

# ESTUDO COMPARATIVO NA RESISTÊNCIA A ABRASÃO DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS AGLOMERADAS COM CIMENTO PORTLAND E COM AGLOMERANTE ASFÁLTICO\*

Alberto Eloy Anduze Nogueira<sup>1</sup>  
Cyro Takano<sup>2</sup>  
Marcelo Breda Mourão<sup>2</sup>

## Resumo

A utilização de carvões fósseis de alta fluidez como redutor tem-se mostrado uma alternativa técnica viável na aglomeração “binder less” de briquetes auto-redutores, ainda em escala experimental, porém não contribuem para mitigação do CO<sub>2</sub> e exige carvões fósseis especiais de alta fluidez. O presente trabalho teve como objetivo avaliar preliminarmente o efeito da adição de aglomerante asfáltico no redutor quanto ao seu comportamento na resistência a abrasão a alta temperatura, tendo em vista a sua utilização em fornos rotativos. Foram preparados 2 lotes de pelotas auto redutoras de minério de ferro com 22% de carvão fóssil, um aglomerado com 9% de cimento Portland e outro utilizando 2% de aglomerante asfáltico. A resistência a frio de pelotas aglomeradas e curadas com cimento foi 6,5 kgf/pelota e com o aglomerante asfáltico foi inferior (3,7 kgf/pelota). O lote com aglomerante asfáltico foi tratado termicamente durante 2 horas a 450°C. Após o ensaio de abrasão (adaptado do ISO 3271), a 950°C, durante 13 minutos, apresentaram resultados semelhantes nos 2 lotes, com relação à resistência à compressão de 60 kfg/pelota, e resultado de abrasão melhor do lote com aglomerante asfáltico com geração de 2,5% de finos (<0,5mm), contra 5,7% com cimento. O aglomerante asfáltico mostra-se um potencial aglomerante para processos de auto redução.

**Palavras-chave:** Auto redução; Aglomerante Asfáltico; Pelotas; Forno Rotativo;

## BINDERS OF SELF-REDUCING PELLETS: A COMPARATIVE STUDY ON PORTLAND CEMENT AND BITUME.

### Abstract

The strength at high temperatures of self-reducing agglomerates reached acceptable values by using high fluidity coals as reducer and binder (binder less process). The present work had as objective to evaluate the effect of the addition of bitumen as binder in coal, mainly on the abrasion resistance at high temperature, regarding its use in rotary kilns. Two batches of self-reducing iron ore pellets were prepared with 22% fossil coal, one with 9% Portland cement and another with 2% bitumen. The cold strength of pellets agglomerated with cement after curing was 6.5 kgf /pellet and with the bitumen was lower (3.7 kgf/pellet). The pellet with bitumen was heat treated for 2 hours at 450°C. After the abrasion test (adapted from ISO 3271), at 950°C, for 13 minutes showed similar results in the two batches, reaching 60 kfg/pellet of compressive strength. Batch with bitumen presented better result for abrasion test by generating only 2.5% fines (<0,5 mm), against 5.7% with cement. The asphalt binder presents a potential use for self-reduction processes.

**Keywords:** Self-Reduction; Asphalt Binder; Pellets; Kiln Furnace;

<sup>1</sup> Engenheiro, Doutor, Professor, FATEC Itaquera, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro, Doutor, Professor Associado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup>

## 1.0 INTRODUÇÃO

O processo de pelletização consiste na aglomeração de finos na forma de esferas da ordem de 8 a 18 mm de diâmetro. Esta operação é feita por rolamento em discos ou tambores rotativos. O princípio está em gerar continuamente uma quantidade de núcleos que são crescidos até o tamanho desejado <sup>[1,2]</sup>. As resistências mecânicas das pelotas é bastante dependente do nível de compactação dado pelo diâmetro do disco.

O comportamento mecânico a frio e a quente das pelotas auto redutora é de grande interesse para o desenvolvimento da tecnologia da redução. A resistência a grandes cargas, como as que ocorrem nos altos fornos ou processamento em um forno rotativo podem ser estudadas com o ensaio de compressão e pelo teste de abrasão. Entendimento destes ensaios e de seus comportamentos são de vital importância <sup>[3-5]</sup>.

