

# ANÁLISE QUÍMICA DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE MARABÁ<sup>1</sup>

Reuel Rocha dos Santos<sup>2</sup>  
Josué Leal Moura Dantas<sup>3</sup>

## Resumo

Neste trabalho, buscou-se o estudo da composição química das escórias, produzidas no Pólo Industrial de Marabá – PA, para o emprego da mesma em uma finalidade que trouxesse benefícios, tanto para as empresas, quanto para o meio ambiente. No presente estudo, foram caracterizadas quimicamente escórias de alto-forno a carvão vegetal, provenientes do Distrito Industrial de Marabá (DIM), tendo-se o objetivo de identificar, através dos métodos titulométrico e separação de misturas (análise via úmida), os principais elementos químicos presentes, analisados na forma de óxidos. As amostras de escórias apresentaram composições típicas, compostas majoritariamente por Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ) e Óxido de Magnésio ( $\text{MgO}$ ). A partir daí pôde-se comparar os resultados com padrões sugeridos na literatura para as diversas aplicações. Ao calcular o índice de hidraulicidade da escória, esta se mostrou apropriada para incremento ao cimento Portland de alto-forno e como aditivo mineral ao concreto. Na agricultura, a aplicação do resíduo é viável podendo ser utilizada como corretivo de acidez do solo.

**Palavras-chave:** Escória de siderurgia; Caracterização química; Aplicabilidade.

## CHEMICAL ANALYSIS OF METALLURGICAL SLAG OF THE INDUSTRIAL DISTRICT OF MARABÁ

### Abstract

This work, sought to study the chemical composition of the slag, produced in the Industrial Pole of Marabá - PA, for use of these in a purpose that brought benefits, both for companies as for environment. In the present study, were characterized chemically blast furnace slag of vegetable charcoal, from Industrial District of Marabá (IDM), tended the objective of identify, through methods titulometric and separation of mixtures (analysis humid), the main chemical elements present, analyzed in form of oxides. The samples of slag had compositions typical, composed mostly for Silica ( $\text{SiO}_2$ ), Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Oxide of Calcium ( $\text{CaO}$ ) and Oxide of Magnesium ( $\text{MgO}$ ). Since then it could be compared the results with standards suggested in the literature for the various applications. When calculating the index of hydraulicity of the slag, this it was shown appropriate for increment to the cement Portland of blast furnace and as mineral additive to concrete. In the agriculture, the application of residue is viable could be used as corrective of soil acidity.

**Key words:** Metallurgy slag; Chemical characterization; Applicability.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Licenciado em Ciências Naturais – Habilitação em Química, pela Universidade do Estado do Pará (UEPA) e Graduando em Engenharia de Materiais na Universidade Federal do Pará (UFPA). Email: reuelrs@hotmail.com

<sup>3</sup> Licenciado em Ciências Naturais – Habilitação em Química, pela Universidade do Estado do Pará e Bacharel em Sistemas de Informação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Email: jlealmoura@yahoo.com.br

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, estão instaladas oito siderúrgicas em Marabá, sendo que no ano de 2007 estas totalizaram<sup>(1)</sup> cerca de 1,8 milhões de toneladas de ferro gusa, um acréscimo de 36%, em relação ao ano anterior, contribuindo assim com 25% da exportação nacional de gusa. Com este aumento, temos como consequência o aumento da produção de resíduos, provenientes do processo de fabricação do produto, tendo em vista que o beneficiamento do minério de ferro, para obtenção do ferro-gusa, gera inevitavelmente determinados resíduos, que se apresentam em diversos estados físicos, mas principalmente no sólido recebendo o nome de escória.

É indispensável esta pesquisa, pois segundo Rizzo,<sup>(2)</sup> os resíduos causam impactos no meio ambiente, em relação ao espaço para disposição destes, que com o passar dos anos tende a aumentar.

As pesquisas atuais procuram áreas de aplicação de resíduos, que são determinadas pelo estudo de suas características. Tais estudos, sugerem sua utilização como insumo para correção do solo, auxiliando a produção de diversas culturas, tais como cana-de-açúcar, sorgo, milho, soja etc.; outros aspectos estudados são: o incremento do referido material ao cimento, utilização em revestimento asfáltico, composição de materiais cerâmicos, entre outros.

Neste trabalho, buscou-se o estudo da composição química das escórias, produzidas no Pólo Industrial de Marabá, para o emprego destas em uma finalidade que traga benefícios, tanto para as empresas, quanto para o meio ambiente, sobretudo este.

