

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia de Materiais e Construção**  
***Curso de Especialização em Construção Civil***

Edson Magno Dos Santos Silva

**"ESTUDO DA APLICABILIDADE DE ESCÓRIA DE  
ALTO FORNO RESULTANTE DA PRODUÇÃO DE  
FERRO GUSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL "**

Belo Horizonte 2016

Edson Magno dos Santos Silva

**"ESTUDO DA APLICABILIDADE DE ESCÓRIA DE  
ALTO FORNO RESULTANDE DA PRODUÇÃO DE FERRO  
GUSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL "**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Construção Civil Gestão e Avaliações nas Construções.

Orientador(a): Prof. White Jose  
dos Santos

Belo Horizonte

2016

S586e

Silva, Edson Magno dos Santos.

Estudo da aplicabilidade de escória de alto forno resultante da produção de ferro gusa na construção civil [recurso eletrônico] / Edson Magno dos Santos Silva.- 2016.

1 recurso online (59 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: White José dos Santos.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.

Bibliografia: f. 51-59.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Escória. 3. Altos-fornos. 4. Cimento Portland.  
I. Santos, White José dos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 69

**ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA**

ALUNO: EDSON MAGNO DOS SANTOS SILVA

MATRÍCULA: 2012740779

**RESULTADO**

Aos 18 dias do mês de março de 2016 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“ESTUDO DA APLICABILIDADE DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO RESULTANTE DA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

 APROVADO APROVADO COM CORREÇÕES REPROVADONOTA: 8,0CONCEITO: B**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. White José dos Santos

Nome

Assinatura

Profª. Drª. Danielle Meireles de Oliveira

Nome

Assinatura

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E AVALIAÇÕES NAS CONSTRUÇÕES"

Belo Horizonte, 18 de março de 2016

  
Coordenador do CursoProf. Antonio Neves  
de Carvalho Júnior  
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho a Deus pela graça divina em viver a vida. A meus pais Aristides e Arlete e minha irmã Erlane minha esposa Erica Mirtes e meus filhos Heitor e Daniel . Todos com parcelas iguais de incentivo, paciência e compreensão me fizeram chegar a este momento.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS que me concede os dias e dom da vida, a minha família, pois sem eles não seria possível esta caminhada.

À coordenação, professores e funcionários do *Curso de Especialização em Construção Civil da UFMG* em especial a secretaria Ivonete pela a atenção e gentileza em ajudar sempre em que eu precisei.

Aos colegas do curso de especialização pelas experiências compartilhadas e pelos momentos de descontração.

Em especial minha esposa Erica Mirtes e meus filhos Heitor Magno e Daniel Magno que souberam com divina bondade e gentileza respeitar e aceitar a ausência nos dias de aula e nos dias de estudo da monografia .

A todos que os que compartilham a alegria deste momento os meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Um problema de preocupação mundial é a crescente geração de resíduos. Muitos rejeitos, sejam industriais ou urbanos, muitas vezes acabam por poluir o meio ambiente, causando problemas de armazenagem de certos materiais. Além disso, materiais alternativos a partir desses rejeitos podem ser mais baratos, apresentando muitas vezes características de desempenho melhores que os materiais convencionais.

As siderúrgicas, em nível mundial, vêm enfrentando um problema comum, que consiste no que fazer com a totalidade da escória gerada na fabricação do aço.

Este trabalho tem como objetivo principal apontar a aplicabilidade do uso da escória na indústria da construção civil através de estudos sobre as tecnologias desenvolvidas para a escória que é utilizada como adição ao cimento Portland comum e as aplicações em outras áreas da construção civil com os benefícios ou não em sua reutilização.

Foram realizados estudos referentes a materias que utilizam ou podem utilizar adições de escórias de alto forno como a indústria cimenteira.

Após o estudo realizado verificou-se que reciclagem de escória de alto forno no Brasil está praticamente limitado a indústria de cimento Portland comum. É significativa a contribuição ambiental deste tipo de reciclagem. Porém, várias aplicações novas podem e devem ser desenvolvidas para que o resíduo de escória de alto forno tenha um melhor aproveitamento.

palavras-chave:

escória, alto forno, aplicação na construção civil.

## ABSTRACT

A global problem of concern is the growing waste generation. Many waste, whether industrial or urban sites, often end up polluting the environment, causing storage problems of certain materials. Furthermore, alternative materials from these waste may be cheaper, often presenting better performance characteristics than conventional materials.

Steelmakers, worldwide, are facing a common problem, which is what to do with all of the slag generated in the production of steel.

This paper aims to point out the applicability of the use of slag in the construction industry through studies on tecnoligias developed for the slag that is used as addition to ordinary Portland cement and applications in other areas of construction with BENEFITS or not reuse.

Studies have been conducted concerning matters that use or may use scrap additions blast furnace to the cement industry.

After the study it was found that recycling blast furnace slag in Brazil is practically limited by their recycling in ordinary Portland cement industry. The environmental contribution of this type of recycling is significant. However, several new applications can be developed to better use this waste.

keywords:

slag, blast furnace, application in construction

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Desenho esquemático da produção do aço .....	21
Figura 2: Processo de resfriamento lento da escória de alto forno.....	22
Figura 3: Escória de alto forno resfriada lentamente.....	22
Figura 4: Processo de resfriamento brusco da escória de alto forno.....	23
Figura 5:Gráfico Rede Rodoviária Nacional por Tipo de Superfície.....	47
Figura 6:Gráfico Rede Rodoviária Nacional não Pavimentada por Jurisdição.	48
Figura 7:Gráfico Evolução da Malha Rodoviária Federal.....	48
Figura 8: Foto demonstrativa das placas permeáveis de concreto .....	55
Figura 9: Foto demonstrativa das placas permeabilização de concreto.....	57
Figura 10:Gráfico Comercio mundial do cimento .....	62
Figura 11:Gráfico Venda de cimento no Brasil ate Novembro 2015 .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais grupos cimenteiros no Brasil.....	31
Tabela 2. Tipos de cimento <i>Portland</i> normatizados no Brasil.....	33
Tabela 3. Consumo de cimento no Brasil.....	63

## LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS

CP II-Z Cimento Portland com adição de materiais pozolânicos  
CP II-F Cimento Portland com adição de materiais calcínicos.  
CP III-32-RS Cimento Portland de alto forno – resistente a sulfatos  
CP II E-32 Cimento Portland com adição de escória de alto forno.  
CPV-ARI Cimento Portland de alta resistência inicial.  
NBR Norma Brasileira  
IBS Instituto Brasileiro de Siderurgia  
ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland  
AEA Agente incorporador de ar  
WRR Agente redutor de água  
SHR Agente redutor de retração  
AAS Escória alcalina ativada  
BFS Escória de alto forno  
PC Polos capilares

## LISTA DE SÍMBOLOS

C3A Aluminato tricálcico

C2S Silicato dicálcico

Ca(OH)<sub>2</sub> Hidróxido de cálcio

C-S-H Produto da hidratação do clínquer

C4AH13 Produto da hidratação do clínquer

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Carbonato de sódio

N Sódio

A Alumínio

G Gipsita

E Bauxita calcinada

C<sub>3</sub>A.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O Etringita

NM Norma Mercosul

CaSO<sub>4</sub> . 2H<sub>2</sub>O Gipsita

## SUMÁRIO

1. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2. <b>OBJETIVO</b> .....	18
3. <b>METODOLOGIA</b> .....	18
4. <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
4.1 PROCESSO SIDERURGICO.....	20
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	24
4.3 APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DO ALTO FORNO NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	29
4.4 ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM CIMENTO E CONCRETO..	35
4.5 ESTUDO DA ATIVIDADE HIDRAÚLICA DA ESCÓRIA.....	37
4.6 ATIVADORES FÍSICOS E QUÍMICOS .....	37
4.7 PERMEABILIDADE A AGUA DO PORO .....	39
4.8 CALOR DE HIDRATAÇÃO .....	39
4.9 TRABALHABILIDADE .....	40
4.10 REAÇÃO ALCALI AGREGADO .....	41
4.11 ATAQUE DE SOLFATOS .....	41
4.12 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO .....	42
4.13 RETRAÇÃO DO CIMENTO COM ESCÓRIA ATIVADA.....	43
4.14 DURABILIDADE E RESISTÊNCIA A CORROÇÃO.....	43
4.15 INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÓXIDO DE MANGANÊS NAS ESCÓRIAS USADAS COMO ADIÇÃO NO CIMENTO PORTLAND.....	44
4.16 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA COMO AGREGADO .....	45
5.0 <b>APLICAÇÃO DE ESCORIA GRANULADO DE ALTO FORNO PAVIMENTAÇÃO RODOVIARIA.</b> .....	46
5.1 SETOR RODOVIARIO NO BRASIL.....	46
5.2 PRODUÇÃO DE ASFALTO .....	48
5.3 CAMADAS DO PAVIMENTO .....	49
5.4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO AGREGADO .....	51
5.5 APLICAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA PARA BASE E SUB BASE DE PAVIMENTAÇÃO.....	53

5.6 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS DE CONCRETO .....	55
5.7 ESTUDO DE APLICAÇÃO DE ESCORIA DE ALTO FORNO EM TELHAS SEM AMIANTO .....	57
5.8 PAINÉIS DE DE CIMENTO DE ESCORIA DE ALTO FORNO .....	59
5.9 ANALISE DO ESTUDO.....	61
6.0 <b>CONCLUSÕES</b> .....	65
7.0 . <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	66



## 1. INTRODUÇÃO

Na perspectiva da sustentabilidade, nas duas últimas décadas aumentou significativamente a preocupação com questões relativas à conservação ambiental. As empresas são cada vez mais pressionadas pelos órgãos ambientais e pela sociedade a buscar soluções que minimizem os danos causados ao meio ambiente. A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto é uma prática adotada em diversos países (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2008).

O tratamento dos resíduos siderúrgicos vêm sendo discutido mundialmente. Diversos países, entre eles o Canadá, Japão, Finlândia, Austrália, estudam a criação de leis e normas técnicas para o gerenciamento e disposição dos produtos siderúrgicos, respeitando a individualidade de cada país. Entretanto, é consenso que cada siderúrgica deva concentrar esforços em todos os níveis na cooperação com os governos, para reciclar e reutilizar seus produtos, especialmente as escórias de alto-forno (IISI, 1994 apud MASSUCATO, 2005).

Com o advento de novas tecnologias, crescimento populacional, diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformam em graves problemas urbanos. Estes se caracterizam por escassez de área de deposição causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 2000).

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2014 do IAB -- Instituto Aço Brasil em 2013, a reutilização de resíduos e coprodutos foi praticamente igual ao ano anterior. Cada tonelada de aço produzido gerou 594kg de coprodutos e resíduos, perfazendo um total de 17,7 milhões de toneladas, bem próximo a 2012, de 17,- milhões de toneladas. A geração de escória de alto-forno no ano de 2012 e 2013 representou 37%, em sua quase totalidade (99%) foram vendidas, especialmente para a produção de cimento e o restante foi para reutilização interna. A escória de aciaria, 29%. O restante 34% foram os pós, lamas e outros, resultantes dos

processos e sistemas de tratamento existentes. Desse total, 88% foram reaproveitados.

Sem dúvida a maior experiência brasileira na área da reciclagem de produtos gerados por outras indústrias na produção de materiais de construção civil é conduzida pela indústria cimenteira, que recicla resíduos das indústrias siderúrgicas (escórias de alto-forno e cinzas volantes), conforme relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgias).

A prática de gerenciamento formada pela reutilização e reciclagem de resíduos é a mais adotada pelas indústrias de produção de ferro-gusa. Entretanto, não existem procedimentos definidos e permanentes que garantam o reaproveitamento contínuo e integral dos resíduos no mercado por parte de todas as empresas do setor, sendo a da escória de alto-forno a melhor prática adotada. Para as empresas do setor, a escória de alto-forno encontra diversos usos, entre as quais se incluem as vendas para as indústrias cimenteiras, a doação para as prefeituras para a pavimentação das estradas e a recirculação no próprio forno (JACOMINO et al., 2002 apud MASSUCATO, 2005).

