

37ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO  
11º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA  
37ª RAPv/11º ENACOR

GOIÂNIA/GO – BRASIL – 08 A 11 de agosto de 2006

## **CARACTERÍSTICAS E DESEMPENHO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO AGREGADO PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS**

*Cristiano Costa Moreira*<sup>1</sup>

### **RESUMO**

Este trabalho tem objetivo geral de discutir o uso de escórias de alto forno para utilização em camadas de pavimento rodoviários., avaliar procedimentos laboratoriais para controle tecnológico e interpretar os aspectos geoquímico e geotécnico, visando validar o uso de “Escórias de Alto Forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos”. Para atingir o objetivo geral, adotou-se os seguintes objetivos específicos:

- divulgar para a comunidade a necessidade de classificar, distinguir comportamentos e desempenhos das Escórias de Alto Forno, produzidos na região central de Minas Gerais;
- mostrar os resultados obtidos em um universo da ordem de 26 ensaios completos, de várias procedências;
- discutir outros ensaios poderem ser aplicados para auxiliar na caracterização física e química;

---

<sup>1</sup> Cristiano Costa Moreira, Av. dos Açudes, 99 – Belo Horizonte – MG CEP: 30.550-020 – solocap@solocap.com.br

- demonstrar a capacidade destas escórias de comportar-se satisfatoriamente, em aplicações como materiais granulares para camadas de bases e sub-bases, podendo ser aplicadas também, em misturas com solos locais para reforço de subleito, sob a luz das especificações aqui consideradas, frente aos resultados dos ensaios realizados em laboratório desses materiais em obras reais.

#### **PALAVRAS-CHAVE:**

Escória, Alto-forno, Expansão.

#### **ABSTRACT**

This research attempts to show the

The general objective of this paper is to propose the use of blast furnace slag as an addition to motorways' base courses under a laboratory perspective of the geo-chemical and geo-technical characteristics through the discussion, interpretation and the creation of laboratory procedures with the aim of completely validating the blast furnace slag as a material prone to be mixed with local materials and become a new granulated material constituting a new base course layer. This general objective will be accomplished with the achievement of the following specific objectives developed in the present paper:

- Revealing the necessity of classifying and distinguishing the behaviors and performance of blast furnace slag
- Demonstrating the results obtained in 10 complete experiments.
- Discussing the possibility that other experiments could be designed to help with the physical and chemical characterization of this slag.
- Demonstrating the capacity of this slag to behave satisfactorily when used, for example, in granulated materials for base and sub-base layers, and their potential to be used in mixtures with local soil to strengthen the sub-structure, in accordance with the specifications considered here, the results of laboratory experiments, and the works that are currently being undertaken.

#### **KEY WORDS:**

Slag, blast furnace, expansion.

## APRESENTAÇÃO

Nos últimos 30 anos, foram utilizadas escórias de várias procedências em pavimentos rodoviários, na região metropolitana de Belo Horizonte, como constituintes de base e sub-base. Há evidências de vários sucessos e alguns registros de insucessos. Entre as ocorrências de insucessos, são citadas deformações permanentes, enrugamentos, sollevamentos e erupções localizadas nos revestimentos asfálticos, que a princípio eram debitadas unicamente às reações químicas e conseqüentes expansões das escórias, e ainda, citações de prováveis expulsão de gases. Existem poucos registros históricos que permitam associações com as características das escórias, tais como : tipo; procedência; idade da produção e do beneficiamento das escórias, que possam ser devidamente esclarecidos, deixando uma grande dúvida sobre suas verdadeiras características e suas condições de aceitação. Tais acontecimentos, marcaram de forma decisiva a imagem do desempenho atípico das escórias utilizadas. Sabe-se que algumas destas escórias foram procedentes de aciarias e outras de altos fornos. Há estudos isolados, para classificações, avaliações e definições, tanto do aspecto geotécnico, como nas especificações de serviço durante a fase executiva, entre estes estudos cita-se, visita executada pela Equipe Técnica da Diretoria de Engenharia do DER-MG, ao estado da Pensylvania nos E.U.A.,<sup>(1)</sup> em 1981, onde observaram revestimentos em camadas de rolamento, bases e sub-bases, executadas com utilização de escórias de aciaria, quando trouxeram valiosas informações e procedimentos de avaliações, que hoje adotamos para as escórias de alto forno. Posteriormente, o IBS Instituto Brasileiro de Siderurgia, 1988, formou o Grupo de Trabalho- GT Escórias – Aplicações de Agregados Siderúrgicos em Pavimentação. Também em 1.988<sup>(2)</sup> o IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias publicou o manual – Escórias siderúrgicas – Material de múltiplas Aplicações.<sup>(3)</sup> Nestes trabalhos são mostradas escórias de aciaria como de alto forno. Revendo as literaturas, pode-se constatar que existem vários trabalhos publicados, visando à utilização das escórias de alto forno e principalmente de aciaria como aditivo do cimento para concretos e argamassas.<sup>(4)(5)(6)(7)(8)</sup>

Como a maior produção das escórias, de aciaria e de alto forno, são próximas a centros urbanos desenvolvidos com grande demanda de materiais granulares, as suas utilizações tornam-se uma necessidade, tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental, face aos grandes volumes existentes e a grande alimentação dos estoques dia após dia.

Em função da deficiência das especificações e parâmetros definidores de aceitação capazes de avaliar estes materiais, tanto no aspecto físico, físico-químico e químico, de forma mais ampla, especialmente as escórias de alto forno, nossa equipe foi incorporando práticas e outros ensaios, a partir das literaturas nacionais e internacionais, que hoje faz parte deste trabalho.

