



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS DE MARABÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO  
AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETOS FABRICADOS EM MARABÁ

MARABÁ  
2013

PAMELLA BARROS DOS SANTOS

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO  
AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETOS FABRICADOS EM MARABÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de  
Materiais, Campus de Marabá, Universidade  
Federal do Pará.

**Orientador: Prof. Dr. Elias Fagury Neto.**

MARABÁ  
2013

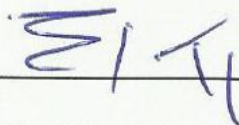
# PAMELLA BARROS DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus de Marabá, Universidade Federal do Pará.


**Orientador: Prof. Dr. Elias Fagury Neto.**

Data de aprovação: 08/04/2012

Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_ - Orientador  
Prof. Dr. Elias Fagury Neto – UFPA

  
\_\_\_\_\_ - Membro interno  
Prof. Dr. Edemarino Araujo Hildebrando – UFPA

  
\_\_\_\_\_ - Membro interno  
Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques – UFPA

*Aos meus queridos pais, Edson Aires dos Santos e  
Cleudilene Barros dos Santos,  
minhas irmãs, Priscilla e Pollyanna Barros.  
Grata pelo carinho, compreensão  
e incentivo que sempre me  
proporcionaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela vida e pelas oportunidades.

Aos meus pais, Edson Aires e Cleudilene Barros dos Santos, pela sua compreensão, incentivo, amor e dedicação durante minha vida.

Às minhas irmãs, Priscilla Barros e Pollyanna Barros, e familiares pelas suas palavras de incentivo e perseverança.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Elias Fagury Neto, pela confiança, paciência e ensinamentos durante a realização desse trabalho e por sua dedicação à Faculdade de Engenharia de Materiais.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais pela difusão de conhecimentos e desenvolvimento de pesquisas, nessa instituição, sendo, portando, grandes colaboradores para estruturação do curso na nossa região.

Aos colaboradores da empresa de serviço de concretagem Nazaré Concretos, pela doação de materiais, concessão de imagens, disponibilização de laboratório e fornecimento de informações para realização dessa pesquisa.

Aos funcionários da empresa Construfox Construções e Incorporações Ltda, especialmente, Moises Pereira Souza Neto, pela disponibilização e execução de ensaios no laboratório.

Aos funcionários da Universidade Federal do Pará pela sua cooperação pela estruturação do Campus de Marabá.

Aos meus colegas de curso pela amizade, companheirismo, e compartilhamento de conhecimentos, enfim, a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente na realização dessa pesquisa.

A todos, muito obrigada.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	6
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	8
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	9
<b>RESUMO</b> .....	10
<b>PALAVRAS-CHAVE:</b> concreto, escória de alto forno e resistência à compressão. .	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	14
2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	14
2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
3.1 <i>Concreto de cimento Portland</i> .....	15
3.1.1 <i>Cimento Portland</i> .....	16
3.1.2 <i>Agregados</i> .....	21
3.1.3 <i>Aditivos químicos</i> .....	23
3.1.4 <i>Água de amassamento</i> .....	25
3.2 <i>Propriedades do concreto endurecido</i> .....	26
3.2.1 <i>Resistência mecânica</i> .....	26
3.2.2 <i>Impermeabilidade</i> .....	27
3.3 <i>Escória de alto forno</i> .....	28
3.3.1 <i>Classificação das escórias de alto forno</i> .....	30
3.3.2 <i>Reaproveitamento das escórias siderúrgicas na construção civil</i> ....	31
3.3.2.1 <i>Utilização da escória produção de cimento Portland</i> .....	32
3.3.2.2 <i>Utilização de escória em obras e lastros rodoviários</i> .....	33