## 1.1 Processo Siderúrgico

A obtenção do ferro a partir de óxidos, deste elemento, constitui-se, basicamente, da mistura do óxido (geralmente a hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com o (C), fundente (calcário) e sopro de ar. O oxigênio ( $\text{O}_2$ ) do ar reage com o (C), gerando energia e gás redutor (CO), suficientes para a redução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Esse processo de redução ocorre dentro de um equipamento chamado alto-forno.

Segundo Rizzo,<sup>(2)</sup> o corpo principal de um alto-forno é composto por: goela, cuba, ventre, rampa, cadinho e soleira (figura 1):

O volume interno de um alto-forno é definido como: o volume compreendido entre o limite superior da goela e o nível do furo de ferro-gusa no cadinho.

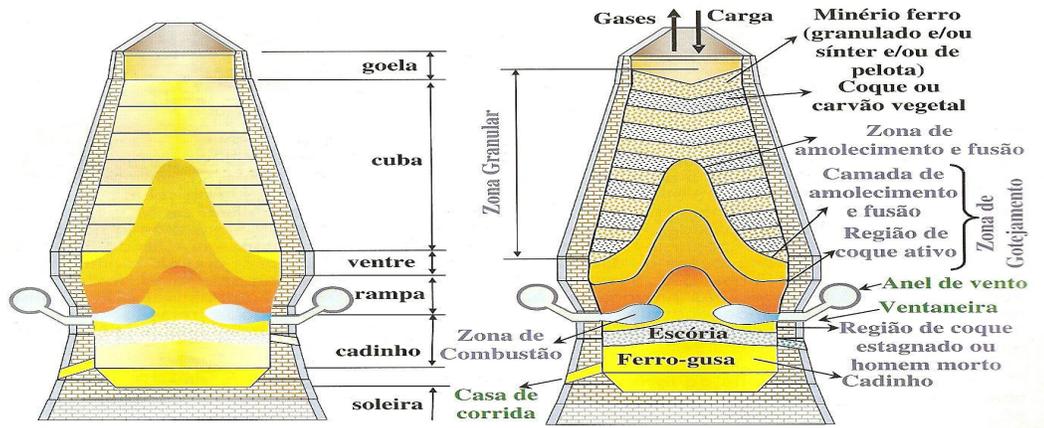
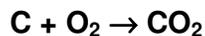


Figura 1: Alto forno.<sup>(2)</sup>

### 1.1.1 Reações químicas de um alto-forno

As temperaturas mais elevadas ocorrem nas proximidades das ventaneiras, sendo da ordem de 1.800°C a 2.000°C. Nesta região, verifica-se a reação:



**Reação 1**

Originando-se grande quantidade de calor.

Este  $\text{CO}_2$ , ao entrar em contato com o carvão vegetal ou coque incandescente, decompõe-se:



**Reação 2**

O CO originado é o agente redutor.

O minério, o calcário e o carvão, ao serem carregados no alto-forno entram em contato com uma corrente ascendente de gases quentes, a uma temperatura em torno de 150°C. A primeira modificação que sofre a carga é, portanto, a de uma secagem, com a remoção da água higroscópica. A seguir, ocorre a remoção da água hidratada, entre 200°C e 500°C.

A decomposição dos carbonatos, contidos no calcário dá-se a aproximadamente 800°C, conforme as seguintes reações:



**Reação 3**



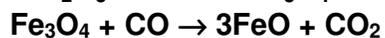
**Reação 4**

Além do CO como agente redutor, o próprio carbono do carvão atua nesse sentido.

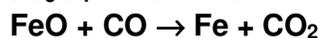
Reações químicas de redução do minério de ferro:



**Reação 5**



**Reação 6**

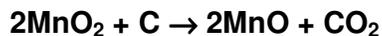


**Reação 7**

Na região que corresponde ao topo da rampa (região acima do cadinho onde o ferro líquido e a escória são depositados), inicia-se a formação da escória, pela combinação da cal (CaO) com a ganga (impurezas do minério de ferro) e uma certa quantidade de óxido de ferro e manganês. Essa escória formada, juntamente com o ferro, começa a gotejar através dos interstícios (espaços vazios) da carga ainda sólida, para depositar-se no cadinho.

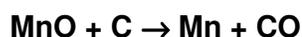
Outras reações:

Nas temperaturas mais baixas da parte superior do alto forno, ocorre a seguinte reação:

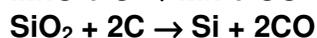


**Reação 8**

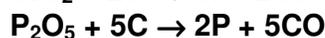
Nas altas temperaturas:



**Reação 9**

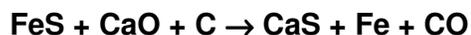


**Reação 10**



**Reação 11**

Esta última reação é incompatível em alto forno, pois praticamente todo o fósforo do minério é incorporado no ferro gusa.

