

# RECICLAGEM DE LAMA DE ACIARIA ATRAVÉS DE AGLOMERAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM ALTOS-FORNOS<sup>1</sup>

*Flávia Oliveira Dias<sup>2</sup>*

*Aline Cristina Pereira Sousa de Caux<sup>3</sup>*

*Robson Santos<sup>4</sup>*

*Pedro José Nolasco Sobrinho<sup>5</sup>*

## Resumo

Pesquisas visando agregar valor aos resíduos sólidos industriais vêm sendo realizadas como forma de minimização dos impactos ambientais causados pela disposição destes resíduos em aterros. Na indústria siderúrgica, dentre os resíduos em potencial pode-se destacar as poeiras e lamas de alto-forno e de aciaria. O presente estudo consiste inicialmente na caracterização de três tipos de lama de aciaria de duas diferentes empresas siderúrgicas brasileiras, contendo cerca de 60% de ferro total, através de técnicas de análise química por via-úmida, fluorescência de raios-x por energia dispersiva e análises físicas. Posteriormente foi proposto um método de reaproveitamento destes resíduos através da sinterização, onde foram gerados dois produtos sinterizados. Os produtos obtidos apresentaram propriedades químicas e físicas como resistência física, porosidade, faixa granulométrica favoráveis para utilização em altos-fornos como fonte de ferro. Por se tratar de um material sinterizado trata-se de uma vantagem metalúrgica comparativamente ao minério de ferro para utilização no alto-forno, além da contribuição para diminuição do passivo ambiental de siderúrgicas.

**Palavras-chave:** Lama de aciaria; Reciclagem; Alto forno; Sínter.

## SLUDGE STEEL RECYCLING BY AGGLOMERATION FOR USE IN BLAST FURNACES

### Abstract

Researches aiming to add value to industrial solid waste have been made as a way of minimizing environmental impacts caused by disposal of waste at landfills. In the steel industry, among the potential waste can be highlighted dusts and sludges from blast furnace and steelmaking. In present study was evaluated the characterization of three steel sludge containing about 60% of iron, by chemical analysis, energy dispersive x-ray fluorescence and physical tests. Subsequently was proposed a method to reusing the wastes through the sintering. The results showed that the products has high resistance and porosity, appropriate range of particle size and chemical composition to utilization in the blast furnace adding iron to the bath, reducing the consumption of high cost products and therefore reducing the environmental impacts.

**Key words:** Sludge steel; Recycling; Blast furnace; Sinter.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Grupo Vamtec.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Industrial, Grupo Vamtec.

<sup>4</sup> Graduando em Administração de Empresas, Grupo Vamtec.

<sup>5</sup> Pós-doutor e Doutor em Engenharia - Metalurgia e Materiais. Grupo Vamtec.

## 1 INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos é atualmente uma preocupação para as empresas, que sofrem pressões para tomarem providências e reduzir os impactos ambientais gerados. Pesquisas visando agregar valor e qualidade aos resíduos sólidos industriais e urbanos têm ganhado espaço em muitos laboratórios e instituições com trabalhos que demonstram o grande potencial do investimento na tecnologia de seu reaproveitamento.<sup>(1)</sup>

O aumento da produção de aço provoca um conseqüente aumento da produção de resíduos.<sup>(2)</sup> No ano de 2009, a geração de grande volume de resíduos e co-produtos na siderurgia, cerca de 640 kg/tonelada de aço contribuiu para a geração de quase 22 milhões de toneladas de resíduos no Brasil.<sup>(3)</sup>

Os resíduos gerados pelas siderúrgicas podem ser classificados em três grandes grupos; os ditos recicláveis contendo ferro, os finos de coque e as escórias. Entre os recicláveis contendo ferro estão: as poeiras e lamas de alto-forno e de aciaria; a lama de tratamento de água de laminação; poeiras de sinterização; e outros.<sup>(4)</sup> As lamas de aciaria são resíduos da indústria siderúrgica geradas no sistema de despoeiramento dos conversores que apresentam consideráveis teores de ferro total, em torno de 60%.<sup>(5)</sup> Empresas que não desenvolveram formas de reciclar estes resíduos acabam destinando-os à deposição, criando um sério problema ambiental, visto que sua geração é considerável, chegando a valores da ordem de 36 kg/t de aço produzido. Um dos principais problemas para a reciclagem da lama de aciaria no próprio processo siderúrgico é o seu elevado teor de umidade.<sup>(6)</sup> Um outro problema também é a fina granulometria do resíduo.