## HISTÓRICO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

### Introdução

Escórias são utilizadas nas indústrias de aglomerantes há muitos anos, sendo interessante que já em 1862 Eugene Langen, em Troisdord – na França, efetuou os primeiros ensaios de que se tem notícia sobre a granulação das escórias (vitrificadas), demonstrando que, destas escórias básicas, moídas e misturadas com cal hidráulica advinha um material que, sem alcançar a qualidade do cimento portland, superava os sistemas que só utilizavam cal como ligante<sup>(7)</sup>

A composição química das escórias de alto forno obtida sob a forma granular, expressa em óxidos, tem como principais constituintes os óxidos de silício  $\text{SiO}_2$  – óxido de alumínio –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , óxido de cálcio -  $\text{CaO}$ , óxido de magnésio -  $\text{MgO}$ , óxido de ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que correspondem a aproximadamente 95% do total. Pode-se dizer que as escórias de alto forno são rochas metamórficas tipo silicíticas – levemente ácidas, com significativo teor em óxidos de cálcio e magnésio.

Composições químicas típicas das escórias de alto produzidas em Minas Gerais, em termos dos elementos com maiores participações no comportamento expansivo, são apresentadas no quadro abaixo;

Ordem	Materiais	Composição percentual
1	$\text{SiO}_2$	20-40
2	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3 - 18
3	<b>CaO</b>	12 - 30
4	<b>MgO</b>	2 - 9
6	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10 - 25
10	S	0,1-2,0

A escória resulta da combinação dos minerais da canga de minério de ferro, das cinzas do coque ou do carvão vegetal e do calcário utilizado como fundente. Secundariamente existem outros materiais tais como: sulfetos de cálcio e manganês, etc.

A composição química das escórias e suas propriedades físicas, mecânicas e geoquímicas, de interesse para a construção civil, seja para a indústria cimenteira, ou para a produção de agregados artificiais empregados na construção civil, ou para composições de camadas granulares de pavimentos, dependem de vários fatores tais como:

- dos insumos – composição do minério e outros minerais metálicos utilizados,
- dos aditivos minerais especialmente os fundentes - calcário calcítico ou calcário dolomítico;
- da eficiência de operação dos altos fornos;
- dos sistemas de resfriamentos
- e depois de resfriada, da série histórica da produção / estocagem “in natura” e produção / estocagem “após beneficiamento”.

A principal função do alto forno consiste na remoção do oxigênio do minério de ferro, transformando este em ferro metálico e sua separação das partes não metálicas (a escória).

A separação do ferro é obtida a partir da reação do óxido de ferro (canga de minério) com o CO (monóxido de carbono) decorrente da combustão do carvão mineral (coque) ou do carvão vegetal.

A parte metálica (Fe<sup>0</sup>) por sua vez é separada da não metálica pela fusão a aproximadamente 1500°C, quando é formada a escória, menos densa, que incorpora todas as impurezas indesejáveis, e corresponde ao líquido mais leve (menos denso) sobrenadante que se separa do gusa também líquido, e posteriormente se solidificada (cristaliza ou não) ao ser resfriada.

Após a escória ser recolhida do alto forno, dependendo do sistema de resfriamento poderá apresentar quatro ou mais tipos de materiais predominantes e distintos, que irão definir suas mais variadas aplicações.

1º Tipo – Cristalizada – Resfriamento “lento” em estoques / pilhas ao ar livre. Origina um produto maciço e cristalizado. Estocado e posteriormente britado dão origem aos agregados para construção civil e para a pavimentação.

2º Tipo – Vítreo – Resfriamento “rápido” ao cair em tanques com água – Tanques de granulação. Origina um produto similar em granulometria às areias – Utilizada tradicionalmente pela indústria cimenteira como aditivo na produção do cimento

3º Tipo – Expandida – Resfriamento “rápido” por jatos d’água sob pressão. Origina a escória expandida, geralmente utilizada como agregados leves para concretos especiais.

4º Tipo – Lã de vidro – Resfriamento “rápido” por ar sob pressão. Origina-se a lã de vidro, com propriedades isolantes, térmicas e acústicas.

Existe um 5º tipo, que é chamado de Escoria Peletizada, desenvolvido no Canadá, quando é peletizada (pulverizada) com ar sob pressão em grandes tambores. Esta apresenta alto grau de vitrificação e excelentes moabilidade para a indústria cimenteira.

Constata que as características finais da escoria é dependente do processo de resfriamento, e este, governa a microestrutura, cristalina ou vítreo, com enormes implicações nos seus comportamentos e nas suas aplicações finais, sejam como agregado ou como aglomerante.

### **Características das Escórias**

As propriedades fundamentais das escórias dependem da hidraulicidade, (capacidade ou não de alguns de seus óxidos reagirem em meio saturado, formando sais insolúveis e estáveis) que por sua vez depende de sua composição química e principalmente da sua forma de obtenção, seja no estado sólido vítreo resfriado ou no estado sólido cristalino resfriado.

As escórias vítreas mantêm as propriedades hidráulicas desejadas para a indústria cimenteira, pois se comportam termodinamicamente instáveis e hidraulicamente latentes podendo ser ativadas, em função de sua granulometria em meio aquoso.

As escórias cristalinas, ou seja, aquelas resfriadas lentamente, carecem de propriedades hidráulicas e são em sua maioria, termodinamicamente estáveis, comparativamente às escórias vitrificadas, comportando-se relativamente como agregados inertes, e são classificados na classe 3 - NBR-1004 – materiais inertes.