A escória de alto forno é um resíduo da produção de ferro gusa em alto forno. Em siderúrgicas que operam altos fornos a carvão de coque são geradas aproximadamente 300 toneladas de escória por tonelada de ferro gusa. Altos fornos que utilizam como combustível carvão vegetal a geração de escória é inferior a este valor (JOHN, 1995).

A mistura da escória granulada moída com o clínquer Portland é uma das formas mais antigas de reciclagem da escória. Atualmente a reciclagem na produção de cimento consome boa parte das escórias geradas no Brasil, mas ainda existem sobras significativas e enormes pilhas de estoque. A reciclagem da escória de alto forno na produção de cimento é uma aplicação que teve início no Brasil no início da década de 50 (JOHN, 1995).

A área da construção civil tem sido foco de muitas pesquisas relacionadas aos materiais e técnicas nela empregados, visando o aprimoramento dos processos. O item a ser estudado neste trabalho é conhecer as diferentes aplicações da escória do Alto forno na construção civil, hoje disponíveis no mercado gerando aumento da produtividade, além da redução de uso dos recursos naturais. Outro ponto de grande interesse e que pode aumentar a viabilidade deste produto é a possibilidade de que este resíduo leve seja um bom isolante térmico e acústico, devido às suas características químicas.

## **2. OBJETIVOS**

O principal objetivo deste estudo é conhecer a aplicabilidade técnica de escória do Alto Forno nos diferentes segmentos da construção civil.

## **3. METODOLOGIA**

- Verificar através de revisão bibliográfica as diferentes aplicabilidades da escória de alto forno no segmento da construção civil.
- Conhecer o desempenho destas escórias de alto forno com diferentes reatividades e suas influências no tipo de cimento utilizado e em outros tipos de materiais.
- Benefícios e desvantagens da reutilização e aplicação da escória.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história registra que o uso da escória como material de construção começou na Inglaterra em 1728, seguida pela Suécia no ano de 1761. Mas os primeiros registros sobre a propriedade aglomerante datam de 1774, por LORIENT, através de mistura com cal e argila, na qual se obteve um produto de qualidade semelhante ao do cimento fabricado na época. No entanto, grande impulso para seu aproveitamento foi dado em 1862, por LANGEN na Alemanha, com o desenvolvimento da granulação da escória na saída do alto-forno, através do resfriamento brusco. E em 1882 surgiu o primeiro cimento Portland com escória, na Alemanha, sendo o seu uso oficializado em 1909.

Até 1950 a utilização da escória desenvolveu-se lentamente devido à concorrência com o cimento Portland sem adição, considerado material nobre, e principalmente pelo desconhecimento das propriedades reais dos cimentos com escória. Após 1950, graças a esforços de divulgação e informação, o cimento com escória desenvolveu-se em diversos países (VENUAT, 1976, apud MASSUCATO, 2005). O primeiro cimento produzido no Brasil foi em 1892, pelo Engenheiro Louis Nóbrega, por um período de três meses. Várias outras tentativas ocorreram sem sucesso. No ano de 1926 foi inaugurada no Brasil a Companhia Brasileira de Cimento Portland, na cidade de Perus, no Estado de São Paulo. Esta data foi um marco para indústria brasileira de cimento. Nesta época, o Brasil produzia 13 mil toneladas anuais de cimento e importava 400 mil toneladas. Em 1929, o Brasil já produzia 96 mil toneladas de cimento (MASSUCATO, 2005).

No Brasil, o primeiro cimento Portland de alto-forno foi produzido em 1952, pela Cimento Tupi S.A, em Volta Redonda, com emprego normalizado pela NBR 5735 (ABNT, 1980) – Cimento Portland de Alto-forno – Especificação. Mas somente em 1977, que foi admitido o uso de até 10% de escória no cimento Portland comum através da NBR 5732, antiga EB-1, e em 1991 foi normalizado o cimento Portland de alto-forno.

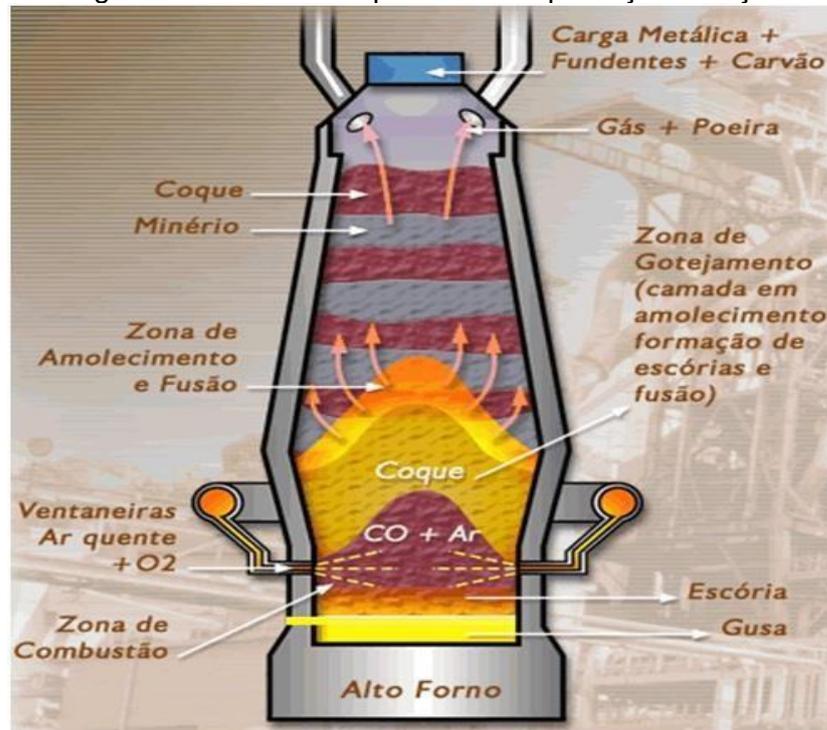
#### **4.1 PROCESSO SIDERÚRGICO**

De acordo com Instituto Aço Brasil (IAB) o aço é um dos principais materiais utilizado na fabricação de produtos como, celular, tubulação hidráulica, componente estrutural dos prédios, aviões, carro encontrando-se bastante presente na vida das pessoas. É considerado um dos principais elementos que possibilitam a sociedade desfrutar da modernidade e comodidade oferecidas pelos bens de consumo.

A crescente demanda por aço incentiva o aumento da produtividade das siderúrgicas. Assim, aliada a evoluções tecnológicas, o setor vem aumentando a produção atendendo demandas cada vez maiores.

A fim de ilustrar o processo de fabricação do aço é apresentado na Figura 1 um esboço de suas principais fase de produção.

Figura 1 - Desenho esquemático da produção do aço.



Fonte: (MASUERO *et al.*, 2004)

Segundo o (IAB) a produção de aço no Brasil é realizada em usinas siderúrgicas integradas e semiintegradas. Nas usinas integradas, o aço é obtido a partir do ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro que é transformado em ferro gusa na própria usina, mais precisamente, nos altos-fornos. Depois degerado o ferro gusa líquido, no alto-forno, ocorre a sua transformação em aço, no convertedor LD - LinzDonawitz, onde também é gerada a escória de Alto forno.

A escória sai do alto forno na forma de um líquido viscoso com temperatura entre 1350°C e 1500°C contendo 1700 kJ/kg de energia térmica conforme ilustra a figura a seguir .

Figura 2 – Foto do processo de resfriamento lento da escória de altoforno.



Fonte: <https://www.google.com.br>

Se resfriada lentamente, esta energia vai ser perdida para a atmosfera e liberada através da cristalização do líquido, formando cristais diversos, como mervinita, melilita, silicato dicálcico, diopsídio (nas escórias ácidas), entre outros. Na condição cristalina a escória não possui capacidade aglomerante, sendo utilizada como agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas.(JOHN & AGOPYAN)

Figura 3 – Foto de escória de alto forno resfriada lentamente



Fonte: <https://www.google.com.br>

Se resfriada bruscamente, de forma que não haja tempo hábil para que o arranjo cristalino ocorra, produz-se um material predominantemente vítreo. A escóriavítrea apresenta nível de energia mais elevado do que a cristalina, porque retém a energia de cristalização de aproximadamente 200 kJ/kg, sendo portanto termodinamicamente menos estável que as cristalinas (JOHN, 1995).

Existem duas tecnologias básicas para produção de escórias vítreas.

A primeira, prática normal nas grandes siderúrgicas brasileiras, é conhecida como granulação. A granulação da escória de alto-forno foi originalmente introduzida por volta de 1853 por Lange, na Alemanha, e visava facilitar a sua remoção das siderúrgicas (JOHN, 1995).

Neste processo, a escória ainda no estado líquido, em queda livre é interceptada por um jato de água fria com pressão de 0,6 MPa, na quantidade de 3 ton de água por tonelada de escória, sendo depositada em tanque cheio de água. O choque dos dois materiais provoca o resfriamento brusco da escória e a sua redução a um material granular, de distribuição granulométrica similar à da areia de quartzo natural, porém de forma mais angular. Este processo propicia elevados teores de vidro, sempre acima de 90% e, freqüentemente, acima de 97% (JOHN, 1995).

Figura 4 – Foto do processo de resfriamento brusco da escória de alto forno.



Fonte: <http://www.ferroeste.com.br>

A escória é um subproduto do processo metalúrgico, obtida durante a fundição dos metais, quando as impurezas são separadas e removidas em diversas faixas granulométricas. A sua constituição química é formada por uma mistura de óxidos metálicos, sulfetos metálicos e metais na forma elementar (NEVILLE, 1997).

#### **4.2 A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

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, estocagem “in natura” e produção / estocagem “após beneficiamento”. (Solocap 2006)

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 (ferro) 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. (Solocap 2006)

Após a escória ser recolhida do alto forno, dependendo do sistema de resfriamento poderá apresentar quatro ou mais tipos de materiais predominantemente 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 – Vítrea – 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 grandestambores.. (Solocap 2006)

#### **4..2.1 CARACTERÍSTICAS DA ESCÓRIA**

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. (Solocap 2006)

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 conseqüência, 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 vítrea, 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. (Solocap 2006)

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 (SERSALE 1986).

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 C2S – (2CaO2SiOs – silicato dicálcico ou ortossilicato), e finalmente, as expansões devidas à corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Isto faz com que a escória de alto-forno tenha estabilidade em suas propriedades, garantindo confiabilidade para a utilização como adições minerais em concreto (AÏTCIN, 2000 apud MASSUCATO, 2005).

Os principais constituintes da escória de ferro são: óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que representam 95% da composição desse material. Elementos secundários como óxidos de manganês e ferro também fazem parte da composição. As características físicas como densidade, porosidade e tamanho da partícula dependem do tipo de resfriamento da escória e de sua composição química. Outro fator importante é o poder aglomerante da escória, que depende da relação entre a quantidade dos compostos SiO<sub>2</sub>, CaO e MgO presentes na escória. Este poder aglomerante é definido como reatividade hidráulica (SILVA, 2006).

Segundo SILVA, 2005 apud SAMENT esta reatividade hidráulica depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória.

Ressalta-se que a composição química e o grau de vitrificação são os fatores de que mais depende a atividade hidráulica das escórias (BATAGIN e ESPER, 1988 apud MASSUCATO, 2005).

Este índice de hidraulicidade ou módulo de basicidade pode ser calculado da seguinte forma:

SiO

CaO % =

2% SiO Ca0% V =

Onde:

⇒V Índice de Basicidade;

⇒CaO% Porcentagem de Óxido de Cálcio;

⇒2% SiO Porcentagem de Dióxido de Silício.

Assim, tem-se que se:

$V \geq 1$  ⇒ Escória Básica ou Basicidade é baixa (Carvão Mineral ou Coque)

$V \leq 1$  ⇒ Escória Ácida ou Basicidade é boa (Carvão Vegetal).