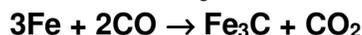


**Reação 12**

Finalmente, as últimas reações fundamentais são representadas pelas equações:



**Reação 13**



**Reação 14**

Todas estas reações produzem, então, o ferro gusa, que além de ferro e carbono também incorpora os elementos manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S).

A formação da escória compreende reações bem mais complexas, esse material caracteriza-se por sua grande fluidez e seu baixo peso específico. Assim, no cadinho (reservatório), a escória e o gusa líquido separam-se por gravidade, formando duas camadas, isto é, a inferior (metálica) e a superior (escória), facilitando o vazamento de ambos os produtos.

O principal produto do alto-forno é o ferro gusa, uma liga ferro-carbono de alto teor de carbono sob forma de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) e teores variáveis de silício, manganês, fósforo e enxofre.

O gusa, também chamado de ferro bruto é duro e quebradiço, com baixa resistência mecânica, devido ao excesso de carbono. Pode ser empregado em diferentes confecções de peças, que são submetidas a pequenos esforços.<sup>(3)</sup>

De um modo geral, a maioria dos ferros gusas possíveis de serem obtidos em alto-forno está compreendida nas faixas de composições, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** – Composição química típica do ferro-gusa<sup>(6)</sup>

Elemento	Faixa de Composição (%)
Carbono	3 a 4,4
Silício	0,5 a 4,0
Manganês	0,5 a 2,5
Fósforo	0,05 a 2,0
Enxofre	0,20
Ferro	Balanço

O gás de alto-forno possui a seguinte composição: 13% de CO<sub>2</sub>; 27% de CO; 3% de H<sub>2</sub> e 57% de N<sub>2</sub>.

Estes gases são utilizados na própria usina siderúrgica nos regeneradores, fornos diversos de aquecimento, caldeiras etc.

## 1.2 Formação da Escória no Alto Forno

Os óxidos ainda não reduzidos, ao atingirem a rampa do alto forno, a uma temperatura acima de 1.200 °C, reagem entre si e posteriormente com aumento de temperatura, passam ao estado líquido, formando a escória.<sup>(3)</sup> Os principais componentes são:

*Provenientes do minério:* Sílica (SiO<sub>2</sub>), Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Cal (CaO), Magnésia (MgO), Titânia (TiO<sub>2</sub>), Óxido de Manganês (MnO<sub>2</sub>), Sulfeto de Manganês (MnS), Dissulfeto de cálcio (CaS<sub>2</sub>), Óxido de ferro (FeO), Óxido de zinco (ZnO) e Óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>).

*Proveniente dos fundentes:* Cal (CaO), Magnésia (MgO), Pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Sílica (SiO<sub>2</sub>) e Sulfeto de cálcio (CaS).

*Proveniente do carvão:* Cinzas (K<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O e P), contendo cerca de 30% de óxido de cálcio (CaO).<sup>(3)</sup>

Os constituintes mais importantes da escória final são: CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO e MnO.

A formação da escória no alto forno é afetada por várias condições como: temperatura de chama, distribuição da carga, redutibilidade da carga metálica, quantidade de ganga na carga (*volume de escória*), tipo de carga, níveis de temperaturas, entre outros.<sup>(4)</sup>

Uma escória espessa, muito viscosa, dificulta a operação do alto forno, agarra-se ao revestimento, escorre lentamente e pode, eventualmente, colar-se ao termo-redutor na rampa, dificultando a normal distribuição da corrente gasosa.<sup>(5)</sup>

A viscosidade da escória depende de sua composição química e da temperatura. Com o desenvolvimento de muitos anos de operação, conseguiu-se verificar que a viscosidade da escória de alto forno, depende da relação entre o teor de CaO + MgO e a soma SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.<sup>(5)</sup>

Essa relação, entre óxidos “básicos” e “ácidos”, é denominada índice de basicidade (ib), um parâmetro bastante utilizado na prática operacional de produção de gusa em altos fornos. Os dois parâmetros mais comuns são:

$$\text{Basicidade binária (ib}_2\text{): } \left( \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right)_{\text{Escória}} \quad \text{Equação I}$$

$$\text{Basicidade quaternária: } \left( \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \right)_{\text{Escória}} \quad \text{Equação II}$$

Tradicionalmente, os óxidos que constituem a escória são classificados em básicos, ácidos e anfóteros.

Contudo, o conceito de basicidade em escória é totalmente empírico e arbitrário. A noção de “ácido” e “base” surge das observações de que escórias ricas em sílica, que atacam refratários dolomíticos ou magnesianos, assim como escórias ricas em CaO e MgO, que atacam refratários sílico-aluminosos. O valor do índice de basicidade (ib), é bastante utilizado na metalurgia para se avaliar o comportamento das escórias nos seguintes casos:

- ataque sobre os revestimentos refratários;
- viscosidade; e
- dessulfuração e desfosforação no refino do aço.

