tamboramento é utilizado para avaliar a resistência das pelotas ao atrito durante as etapas de transporte, manuseio e carregamento em reator, a norma referência é a ISO 3271.

O teste consiste em colocar uma massa de 15 kg de pelotas, de granulometria entre 6,3 mm e 19,0 mm, em um tambor de abrasão e submetê-las a 200 rotações, a uma velocidade de rotação de 25 rpm. O resultado é expresso como o percentual retido na peneira de 6,3 mm.

2.4.3 Porosidade

O ensaio consiste em selecionar 18 pelotas sem trincas, com faixa granulométrica de -12,5 +10,0mm. As mesmas são lavadas em água, secas em estufa à 100°C por 60 minutos e pesadas. Feito isto, as mesmas são colocadas em um recipiente com água destilada, aquecidas até ebulição e resfriadas. O excesso de água é retirado e efetua-se a pesagem das pelotas em uma balança hidrostática. O resultado é obtido pela diferença da massa das pelotas secas pelas úmidas considerando a densidade

da água de 1 gr/cm^3 . A quantidade de água que entrou nos poros determina o volume da porosidade existente.⁽¹⁶⁾

O ensaio de porosidade determina a quantidade de vazios dentro das pelotas, o que influencia na resistência física e seu comportamento em ambientes redutores.

2.4 Ensaio de Redutibilidade e Resistência à Compressão após Redução

Os ensaios de redutibilidade e compressão após redutibilidade foram realizados para determinação do comportamento da pelota em ambiente redutor, tais como em um alto-forno. O teste de resistência à compressão após redução consiste em submeter as pelotas oriundas do teste redutibilidade, a uma força uniaxial até sua ruptura.

O teste de redutibilidade consiste essencialmente na perda de peso de uma amostra de pelotas, provocada pela remoção do oxigênio combinado com ferro, através de um gás redutor. Uma amostra de 500g de pelotas, de $-12,5 +10,0\text{mm}$, é colocada na presença de gases $\text{CO}(30\%)$ e $\text{N}_2(70\%)$ a 900°C por 60 minutos, apresentando um percentual de redução da amostra. A norma referência é a ISO 7215.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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, conforme Figura 5.



Figura 5. Pelotas cruas produzidas com adição de lama de alto-forno.

3.1 Resiliência

No teste de Resiliência ou resistência a quedas, o resultado obtido com as pelotas com 100% de lama foi de 2,6 quedas por pelotas contra 2,8 quedas com 100% de carvão, conforme o gráfico da Figura 6.

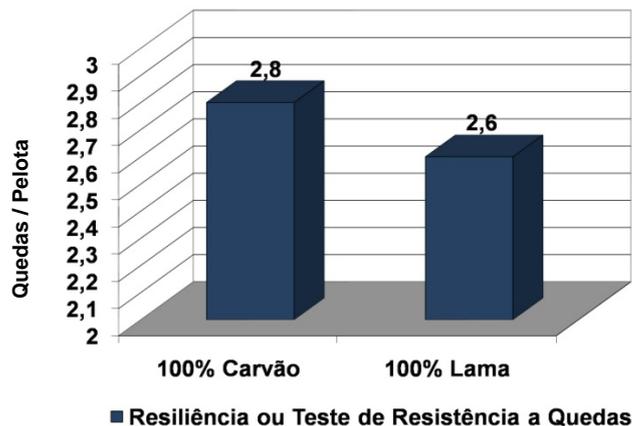


Figura 6. Variação da resiliência das pelotas cruas em relação à substituição total do carvão mineral por lama de alto-forno.

Estes resultados mostram que a lama reduziu a resistência das pelotas nas etapas entre o disco de pelotamento e a grelha, considerando o processo industrial.

3.2 Resistência a Compressão

A Figura 8 apresenta os gráficos com os resultados de resistência à compressão das pelotas cruas úmidas e secas, com granulometria entre 12,5 mm à 16 mm.