A reatividade da escória de alto-forno é a principal propriedade que possibilita a sua utilização como adição. Por sua vez, a reatividade depende da composição química, do teor da fase vítrea e da finura. Busca-se avaliar esta reatividade de diversas maneiras. A NBR 5735 (1991) estabeleceu um critério baseado na seguinte relação:

$$H = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) > 1$$

H – índice de hidraulicidade

As diferenças entre as propriedades do carvão vegetal e do coque fazem com que os altos-fornos também tenham as suas diferenças, como por exemplo, o tamanho. O uso do carvão vegetal limita o tamanho do forno porque este produto não suporta altas pressões de carga. A indústria siderúrgica se caracteriza por elevada economia de escala. Desta forma, este fator técnico favorece a siderúrgica à coque. Em contrapartida, o coque contém elevado teor de enxofre, exigindo uma maior quantidade de cal para impedir que o enxofre contido neste combustível passe para o ferro gusa. Além disso, o coque tem que ser importado, pois o carvão nacional não apresenta qualidade satisfatória (SOARES, 1982 apud MASSUCATO, 2005).

Para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve estar no estado amorfo, ou seja, deve ser resfriada rapidamente desde o estado líquido a 1500°C até a temperatura de 200°C, evitando associações dos átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato este conhecido como cristalização. A ação de resfriamento brusco da escória líquida é denominada granulação (JACOMINO et

al., 2002 apud MASSUCATO, 2005).

A escória de alto-forno pode ter aplicações como matéria-prima para fabricação de cimento, como adição na execução de concreto, como agregado para fabricação de concreto, pré-moldados e pavimentação, como agregado leve na fabricação de concreto e lã de escória para isolamento térmico (KRUGER, 1995).

As escórias ricas em sílica podem ser refundidas com adição de calcário, dolomita ou cascalho e areia, e resfriadas rapidamente para a obtenção de lã de vidro, utilizada como isolante térmico e acústico (LOUZADA, 1991).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987), a escória de alto-forno é classificada como resíduo classe III (resíduos inertes).

### **4.3 APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.(ABCP)

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e

argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da Ilha Britânica de Portland. Experiência brasileira

No Brasil, estudos para aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreram aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas nessa época. Assim, chegou a funcionar durante apenas três meses, em 1892, uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba, cuja construção data de 1890, por iniciativa do engenheiro Louis Felipe Alves da Nóbrega, que estudara na França e chegara ao Brasil com novas ideias, tendo inclusive o projeto da fábrica pronto e publicado em livro de sua autoria. Atribui-se o fracasso do empreendimento não à qualidade do produto, mas à distância dos centros consumidores e à pequena escala de produção, que não conseguia competitividade com os cimentos importados da época.

A usina de Rodovalho lançou em 1897 sua primeira produção – o cimento marca Santo Antonio – e operou até 1904, quando interrompeu suas atividades. Voltou em 1907, mas experimentou problemas de qualidade e extinguiu-se definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, com precariedade e produção de apenas 8.000 toneladas por ano, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1935, após modernização.

Todas essas etapas não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada

como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

O mercado do cimento no Brasil é atualmente composto por 22 grupos cimenteiros, nacionais e estrangeiros, com 95 plantas produzindo (Setembro de 2015), espalhadas por todas as regiões brasileiras. A capacidade instalada anunciada do país é de 82 milhões de toneladas/ano, mas pelos últimos levantamentos, estima-se que a capacidade instalada já tenha ultrapassado os 96 milhões de toneladas/ano, devendo chegar aos 100 milhões de toneladas até o final de 2016, com a entrada das plantas em construção. Somente no ano passado e até o mês de agosto/15, mesmo com o mercado apontando queda no consumo, foram adicionadas mais 5 milhões de toneladas anuais à capacidade instalada do parque industrial cimenteiro( cimento.org 2015)

A seguir tabela com os principais grupos cimenteiros

Tabela 1. – Principais grupos cimenteiros no Brasil.

<b>Grupos</b>	<b>Marcas</b>	<b>Nº Plantas</b>
VOTORANTIM	VOTORAN , POTY, ITAU, TOCANTINS, RIBEIRÃO	26
INTERCEMENT	CAUÊ e CIMPOR	16
NASSAU	NASSAU	11
LAFARGE	LAFARGE, CAMPEÃO, MONTES CLAROS E MAUÁ	9
HOLCIM	HOLCIM	5
MIZU	MIZU	6

(Fonte www.cimento.org)

Em 1991, a partir dos bons resultados dos estudos dos diversos tipos de cimento e a exemplo de países tecnologicamente mais avançados, como os da União Européia, surgiu no mercado brasileiro um novo tipo de cimento, o *cimento portland composto*, cuja composição é intermediária entre os cimentos portland comuns (CP I e CP I S) e os cimentos portland com adições (alto-forno e pozolânico). A aceitação e o uso desse tipo de cimento expandiu-se nos últimos anos e nos dias atuais, 58% de todo o cimento consumido no Brasil é do tipo composto. O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. O cimento CP II-Z, também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578. ([www.cimento.org](http://www.cimento.org))

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca, pelo setor, de medidas para diminuição do consumo energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados cimentos portland de alto-forno e pozolânicos, respectivamente. Nos dias atuais cerca de 29% de todo o cimento consumido no Brasil é do tipo CP III e CPIV e a tendência futura é que esse percentual cresça ano a ano, pois além das características especiais e o uso para toda e qualquer obra, ambos são cimentos ecologicamente corretos, pelo menor uso de clínquer e, conseqüentemente, menor emissão de CO<sub>2</sub> e preservação das jazidas. O cimento portland de alto-forno contém adição de escória no teor de 35% a 70% em massa, que lhe confere propriedades como; baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividade (barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, etc) como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento, estruturas de concreto simples, armado ou protendido, etc. A norma brasileira que trata deste

tipo de cimento é a NBR 5735. .( [www.cimento.org](http://www.cimento.org))

Tabela 2. – Tipos de cimento *Portland* normatizados no Brasil.

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou fíler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z 32	
	Fíler (6-10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-70%)	CP III 32 CP III 40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP III-40 RS, CP V-ARI RS		5737

(Fonte [www.cimento.org](http://www.cimento.org))

### **Cimento Portland CP II (NBR 11578)**

O Cimento Portland Composto é modificado para gerar calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Seu uso, portanto, é mais

indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

Veja as recomendações de cada tipo de CP II:

**a. Cimento Portland CP II-Z (com adição de material pozolânico)** Empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. E para produção de argamassas, concreto simples, armado e elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável.

**b. Cimento Portland Composto CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno)**

Composição intermediária entre o cimento portland comum e o cimento portland com adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento combina com bons resultados o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do Cimento Portland Comum. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos.

**c. Cimento Portland Composto CP II-F (com adição de material carbonático - fíler)**

Para aplicações gerais. Pode ser usado no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros.

***CP III – Cimento Portland de Alto Forno (NBR 5735)***

Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação

geral em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, de concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro e outras. Mas é particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos. Comporta adições de 35 a 70% de Escória e até 5% de material cabornático. Sendo o cimento mais ecológico de todos os cimentos produzidos no Brasil. Pois além da preservação das jazidas naturais e pelo menor lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, aproveita o rejeito das siderúrgicas, a escória. (cimento .org)

#### **4.4 ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM CIMENTO E CONCRETO**

A adição de escória de alto-forno pode provocar melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à sua superfície lisa, que absorve pouca água. A adição de escória proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à velocidade das reações de hidratação. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido à maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade em longo prazo (NEVILLE, 1997).

Outro aspecto importante que dá relevância à adição de escória de alto forno no cimento é o ambiental. De acordo com John (1995), a adição de 65% de escória reduz a energia gasta na produção do cimento de 3,53 GJ/t para 1,67 GJ/t, incluindo a energia para a secagem e moagem da escória.

(CHAMON 2006), estudou a Influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais. As propriedades mecânicas foram analisadas em concreto com diferentes adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de

cerâmica vermelha. De forma geral, tais adições contribuíram de maneira diferenciada para as propriedades analisadas, demonstrando não afetar de forma significativa o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias. As adições de 20% de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha tenderam a diminuir sensivelmente a resistência à tração na flexão.

(PEREIRA 2003) estudou a influência das adições minerais na durabilidade do concreto de cobrimento sujeito à carbonatação. Concretos compostos com adições minerais, tais como sílica ativa, metacaulinita, cinza de casca de arroz, escória de alto forno e cinza volante, foram submetidos a uma avaliação experimental, desenvolvida no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Goiânia, visando conhecer a capacidade de proteção do cobrimento frente à corrosão da armadura induzida por carbonatação do concreto. Os resultados mostraram que existem diferenças significativas de comportamento entre os concretos com adições e que nem sempre as adições minerais causam prejuízo de desempenho. No que se referiu à carbonatação; ao contrário, foi verificado que as adições minerais metacaulinita e sílica ativa proporcionaram ganhos de desempenho aos concretos.

(MASSUCATO 2005) , estudou as influências das propriedades oriundas da adição de escória de alto forno à carvão vegetal e à coque, do concreto no estado fresco e endurecido, produzido com cimentos que já utilizam em sua composição a escória de alto forno. Foram avaliados os efeitos na resistência mecânica, módulo de elasticidade, abatimento, incorporação de ar, tempo de pega e exsudação.

O estudo comprovou que a utilização da escória de alto forno a carvão vegetal como adição, não provocou alterações nas propriedades do concreto no estado fresco, em comparação com a escória de alto forno a coque.

A resistência à compressão com adição da escória de alto forno a carvão vegetal aumentou em até 5% em idades superiores há 60 dias em comparação com o concreto sem adição de escória.

#### 4.5 ESTUDO DA ATIVIDADE HIDRÁULICA DA ESCÓRIA

(PAL, MUKHERJEE e PATHAK 2003) , concluíram em seu estudo que o índice hidráulico (HI) da escória tem uma forte relação com as suas propriedades físicas e químicas, bem como os teores de SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

#### 4.6 ATIVADORES FÍSICOS E QUÍMICOS

A escória, por si só, não possui atividade aglomerante tal que possa ser empregada em situações correntes de engenharia. No entanto, se misturada a produtos químicos que possibilitem um pH alto, ela se transforma em aglomerante. Os ativadores têm dupla função:

- (a) dissolver-se rapidamente em água e elevar o pH da solução para valores acima de 12, acelerando a dissolução da escória, através da dissolução da película de produto de hidratação que protege os grãos;
- (b) acelerar a precipitação de produtos hidratados, seja porque participam das fases hidratadas, ou por reduzir a solubilidade de espécies dissolvidas forçando a sua precipitação. Nos dois últimos casos a ação de aceleração do endurecimento se deve à alteração da precipitação dos hidratados. Evidentemente, a natureza dos ativadores vai influenciar na composição das fases hidratadas presentes. Palestra de Maria Cristina Yuan, IBS no PCC USP em 26/11/1998 JOHN & AGOPYAN

(COLLINS e SANJAYAN 1999), estudaram as propriedades de um concreto contendo escória ativada (AAS). Dois tipos de ativadores foram usados: o hidróxido de sódio em combinação com o carbonato de sódio e o silicato de sódio em combinação com a cal hidratada. Com um fator água/cimento de 0,5 a escória ativada com silicato de sódio apresentou uma perda mínima por abatimento acima de 2 h. Já, a escória ativada com a solução líquida de silicato de sódio apresentou uma considerável perda de trabalhabilidade inicial com perda de água por abatimento superior a 2 h. O concreto dosado com escória ativada pela pasta

de cal e silicato de sódio mostrou uma resistência à compressão similar ao do concreto de cimento Portland padrão na idade de 1 dia, apresentando uma resistência à compressão superior para idades mais avançadas. O concreto com escória ativada com carbonato de sódio e hidróxido de sódio teve um ganho moderado da resistência para idades de três dias. A retração por secagem dos concretos com ativadores de escória foi maior do que o concreto com cimento Portland padrão.

(OLIVEIRA 2000), estudou o efeito dos ativadores e da temperatura na composição química na água do poro de pastas endurecidas de cimento com adição de escória. O estudo demonstrou que as principais espécies químicas encontradas na água do poro foram a hidroxila, o sódio, o potássio e o cálcio, em maior quantidade e, o silício, o alumínio, íons sulfato, sulfetos, tiosulfatos e tiosulfitos em menor concentração. Também, foi demonstrado que a temperatura da cura não influenciou significativamente o pH e a composição das soluções.