Do ponto de vista mineralógico, pode-se dizer que as escórias são menos inertes geoquimicamente que os agregados naturais. O conceito geral de que não existem agregados naturais totalmente inertes, apesar de todos eles terem estados expostos, durante longos períodos de tempo sob ação conjunta de todos os agentes capazes de produzir determinado grau de intemperismo, e por consequência, ter produzido um notável estado de pasivação, que pode ser avaliado através de ensaios de caracterizações físicas e mecânicas, rotineiramente adotados por instituições rodoviárias.

A composição mineralógica da escoria de alto forno, depende do tipo de resfriamento. Quando é submetida a esfriamento rápido, constitui-se majoritariamente vítreo, e aptas para serem utilizadas como aditivos ou ligantes hidráulicos; quando se esfria lentamente, constituem-se majoritariamente cristalinas, aptas para serem utilizadas como agregados. Esta última apresenta-se como uma mistura estável composta por silicoaluminato cálcicos e magnésio.

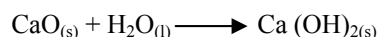
Comparativamente, as escórias de alto forno, podem ser vistas geologicamente como sendo rochas basálticas - metamórficas, quando na natureza, o abaixamento relativamente rápido da temperatura retarda o crescimento de cristais, gerando rocha de textura fina (afanítica)((9)(10)

Do ponto de vista geotécnico, os agregados constituídos de escórias cristalizadas de alto forno, são caracterizados e avaliados de maneira análoga a outros agregados, tendo-se em conta que, as escórias podem apresentar sensíveis aos estados de saturação em água, e a variações de pequenos intervalos de temperaturas, devendo portanto, serem avaliadas sob a possibilidade de sua desagregação / desintegração / decomposição.

A desagregação / desintegração / decomposição por sua vez, diz respeito à sua instabilidade volumétrica e as conseqüências destas, devidas principalmente pela hidratação de certos compostos cálcicos e magnesianos na forma de óxidos livres, ou seja, não combinados, que podem estar presentes superficial ou internamente nos alvéolos ou capilar, ou ainda, na possibilidade das mudanças nas formas alotrópicas (alotropia-fenômeno que consiste o elemento químico em poder cristalizar em mais de um sistema cristalino, e ter, por isso, diferentes propriedades físicas) do C<sub>2</sub>S – (2CaO.2SiO<sub>2</sub> – silicato dicálcico ou ortossilicato), e finalmente, as expansões devidas à corrosão e oxidação do ferro metálico residual.

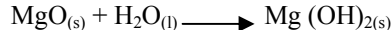
As transformações dos óxidos para o estado dos hidróxidos correspondentes, durante os processos de hidratação, seja no laboratório ou no campo; ocorrem de acordo com as equações:

Óxido de cálcio livre (CaO) forma o hidróxido de cálcio (Ca (OH)<sub>2</sub>)



Na hidratação do óxido de cálcio livre (CaO), há um aumento de 99% em volume e de 54% em superfície. A variação de volume, em alguns casos, leva à desintegração do fragmento devido às tensões criadas pelas diferenças de volume molar. Estudos do efeito da cal livre em argamassas utilizando escórias de aciaria, alguns autores indicam que o valor máximo tolerável deve ser < 4 a 5 % <sup>(5)</sup>

De forma análoga, porém, com presença bastante inferior, o óxido de magnésio (MgO) procedente dos calcários dolomíticos utilizados como fundentes ou carreados devido ao desgaste dos revestimentos refratários do forno, criam a presença destes na escória, que em contato com umidade, hidrata-se lentamente:



Ao se hidratar, o óxido de magnésio (MgO) forma o hidróxido de magnésio ou brucita (Mg (OH)<sub>2</sub>). Segundo <sup>(5)</sup> nessa transformação, o cristalito de hidróxido de magnésio pode aumentar de volume em até 119,54% do volume inicial do cristalito de MgO.

Os óxidos de magnésio susceptíveis de hidratação, são somente no estado livre, na forma de periclásio (MgO). Os óxidos de magnésio quimicamente combinados na forma de monticelita (CMS<sup>3</sup> = CaO.MgO.SiO<sub>2</sub>) e da merwinita (C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub> = 3CaO<sub>3</sub>.MgO.SiO<sub>2</sub>) são quimicamente estáveis, segundo “SHOUSUN, L.” <sup>(5)</sup>

Outro responsável pela expansão volumétrica, é a presença do “ferro metálico” retido na escoria. Este metal, após os processos de corrosão e oxidação, que inicialmente aparecem sob a forma de íons Fe<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup>, são mostrados nas equações abaixo:

Ordem	Formação	Produto formado
1	Reações de oxidação	
1.1	$\text{Fe}^0 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wüatita
1.2	$2\text{Fe}^0 + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
1.3	$3\text{Fe}^0 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
2	Reações de corrosão	
2.1	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe(OH)}_2$	Hidróxido ferroso
2.2	$4\text{Fe(OH)}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe(OH)}_3$	Hidróxido Férrico

Os estágios de corrosão e oxidação de ferro metálico contribuem para transformações volumétricas.

Estes por suas vezes, comportam-se de maneira instável quanto ao seu volume, ou seja, ocorre uma alteração de volume da fração alterada dentro do fragmento, gerando tensões de compressão, podendo levar à desintegração total ou parcial dos fragmentos.