O asfalto é um produto obtido através da destilação do petróleo sendo uma de suas frações mais pesadas com um ponto de ebulição de 500 °C. Isso significa que ele é obtido bem mais perto da base da torre de destilação. Ele também pode ser extraído direto da natureza <sup>[6-8]</sup>.

O Manual de asfalto lista mais de 100 aplicações principais desse material, seja na agricultura e na indústria. Além das aplicações convencionais, tais como, anodos de carbono para fusão de alumínio, eletrodos de grafite para a indústria de aços, os asfaltos são, também, empregados no campo da alta tecnologia para a preparação de fibras de carbono, grafites poli granulados ou compósitos carbono-carbono <sup>[9-11]</sup>.

O cimento Portland é um dos materiais mais importantes de construção civil e altamente empregado pela humanidade. Por definição, é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de *clínquer*, gesso e adições normalizadas finamente moídas. Ele se hidrata ao misturar com água formando um gel e depois de endurecido ganha alta resistência. São importantes as propriedades coesivas intrínsecas assim como a coesão dele com as superfícies dos particulados/agregados a serem aglomerados <sup>[12-14]</sup>.

## 2.0 Desenvolvimento.

### 2.1 Lista de Materiais:

- Minério de ferro (Pellet feed).
- Carvão Chipanga.
- Cimento Portland.
- Asfalto comercial.

### 2.2 Caracterização química, física e morfológica dos materiais empregados.

## 2.2.1 Caracterização química e física do minério de ferro.

Tabela 2.1. Composição do minério de ferro (porcentagem em massa).

Componente	% em massa	Componentes	% em massa
Fe	65,39	CaO	0,017
FeO	0,22	MgO	0,046
SiO <sub>2</sub>	3,01	TiO <sub>2</sub>	0,077
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,77	K <sub>2</sub> O	-
P	0,027	Na <sub>2</sub> O	-
Mn	0,274	PF	1,358

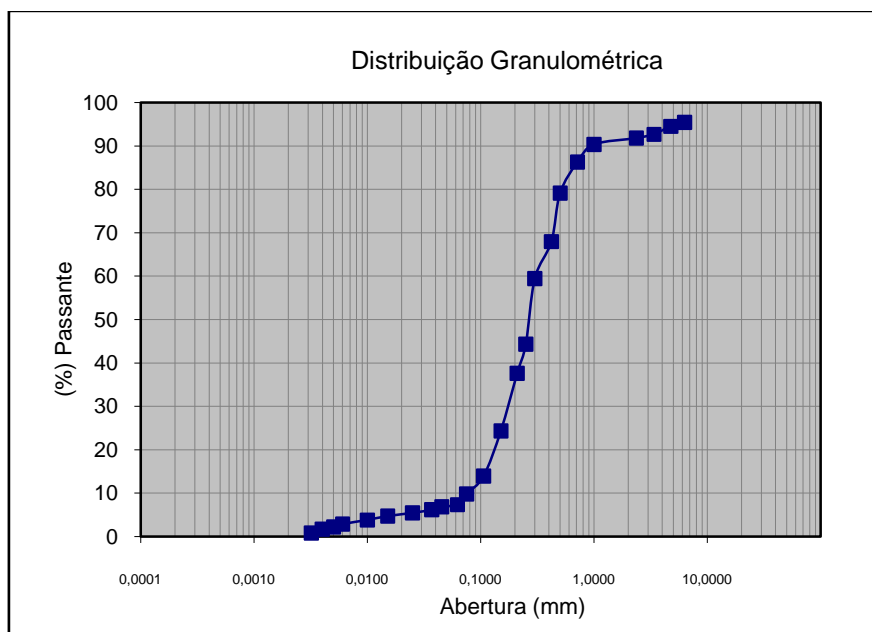


Figura 2.1. Distribuição granulométrica do minério de ferro (Pellet feed).

## 2.2.2 Caracterização do redutor.

Tabela 2.2. Análise imediata ASTM 5142.

Componente	% em massa
Matéria volátil	23,8
Cinzas	10,6
Carbono fixo	65,6

**Tabela 2.3.** Composição do cimento Portland.

Componente	% em massa	Componentes	% em massa
CaO	64,3	K <sub>2</sub> O	0,7
SiO <sub>2</sub>	19,1	MgO	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	Na <sub>2</sub> O	0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	CaO livre	1,0
SO <sub>2</sub>	2,6	outros	4,0

Análises típicas.