3.3.2.3 Utilização de escórias na produção de argamassas e concretos como substituição ou adição ao cimento.....	35
3.3.2.4 Utilização de escória de alto forno como agregados em concretos.....	36
<b>4. MATERIAIS E METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
4.1.1 <i>Materiais</i> .....	37
4.1.1.1 Aglomerante hidráulico .....	37
4.1.1.2 Agregado miúdo.....	37
4.1.1.3 Agregado graúdo de escória de alto forno.....	38
4.1.1.4 Aditivo químico.....	38
4.1.1.5 Água.....	38
4.1.2 Metodologia.....	39
4.1.2.1 Produção e dosagem do concreto .....	39
4.1.2.2 Avaliação do concreto fresco .....	40
4.1.2.3 Caracterização dos agregados .....	40
4.1.2.3.1 Agregado miúdo.....	41
4.1.2.3.2 Agregado graúdo .....	41
4.1.2.4 Resistência à compressão axial.....	42
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
5.1 Agregado miúdo.....	45
5.2 Agregado graúdo (escória de alto forno) .....	48
5.3 Avaliação do concreto fresco.....	51
5.4 Resistência à compressão axial .....	51
5.5 Aplicação prática do concreto com escória de alto forno .....	52
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Geração de coprodutos e resíduos nos anos por empresas siderúrgicas associadas ao instituto nos anos de 2009 a 2011. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2012).....	12
Figura 2: Receita com venda de coprodutos (R\$ milhões) . Fonte: Instituto Aço Brasil (2012).....	14
Figura 3: (a) Monumentos egípcios (b) Coliseu (c) Panteão. Fonte: BATTAGIN, 2012. ....	16
Figura 4: Ensaio de compressão axial. Fonte: ALMEIDA (2009). ....	27
Figura 5: Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo os equipamentos auxiliares principais. Fonte: CHIAVERINI (1986).....	29
Figura 6:Geração de resíduos siderúrgicos e reaproveitamento. Fonte: Instituto Aço Brasil (2012). ....	31
Figura 7: Agregado miúdo. Fonte: autora.....	37
Figura 8: Escória de alto forno. Fonte autora. ....	38
Figura 9: Avaliação do abatimento de cone. Fonte: VAL, 2007.....	40
Figura 10:Confecção dos corpos-de-prova. Fonte: autora.....	42
Figura 11: Corpos-de-prova em cura. Fonte: autora. ....	43
Figura 12: Ensaio de compressão. Fonte: autora.....	44
Figura 13: Curva granulométrica do agregado miúdo (areia), de acordo com a norma NBR 7211:2009.....	46
Figura 14: Curva granulométrica do agregado graúdo (escória de alto forno), de acordo com a norma NBR 7211:2009. ....	48
Figura 15: Aplicação do concreto com escória em bases. (a) Bases para equipamentos; (b) detalhe da estrutura da base; (c) Moldagem do concreto. Fonte: autora. ....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura dos cimentos Portland. Fonte: ABCP, 2002 .....	19
Tabela 2: Principais aditivos químicos usados em concretos, no Brasil. Fonte: Manual de concreto dosado em central, ABESC (2007). .....	24
Tabela 3: Dosagem do concreto com escória de alto forno .....	39
Tabela 4: Métodos de caracterização do agregado miúdo.....	41
Tabela 5: Métodos de caracterização do agregado graúdo de escória de alto forno .....	41
Tabela 6: Programa do ensaio de resistência à compressão axial nos corpos-de-prova .....	44
Tabela 7: Ensaio de granulometria do agregado miúdo. ....	45
Tabela 8: Resultados da caracterização física do agregado miúdo. ....	47
Tabela 9: Ensaio de granulometria do agregado graúdo.....	48
Tabela 10: Resultados da caracterização física do agregado graúdo de escória de alto forno. ....	50
Tabela 11: Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias de idades. ....	52

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de escória de alto forno a carvão vegetal empregada como agregado graúdo em concretos com resistência à compressão de 20 MPa, fabricados por uma empresa de serviços de concretagem no município de Marabá, Pará. Realizou-se a caracterização física dos agregados (areia e escória), sendo que os mesmos estavam em conformidade com as normas da ABNT referentes aos parâmetros investigados nesta pesquisa, com exceção da granulometria e teor de material pulverulento da escória. Moldou-se 30 corpos-de-prova de concreto para a realização dos ensaios de compressão axial, absorção de água, O concretos atingiu aos 28 dias de idade resistência à compressão de 20,81 MPa, parâmetros importante e favorável para um ótimo desempenho e durabilidade. Apesar de algumas divergências em relação às normas da ABNT, a escória apresentou potencial de reciclagem para utilização como agregado graúdo na confecção de concretos.

**PALAVRAS-CHAVE:** concreto, escória de alto forno e resistência à compressão.

## **ABSTRACT**

This study presents an investigation on the use of blast furnace slag used as coarse aggregate in concrete with compressive strength of 20 MPa, manufactured by a company of concreting services in the city of Marabá, Pará. Physical characterization was performed on aggregates (sand and slag), and it was observed that they were in compliance with the standards' rules, with regards to the parameters investigated in this study, with the exception of particle size and content of pulverulent material of the slag. It was shaped up to 30 test specimens of concrete for testing of axial compression. The concrete reached at 28 days of age a compressive strength of 20, 81 MPa, favorable and important parameter for optimum performance and durability. Despite of some differences regarding to the standards, slag recycling has potential for the use as coarse aggregate to produce concrete.