De outro lado, as alterações volumétricas, causadas pelos óxidos livres, podem contribuir significativamente, quando se tem aresta em contatos por superfícies contínuas de produtos alteráveis, entre as fases anidras até as fases hidratadas. Estas alterações podem ser distribuídas linearmente ao longo de determinada extensão, causando deformações (expansões) nas camadas das estruturas de pavimentos. É bem provável, que este comportamento não seja, perfeitamente identificado, nos procedimentos convencionais de determinar os valores das expansões das escórias.

As expansões devidas às transformações alotrópicas do silicato dicálcico, referem-se as fases polimorfas que este elemento adquire desde a escoria no estado líquido até o seu resfriamento no estado cristalino, conhecidas como do

tipo  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . As transformações de fases no estado cristalino de  $\beta \rightarrow \gamma$ , ocorre de forma lenta quando a escoria se encontra no estado sólido, a partir de 725°C, conduzindo determinada fração da escoria à instabilidade volumétrica, podendo promover uma elevada expansão, gerando pulverização do estado não metálico, apesar dos produtos finais serem pouco reativos a ação da água à temperaturas ambientes. Do exposto, pode-se dizer que o comportamento expansivo de determinada fração das escórias é resultante dos processos de: resfriamento, hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio livres, transformações alotrópicas do C<sub>2</sub>S no resfriamento lento, e ainda, corrosão e oxidação do ferro metálico.

### Parâmetros Químicos de Influência sobre a Expansão

Abaixo na tabela, são mostrados alguns fatores de maior influência na expansão ou estabilidade de determinada fração das escórias.

Elemento químico	Parâmetros de influência	Mecanismo
CaO e MgO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor no estado livre</li> <li>• Umidade ambiental</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Teor de CO<sub>2</sub></li> <li>• Granulometria</li> </ul>	Hidratação
Fe <sup>o</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de Fe<sup>o</sup></li> <li>• Umidade ambiental</li> <li>• Tempo de exposição ao ar</li> <li>• Granulometria</li> </ul>	Oxidação
C <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de resfriamento</li> <li>• Impurezas iônicas</li> <li>• Temperatura de resfriamento</li> <li>• Basicidade das escórias</li> </ul>	Transformações alotrópicas

### Efeito dos teores de CaO e MgO na estabilização da Escória

Os teores de CaO e MgO e os respectivos produtos da hidratação são os maiores responsáveis pela estabilização das escórias, como foi comentado antes. Observa-se que tais teores são variáveis em função da capacidade de ação da umidade sobre as pilhas de estocagem da escoria e o tempo de exposição destas. Estudos comprovam que numa pilha de estoque de escoria, os teores de cal livre variam em função da profundidade, ou seja, altura de referência da pilha de estoque, uma vez que as camadas superficiais formam uma capa protetora à infiltração da umidade, fazendo com que não haja condições favoráveis para as hidratações dos óxidos situado nas camadas mais profundas, permanecendo em estados livres.

### Efeito da granulometria na estabilização do CaO e MgO

Além das condições ambientais, especialmente de umidade, do tempo de exposição, a composição granulométrica dos grãos da escoria – entende-se grãos com diâmetros correspondentes a: argilas, siltes, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho; exercem grande influência sobre os processos de hidratações. Quanto maior for a superfície específica exposta às intempéries, maiores serão as interações escoria-ar-água ou escoria-água-ar, e portanto, melhores e maiores serão as porcentagens de óxidos transformados nos processos de hidratação em produtos estáveis, antes de serem trabalhados e compactados em camadas

### Caracterização das Escórias

As escórias de alto forno utilizadas em pavimentação, devem ser caracterizadas visando medir seu desempenho sob as diversas formas das solicitações, tanto no aspecto físico como no aspecto químico, seja à força de impacto, atrito – estático e dinâmico, de esmagamento, de compressão, e ainda, dos agentes de intemperismo – variações de temperaturas, variação da umidade – desde o estado seco, na umidade de equilíbrio até a saturação, sobre os efeitos da iônica destas umidades no processo de lixiviação.

Do ponto de vista do aspecto físico, cita-se todos os parâmetros de caráter físico mecânico, incluindo a expansibilidade geométrica. Esta é perfeitamente determinada pela medição da alteração do volume de determinada massa compactada, em condições próprias dos ensaios, sejam; através do método da compactação convencional – NBR – NBR-7182, ou o método do Departamento de Transporte do Estado da Pensilvânia – USA – PTM-130 adaptado pelo DER-MG, e outros. Não é possível determinar a expansão das escórias pelo método convencional.