**Tabela 2.4.** Asfalto: análise imediata

% Voláteis	% Carbono fixo	% Cinzas
72,7	26,8	0,5

## 2.3 Equipamentos

Entre os equipamentos, tem-se:

- Misturador Turbula da WAB.
- Prensa mecânica de 30 toneladas da EMIC para ensaios a compressão.
- Forno Vertical Lindberg/Blue adaptado para ensaios termogravimétricos.
- Disco pelletizador de 60 cm de diâmetro.
- Forno rotativo Grion.

## 2.4 Método

O minério de ferro foi utilizado na granulometria original e o carvão foi moído no moinho de bolas até a granulometria de -100 mesh. Após a preparação das matérias primas, estas foram secadas a 393 K por duas horas. Após a dosagem (tabela 2.5) dos componentes a mistura foi feita no misturador Turbula, por 30 minutos. Para mistura com asfalto, este era adicionado à mistura previa contendo apenas minério e redutor. A aglomeração foi feito num disco pelletizador adicionando-se agua gradativamente com um borrifador obtendo-se pelotas com um diâmetro aproximado de 15 mm. Deixava-se secar ao ar por 24 horas e sendo depois devidamente armazenadas. No caso em que se adicionou cimento *Portland*, deixavam-se as pelotas por um tempo de cura de 30 dias, em atmosfera umedecida, para garantir a resistência necessária na realização dos testes. Na fabricação das pelotas aglomeradas com asfalto, foi adicionada à mistura minério-redutor o asfalto líquido até atingir a consistência adequada para pelletização. Posteriormente as pelotas foram secadas na estufa a 120 °C por 12 horas e tratadas termicamente a 450°C por 2 horas.

Tabela 2.5. Composição das misturas.

Mistura	Minério	Carvão	Min./Carvão	Cimento	Asfalto
Fe <sub>76</sub> C <sub>22</sub> As <sub>2</sub>	76,4	21,8	77,9/22,1		1,8
Fe <sub>68</sub> C <sub>22</sub> Ci <sub>9</sub>	68,6	22,3	75,5/24,5	9,1	

Fe:Minério, C:Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

### 2.4.1 Teste de abrasão a quente

Para estudar a desagregação de pelotas auto redutoras no forno rotativo, foi feita uma adaptação de uma norma aplicada a pelotas convencionais e para sínter de minério de ferro (norma ISO 3271) a qual estabelece um equipamento como mostrado na figura 2.2, o qual possui um tambor de 914 mm de diâmetro interno e 457 mm de comprimento interno, com uma porta de acesso. Possui dois levantadores em L opostos diametralmente, de 50,8x50,8x6,35 mm. Utiliza-se uma quantidade de amostra de 15 kg previamente tratadas termicamente, se processa a amostra em um ciclo de 200 revoluções com uma rotação de 24 ±1 R.P.M. equivalentes a 8 minutos. Após o ensaio determina-se as frações finas geradas, em peneiras com malhas de 6,33 e 0,5 mm. É considerado um valor satisfatório quando mais de 90% fica retida na malha de 6,33 mm e a quantidade passante em -0,5 mm é inferior a 5%.

Como neste caso o interesse é estudar a abrasão a 950°C foram feitas adaptações à norma, trabalhando-se com quantidades menores (1 kg). A velocidade máxima de giro do equipamento foi de 15 RPM sendo que para atingir 200 revoluções são necessários 13 minutos. O diâmetro do tambor é de 500 mm com 6 levantadores. O material previamente tratado termicamente foi processado na montagem mostrado na figura 2.2, e posteriormente determinadas as porcentagens das frações finas. Durante o processamento, os voláteis e os gases de redução (CO, H<sub>2</sub>) são gerados, fazendo-se necessária sua combustão. Para isso o forno foi equipado com um sistema de combustão de gases.