Segundo (SILVA 1998), a cura térmica trouxe benefícios em argamassas de cimentos de escória de alto forno ativada por silicato de sódio, hidróxido de sódio, cal hidratada e cal hidratada mais gipsita. A maior influência da temperatura na hidratação de cimentos de escória de alto forno comprovou que a sua energia de ativação foi maior que a do cimento Portland e que, conseqüentemente, o benefício resultante do emprego de cura térmica foi também superior. Esta característica foi comprovada pela aceleração da resistência à compressão das argamassas de cimento de escória de alto forno. A temperatura de cura não interferiu nos produtos de hidratação desses cimentos, mas influenciou na sua distribuição e na porosidade das pastas.

(FREITAS, ERLUND e MARTINS 2001), estudaram as condições de temperatura e umidade durante o período de cura, avaliando as características mecânicas, absorção capilar, permeabilidade ao ar, além da evolução da hidratação por meio da análise de imagens de concretos, submetidos a dois tipos de cura: curatérmica a 60 °C e cura úmida por sete dias. Concluiu-se que tais propriedades

tiveram grande influência no desenvolvimento da microestrutura, da durabilidade e de outras propriedades do concreto. Nesta pesquisa, foram utilizados o cimento Portland de alto forno (53% de escória), o cimento de alta resistência inicial sem adições e o cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (27% de escória). De acordo com os resultados obtidos, os concretos com adição de escória apresentaram os melhores desempenhos contra o ataque de cloretos, independente da cura empregada, enquanto o cimento sem adição apresentou o melhor desempenho contra a carbonatação, onde a cura mostrou ser um diferencial.

#### **4.7 PERMEABILIDADE E ÁGUA DO PORO**

(NEVILLE1997 MEHTA,) Os poros na pasta são divididos em macroporos que têm dimensões milimétricas e podem ser gerados por intermédio de aditivos incorporadores de ar e falhas no adensamento, poros capilares e poros de gel.

Os poros capilares estão relacionados com o fator água/cimento, pois a água requerida para o processo de hidratação do cimento é menor que a água adicionada. Esse excesso de água migra para a superfície da pasta formando os poros capilares. Os poros capilares apresentaram menor dimensão que os poros de gel. Estes últimos relacionaram-se diretamente com os produtos de hidratação do cimento como o C-S-H, e tenderam a aumentar com o tempo, ao contrário dos poros capilares. A permeabilidade das pastas de cimento com adição de escória foi sensivelmente menor quando comparado a um cimento comum, conferindo assim uma maior durabilidade a esse tipo de cimento.

#### **4.8 CALOR DE HIDRATAÇÃO**

É denominado calor de hidratação a quantidade de calor (cal/g) que é despreendida durante as reações de hidratação dos compostos do cimento.

Grande parte do calor de hidratação é atribuída aos componentes C3S e C3A, sendo influenciado, também, por outros fatores como o tipo de cimento, finura, temperatura e o tempo de hidratação. Sendo assim, o uso de cimentos com baixo

calor de hidratação como o cimento com adição de escória é recomendado para trabalhos onde grandes volumes de concreto sejam requeridos.

(LIDUÁRIO2006) estudou as contribuições de diferentes tipos de adições nas propriedades térmicas do concreto. Para este estudo, foram utilizados o cimento CP II F-32 e as adições minerais sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e pozolana de argila calcinada. Os resultados mostraram que o metacaulim contribuiu para o aumento do calor de hidratação, alcançando um percentual de 45% em relação à referência, no teor de 12%. A sílica ativa também aumentou o calor, no entanto, em um percentual máximo de 6%, para um teor de 4% na mistura. A condutividade térmica do concreto, por si só, é relativamente baixa, podendo assim liberar uma quantidade suficiente de calor para gerar fissuras. A pozolana e a escória contribuíram para a redução do calor, sendo que para a escória, houve uma maior redução do calor em relação à referência, em torno de 27% no teor de 60%. Para as propriedades térmicas do concreto endurecido, as adições apresentaram influência significativa. Para o calor específico, houve uma pequena diferença entre os concretos, tendo um aumento de 4,2% para o concreto com sílica ativa em relação à referência. A difusividade apresentou uma redução nos concretos com adição mineral, alcançando um percentual de 7,3% para o concreto com escória. Por fim, as adições minerais promoveram pequenos aumentos no coeficiente de dilatação térmica, obtendo-se um percentual de 9,3% para o concreto com metacaulim.

#### **4.9 TRABALHABILIDADE**

A trabalhabilidade é uma importante característica do concreto e da argamassa no estado fresco, essa propriedade apresenta grande influência na qualidade do produto endurecido, como os defeitos de adensamento que atuam diretamente na queda de resistência. Nas argamassas colantes o efeito da trabalhabilidade é sentido no momento da sua aplicação no substrato com o auxílio de uma desempenadeira dentada. Entende-se como uma argamassa com boa trabalhabilidade aquela que apresenta boa consistência, leveza para aplicação,

boa formação dos cordões e um bom tempo em aberto.

As características supracitadas estão diretamente ligadas ao formato e à distribuição granulométrica dos agregados utilizados.

Percebe-se uma melhora da trabalhabilidade nas pastas de cimento Portland com adição de escória de alto forno, isto pode ser explicado pela característica dos grãos de escória, que embora sejam bem angulosos são bastante lisos e sem poeira ao contrário da maioria dos agregados.

#### **4.10 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO**

Segundo (NEVILLE1997) a reação álcali agregado é de natureza físico-química e é considerada lenta, ocorrendo em presença de água, entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos, causando o aparecimento de um gel expansivo na interface pasta-agregado e conseqüentemente, o fissuramento do concreto. Para minimizar essa reação pode-se fazer uso de cimentos com baixos teores de álcalis ou cimentos com adições de materiais que inibam ou minimizem a reação, dentre os quais se podem incluir as pozolanas e as escórias.

#### **4.11 ATAQUE POR SULFATOS**

O ataque ao cimento por sulfatos podem causar comprometimento da estrutura da obra devido à expansão causada pela cristalização da etringita. A etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) origina-se da reação dos sulfatos dissolvidos na água com o C3A do cimento. Na cristalização da etringita ocorre uma expansão. Quando a pressão dessa expansão atinge o limite de resistência à tração do concreto, aparecem fissuras que o deixam mais vulnerável e podem acelerar a sua deterioração. Os cimentos Portland com adição de escória de alto forno possuem alta resistência aos sulfatos, pois apresentam baixo teor de C3A e pequena liberação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  limitando assim a formação da etringita expansiva (NEVILLE1997).

#### 4.12 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão das pastas de cimento depende de fatores como a finura do cimento, a qualidade do clínquer, a relação água/cimento, condições de cura e também dos tipos de adição (MEHTA e MONTEIRO 1994).

As pastas de cimento Portland de alto forno apresentam resistências iniciais menores que as de cimento Portland comum porque a hidratação das escórias é mais lenta que a do clínquer, porém em idades mais avançadas a resistência a compressão do cimento Portland com adição de escória é superior ao cimento Portland comum, segundo o Boletim Técnico BT/PCC/115 da ABCP do ano de 1993.

(BOURGUIGNON 2004), estudou influência da resistência à compressão em concretos com diferentes teores de escória de alto forno. Neste trabalho, pesquisou-se a influência das classes de resistência à compressão na carbonatação natural e acelerada do concreto produzido com diferentes teores de escória de alto forno. A carbonatação do concreto é um dos mecanismos responsáveis pela sua menor durabilidade, sendo tanto maior quanto menor for a sua resistência. Entretanto, apesar de não causar danos aparentes ao concreto não armado, estabelece algumas condições necessárias para a corrosão das armaduras do concreto armado. As propriedades analisadas, massa específica, absorção, índice de vazios, resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação natural e acelerada, tiveram seus resultados analisados estatisticamente e uma correlação entre o aumento da resistência característica do concreto e a diminuição da profundidade de carbonatação foi estabelecida.

Com base nos resultados experimentais, para uma mesma classe de resistência, ficou comprovada a dependência do mecanismo da carbonatação da relação água/materiais cimentícios e a maior carbonatação das misturas com o cimento CP III-32 RS, com e sem a substituição de escória granulada de alto forno moída, quando comparadas às profundidades de carbonatação de concretos confeccionados com o cimento CP II E-32.

#### **4.13 RETRAÇÃO DO CIMENTO DE ESCÓRIA ATIVADA**

(NETO 2002) , estudou a cinética das retrações autógena e por secagem não restringida do cimento de escória ativada em função, principalmente, do tipo e teor de ativadores empregados. O fenômeno da retração também foi analisado com base nos resultados dos ensaios de porosimetria, calorimetria, termogravimetria e DRX. Foram empregados como ativadores: silicato de sódio, cal hidratada + gipsita, cal hidratada e hidróxido de sódio. Como referência foi adotado o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI. De acordo com os resultados obtidos, a ativação da escória com silicato de sódio apresentou retração por secagem e autógena superior à apresentada pelos demais ativadores e pelo cimento Portland. Com base nos ensaios de microestrutura, foram determinantes para a elevada retração do cimento de escória ativada com silicato de sódio: a baixa porosidade, caracterizada pela predominância quase total de mesoporos; o elevado grau de hidratação e a natureza dos produtos hidratados, com predominância quase total de silicato cálcio hidratado (C-S-H).

Na ativação com cal e com cal mais gipsita, a composição diferente dos produtos hidratados (baixa formação de C-S-H e presença significativa de fases aluminato e sulfoaluminato, respectivamente) alterou a porosidade e a retração, principalmente a autógena que apresentou valores inferiores à do cimento Portland. A ativação com hidróxido de sódio é caracterizada pela elevada retração autógena e baixa formação de C-S-H, com presença significativa de fases aluminato.

#### **4.14 DURABILIDADE E RESISTÊNCIA À CORROSÃO**

Estudos comprovaram que o concreto de cimento Portland com adição de escória de alto forno pode ser de dez a cem vezes menos permeável, que o cimento Portland comum. Sendo assim a entrada de íons agressivos foi dificultada, constituindo um fator importante à prevenção da corrosão.

(OSBORNE 1999) estudou a durabilidade e o desempenho em longo prazo do concreto do cimento Portland com escória de alto forno e concluiu que o uso de

escória de alto forno trouxe muitos benefícios técnicos aos usuário do concreto, tal como a redução do calor de hidratação, uma mais baixa permeabilidade e uma resistência à compressão mais elevada em idades mais elevadas, diminuição da penetração de íons de cloreto, aumento da resistência ao ataque do sulfato e reação álcali agregados.

(JAUL, e TSAY 1998) apresentaram um estudo onde a escória foi usada para substituir em até 50% em peso do cimento para fazer o concreto de cimento com escória. Os corpos de prova foram submetidos ao teste acelerado do ciclo molhado/seco por mais de um ano. A resistência à compressão, permeabilidade, a resistência elétrica, a concentração de íons do cloreto, o potencial de corrosão, e a distribuição de tamanho dos poros foram medidos em várias idades. Os resultados das análises mostraram que o concreto de escória com substituição 20-30% teve a melhor resistência de corrosão.

(HOU, CHANG, HWANG 2004), estudaram o efeito da capacidade anticorrosiva no concreto de alto desempenho pela reação pozolânica da escória.

Os resultados mostraram que a reação pozolânica devido à adição de escória diminuiu a quantidade de hidróxido de cálcio, reduziu o volume dos poros capilares (PC) e abaixou sua permeabilidade, tornando o concreto mais durável e compacto.

(BAKHAREV, SANJAYAN, CHENG 2001) apresentaram em seu trabalho uma investigação na durabilidade do concreto com escória básica ativada (AAS) quando expostos à carbonatação. Encontraram como resultados que a resistência do concreto do AAS à carbonatação foi mais baixa do que aquela do concreto ordinário do cimento de Portland (OPC), e o AAS concreto teve uma perda da força e uma profundidade mais elevadas da carbonatação do que o concreto do OPC em ambos os testes.