No caso específico de altos fornos a carvão vegetal, o conceito de basicidade binária é mais empregado. Onde, em condições normais de operação se utiliza uma escória com basicidade menor que a unidade ( $0,70 < ib < 0,95$ ).

Nos altos fornos a carvão de vegetal, a maior viscosidade permissível é de 25 Poise a  $1.500^{\circ}\text{C}$ , com escórias ácidas contendo 60 a 70% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ . Ao trabalhar-se com coque, a viscosidade das escórias é bem menor, variando entre 3 e 10 Poise a  $1.500^{\circ}\text{C}$  (Figura 2).<sup>(5)</sup>

Não existe uma composição padrão para as escórias de altos fornos a carvão vegetal. De acordo com o tipo de matéria-prima disponível e com as condições de operação é feita a escolha da composição da escória de trabalho,<sup>(6)</sup>

Segundo Araújo<sup>(5)</sup>, as escórias de altos fornos a coque, possuem as seguintes faixas de composição: 35 – 45% CaO; 5 – 15% MgO; 30 – 35%  $\text{SiO}_2$  e 10 – 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Já as escórias ácidas advindas de altos fornos a carvão vegetal contêm: 30 – 40% CaO; 1,5 – 10% MgO; 50 – 65%  $\text{SiO}_2$ ; 10 – 20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

A figura 2 mostra as regiões das escórias ácidas e básicas normalmente usadas e que correspondem ao mais baixo ponto de fusão e maior fluidez.

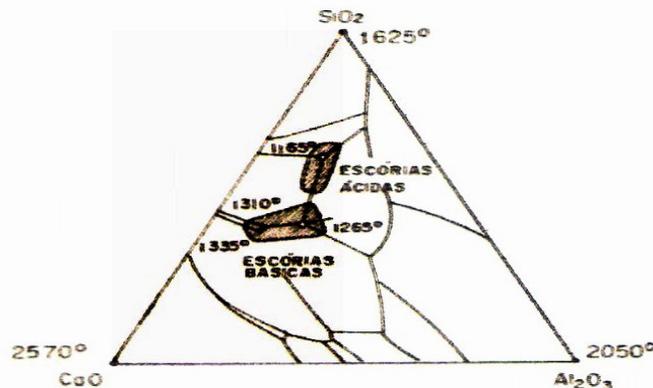


Figura 2: Sistema ternário Cal-Sílica-Alumina.<sup>(5)</sup>

Além da composição química (da qual resultam a basicidade, ponto de fusão e viscosidade), é de importância o volume da escória por tonelada de gusa produzido, o qual depende, principalmente, da quantidade e das propriedades da ganga do minério e das cinzas do termo-redutor.<sup>(5)</sup>

É óbvio que uma tonelage excessiva de escória representa um maior gasto de combustível, além de diminuir a utilização do forno. A quantidade mínima, para se obter uma boa dessulfuração, é determinada sob a condição do teor de enxofre na escória não ultrapassar 2,7%. Usando-se coque, o limite inferior é, portanto, de 200

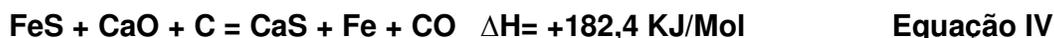
a 400 Kg de escória por tonelada de gusa. Na obtenção de gusa de carvão de madeira trabalha-se com 100-250 Kg, de escória por tonelada.

Segundo Araújo,<sup>(5)</sup> as temperaturas elevadas favorecem a reação:



enquanto que uma escória altamente básica retarda a reação química acima.

A equação abaixo, requer cal e temperaturas elevadas.



Por conseguinte, temperaturas altas nas zonas de combustão, tendem a elevar o silício no gusa e baixar o enxofre. Uma basicidade elevada, tende a diminuir tanto o silício como o enxofre, no ferro gusa. Além da fluidez, para que seja retirada facilmente do forno, a escória deve ter condições para deter o máximo de enxofre.<sup>(5)</sup>

No sistema quaternário CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO, pode-se encontrar uma região de baixo ponto de fusão entre 10 e 13% MgO. Para uma boa dessulfuração, teores mais elevados de CaO e MgO são mais favoráveis, devido a maior tendência destes cátions para ligar-se ao S.<sup>(5)</sup>

### 1.3 Industrialização da Escória

As escórias usadas como sub-base de estradas, têm a seguinte análise média (Tabela 2)<sup>(5)</sup>