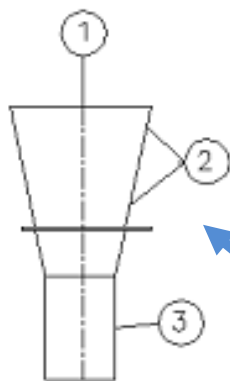
Há pouco relato na literatura sobre sinterização de lamas siderúrgicas somente. Este estudo consiste inicialmente na caracterização da conhecida lama fina de aciaria, utilizando análise química por via-úmida, fluorescência de raios-x por energia dispersiva e caracterização física. Após avaliação dos resultados foram definidas as misturas experimentais utilizadas para serem testadas em escala laboratorial e posteriormente em escala industrial, através de sinterização.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dos trabalhos utilizou-se as lamas de aciaria de duas empresas. Da primeira empresa foram utilizadas materiais em duas faixas granulométricas denominadas Lama A e Lama B. O material da segunda empresa foi denominado Lama C. As lamas A e B foram classificadas em peneira vibratória com malha de 6,0 mm e a Lama C foi classificada em peneira com malha de 12 mm, a fração passante após classificação foi caracterizada. Realizou-se análise de umidade em balança com dispositivo de secagem por infravermelho, modelo Ohaus, MB 35. Em seguida foi feita análise granulométrica em agitador de peneiras Bertel, série 9504. As análises químicas foram realizadas por via-úmida e fluorescência de raios-x por energia dispersiva (óxido de zinco e de alumínio), equipamento EDX 800HS da Shimadzu. Realizou-se ainda avaliação da massa específica aparente – MEA.

Após caracterização das lamas iniciou-se a etapa de sinterização em escala piloto. O equipamento utilizado (Figura 1) é composto por uma cuba móvel com volume de 62 litros, ligado por uma tubulação a um exaustor que faz a sucção do ar através da cuba, passando pela caixa de vento. Nesta tubulação estão posicionados dois vacuômetros, com faixa de medição de 0 mm H<sub>2</sub>O a 2000 mm H<sub>2</sub>O, resolução de

20 mm H<sub>2</sub>O. Uma placa de orifício é utilizada no sinterizador para medição de vazão. Termopares Tipo K com faixa de medição de 0°C até 1.300°C estão posicionados em pontos estratégicos no sinterizador e ligados a indicadores de temperatura com resolução de 1°C. O processo de sinterização consiste em aglomerar as partículas minerais numa massa porosa, pela fusão incipiente, causada pelo calor resultante da queima de combustível a elas adicionada.<sup>(7-9)</sup> Definiu-se a fonte de carbono a ser utilizada como combustível na carga, a formulação, a quantidade de sínter de retorno e a quantidade de carvão vegetal de ignição a serem utilizados no processo. Foi definida também uma formulação utilizando uma mistura das Lamas A e B (Formulação A) e uma formulação utilizando somente a Lama C (Formulação B) com base no teor final de Fe objetivado para o sínter.



- 1 – Cuba  
2 – Termopares  
3 – Caixa de vento



**Figura 1.** Forno sinterizador piloto do Centro de Pesquisa da VAMTEC S/A.

Após avaliação da massa com carga base de 85 kg as matérias-primas foram adicionadas em um misturador tipo betoneira com capacidade para 120 litros e homogeneizadas durante 5 minutos a seco, em seguida iniciou-se o processo de adição de água gradativamente até obtenção de uma mistura homogênea e pelletizada (Figura 2), mantendo-se sob mistura por mais 10 minutos, totalizando 15 minutos. A umidade na mistura é importante para controlar a permeabilidade da camada, fazendo as partículas finas aderir as mais grossas proporcionando a micropelletização.<sup>(8,10)</sup>