**KEY WORDS:** concrete, blast furnace slag and compressive strength.

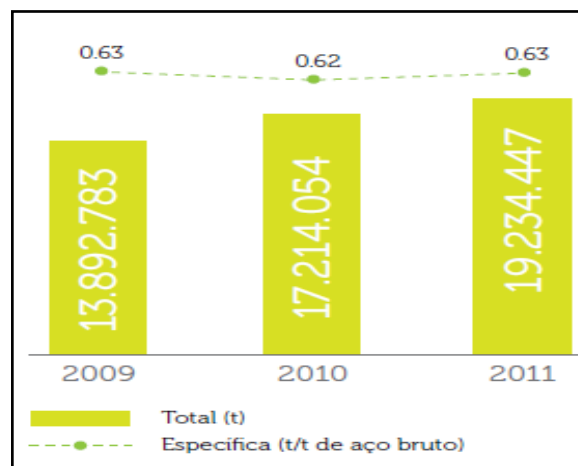
## 1. INTRODUÇÃO

A escória de alto forno é um subproduto do processo siderúrgico, classificada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, como resíduo da classe II, ou seja, substância quimicamente ativa, cuja disposição inadequada, em grande escala e ao longo dos anos, pode ocasionar impactos ambientais, uma vez que podem ser encontrados teores de metais pesados e outros contaminantes em proporções superiores às prescritas em normas (JUNIOR, 2009).

A produção dos resíduos sólidos é um dos grandes desafios relacionados à questão ambiental para as empresas siderúrgicas devido à diversidade e a grande quantidade do volume de resíduos gerados, sendo que estes são fontes de poluição do solo, ar e água caso não sejam reciclados ou estocados de maneira adequada (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011).

Conforme o Relatório de Sustentabilidade de 2012 do Instituto Aço Brasil, em 2011, as empresas associadas à instituição geraram um total de 19,2 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos, como mostra a Figura 1, cerca de 60% dos coprodutos produzidos são escórias, atualmente denominadas agregados siderúrgicos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2012).

Figura 1: Geração de coprodutos e resíduos nos anos por empresas siderúrgicas associadas ao instituto nos anos de 2009 a 2011. Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2012).



A construção civil é um dos setores industriais que se destaca na capacidade de aproveitar volumes significativos de resíduos, tais como os siderúrgicos, uma vez que essa indústria consome uma elevada quantidade de insumos e de matérias-primas, a produção de concretos e cimentos é um dos segmentos com potencialidade para reutilização de subprodutos industriais (JOHN, 2003).

Atualmente, o concreto é um dos materiais de construção de maior consumo pelo homem, constituído, em média, por 70% de agregados, sendo relevante a produção dessa matéria prima para a sociedade por estar diretamente associada à qualidade de vida da população tais como: construção de moradias, saneamento básico, pavimentação e construção de rodovias, vias públicas, ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos e etc. (JOHN, 2003; CETEM, 2009).

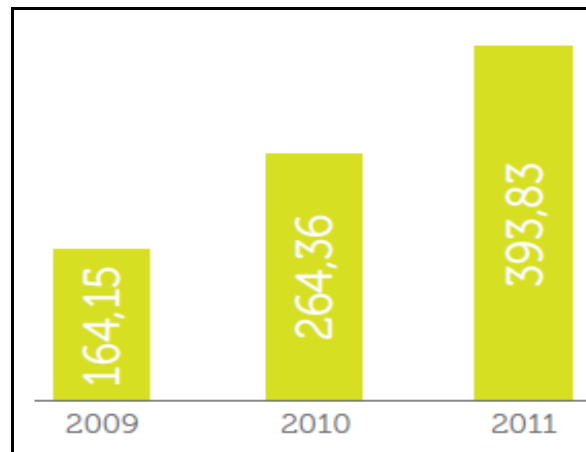
Estudos publicados por diversos pesquisadores de instituições nacionais e internacionais afirmam que é possível substituir, parcial ou integralmente, os agregados naturais (areia e brita), materiais constituintes de concretos, por resíduos industriais como escórias siderúrgicas, resíduos recicláveis de construção e demolição (RCD) ou por agregados artificiais, como argila expandida ou vermiculita (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Instituto Aço Brasil (2012), no nosso país o principal destino dos inúmeros agregados siderúrgicos é para indústria cimenteira. O uso desses coprodutos nesse setor traz benefícios ambientais significativos, como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> por meio da substituição do clínquer. Entretanto, novas alternativas de reutilização das escórias devem ser adotadas e uma das opções é sua utilização como agregado graúdo para concretos, já que em certas regiões brasileiras a indústria cimenteira não está presente ou se encontra distante das fontes geradoras de escórias.