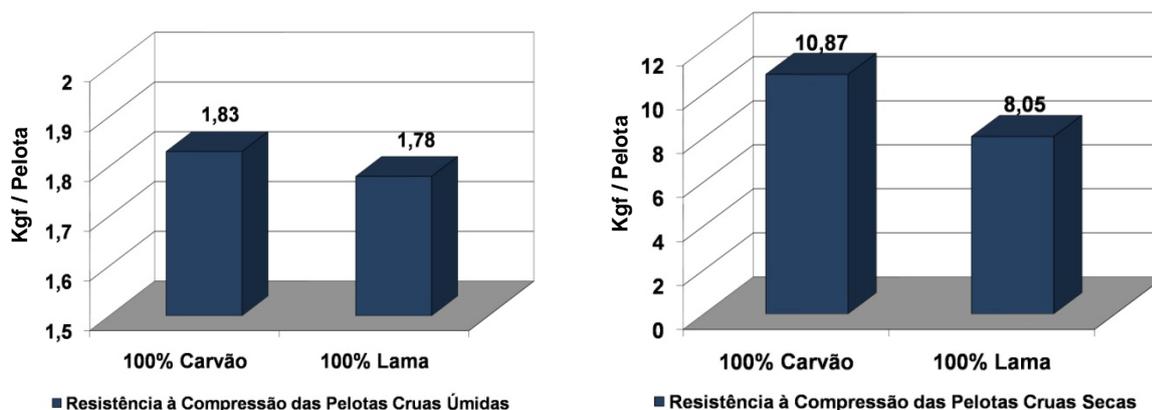


Figura 7. Variação da resistência à compressão das pelotas cruas úmidas e secas em relação à substituição total do carvão mineral por lama de alto-forno.

Os resultados dos testes mostram a perda de resistência mecânica das pelotas com 100% de lama e 0% de carvão. O primeiro teste, semelhante ao teste de resiliência, mostra a queda da resistência nas primeiras etapas do processo até a chegada na grelha. O segundo teste mostra a perda de resistência das pelotas cruas nas diversas etapas de secagem e endurecimento.

3.3 Queima das Pelotas

No teste de queima das pelotas houve dificuldade na separação de alguns “cachos” de pelotas calcinadas com 100% de lama e 0% de carvão, foi observado um excesso de sinterização na região periférica o que indica uma concentração

excessiva de lama. As características visuais (coloração e textura) foram semelhantes as pelotas fabricadas com a mistura padrão, conforme Figura 8.



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

3.4 Resistência a Compressão das Pelotas Calcinadas

No ensaio de resistência à compressão apresentado no gráfico da figura 9, nota-se uma perda gradativa de resistência de 322 Kgf/pelotas para 248 Kgf/pelotas com a substituição do carvão pela lama de alto-forno nas pelotas de 12,5 mm à 10 mm.

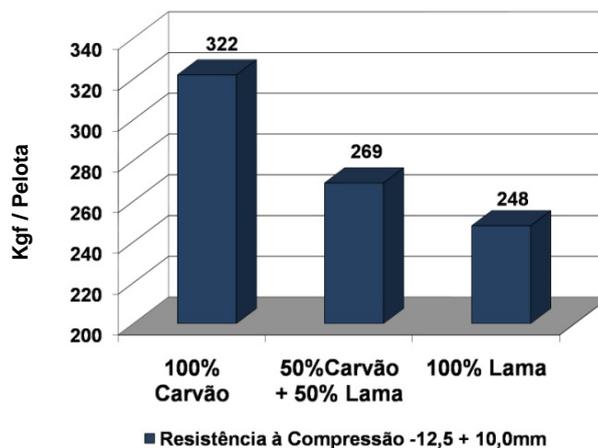


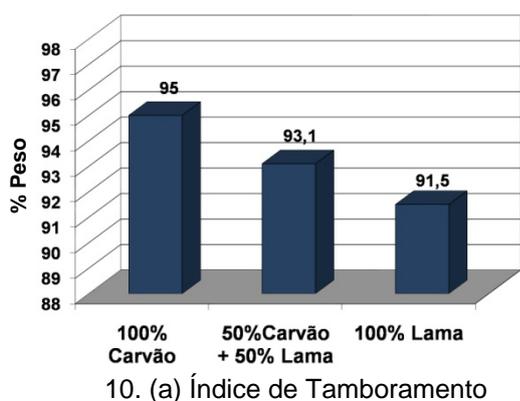
Figura 9. Variação da resistência à compressão das pelotas calcinadas em relação à quantidade de lama de alto-forno na mistura de pelotamento.

Estes resultados mostram o aumento da tendência a degradação no manuseio das Pelotas calcinadas com o aumento da adição de lama e retirada do carvão mineral. Esta queda pode estar associada à elevada umidade da lama causando vazios nas pelotas durante a etapa de secagem.