**Caracterizações físicas – Parâmetros e Valores Especificados**

Ordem	Parâmetro	Unid.	Método	Especificações				
				DNIT			França	AASHTO
				Es-260	ES-262 <sup>(*)</sup>	ES-031		
1	Absorção de água	%	NBR-9937	1 a 3	1 a 2	-	---	---
2	Porosidade aparente	%	NBR-9937			-	---	---
3	Expansibilidade – DNER <sup>(a)</sup>	%	ME-029	< 10 <sup>(2)</sup>	< 5	---	---	---
4	Potencial de Expansão	%	PTM-130		< 3,0 <sup>(1)</sup>	---	---	---
5	Durabilidade - Sulfato magnésio- DNER	%	ASTM-C-88	< 10		<12	---	---
6	Compactação	%	NBR-7182	---	---	---	---	---
7	Umidade ótima	%	NBR-7182	---	---	---	---	---
8	I.S.C-Índice de Suporte Califórnia	%	NBR-9895	---	---	---	---	---
9	Desgaste - Abrasão Los Angeles	%	NBR-6465	< 35	< 25	> 50	---	---
10	Granulometria por peneiramento	%	NBR-7181	Faixas			---	---
11	Impurezas Orgânicas	Ppm	NBR-7220	< 300		< 300	---	---
12	Índice de forma	---	NBR-7809			< 0,5	---	---
13	Massa específica aparente	g/cm <sup>3</sup>	NBR-9937	2 a 3	3 a 3,5	---	---	---
14	Limite de liquidez	%	NBR-6459	---	---	---	---	---
15	Limite de plasticidade	%	NBR-7180	---	---	---	---	---
16	Massa unitária	%	NBR-7251	1,10 a 1,24	1,5 a 1,7	---	---	---
17	Materiais carbonosos –	%	ASTM-C-123	---	---	---	---	---
18	Degradação do Estado Washington-AASHTO	--	17-T	---	---	---	---	> 15
19	Resistência ao Esmagamento	%	NBR-9938	---	---	---	---	---
20	Equivalente de Areia	%	NBR-12052	---	---	> 55	---	---
	<b>Caracterizações químicas</b>					---	---	---
21	SiO <sub>2</sub> - (Óxido de Silício) <sub>(total)</sub>	%	Gravimétrico	---	---	---	---	---
22	CaO – (Óxido de Cálcio) <sub>(total)</sub>	%	EAA chama	---	---	---	---	---
23	MgO – (Óxido de magnésio) <sub>(total)</sub>	%	EAA chama	---	---	---	---	---
24	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – (Óxido de Ferro) <sub>(total)</sub>	%	Titulométrico	---	---	---	---	---
25	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – (Óxido de alumínio) <sub>(total)</sub>	%	EAA Chama	---	---	---	---	---
26	S – (Enxofre) <sub>(total)</sub>	%	Leco	---	---	---	---	---
	<b>Relações Químicas – Eq. de equilíbrio</b>		-	---	---	---	---	---
27	% CaO/% SiO <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-	Cálculo	---	---		< 1,4	---
28	S <sub>total</sub>	-	Cálculo	---	---	---	< 2 %	---
29	CaO + 0,8MgO	-	Cálculo	---	---	---	≤1,28 SiO <sub>2</sub> + 0,4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---
30	Ca O	-	Cálculo	---	---	---	≤ 0,9 SiO <sub>2</sub> + 0,6 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1,75S	---

<sup>(a)</sup> Citada na especificação DNER-ES-378/98 – Base estabilizada Granulometricamente com utilização de solo laterítico;

**Quadro dos Resultados Ensaio – Valores Estatístico**

Ordem	Parâmetro	Unid.	Resultados Estatísticos					Número
			Média	Máximo	Mínimo	Coef.Var	Desv.Pad	
1	Absorção de água	%	3,00	6,89	0,08	73,81	2,21	9
2	Porosidade aparente	%	5,33	18,80	0,14	104,34	5,56	8
3	Expansibilidade	%	7,76	12,30	3,82	29,38	2,28	10
4	Potencial de Expansão	%	0,09	0,80	0,00	259,61	0,22	12
5	Durabilidade - Sulfato magnésio	%	2,22	5,00	5,00	43,91	0,97	10
6	Compactação - Dens. Máxima seca	g/cm <sup>3</sup>	1,672	2,026	1,328	9,59	0,16	26
7	Umidade ótima	%	8,3	14,0	5,0	30,0	2,5	26
8	I.S.C-Índice de Suporte Califórnia	%	97	147	73	26	25	6
9	Desgaste - Abrasão Los Angeles	%	40	45	35	8,4	3,4	11
10	Granulometria por peneiramento	%	abaixo					
11	Impurezas Orgânicas	Ppm	< 300	< 300	< 300	--	--	5
12	Índice de forma	---	0,91	0,95	0,89	2,50	0,02	4
13	Massa específica aparente – Dens. Real	g/cm <sup>3</sup>	2,432	2,777	1,734	11,64	0,283	14
14	Limite de liquidez	%	NL	NL	NL	-	-	5
15	Limite de plasticidade	%	NP	NP	NP	-	-	5
16	Massa específica aparente solta	%	1,153	1,279	1,053	8,0	0,1	8
17	Materiais carbonosos (Em areias especiais)	%	1,40	2,2	0,9	29	0,4	7
18	Degradação do Estado Washington		46,5	48,0	45,0	3,2	1,5	2
19	Resistência ao Esmagamento	%	46,0	50,0	42,0	8,7	4,0	2
20	Equivalente de Areia	%	86	96	80	8	7	3
	<b>Caracterizações químicas</b>							
21	SiO <sub>2</sub> - (Óxido de Silício) <sub>(total)</sub>	%	34,3	39,5	23,6	12,3	4,2	10
22	CaO – (Óxido de Cálcio) <sub>(total)</sub>	%	22,4	30,1	14,3	21,8	4,9	10
23	MgO – (Óxido de magnésio) <sub>(total)</sub>	%	4,7	6,4	2,2	27,5	1,3	10
24	SiO <sub>2</sub> – (Óxido de Ferro) <sub>(total)</sub>	%	16,2	35,3	9,9	54,4	8,8	6
25	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – (Óxido de alumínio) <sub>(total)</sub>	%	8,88	13,68	4,38	38,87	3,45	10
26	S – (Enxofre) <sub>(total)</sub>	%	0,13	0,17	0,09	22,8	0,03	10
	<b>Relações Químicas – Equações de equilíbrio</b>							
27	% CaO/% SiO <sub>2</sub>		Ok	Ok	Ok	-	-	
28	S <sub>total</sub>		Ok	Ok	Ok	-	-	
29	Ca O + 0,8MgO ≤ 1,28 SiO <sub>2</sub> + 0,4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Ok	Ok	Ok	-	-	
30	Ca O ≤ 0,9 SiO <sub>2</sub> + 0,6 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1,75S		Ok	Ok	Ok	-	-	