**Tabela 2** – Composição da escória para sub-base

Composto	Fórmula	%
Sílica	SiO <sub>2</sub>	29 – 38
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 – 18
Cal	CaO	38 – 45
Magnésia	MgO	2 – 7
Óxido de Ferro	FeO	0,5 – 2
Óxido de Manganês	MnO <sub>2</sub>	1 – 4
Sulfeto de Cálcio	CaS	1 – 2

Uma utilização da escória, que tem se mostrado importante, na área da agricultura, é como corretivo de solo, atuando na neutralização da acidez excessiva e melhora também as condições físicas do mesmo. Isto ocorre, porque a escória, depois de perder a cal, deixa resíduos coloidais que reduzem os poros do terreno e aumentam a sua capacidade de reter água. Contribui ainda com óxido de magnésio, (importante para a formação da clorofila), também com o manganês e outros elementos residuais, que auxiliam de modo significativo para o crescimento das plantas. Para isto, o teor de CaO + MgO na escória deve ser no mínimo 47%. A preparação de adubo é simples: a escória (em pedaços ou granulada) é moída num moinho de bolas, até passar pela peneira com malha de 0,30 mm (50 malhas por polegada). O adubo em pó não é higroscópico; pode ser armazenado longo tempo, sem formação de conglomerados ou pelotas.<sup>(5)</sup>

Para que a escória seja aproveitada na construção civil, compondo o cimento, algumas adequações devem ser feitas: adicionar calcário moído a escória granulada, (a fim de aumentar a porcentagem de CaO de 40% – 45% para 64% – 66%) e também de 3% – 4% de gesso. Para evitar a formação de anéis no interior

do forno rotativo, o calcário não deve ter muito carbonato de magnésio, observando o limite de 5% de MgO no Clinker. A escória é primeiramente seca e levada aos silos de dosagem, de onde alimenta, juntamente com o calcário, os moinhos de bolas, ou de barras; é triturada até atingir uma granulação inferior a 0,09 mm (170 malhas por polegada). O material é levado ao forno rotativo que tem 2-4 m de diâmetro e 50 m – 80 m de comprimento, aquecido a gás ou óleo pulverizado, consumindo cerca de 3.350 Kj/Kg (800 Kcal/Kg) de Clinker. Este é depois, moído abaixo de 0,09 mm (170 malhas por polegada). O concreto feito com a dosagem de 300 Kg de cimento por metro cúbico, após 28 dias, tem uma resistência à compressão entre 30 MPa e 40 MPa. O formato angular, das partículas de escória, fazem uma excelente ligação entre a argamassa de cimento e o agregado.<sup>(5)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise das amostras, foi feita no laboratório de Química da USIMAR (Usina Siderúrgica de Marabá), no mês de setembro deste ano, sendo realizadas diariamente com exceção dos domingos e feriados, principalmente no período matutino. O procedimento analítico, por via úmida, é aplicável à determinação dos teores de sílica ( $SiO_2$ ), óxido de cálcio ( $CaO$ ), óxido de magnésio ( $MgO$ ), óxido de ferro ( $FeO$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ) e óxido de manganês ( $MnO$ ), contido na escória de alto forno.

Para a preparação das amostras, seguiu-se a NBR 5012, que define amostragem e preparação de Amostras de Ferro ligas e outras Adições Metálicas; e também a NBR 11589, para preparação, padronização e estocagem de soluções para análises químicas.

Os procedimentos foram realizados, conforme descritos em Pinheiro,<sup>(4)</sup> para determinação do teor de Sílica ( $SiO_2$ ), Óxido de Ferro ( $FeO$ ), Alumina ( $Al_2O_3$ ), Óxido de Magnésio ( $MgO$ ) e Óxido de Manganês ( $MnO$ ).

## 3 RESULTADOS

A partir da operacionalização do alto-forno e observação das características da escória resultante, pode-se classificar visualmente a escória em cinco grupos principais:

- *Escória Cinza*  
Características: coloração cinza na bica de corrida; completamente líquida com gusa na temperatura de 1.350°C – 1.400°C; boa fluidez escoando com facilidade.  
Normalmente é a escória desejada nos altos-fornos a carvão vegetal.
- *Escória Branca*  
Características: coloração branca na bica; muito fluida.
- *Escória Verde Claro*  
Características: coloração verde claro; temperatura do gusa 1.350°C/1.400°C; boa fluidez escoando com facilidade.
- *Escória Verde Escuro*  
Características: coloração verde escura (alto teor de FeO); baixa fluidez escoando com dificuldade; temperatura do gusa abaixo de 1.300°C.
- *Escória Queimada*  
Características: coloração preta (alto teor de FeO); temperatura do gusa abaixo de 1.250°C.