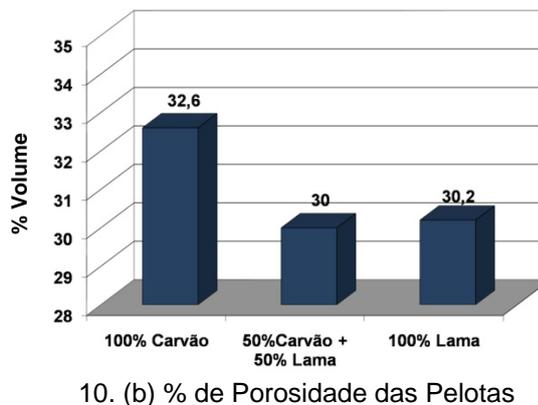
3.5 Ensaio de Tamboramento e Porosidade

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 as pelotas com 100% de lama e 0% de carvão, conforme Figura 10(b).



10. (a) Índice de Tamboramento



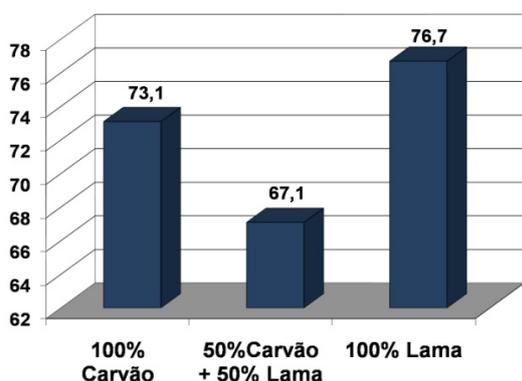
10. (b) % de Porosidade das Pelotas

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

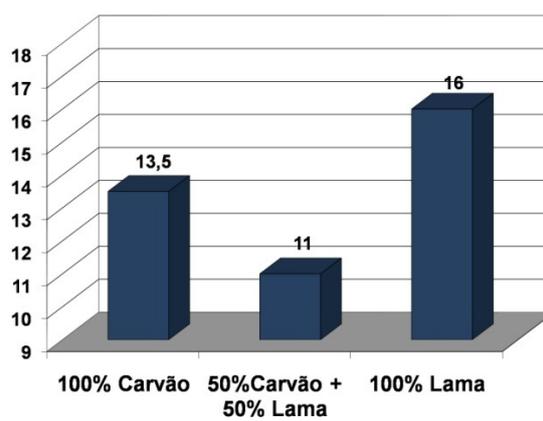
Segundo Geerdes, Toxopeus e Van Der Vliet⁽⁹⁾ o percentual de tamboramento mínimo necessário para utilização de pelotas em alto-forno deve ser maior que 95%. As pelotas obtidas que tiveram os melhores resultados foram 93,1% de tamboramento com 50% de lama e 50% de carvão mineral.

3.6 Grau de Redução

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 100% de lama e 0% de carvão aumentaram seu grau de redução e também a resistência à compressão após redução, conforme exemplificado nos gráficos das Figuras 11(a) e 11(b).



11. (a) Grau de Redução (%)



11. (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.

Segundo Biswas⁽¹⁷⁾ para utilização de pelotas em altos-fornos o grau de redutibilidade das pelotas deve ser acima de 70%. Foram obtidas pelotas com grau



de redutibilidade de 76,7% com substituição de 100% de carvão pela de lama de alto-forno.

4 CONCLUSÃO

A lama de alto-forno é um material que pode ser usado na fabricação de pelotas calcinadas, porém degrada as propriedades físicas das pelotas causando um aumento da tendência à degradação por manuseio. Esta queda pode estar associada à forma bruta de adição da lama. A elevada umidade pode gerar vazios demasiados grandes durante a etapa de secagem causando queda das propriedades mecânicas. Novos estudos podem ser realizados para determinação de processos siderúrgicos capazes de utilizar pelotas com as propriedades obtidas neste trabalho, considerando os ganhos monetários e ambientais.

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 Iren 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 BATTERHAM, R. J.; **Modeling the development of strength in pellets**. Metallurgical Transactions, September, 1986.



- 15 GERMAN, R.M.; **Fundamentals of Sintering**. Ceramics and Glasses Handbook, V. 4, 1983.
- 16 FONSECA, M. C.; **Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto, 2004.
- 17 BISWAS, A. K.; **Principles of Blast Furnace Ironmaking**. Australia: Cootha Publishing House, 1981.