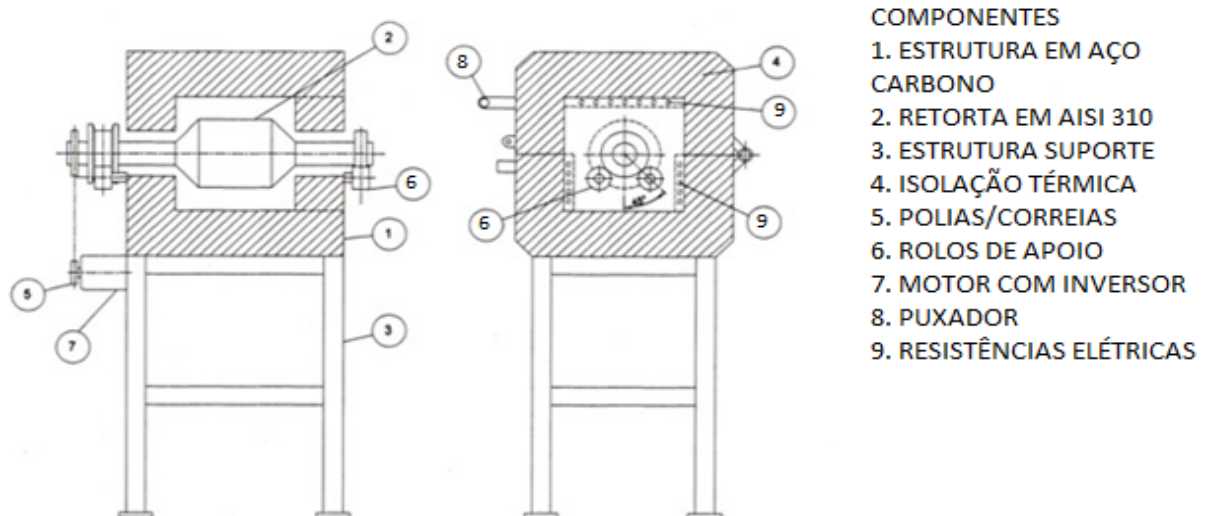


Figura 2.2. Esquema do forno rotativo para o ensaio de abrasão a quente.

## 2.4.2 Teste de quedas.

O teste consiste em medir o número de quedas sobre uma placa de aço, de uma altura padronizada de 457,2 mm (18 pol.) até a ruptura da pelota. São obtidas a média e o erro para cada um dos lotes. É considerada uma boa resistência quando a pelota suporta mais de 5 quedas.

## 2.5. Resultados e discussão de resultados.

Na tabela 2.6 tem-se a composição, basicidade e quantidade de escória para cada mistura. É notória a quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presentes no minério e no carvão, dando à escória um comportamento ácido sendo que, mesmo no caso de adição de 10% em massa de cimento Portland, a basicidade quaternária não atinge a unidade ( $B_q=0,89$ ). Quando se utiliza aglomerantes orgânicos como o asfalto, o balanço de acides geral aumenta, com os componentes formadores de escória baixa. Mesmo considerando a mesma basicidade da pelota obtida com cimento a quantidade de escória gerada com asfalto seria 8,39%, isto é 67% da gerada com utilização de cimento (12,55%).

**Tabela 2.6.** Composição, basicidade e quantidade de escória para cada mistura.

Mistura	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	Basicidade Quaternária	% Escória
<b>22As<sub>2</sub></b>	3,37	1,12	0,05	0,01	4,54
	3,37	1,12	3,9	0,87	8,39
<b>Fe<sub>68</sub>C<sub>22</sub>Ci<sub>9</sub></b>	5,12	1,59	5,85	0,87	12,55

Fe:Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

As resistências a compressão a frio foram obtidas com um tempo de cura superior a 30 dias nos casos das pelotas aglomeradas com cimento, tabela 2.7. No caso das pelotas elaboradas com asfalto, após o processamento a 450 °C durante 2 horas.

**Tabela 2.7.** Resistência a compressão a frio.

Mistura	Fr 15mm [kgf] ( $\pm 10\%$ )
<b>Fe<sub>76</sub>C<sub>22</sub>As<sub>2</sub></b>	3.7
<b>Fe<sub>68</sub>C<sub>22</sub>Ci<sub>9</sub></b>	6.5

Fe: Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

Na tabela 2.8 tem-se os resultados da resistência a compressão após o teste de abrasão a quente. Não apresentaram diferenças entre as pelotas ensaiadas (9% de cimento, sem aditivos, e com 2% de asfalto, estas previamente tratadas termicamente a 450C durante 2 horas). Convém frisar que as pelotas foram obtidas em disco de 60cm de diâmetro, cuja compactação é bem inferior às pelotas produzidas industrialmente.