## Comentários

Comentam-se adiante, os parâmetros especificados, os conceitos dos autores e de técnicos especialistas nas várias áreas do estudo petrológico, a saber:

### a) Absorção Porosidade

Este ensaio tomado para comentário em primeiro plano, face de a literatura demonstrar a existência de uma função direta destes com todo comportamento mecânico das rochas silicíticas naturais, para valores da ordem de 10%<sup>(9)</sup>. Os resultados encontrados parecem confirmar ser bastante válido para as escórias. Os valores citados especialmente nas especificações DNER – ES-262/94, não parecem sensatos no limite inferior e muito pequeno no limite superior, ou seja de 1 a 3%. Valores menores do que 1% deveria ser adequado, de outro lado, temos encontrado valores de até 7%, estando todas as demais características das escórias satisfatórias, especialmente durabilidade e potencial de expansão.

O comportamento puramente físico da absorção e da porosidade, a composição mineralógica, efeitos estruturais e texturais durante a cristalização e a curva granulométrica, demonstram muita correlação com outros parâmetros: expansibilidade, degradação granulométrica, massa específica aparente, durabilidade, abrasão Los Angeles, e ainda, influência sobre a umidade ótima determinada no ensaio de compactação.

### b) Expansibilidade

Este ensaio desenvolvido pela Eng<sup>a</sup>. Elda de Castro do LNEC – Lisboa, normalizado pelo DNER, foi originalmente proposto, para avaliar a expansibilidade dos solos lateríticos, limitando o valor em 10%. Os solos lateríticos, pobres em oxido de silício - SiO<sub>2</sub>, devem apresentar a relação sílica sesquióxidos (SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) > 2, ou seja não devem conter argilas com alta atividade como as montmorilonitas, sob risco de altos valores de expansibilidade <sup>(10) (13) (14)</sup>. Não é o caso das escórias, pois estas não contêm nada em argilas e são relativamente ricas em silício. A adoção deste ensaio foi tomada como fator de referência, e como forma de auxiliar a interpretação da absorção e da porosidade, não sendo, portanto definidora de comportamento expansivo das escórias.

De maneira geral as escórias apresentam pequena fração abaixo da # 40. A adoção deste ensaio passou a representar a medida da expansão como comportamento físico, muito mais ligado às suas características de absorção e porosidade do que propriamente da expansão. Tratar de um ensaio simples, fácil e baixo custo .

### c) Potencial De Expansão - Método – PTM – 130

A especificação – DNER – EM-260 – Escoria de Alto Forno para Pavimentos Rodoviários, não solicita nas suas condições específicas a necessidade de executar este ensaio. No entanto, com base no texto e especialmente por falta da série histórica das escórias, desde os critérios de resfriamento, produção, beneficiamento e estocagem, pode-se entender a necessidade de estar sempre executando este ensaios.

Os ensaios executados obedeceram às recomendações do Método, com as respectivas adaptações feitas pelo DER-MG.

Todos os valores de expansão são iguais a “Zero”, ou seja, indica que as escórias de alto forno não apresentam nenhuma leitura sensível aos extensômetros na escala de 1/100 mm.

Um n° reduzido de amostra foi dividido em duas frações –  $\phi > \# 3/16$  e  $\phi < 3/16$ . Estas, foram submetidas aos ensaios normal, apresentando leitura igual a 0(zero). Permitiu concluir que no âmbito da amostras estudadas, as respectivas frações não apresentam valores de expansão

A literatura internacional indica vários procedimentos para determinar as expansões, em outras temperaturas e outros períodos de saturação e secagem.

### d) Durabilidade a Sulfato de Magnésio

O ensaio de durabilidade é a forma de medir o desempenho – resistência, do agregado, sob o efeito expansivo dos sais (sulfato de magnésio ou sulfato de sódio) durante a ciclagem saturação / secagem, que é um fenômeno similar à ação degelo e gelo da água, penetrando na capilaridade, devida á absorção e porosidade dos fragmentos. Geoquimicamente existe a possibilidade de solubilização dos argilo minerais secundários alterados ou em alteração presentes, especialmente quando se utiliza o sulfato de magnésio.

Entre os minerais secundários citam-se os silicatos complexos de alumínio, magnésio, sódio e cálcio hidratados. Em alguns casos essa degradação física é denominada desintegração, e, em outros casos, de caráter químico chamado de decomposição. Nas escórias de alto forno, são extremamente pequenas as frações que desintegram fisicamente e menor ainda a que decompõe quimicamente, abaixo dos limites recomendados para agregados naturais

e) Compactação e Umidade Ótima e I.S.C.