#### **4.15 INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÓXIDO DE MANGANÊS NAS ESCÓRIAS USADAS COMO ADIÇÃO NO CIMENTO PORTLAND**

(RAI, PRABAKAR, RAJU, MORCHALLE 2002) avaliaram a possibilidade de usar escórias com altas e baixas concentrações de MnO<sub>2</sub>. A análise química para as escórias com altos teores de MnO mostraram que as amostras de escória possuíam baixos teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e altos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O, o que contribuiu tanto para a formação das reações pozolânicas quanto no desenvolvimento da resistência de composições misturadas do cimento de escória. Elevados teores de MnO (>15%) foram considerados impróprios para a adição em cimentos por causa de seus efeitos deletérios.

#### **4.16 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA COMO AGREGADO**

As propriedades do agregado variam com sua composição e a velocidade de resfriamento. As escórias de resfriamento lento apresentam uma estrutura vesicular ou celular, de massa específica entre 2,0 e 2,8 kg/dm<sup>3</sup> e massa unitária entre 1,12 e 1,36 kg/dm<sup>3</sup>. Situam-se, portanto, na faixa entre o agregado normal e o leve estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Estes autores chamam à atenção para o fato da escória poder apresentar um teor excessivo de sulfeto de ferro, que poderá ocasionar problemas de manchamento e afetar a durabilidade do concreto. O sulfeto pode se converter em sulfato e possibilitar o ataque ao concreto. Daí as especificações das normas, como as britânicas, por exemplo, que limitam o teor de SO<sub>3</sub> solúvel e de enxofre total como sulfeto nas escórias, em 0,7% e 2%, respectivamente.

Conforme (ARIVABENI 2000), a escória de alto forno tem um grande potencial de utilização como agregado para concreto, apesar da heterogeneidade de material. A factibilidade técnica da utilização da escória de alto forno utilizada como agregado graúdo, da escória de alto forno utilizada como agregado miúdo e da escória de alto forno utilizada em substituição parcial ao cimento, foi apresentada por vários ensaios, análises e resultados comparativos aos concretos convencionais. Um estudo do comportamento ambiental dos concretos

produzidos com escória também foi elaborado, visando conhecer seus impactos e os benefícios que o encapsulamento da escória traz ao meio ambiente.

Existiram limitações do seu uso como agregado, pelo risco do concreto ficar sujeito ao fogo ou ao calor intenso. Neste caso, a escória tendeu a desintegrar-se, comprometendo a estrutura.

(COELHO 2002) estudou a influência de elevados teores de escória de alto forno como adição mineral e agregado miúdo em concretos. Analisando seus resultados em termos de resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral, no teor de ar incorporado, na massa específica, na absorção, no índice de vazios, na retração e na profundidade de carbonatação concluiu pela possibilidade de sua utilização com dosagem adequada e cura eficiente.

## **5. APLICAÇÃO DE ESCORIA GRANULADO DE ALTO FORNO PAVIMENTAÇÃO RODOVIARIA.**

### **5.1. SETOR RODOVIARIO NO BRASIL**

De acordo com o relatório 2012/2013 DNIT – Departamento Nacional Infraestrutura Transportes o setor rodoviário brasileiro é o mais expressivo modal de transporte de cargas do país, atingindo praticamente todos os pontos do território nacional e possuindo uma grande relevância na atividade econômica nacional.

Em função disso, o monitoramento constante das condições da malha rodoviária torna-se essencial para um planejamento estratégico e efetivo, possibilitando o acompanhamento das soluções técnicas adotadas em cada segmento rodoviário ao longo do tempo.

Segue abaixo Classificação do DNIT para as rodovias.

#### **RODOVIA NA ESFERA DE ATUAÇÃO DO DNIT**

São as Rodovias Federais, cujos trechos estão sob regime de administração

direta, ou delegada pelo DNIT aos Estados, Distrito Federal e Municípios.

#### RODOVIAS SOB JURISDIÇÃO ESTADUAL

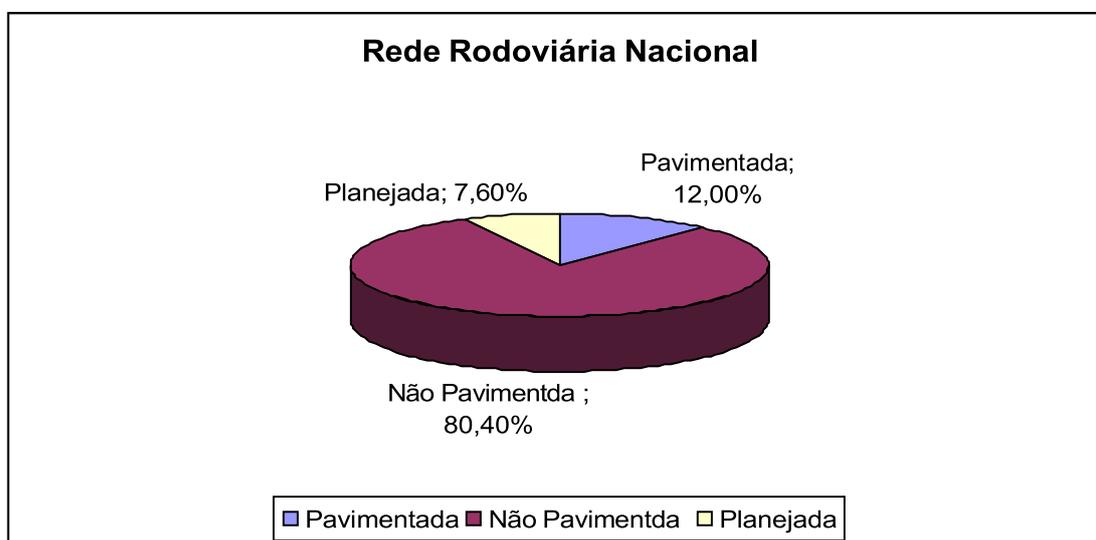
São aquelas, cujos trechos estão sob regime de administração direta ou contratada, controladas pelos órgãos rodoviários estaduais, e que constam do plano de viação de cada estado, nelas incluídas aquelas construídas pelos Estados sobre a diretriz de uma Rodovia Federal Planejada.

O DNIT só reconhece oficialmente como Rodovias Estaduais, àquelas que constam do Sistema Rodoviário Estadual de cada unidade da Federação.

#### RODOVIAS SOB JURISDIÇÃO DO MUNICÍPIO

São rodovias efetivamente sob jurisdição municipal, cujos trechos estão sob regime de administração direta ou contratada, controladas pelas Prefeituras Municipais, incluídas aquelas construídas pelos Municípios sobre a diretriz de uma Rodovia Federal Planejada. Os gráficos a seguir apresentam as condições de pavimentação das estradas nacionais por superfície, jurisdição e a evolução da malha rodoviária nacional no período de 1999 a 2013.

Gráfico 1 – Rede Rodoviária Nacional por Tipo de Superfície



(Fonte: SNV 2013)

Gráfico 2 – Rede Rodoviária Nacional não Pavimentada por Jurisdição

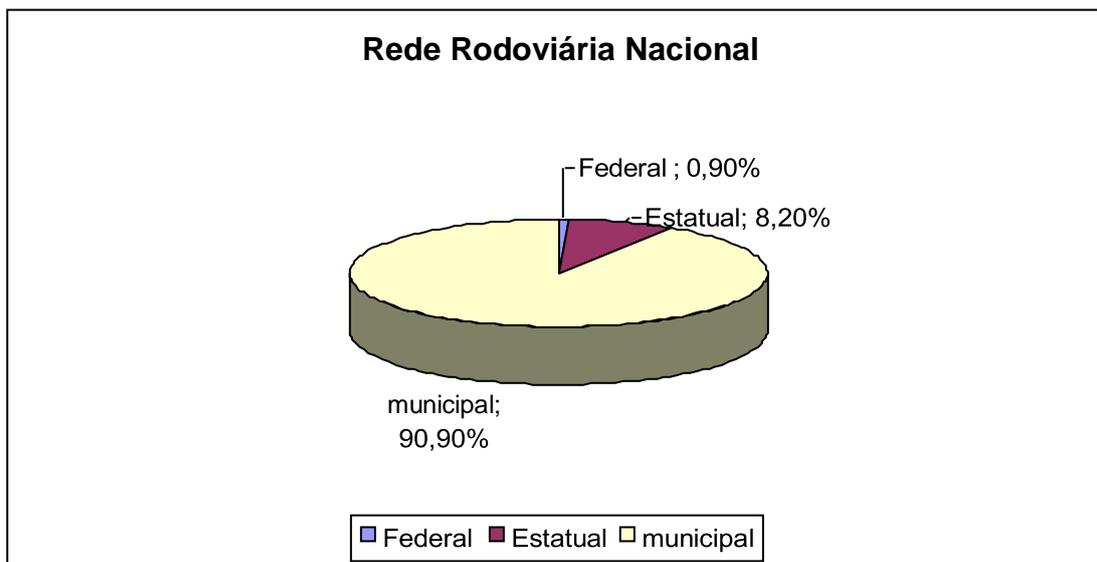
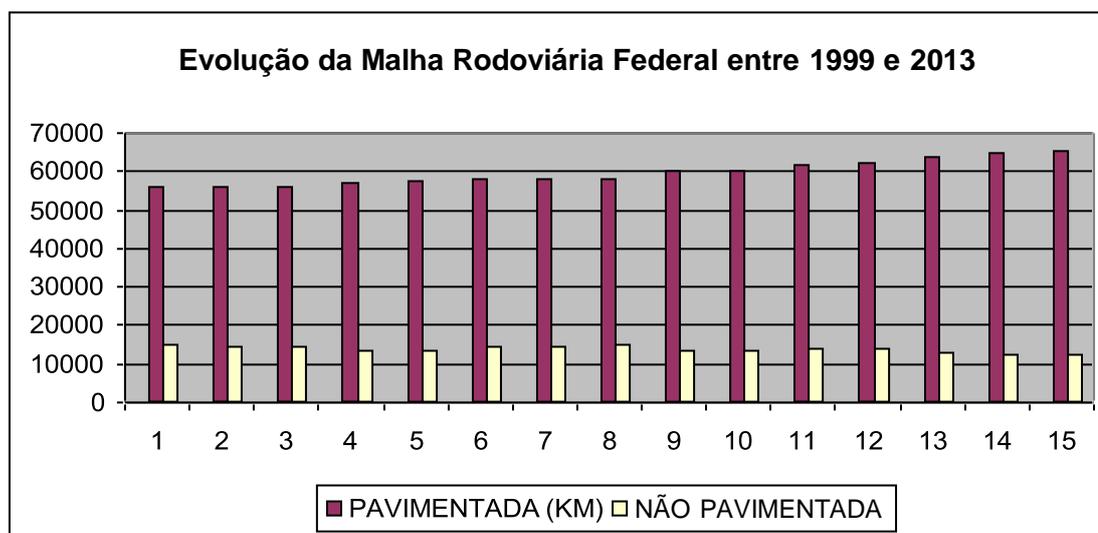


Gráfico 3 – Evolução da Malha Rodoviária Federal



## 5.2 PRODUÇÃO DE ASFALTO.

De acordo com Santana (1993), pavimento é uma estrutura construída sobre uma superfície obtida pelos serviços de terraplenagem com a função principal de

fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é com a máxima qualidade e o menor custo. Subleito é o terreno de fundação do pavimento, aquele que irá suportar o pavimento. Sua superfície superior é denominada de leito. Na engenharia, o projeto de terraplenagem prevê um material de melhor qualidade para a camada superior do subleito.

A produção de asfalto no Brasil iniciou-se em 1944, na refinaria Ipiranga, com petróleo importado geralmente da Venezuela.

Segundo Senço (1997), utilizava-se nos serviços de pavimentação, asfalto importado de Trinidad.

### **5.3 CAMADAS DO PAVIMENTO.**

O pavimento pode ser constituído por uma única camada que seja capaz de resistir simultaneamente aos esforços produzidos pelos veículos, e, além disso, proteger o revestimento de possíveis falhas do subleito.

Petrucci (1995) e Bauer (1994) dizem que tais camadas, por razões tecnoeconômicas, são geralmente divididas em duas partes: base e sub-base. Em solos de baixa capacidade de suporte agrega-se uma terceira camada conhecida como reforço de subleito. Cada uma dessas camadas terá, normalmente, uma resistência maior à medida que se aproxima do revestimento. Seus custos estão diretamente ligados a essas resistências. Os autores também citam alguns itens relevantes, caso o pavimento seja usado em vias urbanas.