**Figura 2.** Misturas de lamas para sinterização.

Após a homogeneização da mistura iniciou-se o carregamento do forno sendo adicionada uma camada de 5 kg de sínter de retorno sobre a grelha. Esta camada, denominada *bedding* ou falsa grelha é necessária para filtrar parte dos gases inerentes ao processo de sinterização, proteger e evitar a aderência da mistura a sinterizar nas grelhas, garantindo que estas não estarão expostas a temperaturas tão elevadas e melhorando a eficiência dos coletores de pó prolongando a vida do equipamento.<sup>(7,8)</sup> Em seguida adicionou-se a mistura homogeneizada e sobre esta 2 kg de carvão vegetal para ignição, que ocorreu através da utilização de um bico queimador de GLP. Uma vez iniciada a ignição na parte superior da carga, a combustão prossegue à medida que o ar entra em contato com as partículas de combustível presentes na mistura formando uma frente de combustão.<sup>(10)</sup> O processo é finalizado após a frente de combustão percorrer no forno toda a carga a ser sinterizada. O tempo de reação deste processo, incluindo o tempo de resfriamento do bolo de sínter é totalmente controlado e após este tempo o sínter é descarregado do forno sinterizador. Deste produto são separadas amostras para análises químicas e físicas.

Após avaliação, análises químicas do produto obtido e avaliação qualitativa das características do sínter produzido em escala laboratorial foi realizado o teste industrial em forno sinterizador com volume de 800 L. As misturas para o teste industrial foram preparadas em misturador com capacidade de 7.000 L, com cargas-base de 700 kg. A mistura foi homogeneizada durante 5 minutos a seco, adicionando-se umidade gradativamente, após adição de umidade a mistura foi homogeneizada por mais 10 minutos. A mistura já micropelotizada foi descarregada em um *bag* para adição no forno sinterizador. Adicionou-se sobre a grelha do forno sinterizador 40 kg de sínter para formação da camada de proteção e sobre esta falsa grelha a mistura a ser sinterizada. A ignição foi realizada com a utilização de um GLP. Após ignição estabeleceu-se esperou-se o tempo necessário para a produção do sínter que foi descarregado em uma caixa metálica e teve sua massa avaliada. Em seguida foi britado e classificado em função da especificação pré-estabelecidas. Dos produtos obtidos, separou-se amostras e realizou-se análises químicas, testes de tamboramento e abrasão<sup>(11)</sup> resistência à queda<sup>(12)</sup> e densidade aparente.

### 3 RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de granulometria das lamas após classificação inicial.

**Tabela 1.** Análise Granulométrica das lamas

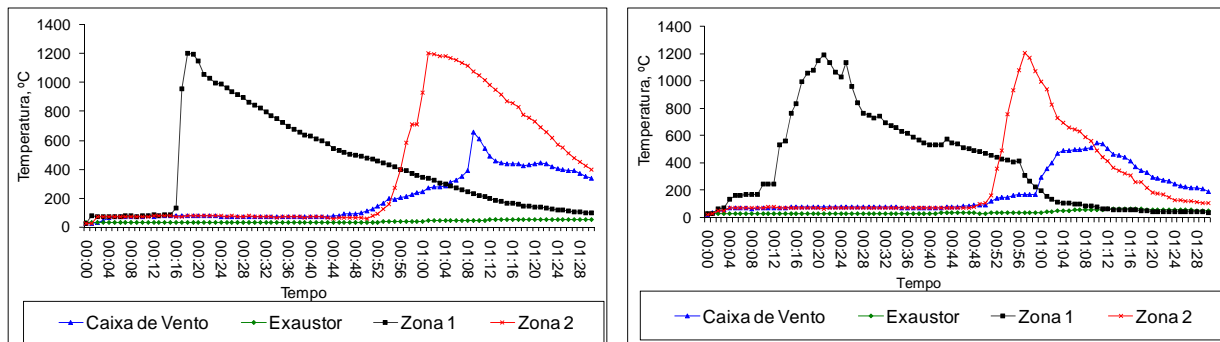
% Retida por peneira	Lama A	Lama B	Lama C
8,0 mm	0	0	0,0
6,3 mm	0,3	0,0	3,6
5,6 mm	0,1	0,0	1,7
4,7 mm	0,2	0,0	1,9
3,4 mm	3,1	0,0	7,4
2,0 mm	22,4	0,5	11,6
1,0 mm	24,0	1,8	15,3
0,6 mm	15,9	6,4	0,0
Fundo	34,0	91,3	58,4