JOHN (2003) afirma que a reciclagem reduz custos de gerenciamento de resíduos como também proporcionar novas oportunidades de negócios para as empresas geradoras. Em 2011, por exemplo, as empresas associadas ao Instituto Aço Brasil obtiveram uma receita de aproximadamente R\$ 393,8 milhões com a

comercialização dos seus coprodutos e ao decorrer dos anos esse faturamento aumentou, expressivamente, (49% no último período), como demonstra a Figura 2 (Instituto Aço Brasil, 2012).

Figura 2: Receita com venda de coprodutos (R\$ milhões) <sup>1</sup>. Fonte: Instituto Aço Brasil (2012).



O presente trabalho irá apresentar um estudo sobre a aplicação de escória de alto forno bruta e britada na confecção de concretos com resistência à compressão de 20 MPa. O rejeito foi empregado como agregado graúdo em substituição da brita, o mesmo é proveniente da produção de ferro gusa em alto forno a carvão vegetal da siderúrgica SIDEPAR (Siderúrgica do Pará).

O concreto foi produzido por uma empresa de serviços de concretagem localizada no município de Marabá, no estado do Pará, conforme a solicitação da SIDEPAR, situada também nessa região, que reutiliza o seu próprio rejeito na produção de concretos com 20, 25 e 30 MPa, cuja finalidade é utilizá-los em algumas de suas obras civis nas instalações da empresa.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 *Objetivo geral*

A pesquisa tem como objetivo principal estudar o desempenho de concretos fabricados com escória de alto-forno (agregado graúdo) com resistência à

compressão de 20 MPa, produzido por uma empresa de serviço de concretagem no município de Marabá, Pará.

## *2.2 Objetivos específicos*

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser resumidos nos itens a seguir:

- Análise das características físicas dos agregados utilizados na produção dos concretos;
- Exame da trabalhabilidade do concreto;
- Avaliação da resistência à compressão axial do concreto;
- Verificação da aplicação dos concretos produzidos com escória de alto forno como material para construção civil;
- Identificação da situação atual das pesquisas na área de aproveitamento de escória de alto forno como agregado em concretos.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### 3.1 Concreto de cimento Portland

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, isso se deve ao fato de seus componentes serem produzidos a partir do emprego de matérias primas locais assim como pelo fato da versatilidade de aplicações do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

A norma NR 12655: 2006 define concreto de cimento Portland, como um material composto pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e água, com ou sem a adição de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).

### 3.1.1 Cimento Portland

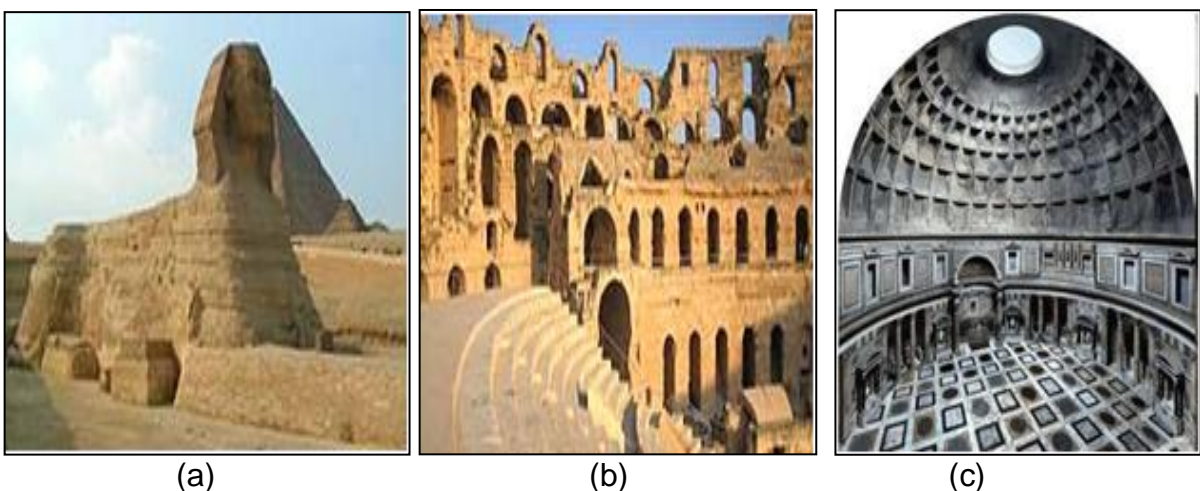
Cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela pulverização de clínquer que se apresenta como um pó fino de cor cinza com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes. É denominado mundialmente como cimento e endurece com a ação da água (hidratação), dando origem a uma matriz firme e resistente (BAUER,2008; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Denomina-se esse material como cimento Portland devido à semelhança da cor do cimento hidratado com um calcário conhecido como pedra Portland, extraído em Dorset, na Inglaterra (BAUER,2008).