O pavimento para uso urbano deve atender às seguintes exigências:

- Alta resistência às cargas verticais e horizontais ao desgaste, e impermeabilidade para evitar deterioração da base;
- Baixa resistência à circulação dos veículos para diminuir o consumo de combustível;
- Facilidade de conservação;
- Alto coeficiente de atrito para permitir uma boa frenagem, inclusive sob chuva ou geada;
- Baixa sonoridade para não aumentar excessivamente o ruído urbano;

- Cor adequada para que motoristas e pedestres tenham uma boa visibilidade, mesmo à noite ou com nevoeiro.

Os pavimentos sofrem esforços complexos, no qual o mais importante é a resistência às cargas. Senço (1997) os agrupa em duas categorias:

a) Esforços produzidos pelo tráfego de veículos (compressão, tração, flexão e corte), em ação estática (nos estacionamentos) ou em ação dinâmica (nas faixas de rolamento);

b) Esforços produzidos por variações de umidade e temperatura; a ação devido à umidade em alguns pavimentos é notável, outros perdem resistência com o calor, e outros se contraem acentuadamente com as grandes variações de temperatura. A repetição e combinação desses esforços, que se verificam continuamente, produzem fadiga nos materiais.

O pavimento sofre deformações e deve ter a capacidade de elasticamente voltar à sua posição normal, quando a carga desaparece. Os pavimentos asfálticos tendem a entrar em fluência lenta, particularmente quando combinado com as cargas e aumento de temperatura em função do clima.

As variações de velocidades ou direção dos veículos dão lugar a esforços de deslizamento das capas superiores, pelo que os elementos pétreos devem ter uma excelente resistência ao desgaste.

Os asfaltos oferecem uma razoável coesão, mas com o tempo as evaporações dos componentes voláteis os tornam quebradiços. Porém, por outro lado, o excesso de componentes leves os faz demasiadamente plásticos e tendem a provocar ondulações perto dos cruzamentos onde o trânsito urbano é mais intenso e pesado (SENÇO, 2001).

Os pavimentos asfálticos são muito sensíveis à umidade na sua base, a cor escura faz com que as variações de temperatura sejam elevadas nestes materiais, o que faz com que a penetração da umidade na sua massa seja evaporada rapidamente criando-se variações grandes de volume e com ela tensões que facilitarão sua quebra e posterior destruição (PETRUCCI, 1995).

Por sua vez, John (2000) adverte que a inexistência de um padrão e de critérios de testes para avaliar a potencialidade de aplicação dos resíduos são causas que restringem a sua aplicação, além de ser necessária uma amostragem cuidadosa para determinar a variabilidade envolvida na geração dos mesmos. O autor também afirma que a viabilidade de reciclagem de um resíduo depende de fatores, tais como:

- Proximidade da instalação de processamento;
- Custo de transporte dos resíduos;
- Volume de resíduos disponível para reprocessamento;
- Custo de estocagem do resíduo no local de geração ou afastado da origem. O estudo da viabilidade técnica da reciclagem de um determinado resíduo.

#### **5.4 UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ALTO FORNO COMO AGREGADO.**

Quanto ao seu uso para pavimentação, Senço (2001) as classifica em granulada e bruta. O mesmo autor também apresenta informações técnicas relevantes para a utilização deste material para a pavimentação, as quais serão apresentadas a seguir.

A escória granulada pode ser utilizada como base ou sub-base de pavimentos, desde que misturada com brita e cal, enquanto a escória bruta, que é composta de grãos com as dimensões habituais das britas utilizadas em pavimentação, pode ser empregada na construção de bases e sub-bases de pavimentos, apenas com adição de cal.

A utilização da escória em pavimentação, embora não possa ser considerada rotineira, já é freqüente em países em que a produção do aço atingiu níveis elevados, como os Estados Unidos, Alemanha, Japão, França e Reino Unido.

A produção de escória nesses países ultrapassa cem milhões de toneladas anuais. Na Inglaterra, as especificações sobre o uso da escória de alto-forno permitem uma resistência mecânica desse material inferior à resistência exigida para os agregados britados de rocha. A grande preocupação quanto ao uso da escória é a sua estabilidade química, quando utilizada para agregado de concreto.

São tomados cuidados especiais também quanto às impurezas, principalmente as de enxofre:

O mesmo autor faz menção do uso da escória em pavimentação na Austrália e Hungria. Na Austrália, a escória de alto-forno pulverizada (cinza volante) tem propriedades das pozolanas, servindo como aglutinante que reage com a cal, formando componentes cimentantes. Na Hungria, a escória de alto-forno granulada foi utilizada como base de pavimento na forma de cascalho rolado, tratado com 20% de escória granulada e 2% de cal hidratada, compondo uma camada de espessura final de 26 centímetros.

O trecho pavimentado foi submetido ao tráfego durante os meses de inverno para depois ser superposto por uma camada de binder de 11 centímetros e camada de rolamento de concreto asfáltico de 4,5 centímetros de espessura.

Exames posteriores evidenciaram o bom desempenho do pavimento, o que levou as autoridades a elaborar normas para a execução desse tipo de serviço.

Porém, é na França que se encontra, não só um volume maior de obras com o uso da escória, mas também, bibliografia mais vasta e concludente sobre o comportamento dos pavimentos com base, sub-base ou revestimento usando-a como agregado. No final dos anos 60, o próprio laboratório de Ponts et Chaussées passou a centralizar o controle do fornecimento de escória granulada para algumas regiões da França, inclusive recebendo e distribuindo escória importada da Bélgica (SENÇO, 2001).

Com o apoio de equipes especialmente treinadas para orientar a aplicação, o uso da escória passou a ser rotineiro, entrando como integrante de projetos-tipo de pavimento nos catálogos que tanto têm contribuído para uniformização dos processos executivos neste país, como mais uma opção à disposição dos engenheiros projetistas. Venuat (apud LOUZADA, 1991) diz que na França a escória de alto-forno utilizada como agregado para enchimento das camadas de base de pavimentos de estradas e auto-estradas é composta por agregado natural, de 5% a 20% de escória granulada e 1% de cal.

De acordo com Lima (1999), algumas das características da escória, como

agregado miúdo, já estão normalizadas neste país.

No Brasil, a utilização da escória de alto-forno em pavimentação ainda é ineficiente, principalmente no Estado de São Paulo, onde é vendida à indústria de cimento para fabricação de Cimento de Alto-Forno (CAF). A própria Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), limita a utilização da escória à pavimentação de ruas internas da fábrica. Senço (2001) frisa a importância da limitação do teor de chumbo, especialmente no que tange a questão ambiental.

Mesmo assim, o uso da escória em obras rodoviárias é objeto de algumas normas e especificações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

Para Senço (2001) o que mais chama a atenção é a especificação para o concreto betuminoso usinado a quente, por se tratar de um produto nobre na hierarquia dos revestimentos, indicando uma possibilidade de uso da escória como agregado de misturas betuminosas para tráfego intenso e vias de alto padrão, não se limitando a vias de pouco tráfego e de condições técnicas precárias.

No caso brasileiro, não é possível ainda a apresentação de exemplos marcantes da utilização da escória de alto-forno em pavimentação, o que não impede de se encarar com algum otimismo esse emprego, tendo em vista a produção nacional de aço e a tendência de se utilizar ao máximo os materiais abundantes nas proximidades dos serviços. A alternativa pode vir a ser uma solução mais econômica para a pavimentação de vias, principalmente nas proximidades das grandes indústrias siderúrgicas.

## **5.5 APLICAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA PARA BASE E SUB BASE DE PAVIMENTAÇÃO.**

Alunos da UFV- Universidade Federal de Viçosa realizou um trabalho com um solo residual jovem de gnaiss da Zona da Mata Norte de Minas Gerais. A amostra foi na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa.

Foi utilizada escória de alto-forno granulada moída produzida pela empresa Aço

Minas Gerais. Esse resíduo foi moído pela empresa Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda., que forneceu uma amostra desse material para ser utilizada no trabalho.

Foi empregada uma cal hidratada comercial adquirida no comércio da cidade de Viçosa, Minas Gerais, da marca SUPERCAL e fabricada pela companhia ICAL. Sua função nas misturas foi atuar como elemento ativador das reações de hidratação dos compostos químicos da escória de alto-forno granulada moída

O estudo, trabalhou com:

- (i) caracterização geotécnica do solo e química da escória de alto-forno granulada moída;
- (ii) teores de escória de alto-forno granulada moída de 5, 10 e 15% em relação à massa seca de solo;
- (iii) teores de cal hidratada de 5, 10 e 20% em relação à massa seca de escória;
- (iv) compactação de corpos-de-prova do solo e de suas misturas com escória de alto-forno e cal hidratada na energia do ensaio Proctor intermediário;
- (v) ensaios de compressão não-confinada realizados nos corpos-de-prova do solo e misturas compactados, nos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias.

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes Normas Técnicas: granulometria (ABNT, 1984a), limites de Atterberg (ABNT, 1984bc), massa específica dos grãos (ABNT, 1984d), compactação (ABNT, 1986) e compressão não-confinada (DNER, 1994). Considerando que, presentemente, não se dispõe de norma técnica brasileira específica para a determinação da resistência mecânica das misturas em estudo, adotou-se aquela preconizada pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994) para a caracterização de misturas solo-cimento, envolvendo as etapas de compactação, cura, imersão em água e ruptura dos corpos-de-prova.

NBR 12253 (ABNT, 1992) para misturas solo-cimento, que destaca que a resistência mínima dessas misturas deve ser igual ou superior a 2,1 MPa para um período de cura de sete dias, conclui-se que a mistura com 10% de escória ativada com 10% de cal praticamente atendeu às exigências de misturas solo-cimento para emprego como camadas de base e sub-base de pavimentos

rodoviários.

Os resultados do programa experimental levaram às seguintes conclusões:

- (i) a escória de altoforno granulada moída ativada com cal hidratada mostrou-se um agente químico eficiente na estabilização do solo residual jovem em estudo;
- (ii) A adição de escória ao solo não causou variações significativas nos parâmetros ótimos de compactação desse solo;
- (ii) considerando-se o desvio-padrão observado, a mistura de 10% de escória ativada com 10% de cal atingiu aos sete dias de cura, para fins práticos, as exigências mínimas de resistência mecânica para o emprego de misturas solo-cimento como camadas de base de pavimentos rodoviários, (NBR 12253).

## 5.6 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS DE CONCRETO.

De acordo com [cimento.gov](http://cimento.gov) as cidades brasileiras poderão contar com um grande reforço contra as enchentes e favoráveis aos lençóis freáticos e ao reuso da água da chuva. Foi aprovada a norma da ABNT que estabelece os requisitos e procedimentos de execução de pavimentos permeáveis de concreto, que inclui os pisos permeáveis intertravados e as placas permeáveis de concreto

Figura 5 – Foto demonstrativa das placas permeáveis de concreto.



(Fonte [www.cimento.org](http://www.cimento.org))

A nova norma estava em discussão desde outubro de 2013 na Comissão de Estudo de Pavimentos Permeáveis de Concreto (CE-18:600.10) do Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB-18). Essa comissão contou com a

participação intensa de órgãos públicos, de empresas, associações setoriais, representantes de universidades e profissionais da construção civil.