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de análises químicas e umidade das lamaz após classificação. A massa específica aparente (MEA) obtida foi de 1,3 g/cm<sup>3</sup>; 2,1 g/cm<sup>3</sup> e 1,4 g/cm<sup>3</sup>, para as lamaz A, B e C, respectivamente.

**Tabela 2.** Resultados de análises das lamaz(% em massa)

Lama	Umid.	Fe <sub>total</sub>	Fe <sub>met</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	ZnO
A	16,9	52,4	2,8	1,3	12,9	1,5	3,6	0,16
B	7,2	76,3	41,7	1,4	9,2	1,1	2,5	0,02
C	18	54,9	7	0,9	11,5	4	3,6	0,3

A Figura 3 descreve as curvas alcançadas durante os processos de sinterização laboratorial para os produtos A e B. Pode-se observar que a temperatura máxima alcançada no processo foi de 1.200°C para o sinter A e B, temperatura mais do que suficiente para que a umidade evapore durante o processo e as partículas se unam proporcionando a resistência e a porosidade ao produto. Várias reações químicas acontecem ao mesmo tempo no processo de sinterização, podendo destacar para este caso as reações de oxidação e redução do ferro e seus compostos (FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



a – Produto A

b – Produto B

**Figura 3.** Curvas de temperatura do processo de sinterização.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das análises dos sínteres fabricados em escala piloto.

**Tabela 3.** Resultados de análises do sinter produzido no sinterizador piloto(% em massa)

Produto	Fe <sub>total</sub>	Fe <sub>met</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	ZnO
A	60,8	8,6	1,1	15,2	3,7	2,4	0,04
B	54,1	1,6	1,5	17,8	2,5	4,7	0,27

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de análises químicas, densidade a granel (DG), resistência à queda (RQ), tamboramento (TB) e abrasão (Abr) dos sínteres fabricado em escala industrial.

**Tabela 4.** Resultados de análises dos sínteres industriais(% em massa)

Sínter	DG (g.cm <sup>-3</sup> )	RQ >10,0mm	TB >6,3mm	Abr. <0,5mm	Fe <sub>total</sub>	Fe <sub>met</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	ZnO
A	1,9	91,3	68,4	6,2	56,2	2,7	2,4	8,2	14,5	2,1	0,05
B	1,6	84,9	72,0	1,9	59,0	2,1	1,6	11,3	1,4	3,6	0,39

Na Figura 4, a e b são apresentados os sínteres A e B produzidos em escala industrial.



a. Sínter A



b. Sínter B

**Figura 4.** Sínteres A e B.

É possível observar que o material apresentou boa sinterabilidade resultando num produto poroso e homogêneo.

#### 4 DISCUSSÃO

Para o processo de sinterização o controle da granulometria da mistura a ser sinterizada é de suma importância para garantia da permeabilidade da carga, pois permite que o ar percole as frações ainda não sinterizadas garantido que a frente de combustão chegue a todos os pontos da mistura.<sup>(9)</sup> A matéria-prima avaliada apresentou frações heterogêneas, motivo pelo qual foi realizada a pré-classificação das amostras. Partículas de maior dimensão não são incorporadas de maneira satisfatória ao bolo de aglomerado o que resulta num sínter com frações não sinterizadas e frágil.