De acordo com a matéria-prima disponível e os parâmetros industriais escolhe-se a composição da escória de trabalho. A escória cinza é o tipo desejado, designando um padrão de normalidade do forno.

Na Tabela 3 são apresentados os dados das análises obtidas pelo método via úmida.

**Tabela 3** – Resultado obtido das análises de Escórias

Observando as composições da série de tipos de escória, apresentadas na Tabela 2, algumas considerações podem ser feitas:

Visual	%Elementos						Ib <sub>2</sub>	IF	TOTAL	VE
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	MgO	MnO				
cinza										
<i>Máximo</i>	47,54	17,21	34,54	7,2	7,78	3,44	0,92	1,87	99,92	194
<i>Mínimo</i>	36,86	14,28	28,45	1,12	3,89	1,72	0,61	1,25	98,36	146
<i>Média</i>	41,325	15,503	31,355	1,921	6,654	2,373	0,765	1,505	99,130	163
Verde esc.										
<i>Máximo</i>	41,26	14,28	27,77	5,21	6,81	3,21	0,67	1,61	98,54	185
<i>Mínimo</i>	42,07	14,28	29,76	5,21	7,77	3,21	0,71	1,61	99,28	185
<i>Média</i>	41,26	14,26	27,77	3,34	6,81	2,08	0,67	1,5	98,54	164
<i>Média</i>	41,665	14,27	28,765	4,275	7,29	2,645	0,69	1,555	98,91	174,5
verde										
<i>Máximo</i>	40,23	14,02	32,46	2,23	7,28	3,09	0,81	1,37	99,31	155
<i>Mínimo</i>	41,21	16,72	33,19	2,6	8,25	3,81	0,85	1,62	99,31	180
<i>Média</i>	38,08	14,02	28,4	1,49	7,28	2,45	0,69	1,3	97,93	150
<i>Média</i>	39,406	15,631	31,264	1,778	7,66	3,057	0,797	1,419	98,796	161,2

- *Para escórias cinza:*

Por representar o padrão de normalidade, do alto-forno, essa escória corresponde a 57,6% do total de volume de escória, produzida pela indústria durante o período estudado.

- *Para escórias verdes claro:*

Corresponde a 34,18% do total de volume de escória, produzida pela indústria durante o período estudado.

- *Para escórias verdes escuro:*

Corresponde a 8,22% do total de volume de escória, produzida pela indústria durante o período estudado.

Na Tabela 3, têm-se os resultados da análise química de 27 amostras de escória, realizada no laboratório da Usimar, durante o mês de setembro do corrente ano, esta forneceu as bases para verificarmos as possíveis aplicações, seguindo os percentuais obtidos com os experimentos.

## 4 DISCUSSÕES

Observando as composições, da série de tipos de escória apresentadas nos experimentos, algumas considerações podem ser feitas:

- *Para escórias cinzas:*

O teor de óxido de magnésio (MgO) médio obtido foi de 6,65%, não estando este dentro dos padrões de análise típica, em que o MgO das escórias cinzas é

normalmente entre 1% a 5%.

A menor porcentagem de MgO encontrada foi 3,89%, implicando em menor índice de basicidade binária (0,61) e maior índice de fluidez (1,87).

O teor médio de  $Al_2O_3$  foi de 15,5%, estando dentro da faixa usual da alumina que é de 10% a 20%.

O índice de basicidade médio calculado foi de 0,765; enquadrando-se nos parâmetros de trabalho, geralmente na faixa de 0,70 a 0,95.

- *Para escórias verdes claro:*

As escórias de coloração verde claro, quando vazadas, apresentam temperatura média de 1.355°C e bom índice de fluidez (1,41) sendo o parâmetro aceitável entre 1 e 1,5.

O teor médio de MgO encontra-se dentro do padrão, normalmente menor que 10%. A porcentagem de alumina também obedece a faixa usual de 10% a 20%.

O índice de basicidade médio destas escórias (0,796) encontra-se na faixa aceitável (0,70 a 0,95).

- *Para escórias verdes escuro:*

A temperatura média da escória foi de 1.300°C, a essa temperatura, o ferro presente no FeO não é reduzido eficientemente. Devido a isso, este óxido incorpora-se em quantidade mais expressivas a escória, dando a ela uma coloração mais escura. Os teores médios de FeO encontrados foram de 4,275%, resultando em baixa fluidez (1,555) e geração de maior volume médio de escória, uma deficiência no processo.