Segundo o engenheiro Cláudio Oliveira, gerente de Indústria, Inovação e Sustentabilidade da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e coordenador dessa comissão do CB-18/ABNT, a nova norma veio preencher uma lacuna ao estabelecer os requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local. “Esta norma estabelece as diretrizes para a correta utilização dos sistemas permeáveis à base de cimento, que aumentam as áreas permeáveis nas cidades, ajudando a minimizar a ocorrência de enchentes ao eliminar a água de escoamento superficial e permitir que as águas das chuvas possam se infiltrar no solo e abastecer os lençóis freáticos. Esse tipo de pavimento também pode ser dimensionado para armazenar as águas pluviais, que podem ser usadas como água de reuso, na irrigação de jardins, lavagem de áreas públicas e privadas, entre outros usos sanitários”,

A nova norma, que deverá ser publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, também promoverá a melhoria da qualidade dos projetos e obras de pavimentos permeáveis de concreto, ao definir e detalhar os requisitos mínimos que devem ser atendidos por esse tipo de pavimento, muito utilizado em calçadas e praças de áreas públicas e privadas, em estacionamentos e em vias de tráfego leve, entre outros. “Os projetistas, arquitetos e engenheiros, têm agora todos os parâmetros para desenvolver um bom projeto e as construtoras, empresas e órgãos públicos que contratam e executam esse tipo de pavimento passam a dispor de todas as definições para realizar uma boa obra”, avalia o engenheiro Ramon Barral, presidente da Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (BlocoBrasil). Conforme a ilustração da próxima figura pode observar o processo de permabilização do no pavimento.

Figura 6 – Foto demonstrativa do processo de permeabilização do Pavimento de concreto



(Fonte [www.cimento.org](http://www.cimento.org))

### **5.7 ESTUDO DE APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM TELHAS SEM AMIANTO**

A fabricação de telhas sem amianto a partir de matérias-primas de custo reduzido por meio de processos alternativos e em pequena escala, tem sido desenvolvida pelo Grupo de Construções Rurais da FZEA-USP em Pirassununga (Agopyan et al., 2005; Cunha et al., 2001); referidos estudos envolveram o emprego de resíduos de indústrias siderúrgicas (escória de alto-forno) como aglomerante alternativo e fibras residuais de sisal, coco e eucalipto, como reforço. O desempenho mecânico e físico das telhas demonstrou seu potencial para aplicação na construção rural, tanto em moradias quanto em abrigos para animais.

O presente trabalho teve por objetivo comparar o desempenho térmico de um tipo de telha alternativa com dois tipos de cobertura largamente utilizados no meio avícola, utilizando-se de protótipos de galpões avícolas

Os materiais de cobertura utilizados foram:

1) telhas compostas de uma matriz à base de cimento Portland CII 32Z (ABNT NBR-5735) + escória de alto-forno (EAF) e sílica ativa, reforçadas com fibras de polpa celulósica de sisal (*Agave sisalana*) (Devito, 2003);

2) telhas de cimento amianto recém pintadas de branco

3) telhas cerâmicas. Em cada protótipo se usaram 10 lâmpadas de 100 W, simulando o calor sensível mais o calor latente produzido pelas aves, na proporção de 20 W por ave adulta (2,1 kg). Foram simuladas 12 aves m<sup>-2</sup>, totalizando 1036 W. Obtiveram-se os dados climáticos por mini dataloggers da marca HOBO® acoplados a globos negros instalados no centro geométrico dos protótipos

O experimento foi realizado em Piracicaba, SP, Brasil. Latitude: 22° 42' 30" sul - Longitude de 47° 38' 00" oeste Altitude de 546 m, no período de 31/01/2005 a 22/02/2005. Utilizaram-se modelos em escala reduzida e distorcida (1:2 na vertical e 1:10 na horizontal) com medidas de 3,6 m de comprimento por 1,2 m de largura e 1,5 m de altura. Os modelos foram instalados sobre solo coberto de grama batatais, sendo sua estrutura de tijolos sem paredes laterais e telhado em duas águas, com comprimento no sentido leste-oeste

As telhas compostas de fibras vegetais apresentaram desempenho térmico semelhante as das telhas cerâmicas apontadas como referência, quanto ao conforto térmico em instalações

A confecção das telhas compostas com fibras vegetais é segura para o trabalhador, diferentemente das telhas de cimento amianto.

## 5.8 PAINÉIS DE CIMENTO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO.

A idéia de reaproveitar escórias de alto-forno, abundantes e poluidoras atende, por sua vez, um grande problema das siderúrgicas, preocupadas em reduzir o impacto ambiental negativo de sua atividade. São situações propícias à pesquisa acadêmica associada à inovação necessária do setor industrial, que foram abrigadas dentro do programa Parcerias para Inovação Tecnológica (Pite), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) que financiou o projeto "Painéis de Cimentos de Escória Reforçados com Fibra de Vidro 'E'".

O projeto, coordenado pelo professor Vahan Agopyan e conduzido pelo Departamento de Engenharia de Construção Civil visava desenvolver fibrocimentos capazes de aceitar fibras de vidro convencionais, uma vez que as fibras modificadas eram materiais importados que aumentavam o custo de produção. A fabricação de painéis de concreto maciço gera blocos excessivamente pesados para a construção civil. Esses materiais demandariam muita energia e muita matéria-prima na sua fabricação, implicando em uma construção muito custosa e pouco eficiente. A tecnologia de fabricação dos fibrocimentos, ou seja, cimentos com fibra de vidro adicionada, permite a produção de painéis de cimento mais finos e leves, que facilitam a construção. O problema da fabricação dos fibrocimentos é que as fibras de vidro são muito vulneráveis ao ambiente alcalino do cimento. Japão, China e Espanha, países líderes na área, resolveram o problema criando fibras de vidro álcali resistentes, modificadas para resistir à alcalinidade do cimento. A inovação está na agregação de valor à escória pela introdução da fibra de vidro, que torna o material mais fácil de moldar e muito resistente. Segundo o professor Vanderley Moacyr John, do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica, o projeto buscou atingir seu objetivo por um caminho diferente do adotado por outros países: "enquanto a abordagem tradicional usava fibras de vidro específicas para resistir ao cimento, nossa equipe buscou fazer um tratamento do cimento para reduzir sua alcalinidade e permitir o uso de fibras de vidro convencionais do tipo 'E', que são mais baratas, além de serem produzidas no Brasil".

As escórias de produção de aço são compostos ricos em uma variedade de substâncias, principalmente óxidos de cálcio, silício e alumínio. Magnésio, manganês e enxofre podem estar presentes, também, em menores quantidades. Esses compostos possuem uma característica diretamente atraente para os objetivos desejados: já são de alcalinidade menor do que os cimentos tradicionais. Com a adição de ativadores (silicatos de sódio, sulfatos e hidróxidos de cálcio, juntos ou não) as escórias adquirem melhores propriedades cimentícias. As fibras de vidro E (também usadas em isolantes elétricos) contribuem melhorando a resistência do material, por exemplo, na hora de produzir estruturas curvas.

Segundo o professor Agopyan, "a entrada da Fapesp como agência financiadora foi fundamental para estimular o envolvimento da Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST) e da Owens Corning". E o projeto gerou resultados interessantes para todos os envolvidos. A Siderúrgica de Tubarão obteve um novo aproveitamento para sua escória, e fatura com sua venda. O material, antes depositado em aterros, contaminando solo e sub solo, agora é comercializado. A CST fatura US\$ 9 milhões por ano, vendendo escória para quatro empresas cimenteiras. E a Owens tem uma nova utilidade para suas fibras de vidro.

"A interação entre universidade e empresa foi muito benéfica para nós", "não apenas se formaram mestres e doutores, mas pesquisadores qualificados a trabalhar em conjunto com empresas. Hoje, temos aqui parcerias com dez empresas, desde pequeno porte até gigantes como Votorantim e Braskem. Isso foi possível, em grande parte, pela ação da Fapesp, desde a época em que foi desenvolvido o projeto, de 1996 a 1999", conclui o professor Vanderley John.

Algumas aplicações de escória ainda não foram utilizadas no Brasil. A principal delas talvez seja a produção de agregados leves a partir da pelotização da escória líquida. Este material é produzido comercialmente na Inglaterra e Canadá. O interesse por estes agregados vai crescer no mercado brasileiro, na medida

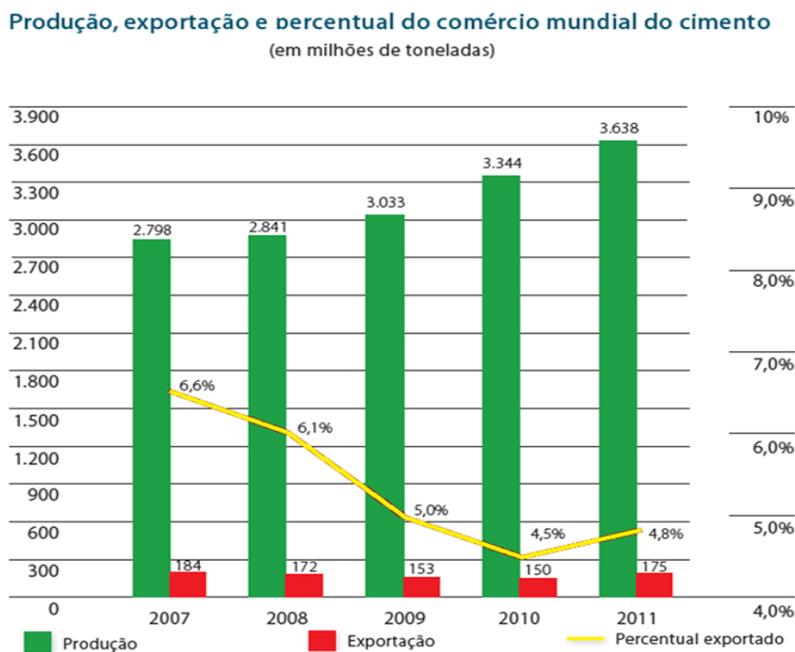
que o uso de pré-moldado se generalize. Outra aplicação interessante é a produção de blocos e lajotas de escória ativada com cal, produto tradicional em algumas regiões da Europa. A escória ainda em seu estado líquido pode também ser utilizada para a produção de lã de rocha, um importante produto para absorção acústica, isolamento térmico e proteção contra chamas, dispensando o impacto ambiental da mineração de rochas e sua fusão. Mesmo no mercado de cimento Portland, existem algumas variantes que devem ainda podem ser exploradas. Este é o caso da combinação cimentos de escória com cura térmica, demonstrada por CAMARINI (1995). Outra alternativa é a adição de escóriamóida diretamente na betoneira, tecnologia adotada em muitos países mas praticamente ignorada no Brasil (MARQUES, 1994).

## **5.9 ANALISE DO ESTUDO**

### **Mercado**

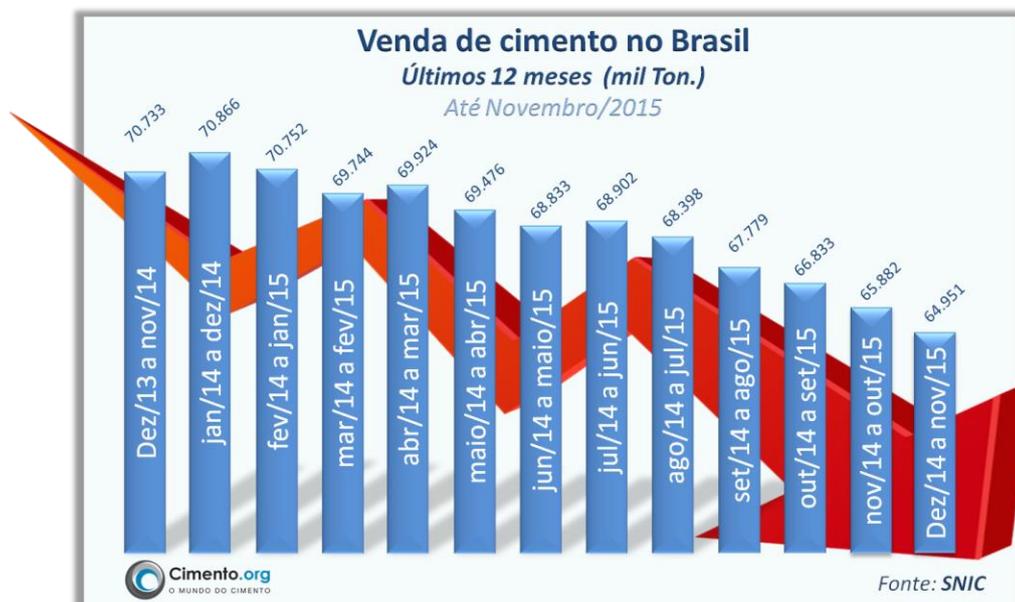
Entre os países americanos, apenas os EUA supera o Brasil em número de empresas cimenteiras, onde, ainda assim, 70% do cimento é produzido por 10 grupos. O comércio internacional de cimento sempre teve uma participação pouco expressiva quando comparado com o consumo mundial. Na década de 50, o comércio entre nações representava pouco mais de 6% do consumo de cimento no mundo. Essa relação caiu nas décadas de 60 e 70, voltando a crescer entre 80 e 90. Nos últimos anos, a relação entre o comércio exterior e o consumo global se estabilizou em torno de 5% como pode ser observado no gráfico a seguir.