Segundo Mourão et al.,<sup>(10)</sup> para minérios de ferro é desejável que as frações estejam preponderantemente entre 0,5 mm a 7,0 mm. As lamas avaliadas apresentaram valores dentro desta faixa. Outro ponto importante relativo às características granulométricas de materiais utilizados em processos de sinterização é a diminuição da permeabilidade da carga por partículas pequenas, o que pode ser minimizado por um processo de pré-aglomeração.<sup>(13,14)</sup> O teor de umidade das matérias-primas utilizadas também tem interferência na permeabilidade da carga.<sup>(15,16)</sup> No caso dos sínteres A e B a mistura foi inicialmente micropelotizada para adequação granulométrica antes do processo de sinterização, sendo a água adicionada à betoneira até formação das micropelotas, para evitar a obstrução do escoamento de ar através da mistura. Segundo Vieira et al.<sup>(13)</sup> para sínteres de minério de ferro as micropelotas são formadas por um núcleo geralmente de partículas mais grossas cobertas por uma camada mais fina. Em função da etapa de microaglomeração, as partículas da mistura podem ser classificadas em nucleantes, intermediárias e aderentes.

A maior temperatura atingida na zona 2 do forno durante os processos de sinterização laboratoriais dos sínteres A e B foi de aproximadamente 1.200°C (Figura 3) com uma hora de processo. Para um sínter fabricado com minério de ferro produzido no mesmo equipamento utilizando os mesmos parâmetros este tempo foi de aproximadamente trinta minutos conforme pode ser visualizado na Figura 5.

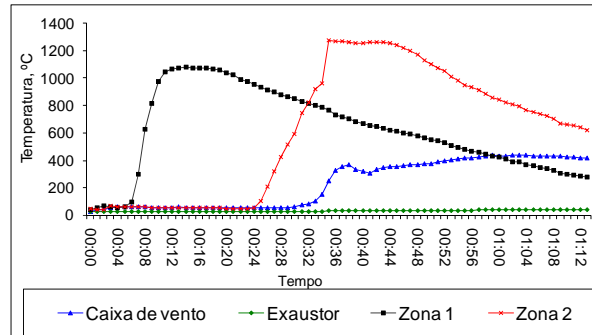


Figura 5. Curvas de temperatura do processo de sinterização de sínter de minério de ferro.

O sínter obtido apresentou características físico-químicas tais que possibilitam a sua utilização em alto-fornos incorporando ferro ao banho, conseqüentemente eliminando a destinação do resíduo para aterros, podendo contribuir para o aumento da produtividade do alto-forno e redução de custo no processo, após a realização dos ajustes necessários para cada caso. Devem ser feitos, portanto, estudos da aplicação do produto sinterizado fabricado com lama de aciaria em altos fornos para obtenção de resultados práticos e que permitam uma comparação com as referências disponíveis. Observou-se a presença de zinco nas lamas avaliadas e nos produtos obtidos. O teor foi reduzido com o processo de sinterização e ficou depositado na saída do forno sinterizador, comprovando a possibilidade de sua eliminação neste processo. O zinco é prejudicial ao processo de redução em altos-fornos, uma vez que parte do óxido de zinco pode se depositar nas paredes da cuba e nos condutores de saída de gases interrompendo o seu fluxo, outra parte dos vapores pode formar incrustações no revestimento refratário do alto-forno.<sup>(14,17)</sup> É necessário que sejam realizados novos estudos visando o desenvolvimento de metodologia para eliminação deste elemento.

Para comparação dos resultados foi realizada análise do índice de Shatter (Resistência à Queda – RQ) do sínter de minério de ferro obtendo-se o valor de 80,25%. O produto A apresentou resistência de 91,3%, maior que o desejado, e a resistência obtida para o produto B foi de 84,9%. Segundo Procópio, Nolasco Sobrinho e Cunha,<sup>(18)</sup> o volume ocupado do forno tem influência na resistência mecânica do sínter e poderão ser feitos então novos testes variando este parâmetro para melhorar esta característica do sínter B.

A densidade a granel do produto é uma característica importante para a realização de dimensionamento de silos, os resultados obtidos para os sínteres A e B foram de 1,9 g.cm<sup>-3</sup> e 1,6 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente. O sínter deve apresentar boa resistência mecânica devido aos esforços de carregamento ao qual estará submetido no interior do alto forno. Um sínter com baixa resistência mecânica pode gerar grande quantidade de finos, que causará uma diminuição da permeabilidade dos gases de alto forno, levando a uma queda no rendimento do processo. A resistência ao tamboramento dos sínteres fabricados foi de 68,4% para o sínter A e 72% para o sínter B, valores considerados normais para o teste, garantindo a mínima geração de finos durante seu uso no processo metalúrgico/siderúrgico. Nos testes de

resistência a abrasão os sinteres obtidos apresentaram frações de 6,2% e 1,9%, respectivamente menores que 0,5 mm. Através do índice de abrasão é possível avaliar a capacidade de o material resistir ao transporte e a abrasão.