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 (BATTAGIN, 2012).

Os imponentes monumentos do Egito antigo, Figura 3 (a), já utilizavam um aglomerante constituído por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o e o Coliseu e Panteão, Figura 3 (b) e Figura 3 (c), respectivamente, 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 (BATTAGIN,2012).

Figura 3: (a) Monumentos egípcios (b) Coliseu (c) Panteão. Fonte: BATTAGIN, 2012.





CHIAVERINI (1986), afirma que o cimento pode ser utilizado em:

- Pasta: mistura de cimento com determinada quantidade de água, adquirindo com o tempo resistência moderada;
- Argamassa: material que consiste na mistura de cimento, água e agregado miúdo, geralmente, a areia;
- Concreto: formado pela mistura de cimento, água, agregado graúdo, agregado miúdo e eventualmente, aditivos químicos e adições minerais.

O cimento Portland é atualmente produzido em instalações industriais de grande porte, localizadas junto às jazidas que se encontram em situação favorável quanto ao transporte do produto acabado aos centros consumidores (BAUER, 2008).

O clínquer, principal componente do cimento, é produzido em um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. As matérias primas principais na produção do clínquer são, o calcário e a argila. Primeiramente, a rocha calcária é britada e moída, em seguida, é misturada, em proporções adequadas, com argila finamente pulverizada. A mistura formada é transferida para o forno onde são submetidas à ação do calor, até a temperatura de fusão incipiente, transformando-se em um novo material (clínquer) que se apresenta sob a forma de pelotas sendo resfriado, bruscamente, na saída do forno e, posteriormente, finamente moído, tornando-se em pó (ABCP, 2002; BAUER, 2008).

As adições são outras matérias primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis, atualmente, no mercado, essas outras matérias são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os carbonáticos (ABCP, 2002).

O gesso ou a gipsita tem como finalidade controlar o tempo de pega do clínquer quando misturado com água, se o mesmo não fosse adicionado ao material,

o cimento, quando hidratado em água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras (ABCP,2002;CHIAVERINI,1986).

As escórias de alto forno possuem a característica de reagir em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer, quando adicionada à moagem do clínquer com gesso, em proporções convenientes, obtém como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como a durabilidade e a resistência (ABCP, 2002).

Os materiais pozolânicos quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, quando estão em presença de água conjuntamente com o clínquer o qual libera hidróxido de cálcio (cal) reagindo com a pozolana, tornando os concretos e argamassas menos permeáveis (ABCP, 2002).

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário, tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis (ABCP, 2002).

Os constituintes essenciais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que representam 95 a 96% do total da análise dos óxidos presentes. Além desses compostos, são encontrados no cimento, em pequenas proporções, magnésia (MgO) , anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e outras substâncias de menor importância. Os dois últimos óxidos citados são conhecidos como álcalis do cimento, são considerados importantes no estudo do concreto por serem responsáveis por reações álcalis/agregado, quando em contato com alguns tipos de agregados, resultam em produtos expansivos (BAUER,2008)

Segundo a ABCP (2002), existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente, em função de sua composição. Os principais

tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil estão listados conforme a tabela 1.

Tabela 1: Nomenclatura dos cimentos Portland. Fonte: ABCP, 2002

NOME TÉCNICO		SIGLA	CLASSE	IDENTIFICAÇÃO DO TIPO E CLASSE
Cimento Portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland Comum	CP I	25	CPI-25
			32	CPI-32
	40		CPI-40	
	Cimento Portland comum com adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento Portland composto (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
	Cimento Portland composto com fíler	CP II-F	25	CP II-F-25
			32	CP II-F-32
			40	CP II-F-40
Cimento Portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
Cimento Portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP IV-32
Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento Portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS etc.
			32	
			40	
Cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC e etc.
			32	
			40	
Cimento Portland Branco (NBR 12989)	Cimento Portland branco estrutural	CP B	25	CPB-25
			32	CPB-32
	40		CPB-40	
	Cimento Portland branco não estrutural	CP B	-	CPB
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CP P	G	CPP - classe G

O primeiro cimento Portland lançado no mercado brasileiro foi o conhecido CP, correspondendo atualmente ao CP I, um tipo de cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso. Atualmente, os cimentos Portland compostos são os mais encontrados no mercado, correspondendo por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira e são utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo CP (ABCP, 2002).