#### 4.1 Utilização no Revestimento Asfáltico

Para que a escória seja utilizada, como sub-base para revestimento asfáltico, se faz necessário à comparação de suas características, com as definidas por Araújo<sup>(5)</sup> na Tabela 2. Por isso, observa-se a tabela a seguir (Tabela 4), considerando a porcentagem dos elementos de acordo com a coloração apresentada pelo material.

**Tabela 4** – Composição das escórias de cores cinza, verde e verde escura

Composto	Fórmula	Cinza %	Verde %	Verde Escura %
Sílica	$SiO_2$	36 – 48	38 – 41	41 – 42
Alumina	$Al_2O_3$	14 – 18	14 – 17	14 – 15
Cal	CaO	28 – 35	28 – 33	28 – 33
Magnésia	MgO	3 – 8	7 – 8	6 – 8
Óxido de Ferro	FeO	1 – 2	1 – 2	3 – 5
Óxido de Manganês	$MnO_2$	1 – 4	2 – 4	2 – 3

Observamos, na tabela (Tabela 4), um intervalo superior ao exigido em relação à sílica e magnésia; e inferior em relação à cal, sendo que este valor foi o que apresentou maior diferença em relação ao padrão exigido, assim não é aconselhável, seguindo o padrão adotado por Araújo,<sup>(5)</sup> utilizar a escória analisada como sub-base para revestimento asfáltico.

#### 4.2 Utilização como Aglomerado para Concreto e Cimento

Em Massucato,<sup>(7)</sup> tem-se a seguinte relação:  $(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2 > 1$ , que segundo o autor é: “única exigência da norma para a utilização da escória de alto-

forno como adição mineral ao concreto”. Sendo que, a partir desse valor, as escórias podem ser classificadas, como básicas ou não. Ao se considerar os valores médios obtidos chegam-se aos seguintes resultados: para escória de cor cinza, cerca de 1,3; para cor verde escura, cerca de 1,2; e para escória de cor verde é cerca de 1,4.

Esse valor é chamado de índice de hidraulicidade, que segundo Massucato,<sup>(7)</sup> se este índice for igual ou maior que um ( $\geq 1$ ), a escória possui atividade hidráulica, suficiente para ser usada na produção de cimento Portland de alto-forno e como adição no concreto.

Observando o critério estabelecido, é viável a adição das escórias analisadas ao cimento Portland, pois apresentam independente da coloração valor maior a um, critério estabelecido para utilização da mesma.

No caso da adição de escória no concreto, em Massucato<sup>(7)</sup> tem-se os exemplos de outros países que adicionam a escória com a mesma granulometria do cimento diretamente na betoneira, assim o cimento Portland de alto forno pode ser preparado na obra.

### **4.3 Utilização da Escória como Corretivo para Solo**

Em Prado,<sup>(8)</sup> após seus experimentos, verificou que a aplicação da escória de siderurgia, aumentou significativamente de forma quadrática o valor de pH, os teores de cálcio e magnésio, os valores da soma de bases e saturação por bases e diminuiu a acidez potencial do solo. As escórias analisadas, possuem como principais componentes os elementos: silício, magnésio e cálcio, que segundo o autor são responsáveis pela correção da acidez do solo, assim as escórias das siderúrgicas podem ser utilizadas para esse fim.

Uma possível utilização é no cultivo de arroz, pois segundo Barbosa o Si é o elemento absorvido em maior quantidade por este, cerca de duas vezes mais que o potássio. Como na análise a sílica aparece como o principal elemento, constituinte da escória, esta pode facilmente ser empregado neste tipo de cultura. Além de contribuir para neutralizar o solo.

Já na cultura de algodão, Cunha<sup>(9)</sup> em seus experimentos concluiu que o silício presente na escória, diminui o tempo de germinação do grão.

### **4.4 Aplicação como Preenchimento de Orifícios**

Uma sugestão para aproveitamento das escórias, seria como preenchimento de orifícios, gerados na retirada de barro, principalmente nas margens dos rios, para utilização das atividade cerâmicas, tendo em vista que para tal fim não é necessário um material com grande resistência a tração mecânica, isto seria utilizado para desocupar os pátios de estocagem do material nas siderúrgicas. Como a escória não apresenta, em sua composição, nenhum metal pesado, pelo contrário, esta pode ser utilizada como adubo na agricultura, não apresentará nenhum dano ao meio ambiente.

### **4.5 Aplicação na Composição de Materiais Cerâmicos**

Outra aplicação interessante, é a agregação da escória a cerâmica, para produção de telhas, tijolos de alvenaria e tijolos furados, a partir da mistura argila-escória. Em Moreira,<sup>(10)</sup> foram analisadas amostras de uma siderúrgica do pólo

siderúrgico de Marabá, sendo que o autor chegou a conclusão que “o uso controlado de escória misturado à argila para fabricação de produtos cerâmicos é tecnicamente viável, demonstrando também viabilidade para ser uma alternativa eficiente na diminuição de problemas de poluição.” Para chegar a tal conclusão análises físico-químicas foram feitas em amostras da escória.