Gráfico 4. – Comercio mundial do cimento.

(Fonte [www.cimento.org](http://www.cimento.org))

De acordo com dados divulgados pelo SNIC- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento estima que mercado, indica que as vendas de cimento para o mercado interno brasileiro, em novembro de 2015, registraram mais uma queda de 16% em relação ao mesmo mês do ano anterior. Com a queda em novembro as vendas acumuladas no país (de jan a Nov/15) já acumulam queda de 9%, o que fatalmente levará o ano a fechar com uma redução em vendas bem próxima aos 10%. No mês de dezembro de 2014 foram comercializadas 5,2 milhões de toneladas e as perspectivas para o mês em curso (dezembro/15) conforme demonstra o próximo gráfico .

Grafico 5. – Venda de cimento no Brasil até Novembro 2015.



(Fonte www.cimento.org)

#### CONSUMO DE CIMENTO NO BRASIL DE 2010 A 2014

Ano	Toneladas	Varição anual (%)
10	60.007.980	16,14%
11	64.971.753	8,27%
12	69.323.633	6,70%
13	70.974.211	2,38%
14	71.702.803	1,03%

(Fonte www.cimento.org)

O Brasil não possui uma norma específica para as escórias de alto-fornos. As especificações das escórias são baseadas nas normas de cimento Portland e o uso como adição mineral está citado na norma de controle tecnológico do concreto NBR 12654 (ABNT,1992) (MASSUCATO, 2005).

Segundo REGOURD (1986) et al. JOHN, VANDERLEY M.(1995) apud MASSUCATO, 2005, a ativação química da escória pode ser classificada em três tipos: química, mecânica e térmica.

A ativação mecânica é obtida pela moagem da escória, de maneira a obter área superficial específica elevada. Isto ocorre porque a velocidade de dissolução depende da área de contato da solução e a ativação térmica é obtida pela elevação da temperatura da solução escória e água.

A ativação química, de maior interesse prático se dá pela combinação de dois fatores: a elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH e pela antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados, devido ao aumento da concentração de íons na solução já no início do processo, pela dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória (JOHN, VANDERLEY M., 1995 apud MASSUCATO, 2005).

A incorporação de adições minerais ao concreto, seja na produção do concreto ou no processo de fabricação do cimento, em geral, resulta na melhoria das características do produto final, por modificar a estrutura interna da pasta de cimento. O uso de adições, em geral, tem como objetivo reduzir a porosidade capilar do concreto e, em alguns casos, proporcionar um ganho de resistência, além de diminuir o calor de hidratação e, por consequência, reduzir as fissuras de origem térmica (NEVILLE 1997 apud VAL, 2007).

A escória é composta pelos mesmos óxidos que compõem o cimento, porém em proporções distintas. Apresenta boa reatividade nos períodos iniciais, produzindo resistência adequada aos 7 dias de hidratação. Com relação à durabilidade, concretos com escória têm a permeabilidade e porosidade reduzida e uma crescente resistência ao longo da idade, pois possuem uma microestrutura mais densa (NEVILLE, 2004).

## **6. CONCLUSÕES**

O Brasil está praticamente limitada a sua reciclagem de escória de alto forno na indústria de cimento Portland. Este tipo de reciclagem tem uma contribuição ambiental significativa. No entanto, é necessário que estudos e pesquisas sejam desenvolvidas para que novas e variadas aplicações tenham melhor aproveitamento deste resíduo. Nesta linha, o desenvolvimento de cimentos especiais, de baixa alcalinidade apresenta enorme avanço como podemos observar nos estudos já realizados junto as cimenteiras.

É preciso avançar nas normas, na legislação, na tecnologia e na pesquisa para área de pavimentação uma vez que estudos demonstram a viabilidade técnica em adição da escória para base e sub base de pavimentação já aplicadas amplamente em países europeus.

É necessário mais estudos e investimento das empresas privadas e órgãos governamentais para desenvolvimento de novos produtos como podemos verificar no caso das placas de cimento e as telhas sem o amianto e bem como o desenvolvimento de produtos acústicos com adição da escória, para que o país tenha produtos inovadores com valor agregado de sustentabilidade para oferecer ao mercado interno e internacional gerando dividendos a toda sociedade brasileira.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO – ABEDA. Manual básico de emulsões asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro: 2001. 134p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento. Rio de Janeiro: 1984a. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6459/84, Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Procedimento. Rio de Janeiro: 1984b. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7180/84, Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Procedimento. Rio de Janeiro: 1984c. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6508/84, Solo – Determinação da Massa Específica Aparente – Procedimento. Rio de Janeiro: 1984d. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7182/84, Solo – Ensaio de Compactação – Procedimento. Rio de Janeiro: 1986. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12253/92, Solo – Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento. Rio de Janeiro: 1992. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Argamassa poscolante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – determinação da resistência à tração - NBR 14084/2004. Rio de Janeiro, 2004. Agregado fino – determinação de impurezas orgânicas - NBR NM 49/2001. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Agregados – Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248/2003. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento Portland comum – NBR 5732/1991. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento Portland composto – NBR 11578/1991. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cal hidratada para argamassas – requisitos - NBR 7175/2003. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento

Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica - NBR NM 23/2001. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento

Portland – determinação da pasta de consistência normal - NBR NM 43/2003. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento

Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier - NBR 11582/1991. Rio de Janeiro, 1991.

AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. Durability evaluation on vegetable fibre reinforced materials. Building Research and Information, v. 20, n.4, 1992 p.233-235.

AMORIM, L.V.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H.C. Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars. Journal of Environmental Engineering, v. 129, n. 10, p. 916-920, 2003.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Edurado; JOHN, Vanderley Moacyr - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. PCC - Departamento Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica. São Paulo/SP, 2008.

BAKHAREV, T.; SANJANYAN, J.G; CHENG, YI-BING. Alkali activation

of Australian slag cements. Cement and Concrete Research 29, 1999, p. 113 – 120. Department of Civil Engineering and Department of Materials Engineering Monash University, Australia.

CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. São Paulo, 1995 (Tese de Doutorado)

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. Características da Escória Granulada de Alto-Forno e seu Emprego como Aglomerante e Agregado. São Paulo: IPT, 1992. (Boletim, 65).

CINCOTTO, M.A.; JOHN, V.M. Cimento alternativo à base de escória de alto-forno. Construção São Paulo, nº2204, Mai. 1990. (Encarte Tecnologia de Edificações nº9). JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. São Paulo : EP USP, 1995 (Tese de Doutorado) MARQUES, J.C. Escória de alto forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concretos. São Paulo, 1994. 175p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. OLIVEIRA, C.T.A. Água do poro de pastas endurecidas de cimento de escória. São Paulo, Escola Politécnica da USP, Tese de Doutorado. 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER–

ME 201/ 94, Solo-cimento – Compressão Axial de Corpos-de-prova Cilíndricos –Método de Ensaio. Rio de Janeiro: Norma Rodoviária, 1994. 4p.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. Rede viária florestal. Curitiba: FUPEF, 1986. 157p.

SANT’ANA, A. P. et al. Avaliação da resistência mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 1., 2004, São Carlos. Simpósio...  
São Carlos: EESC/Universidade de São Paulo, 2004. 6p. (CD-ROM).

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª edição. Tradução de Salvador Giamusso. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. 2ª edição. São Paulo: Ed. Pini, 1994.

SERSALE, R. Characterization and potential uses of steel slag. Silicates Industriels, Bruxelles v.51, p.163-170, 1986.

RESCHKE, J. S. Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade. Rio Grande do Sul, 2003. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

CHAMON, J. Estudo da Influência de Adições no Módulo de Elasticidade Dinâmico, na Resistência à Fadiga e na Tenacidade à Fratura para Concretos Convencionais. Minas Gerais, 2006.

Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

PEREIRA, A. C. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação. Goiás, 2003. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Disponível em:

<<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

MASSUCATO, C. J. Utilização de escória de alto forno e carvão vegetal como adição no concreto. São Paulo, 2005. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Disponível em:

<<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

ESPER, M. W.; HELENE, P. Características do Cimento Portland de Alto-Forno. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1993

COLLINS F. G.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. Cement and Concrete Research 29, 1999, p. 455-458. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G; Cheng, YI-BING. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. Cement and Concrete Research 30, 2000, p. 1367 – 1374. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia.

OLIVEIRA, C. T. A. Água do poro de pastas de cimento de escória. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

SILVA, M. G. Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno. São Paulo, 1998. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>>

Acesso em: 15 outubro. 2015.

FREITAS, FERNANDO A. ERLUND. Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento portland, com e sem adição de escória, por meio da análise de imagens. São Paulo, 2001. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL CAMPINAS Disponível em:

<<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro.2015.

RICHARDSON, I. G. e CABRERA, J. G. The nature of C-S-H in model slag-cements. Cement & Concrete Composites 22, 2000. p 259 – 266.

Civil Engineering Materials Unit, School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK

LIDUÁRIO, A. S. Contribuição ao Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto Convencional na Presença das Adições Mineraias. Goiás, 2006. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Disponível em:

<<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro.2015.

COSTA, M. R. M. M. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. São Paulo, 2006. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em:

<<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro.2015.

CARDOSO, A.; CARBONE, J. P. Caracterização reológica de revestimentos a base de gesso por squeeze-flow. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. Influência da resistência à compressão em concretos com diferentes teores de escória de alto-forno. Espírito Santo, 2004. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO.

Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

NETO, A. A. M. Estudo da Retração em Argamassa com Cimento de Escória Ativada. São Paulo, 2002. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

OSBORNE, G. J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. Cement and Concrete Composites 21, 1999, p. 11 – 21. Turnpike Drive, Luton, UK.

MACHADO, A. T. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

ARIVABENI, L. F. Contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para produção de concretos. Espírito Santo, 2000. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

COELHO, M. A. M. Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno. Espírito Santo, 2002. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 outubro. 2015.

BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, E.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. Recycling of construction and demolition waste materials: A chemical-mineralogical appraisal.

Waste Management, v. 25, n.2 spec. issue, p 149-159, 2005.

HEIKAL, M.; AIAD, I.; HELMY, I. M. Portland cement clinker, granulated slag and by-pass cement dust composites. Cement and Concrete Research 32, 2002, p. 1805–1812. Institute of Efficient Productivity, Zagazig University, Zagazig; Egyptian Petroleum Research Institute; Faculty of Science, Zagazig University, Egypt.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Cimento

Portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) - NBR NM 76/1998. Rio de Janeiro, 1998.

BATTAGIN, A. F. Método microscópico rápido para verificação da reatividade de escórias de alto forno. Boletim Informativo de Microscopia n 3, São Paulo, 1984.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., OLIVEIRA, A.L., BEDIN, C.A. Alvenaria estrutural de blocos de concreto. 1ª ed. 61 p. Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MOHAMAD, G. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 1ª ed. p. 1008 – 1026. IBRACON, São Paulo, 2007. LIMA, F.A.M., Estudo da influência da adição de vermiculita expandida na resistência à compressão e nas propriedades reológicas de pastas de cimento para cimentação de poços de petróleo. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

YAMAMOTO, J.K. et al. Environmental impact reduction on the production of blended portland cement in Brazil. Environmental Geosciences, v.4, nº4, 1997, p. 192- 206. ZWAN

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. São Paulo : EP USP, 1995 (Tese de Doutorado)

MARQUES, J.C. Escória de JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. São Paulo : EP USP, 1995 (Tese de Doutorado)

IBS (Instituto Brasileira de Siderurgia), SIDERURGIA BRASILEIRA - Relatório de Sustentabilidade 2007, Conceção AMCE Negócios Sustentáveis.