Todos as amostras comportaram-se normais, ou seja, idênticas a outros materiais granulares naturais, inclusive nos intervalos de umidades ótimas. Os valores estatísticos são mostrados abaixo:

Parâmetros	M.E.A seca	Variações máximas	Hót	Variações máximas
Média	1,719	17,3 %	8,3	40,7 %
Máximo	2,079		14,0	
Mínimo	1,328		5,0	
Coefficiente de Variação	11,2	-	28,4	-
Desvio padrão	0,19	-	2,3	-
<b>Número amostral</b>	30	-	30	-

As variações observadas, são decorrentes das variações das composições granulométricas, dos valores de porosidades e absorção, das composições mineralógicas dos fragmentos, do histórico de produção e estocagem. Este comportamento indica a necessidade de estar sempre controlando e determinando estes parâmetros, visando de um lado o nível da qualidade, e de outro, os quantitativos de massas e volumes.

f) Desgaste por Abrasão Los Angeles

Todos os resultados situam-se numa faixa restrita, entre 35 a 45 %, ligeiramente acima dos limites das especificações DNER - EM - 260/90 – Escórias de Alto Forno para Pavimentos Rodoviários, DNER - EM - 262/90 – Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários. No entanto, inferiores a 50% recomendados pelas especificações DNIT-ES-303/97 – Base estabilizada Granulometricamente e DNIT-031/2004 – Concreto Betuminoso usinado a quente.

Historicamente este ensaio é considerado inadequado por alguns técnicos da comunidade rodoviária como referência por si só, de dureza das rochas, o que é uma verdade sob o ponto de vista da resistência mecânica das rochas. O ensaio simplesmente mede a porcentagem de fragmento que desintegram de frações pedregulho em diâmetros da areia grossa a fina, passante na # nº 12 – (1,62 mm), sob condições de cargas abrasivas, de impacto e atrito de esferas metálicas. Este ensaio desenvolvido nos EUA, no início do século passado, pode ser um coadjuvante na representação da resistência dos materiais que trabalham essencialmente por atrito. Mesmo assim, vários autores brasileiros dão pouco valor para o resultado <sup>(11)</sup>, inclusive no EUA, onde já é normalizado outro ensaio - Degradação do Estado de Washington.

g) Granulometria

O quadro adiante ilustra as curva granulométricas médias antes e após a compactação.

Ensaio	Granulometria por peneiramento úmido - % passando											
	Antes da compactação						Após compactação					
Peneiras	1	3/8	4	10	40	200	1	3/8	4	10	40	200
Média	100	82	62	39	16	7	100	83	65	45	23	9
Máximo	100	95	71	48	20	9	100	96	76	58	30	12
Mínimo	100	70	46	24	10	5	100	66	47	24	14	5
Coef. Variação	0,0	9	11	17	22	16	0	11	14	20	20	20
Desv. Padrão	0,0	7	7	6	4	1	0	9	9	9	5	2
Nº - amostras	9,0	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Constata-se uma degradação granulométrica da ordem de 10%, semelhante aos solos granulares naturais, com mineralogia e resistência a abrasão. A degradação da escoria, pode ser benéfica, visto que expõe maiores superfícies específicas ao intemperismo, podendo ser fator acelerador de reações pozolânicas, concrecionáveis, quando se tem aresta em contatos por superfícies contínuas de produtos apresentando pequena hidraulicidade.

#### h) Degradação do Estado de Washington

O resultado deste ensaio representa melhor a coerência, coesão e interação cristalina das rochas, muito mais do que o desgaste por Abrasão Los Angeles. Ele mede a capacidade ou não dos fragmentos desintegrar-se ao atritarem, sob forças de amassamento (compressão) e cisalhamento, induzindo à desintegração superficial para produção de partículas finas, com  $\phi$  correspondentes aos de siltes e de argilas, ou seja, finos deletérios. Determinados de forma semelhante ao ensaio de equivalente de areia, numa suspensão aquosa, tendo uma equação para cálculo e uma tabela comparativa de resultado x aplicação.<sup>(11)</sup> Não é citado nem normalizado pelo DNER. Os resultados situam-se acima do mínimo recomendado pela AASHTO-170-T, para camadas de bases e revestimentos, e bastante comparáveis aos resultados de rochas silicíticas naturais (Granitos-Gnaisses). O ensaio determinar com maior precisão e representação a dureza / resistência e a coerência da cristalização dos materiais.

#### S) I.S.C – Índice de Suporte Califórnia.

Todos os resultados encontrados são satisfatórios, dispensando comentários.

#### j) Caracterizações Químicas

Com base no texto, a composição mineralógica, especialmente os óxidos alcalinos CaO e MgO, os óxidos metálicos Al e Fé e o não metal “S”, definem o comportamento expansivo das escorias. Nas bibliografias citadas, apresentam algumas inequações químicas de equilíbrio, estabelecendo parâmetros de aceitação. Todas desenvolvidas em países europeus, adotados na Espanha e na França, principalmente. Na França, onde existe um Centro Técnico de Promoção das Escorias de Alto forno, desde 1.958.<sup>(2)(3)</sup>

1ª - Relação química → % Ca O / % Si O<sub>2</sub> < 1,4 e S<sub>total</sub> < 2%

na Espanha, semelhantes às constantes das especificações inglesas são

2ª - Relação química - Módulo A - Relação química → CaO + 0,8 MgO ≤ 1,28 SiO<sub>2</sub> + 0,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 1,75 S

3ª - Relação química - Módulo B - Relação química → CaO ≤ + 0,9 SiO<sub>2</sub> + 0,6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 1,75 S

A escoria cuja análise química apresente uma composição que atenda aos módulos A e B, e as relações CaO/SiO<sub>2</sub>, possivelmente estará livre da desintegração causada pelos óxidos de cálcio e magnésio.