O elevado consumo de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou, mundialmente, a busca de medidas para diminuição do consumo e 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 (BAUER,2008).

A adição de escória e materiais pozolânicos em cimentos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto. Outras propriedades são também alteradas, incluindo a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência à compressão em idades avançadas, a trabalhabilidade e outros (ABCP, 2002; BAUER,2008).

Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) tem a capacidade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação, isso se deve a utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP, 2002).

Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles resistentes aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos (ABCP, 2002; METHA e MONTEIRO,1994)

Cimento Portland composto com filer (CP II-F) tem necessariamente mais que 5% de filer calcário e não contém escória ou pozolana pode ser considerado

resistente a sulfatos, devendo ser submetido a ensaios específicos de determinação da resistência aos sulfatos antes de uma decisão sobre sua utilização em meios agressivos sulfatados (ABCP, 2002)

O cimento Portland branco é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração, a cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente, com relação ao resfriamento e à moagem do produto (ABCP, 2002).

O cimento Portland branco estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, possuindo as classes de resistência 25, 32 e 40 enquanto que o cimento portland branco não estrutural não tem indicação de classe e é aplicado, por exemplo, no rejuntamento de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, isto é, em aplicações não estruturais (ABCP, 2002).

Cimento para poços petrolíferos tem como composição somente o clínquer e o gesso para retardar o tempo de pega no processo de cimentação dos poços petrolíferos cuja finalidade é garantir que o cimento conserve as propriedades reológicas (plasticidade) necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas em grandes profundidades durante a aplicação (ABCP, 2002).

### 3.1.2 Agregados

BAUER (2008) define agregado como um material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos.

O termo “agregados para a construção civil” é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria prima mineral bruta ou beneficiada de uso imediato na indústria da construção civil (IBRAM, 2011).

Segundo a NBR 7211:2009, os agregados para concretos são classificados quanto à sua origem, massa específica e dimensão dos grãos. Quanto à origem os agregados classificam em naturais e artificiais. São chamados de agregados naturais àqueles encontrados na natureza já preparados para o uso sem outro tipo de beneficiamento que não seja a lavagem ou seleção, sendo provenientes das rochas existentes na crosta terrestre que estão sujeitas a processos de intemperismo (areia de rio, areia de cava ou pedregulho).

Enquanto que os agregados artificiais são aqueles derivados de processos industriais, incluindo a britagem, a partir de matérias-primas naturais (argila expandida, concreto reciclado de demolições, escórias de alto forno e aciaria).

Os agregados são classificados quanto à dimensão dos grãos, em gráudo e miúdo, sendo o agregado gráudo aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a norma NM 248:2003. Já os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150  $\mu$ m, em ensaio realizado de acordo com a norma NM 248:2003.

E finalmente, quanto à massa específica, a norma classifica os agregados em leves cuja massa específica é menor que 200  $\text{Kg/m}^3$  (argila expandida, vermiculita), normais com massa entre 2000 e 3000  $\text{kg/m}^3$  (areias naturais de cava ou praia, pedregulho, rochas britadas) e pesados com valores acima de 300  $\text{Kg/m}^3$  (barita, magnetita, hematita).

De acordo com NEVILLE (1997), citado por ALMEIDA (2009), o emprego de agregados traz vários benefícios ao concreto tais como maior estabilidade dimensional, menor retração da pasta, aumento da durabilidade, redução da quantidade de cimento e maior resistência ao desgaste superficial.

Os agregados são tradicionalmente tratados como materiais de enchimento dentro do concreto, pelo fato de não apresentarem reações químicas complexas quando entram em contato com a água, sendo considerados inertes. Porém, esse tratamento secundário dado aos agregados se mostrou errôneo diante de descobertas acerca da influência que os agregados exercem na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

### 3.1.3 Aditivos químicos

O emprego de aditivos em concretos e argamassas é tão antigo quanto o próprio cimento ou de outros aglomerantes hidráulicos. Os romanos adicionavam clara de ovo, sangue, banha ou leite aos concretos e argamassas rudimentares utilizados em suas construções para melhorar a trabalhabilidade das misturas (ABCP, 2002).