## 5 CONCLUSÕES

- É possível reciclar lamas de aciaria para a fabricação de sinter;
- Os produtos sinterizados obtidos apresentaram características químicas e físicas favoráveis à sua utilização em alto-fornos; e
- Deve-se prosseguir o estudo iniciado para redução do zinco presente no produto através da sinterização para possibilitar a utilização de lamas de aciaria com maiores teores de zinco.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos funcionários do Centro de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação e Controle de Qualidade da Vamtec pela dedicação na execução dos testes e ensaios às empresas doadoras dos resíduos siderúrgicos e à Vamtec S/A pelo apoio financeiro para realização e apresentação do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 CAUX, L. S. *et al.* Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos da indústria de celulose kraft na produção de corpos cerâmicos. In: 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2007, Vitória. Anais...Vitória: ABM, 2007. p. 2215-2223.
- 2 NOLASCO SOBRINHO, P. J.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem da poeira e lama Geradas na fabricação de aço inoxidável. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, n. 57, pp. 121-127, abr. jun. 2004.
- 3 INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário estatístico 2010. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>>. Acesso em 05/05/11.
- 4 TAKANO, C. A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, 2000.
- 5 MENDES, J. J. Influência da adição da lama de aciaria a oxigênio nas características físicas e microestruturais de pelotas queimadas de minério de ferro. Ouro Preto: Rede Temática de Engenharia de Materiais – UFOP, CETEC, UEMG. 2009. 79 p. Dissertação de mestrado.
- 6 VIEIRA, C.M.F. *et al.* Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, pp. 269 – 275, 2007.
- 7 ARAÚJO, L. A. Manual de Siderurgia. São Paulo: Ed. Arte e Ciência, 1997.
- 8 RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos siderúrgicos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 9 MCCANN, G.; STREZOV, V.; LUCAS, J.A.; EVANS, T.; STREZOV, L. Iron ore characterization during high temperature thermal processing. Dev. Chem. Eng. Mineral Process, n. 12, pp. 1-14, 2004.
- 10 MOURÃO, M. B. *et al.* Introdução à Siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 3271: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta — Determinação dos índices de tamboramento e abrasão. Rio de Janeiro, 2009.
- 12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10633: Sinter de minério de ferro - Determinação da resistência à queda - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.



- 13 VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; PENA, E. Q.; SESHADRI, V.; ASSIS, P.S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. REM, Ouro Preto, n. 56, pp. 97-102, abr.jun, 2003.
- 14 TELLES, V. B. Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. 2010. 87 p. Dissertação de Mestrado.
- 15 NOGUEIRA, R. W. M.; PENA, J.C; MUNIZ, G. L. F. Permeabilidade de minérios e misturas de Sinterização. In: 27º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 1972, São Paulo. Anais...São Paulo: ABM, 1972. Contribuição técnica nº 1043.
- 16 CAMPOS, A. A. Desenvolvimento de escória sintética sinterizada para produção de ações elétricos de grão orientados (GO). Belo Horizonte: Pós Graduação em Engenharia Metalúrgia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2009. 87 p. Dissertação de Mestrado.
- 17 CANTARINO, M. V. Estudo da remoção de zinco e de álcalis contidos em lammas de aciaria LD. Belo Horizonte: Pós Graduação em Engenharia Metalúrgia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2011. Dissertação de Mestrado.
- 18 PROCÓPIO, H. H. F. A.; NOLASCO SOBRINHO, P. J.; CUNHA, M. A. Evaluation of height of the bed layer on iron ore sinter characteristics using a pilot sintering furnace. In: 7th IASIronmaking Conference, 2009, Campana, Buenos Aires, Argentina.