**Tabela 2.8** Resistência à compressão após o teste de abrasão a quente.

Mistura	Fr(15mm) [kgf] (± 10%)
$Fe_{76}C_{22}As_2$	60.0
$Fe_{68}C_{22}Ci_9$	61.5

Fe: Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

Nas tabelas 2.7 e 2.8 estão mostradas as resistências a compressão a frio e após processamento térmico (teste de abrasão) de cada uma das misturas. De modo geral, a resistência a compressão aumenta em algumas ordens de magnitude após processamento.

Na tabela 2.9 Tem-se o resultado do teste de quedas para as diferentes misturas. O teste de quedas é um teste simples que permite colher informação da resistência das pelotas de forma rápida. Considera-se uma boa resistência da pelota a que resiste a 5 ou mais quedas sem ruptura. De modo geral, todas as misturas elaboradas com cimento foram reprovadas neste teste, como era esperada, já que nenhuma superou a marca de três quedas. A mistura que apresentou ótimos resultados foi a elaborada com asfalto, curada a 450 °C por 2 horas.

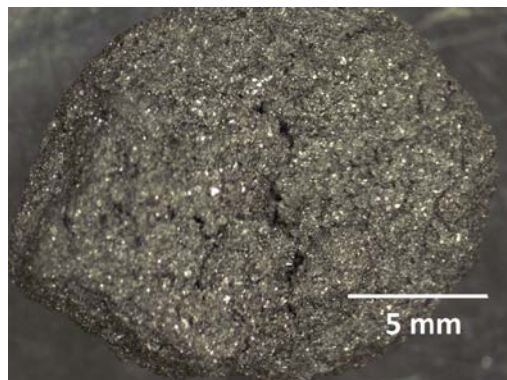
**Tabela 2.9** Número de quedas, até fratura, de uma altura de 457.2 mm (18 pol.)

Mistura	Número de Quedas a fratura (± 8%).
$Fe_{76}C_{22}As_2$	17,2
$Fe_{68}C_{22}Ci_9$	2,6

Fe: Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

Os resultados acima não estão coerentes com os resultados de resistência à compressão (tabela 2.8) e necessitam melhor avaliação.

Na figura 2.3 foi possível observar a fratura de uma pelota aglomerada com aglomerante asfáltico. São evidentes as cavidades internas e a presença de partículas de minério de ferro com tamanho maior que a média, que provavelmente, servem como concentradores de esforço no momento da fratura. A moagem do minério a granulometrias menores possivelmente ajudariam a incrementar a resistência das pelotas.



**Figura 2.3.** Fratura de uma pelota aglomerada com asfalto.



Na tabela 2.10 têm-se os valores do material retido acima de 6,33 mm, e o material passante abaixo de 0,5 mm. A norma original do teste de abrasão ISO 3271 estabelece que após o teste, o material resultante deve estar 95% acima de 6,33 mm, e inferior a 5% passante em 0,5 mm. Verifica-se que a geração de finos menores que 0,5mm foi ultrapassada com pelotas aglomeradas com cimento. Para comparar as diferentes misturas de pelotas, criou-se um quociente entre o retido acima de 6,33 mm e o passante em 0,5 mm. Na medida em que esse número seja maior, o material apresentará melhores respostas a abrasão a quente.

**Tabela 2.10.** Medição da resistência a abrasão a quente das diferentes misturas

Mistura	+6.33 mm (a)	-0.5 mm (b)	a/b
$\text{Fe}_{76}\text{C}_{22}\text{As}_2$	93.86	2.47	38.00
$\text{Fe}_{68}\text{C}_{22}\text{Ci}_9$	92.96	5.67	16.40

Fe:Minério, C: Carvão, Ci: Cimento, As: Asfalto.

Na tabela 2.11 tem-se a fração de redução atingida por cada mistura de pelota durante o teste de abrasão a quente, sendo que as pelotas ficaram a 950°C, por 13 minutos e posteriormente resfriadas a 37,5°C/hora, durante 16 horas, em atmosfera de nitrogênio. Como pode ser visto na tabela a média da porcentagem de redução foi parcial (58%), como esperada, pois o tempo de residência foi insuficiente. Não apresentaram diferenças entre as duas misturas.