No início dos anos 60 no Japão e na Alemanha foram introduzidos comercialmente os aditivos base de melamina e naftaleno, desde então têm sido utilizados em grande quantidade pela indústria do concreto (MALHOTRA, 1989).

A norma NBR 12655:2006 define aditivos como material adicionado durante o processo de mistura do concreto em pequenas quantidades (geralmente inferior a 5%) proporcional à massa de cimento para modificar as propriedades do concreto fresco ou endurecido, adequando o a determinadas condições.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que o emprego de aditivos na produção de concretos, pastas e argamassas cresceu, expressivamente, em escala mundial, e cerca de 70 a 80% de todo o concreto produzido contenham ou mais aditivos.

Segundo a ABESC (2007), os principais aditivos utilizados, no Brasil, na produção de concretos são: os incorporadores de ar, plastificantes e seus derivados

(plastificantes aceleradores e retardadores) e os superplastificantes. A Tabela 2 cita os principais aditivos relacionando-os aos seus efeitos e vantagens.

Tabela 2: Principais aditivos químicos usados em concretos, no Brasil. Fonte: Manual de concreto dosado em central, ABESC (2007).

TIPOS	EFEITOS	Vantagens
Plastificantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumenta o índice de consistência;</li> <li>- Possibilita redução de no mínimo 6% de água de amassamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Maior trabalhabilidade para determinada resistência;</li> <li>- Maior resistência para determinada trabalhabilidade;</li> <li>- Menor consumo de cimento para determinada trabalhabilidade e resistência.</li> </ul>
Retardadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumenta o tempo de início de pega.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantêm trabalhabilidade a temperaturas elevadas;</li> <li>- Retarda a elevação do calor de hidratação;</li> <li>- Amplia os tempos de aplicação.</li> </ul>
Aceleradores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pega rápida;</li> <li>- Aumento da resistência à compressão inicial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concreto projetado;</li> <li>- Ganho de resistência em baixas temperaturas;</li> <li>- Redução do tempo de desforma;</li> <li>- Reparos.</li> </ul>
Plastificantes e aceleradores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efeito combinado dos aditivos plastificantes e aceleradores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduz a água e permite ganho mais rápido de resistência</li> </ul>
Plastificantes e retardadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efeito combinado dos aditivos plastificantes e retardadores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Em climas quentes diminui a perda de consistência.</li> </ul>
Incorporadores de ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorpora pequenas bolhas de ar no concreto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumenta a durabilidade ao congelamento do concreto sem elevar o consumo de cimento e o conseqüente aumento do calor de hidratação;</li> <li>- Reduz o teor de água e a permeabilidade do concreto;</li> <li>- Bom desempenho em concretos de baixo consumo de cimento.</li> </ul>
Superplastificantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado aumento de índice de consistência</li> <li>- possibilita redução de, no mínimo 12%, de água de amassamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É eficiente como redutor de água e na execução de concretos fluidos (auto adensáveis).</li> </ul>



Os aditivos incorporadores de ar consistem na introdução de microbolhas de ar, melhorando a trabalhabilidade do concreto, aumentando a durabilidade, tornando o material mais resistente à ação do gelo e degelo, bem como à ação de elementos agressivos. Diminuem a permeabilidade e a segregação, deixando o concreto mais coeso e homogêneo. Esses incorporadores agem como um fluido e substituem uma parte da água e da areia fina (1 ou 2 mm), são inertes e facilitam o lançamento do concreto (ABESC,2007; BAUER, 2008; CHIAVERINI, 1986)

Enquanto que os plastificantes reduzem a quantidade necessária de água e melhoram a trabalhabilidade da mistura, facilitando o seu acabamento e adensamento. Além disso, melhoram as condições de transporte até a obra, pois reduzem a perda da consistência ao longo do tempo (ABESC, 2007).

Os plastificantes retardadores e aceleradores englobam as características de um plastificante mais as características individuais. Os retardadores têm por finalidade “retardar o tempo de pega” do cimento, ou seja, prolongam o período que transcorre desde a colocação da água até o princípio das reações químicas do cimento, são bastante utilizados em concretagem de grande volume, obtendo-se uma resistência homogênea em todas as seções. Enquanto que os aceleradores “aceleram o tempo de pega” (ABESC, 2007; CHIAVERINI,1986).