As literaturas pesquisadas, indicam que as maiores dúvidas não são devidas aos teores totais de óxidos e sim aos teores de óxidos livres, sujeitos às hidratações, transformando-se em hidróxidos correspondentes. A redução da alcalinidade e o relativo enriquecimento em íons de silício, ferro e alumínio, são fatores que demonstram a possibilidade de alteração, não no sentido da degradação e sim no sentido do concrecionamento, em virtude da ocorrência de reações pozolânicas, favorecidas pela elevação do pH, durante a fase de hidratação dos óxidos na fase úmida.

Os óxidos totais de cálcio e magnésio, apresentam-se muito baixo < 30%, enquanto que a comunidade internacional considera duvidosas as escoriais contendo teores > 40%.

#### k) Comentários finais

Vários autores citam às formas de alterações, e, os respectivos procedimentos de avaliações das rochas naturais<sup>(12)</sup>, no entanto, parece faltar sistemática e especificações análogas às escórias de alto forno. Trata-se de assunto relativamente novo no Brasil, que desperta grande interesse da comunidade rodoviária, e especialmente à comunidade de proteção e preservação do meio ambiente

O autor mostra do ponto vista laboratorial, que os parâmetros físicos, químicos, físico-químicos e geotécnicos das escorias de alto forno, produzidas na região central de Minas Gerais, apresentam excelentes performances para aplicações em camadas granulares de bases e sub-bases de pavimentos. Comenta fatos e necessidades de se criar procedimentos rotineiros de avaliações e procedimentos relativos ao histórico das escorias, ligados à sua produção, beneficiamento e estocagem, como fato tão importante quanto aos ensaios rotineiros de controle e avaliação da qualidade.

## Referências Bibliográficas

1. DER –MG. Emprego de Escória em Pavimentação. Belo Horizonte, 1981.
2. IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. Aplicações de Agregados Siderúrgicos em Pavimentação. Rodoviária (GT Escórias), 1988.
3. DNER – IPR. – Manual para utilização de Escórias Siderúrgicas como agregado na engenharia rodoviária, Rio de Janeiro, 1990.
4. BAUER, Falcão L.A. e NORONHA M. A. Azevedo. Uso de Aditivo no preparo do concreto. Controle de Qualidade nº5. Revista Construção Pesada, Agosto, 1979.
5. MACHADO, Alexandre Teixeira. Estudo Comparativo dos Métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
6. JOHN, Vanderley M. e ÂNGULO, Sérgio C. Metodologia para Desenvolvimento de reciclagem de resíduos In: Utilização de Resíduos na Construção habitacional – Coletânea Habitare, Vol. 4.
7. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Caracterização de Escória Granulada de Alto-forno e seu emprego como Aglomerante e Agregado. Boletim 65, São Paulo, 1992.
8. BRAVO, Custodio Soria. Escórias de Altos Hornos Atípicas. Universidad Nacional de Tucuman. 2000.
9. LIMA, Luciana Amaral de. Hormigones com escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya. Tese de Doutorado. Barcelona, 1999.
10. FRAZÃO, Ely B; Junior, Fernando A. Procedimentos para Avaliação da Alterabilidade de Rochas, - 28ª RAPv – Belo Horizonte, 1994.
11. FRAZÃO, Ely B; OLIVEIRA, Mirian C. B. e JR, Fernando A. Características de Alterabilidade de Basaltos da Formação Arapey / Noroeste do Uruguai - 28ª RAPv – Belo Horizonte, 1994.
12. CARNEIRO, Francisco B.L.B., SILVA, Hélio C.M. Degradação dos Agregados nas Camadas de base de brita graduada e de revestimento de concreto asfáltico – análise da validade do ensaio Los Angeles. IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo. 1º Encontro. Belo Horizonte, 1980.
13. FILHO, Cid Chiodi. Análise comparativa de materiais carbonáticos e silicáticos para enrocamento de galerias pluviais. Belo Horizonte, 1996.
14. SANTANA, Humberto e GONTIJO, Paulo R.A. Os Materiais Lateríticos na Pavimentação de Baixo Custo no Brasil. Apresentado na 22ª RAP, Maceió, 1987.
15. ABPV (Associação Brasileira de Pavimentação). Utilização da laterita em pavimentação, Boletim técnico nº 9. Rio de Janeiro, 1976.
16. NOBREGA, Maria Tereza de. A Estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Dissertação. São Paulo, 1991.
17. CARUSO, Luiz Geraldo. Sugestão de Roteiro de ensaios Tecnológicos em materiais rochosos. Escola Politécnica de São Paulo – 1.972.
18. PETRUCCI, Eládio G.R. Materiais de Construção. Editora Globo, 8ª Ed. Rio de Janeiro, 1987.
19. DNER. IPR. DNER-ME 037/97 – Especificação de Material – Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997.
20. ALCAN Alumínio Brasil S/A. Especificação para Execução de ensaios de laboratório sobre amostras de escória. Barragem de Lama do Marzagão., Ouro Preto-MG. 1982.
21. SOUZA, Murilo Lopes de. Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas rodoviária, 1976. vol.1 (Pub.609).
22. IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias). Controle dos Pavimentos Derrapantes – Fendilhamento dos Pavimentos Asfálticos., Rio de Janeiro, 1977. Public. 618.
23. ASPHALT INSTITUTE. Construcción – Principios de construcccion de pavimentos de Mezcia Asfáltica em Caliente – MS-22. E.U. 1992.
24. DNER. Norma DNER-ES 303/97 – Especificação de Serviço – Base Estabilizada Granulometricamente. Brasília, 1997.
25. DNER. Norma DNER-EM 260/94 – Especificação de Material – Escórias de Alto Forno para Pavimentos Rodoviários. Brasília, 1994.