**Tabela 2.11.** Fração de redução atingida por cada mistura de pelota durante o teste de abrasão a quente

Mistura	%fr
$\text{Fe}_{76}\text{C}_{22}\text{As}_2$	57.11
$\text{Fe}_{68}\text{C}_{22}\text{Ci}_9$	59.12
<b>Media</b>	<b>58.12</b>

### 3.0 Conclusões.

- As pelotas manufaturadas com cimento e ensaiadas a 950°C (ensaio de abrasão) foram reprovadas no teste de quedas com um número de quedas inferior a 5.
- Não houve diferenças na resistência à compressão (ambas ~60kgf/pelota) entre os dois lotes de pelotas ensaiadas com 22% de carvão fóssil (9% de cimento e 2% de aglomerante asfáltico), embora no teste de queda a que apresentou resistência bem maior foi a elaborada com 2% de aglomerante asfáltico.
- No teste de abrasão à quente a que apresentou melhor resultado foi a manufaturada com 2% de aglomerante asfáltico.
- A escória proveniente das pelotas que seria gerada com aglomerante asfáltico, adotando a mesma basicidade para ambas, seria de ordem de 30% inferior comparadas às aglomeradas com cimento.
- Os resultados preliminares obtidos, em escala laboratorial, são animadores para utilização de aglomerante asfáltico em pelotas auto redutoras

## REFERÊNCIAS

- 1 Mourão, M; Takano, C; ET AL. Siderurgia para não siderurgistas. ABM. 2005. p 10-15.
- 2 Nogueira, A.A.; Zambrano, A. P.; Takano, C.; Mourão, M. B.; Tagusagawa, S. Y. Biomass use in the Production of Iron-Carbon Nuggets. Jornadas de Investigación. Encuentro Academico Industrial JIFI 2016, 2016, Caracas. UCV, 2016.
- 3 Kawatra, K; Mafra, W; Iron ore pelletization. ABM, 2013, p.15-35.
- 4 Nogueira, A. A.; Zambrano, A. P.; Takano, C.; Mourão, M. B. Effect of SiO<sub>2</sub> on Compressive strength and hot abrasion resistance of self reducing pellets bonded with Portland cement. In: AISTech 2015, 2015, Cleveland. AISTech 2015. AIST, 2015.
- 5 INSTITUTO DO ASFALTO. Manual de asfalto. Rio de Janeiro. 2001.
- 6 Nogueira, A. A.; Takano, C.; Mourão, M. M.; Zambrano, A. P. Produção de Pelotas auto-redutoras a Partir de Lixo Orgânico Domestico. ABM Week, 2015, Rio de Janeiro. ABM, 2015. p.105 - 115
- 7 Workshop the chemical components and structure of asphaltic materials. 1991. Rome. Italy.
- 8 Nogueira, A. A.; Zambrano, A. P.; Mourão, M. B.; Takano, C. The self-reducing pellet production from organic household waste In: TMS 2015, 2015, Orlando. 6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. TMS, 2015. p.323 - 330
- 9 PREGO, A. A memória da pavimentação no Brasil. Rio de Janeiro: ABPv, 1999.
- 10 SHELL. The Shell bitumen handbook. 5. ed. Cambridge, 2003.
- 11 Nogueira, A. A.; Takano, C.; Mourão, M. B.; Zambrano, A. P. Efeito da Adição de SiO<sub>2</sub> na Resistência a Compressão e Abrasão a Quente de Pelotas Autorredutoras Aglomeradas com Cimento Portland. In: 44° Seminário de redução de Minério de Ferro e Matérias- Primas., 2014, Belo Horizonte.
- 12 Darley, H.; Gray, G.; Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Fifth Edition. Gulf Publishing Company. Houston. Texas. 1988.
- 13 Nogueira, A.A.; Takano, C.; Zambrano, A. P.; Mourão, M.B. Effects of Reducer and Slag Concentrations in the Iron-Carbon Nuggets Coalescence in Self Reducing Processes. In: TMS 2014 143rd Annual Meeting & Exhibition, 2014, San Diego, California. TMS 2014 143rd Annual Meeting & Exhibition. San Diego: TMS, 2014.
- 14 Nogueira, A.A.; Zambrano, A. P.; Takano, C.; Mourão, M.B. Resistance at High Temperature and Binders Influence on Self-Reducing Pellets. In: AIST 2014 AISTech-The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2014, Indianapolis.