## 5 CONCLUSÃO

Baseado nos dados contido em Araújo,<sup>(5)</sup> conclui-se que as características das escórias analisadas, não permitem uma adequada aplicação desta na sub-base de revestimento asfáltico. Porém, em outras aplicações a escória se mostrou adequada, sendo a mais significativa o emprego desta na produção do cimento Portland de Alto forno, juntamente como agregado mineral no concreto, conforme descrito em Massucato.<sup>(7)</sup> Como em Marabá, e tampouco nas cidades circunvizinhas, não existe indústrias de fabricação de cimento, esta aplicação apresenta dificuldade, tendo em vista o aumento de preço do material se este for transportado, mas como aditivo no concreto é perfeitamente viável, pois a cidade possui empresas que trabalham nesse segmento industrial.

A agricultura se mostra outra área de aplicação da escória, que pode ser usada como corretivo da acidez do solo, pois sua composição, segundo as análises realizadas, apresenta principalmente os elementos: silício, magnésio e cálcio; sendo que estes elementos segundo Prado,<sup>(8)</sup> são responsáveis por esta regulação. Além disso outros benefícios podem ser alcançadas com o incremento da escória ao solo, como a diminuição do tempo de germinação do algodão, conforme observado por Cunha.<sup>(9)</sup>

Na composição de materiais cerâmicos a escória pode ser acrescentada, conforme verificado em Moreira,<sup>(10)</sup> representando de 20% a 25% dependendo do produto, sem contudo mudar as características de tensão de ruptura a flexão e absorção a água.

Assim, análises químicas realizadas nas amostras de escórias, provenientes do Distrito Industrial de Marabá, viabilizou a comparação dos aspectos relevantes para aplicação desta como substituinte de materiais com características semelhantes, demonstrando a possibilidade de adição do material a cimentos, concretos, corretivo de acidez de solo, aterro e cerâmicos. O que agrega valor a escória, deixando de ser apenas um resíduo, propiciando assim rentabilidade.

## REFERÊNCIAS

- 1 SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE FERRO-GUSA DO ESTADO DO PARÁ. Distrito Industrial de Marabá: desenvolvimento e verticalização. Pólo Sustentável, v.1, 2007. Disponível em: <<http://www.sindiferpa.com.br/polosustentavel/polo20070910.pdf>>. Acesso em: 07 de out. de 2008.
- 2 RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos siderúrgicos. São Paulo: ABM, 2005.
- 3 MORAES FILHO, B. M.; COSTA, D. S. Análise Experimental do Processo de Fabricação de Material Cerâmico Utilizando Escória de Alto Forno e Argila. 2004. 47 p. (Monografia do Curso de Especialização em Tecnologia Mineral e Metalurgia. Universidade Federal do Pará).
- 4 PINHEIRO, L. C. L. Instrução Técnica de Laboratório: Análise Química de Escória

- (Processo Via-Úmida). USIMAR: 2006.
- 5 ARAÚJO, L. A. Manual de siderurgia - Produção. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. v.1.
  - 6 VIEIRA, C.B.; VIEIRA FILHO, J.B. Fundamentos de Escórias de Altos Fornos a Carvão Vegetal. Açailândia, MA: TPG Ltda., 1990.
  - 7 MASSUCATO, C. J. Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto. Campinas, SP: [s.n.], 2005.
  - 8 PRADO, R. M.; FERNANDES, Francisco Maximino. Escória de siderurgia e calcário na taxa de folhas senescentes da cultura da cana-de-açúcar. Revista de Agricultura, Piracicaba, V.75, fasc.3, 2000. Disponível em: <[www.fcav.unesp.br/download/deptos/solos/renato/07.pdf](http://www.fcav.unesp.br/download/deptos/solos/renato/07.pdf)>. Acesso em: 07 de out. 2008.
  - 9 CUNHA, P. F. F. C. et al. Cultivo de algodão herbáceo com adubação de escória siderúrgica: avaliação de crescimento. Publicações, Embrapa, 2005. Disponível em: <[www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos\\_cba5/440.pdf](http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos_cba5/440.pdf)>. Acesso em: 09 de out. 2008.
  - 10 MOREIRA, A. C. M.; COSTA, D. S. Estudo do aproveitamento da escória de alto forno das siderúrgicas de marabá-pa para fabricação de material cerâmico. In: CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 17., 2006, Foz do Iguaçu. Resumos... Foz do Iguaçu: 2006. p. 2044.