Os aditivos superplastificantes surgiram a partir da década de 70, contribuindo para o avanço na tecnologia do concreto, possibilitando a dosagem de concretos com resistências elevadas e alto desempenho (CAD). Esses aditivos permitem elaborar concretos com baixíssimo teor de água, alta resistência e fluidez, reduzindo a quantidade de cimento na produção de concretos sem alterar a consistência da mistura. (ABESC, 2007; CHIAVERINI, 1986).

#### 3.1.4 Água de amassamento

A norma NBR 15900 prescreve que a água utilizada na produção de concretos e argamassas não deve conter substâncias que alterem as propriedades

químicas e físicas desses materiais, como a hidratação do cimento, resistência, ou alteração na pega.

No concreto, o papel da água deve ser visto sob uma perspectiva apropriada, porque, como um ingrediente necessário para as reações de hidratação do cimento e como um agente que dá plasticidade aos componentes das misturas do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A qualidade da água de amassamento utilizada é de fundamental importância para a produção de concretos de adequado desempenho, pois a presença de impurezas pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto, por causar manchamentos na superfície deste material ou até mesmo provocar corrosão das armaduras. Dessa forma, a água de amassamento não deve conter matéria orgânica indesejável nem substâncias inorgânicas em teores excessivos (BAUER, 2008).

### 3.2 Propriedades do concreto endurecido

CHIAVERINI (1986), afirma que as propriedades básicas do concreto é a resistência mecânica e a “impermeabilidade”. O autor também menciona que nessas propriedades, a pasta exerce um papel fundamental, pois se a mesma for de alta resistência, o concreto apresentará elevada resistência; se ela for impermeável, o concreto também será igualmente impermeável, sendo assim, a qualidade da massa é essencial.

#### 3.2.1 Resistência mecânica

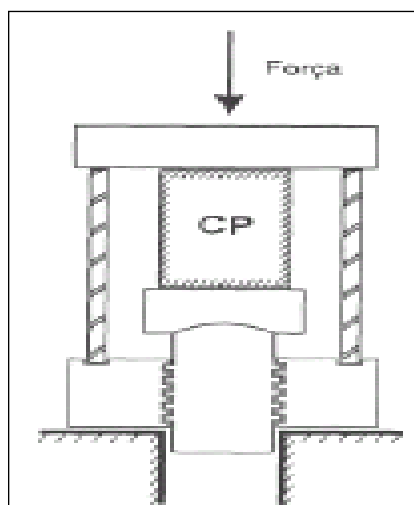
MEHTA e MONTEIRO (1994) ressaltam que a resistência à compressão é considerada umas das características mais relevantes, pois várias propriedades do concreto estão relacionadas com esse parâmetro. Em projetos de estruturas de concreto, por exemplo, o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência.

SILVA (2006) também afirma que a resistência à compressão é a mais importante dentre as propriedades mecânicas do concreto por se tratar da propriedade que mais reflete o seu comportamento mecânico.

ALMEIDA (2009), citando LEONHARDT (1977), menciona que a resistência à compressão é usualmente determinada por meio de solicitação monoaxial, Fig. 4, em um ensaio de curta duração, sendo o resultado influenciado pelo tamanho e pela forma dos corpos de prova. Os dois tipos de corpos de prova mais utilizados são:

- Cilindros padronizados, empregados no Brasil, França, Estados Unidos e Canadá.
- Prismático, utilizados na Alemanha, Inglaterra e outros países.

Figura 4: Ensaio de compressão axial. Fonte: ALMEIDA (2009).



### 3.2.2 Impermeabilidade

O concreto é um material poroso, a origem dos poros é diversa podendo ser ocasionada pelo excesso de água durante a fase da mistura, diminuição de volume absoluto que acompanha a hidratação dos constituintes do cimento, ar incorporado durante a mistura, fissuras e etc. A essas causas inerentes podem ser somadas as consequências da má elaboração e dosagem do material, responsável pelo

aparecimento de vazios de maior dimensão, como esses são interligados, o concreto é normalmente permeável a líquidos e gases (BAUER,2008).

A penetração dos agentes químicos depende do diâmetro dos poros nos concretos, distribuição e continuidade entre eles. Essa entrada de substâncias agressivas é conduzida pela taxa de penetração de água, como meio de transporte, que se dá principalmente por mecanismos de absorção capilar podendo ainda ocorrer migração iônica no caso da penetração de cloretos (SATO, 2000).

Permeabilidade é um método bastante utilizado na avaliação da durabilidade de estruturas, o ensaio consiste em avaliar o fluxo de um líquido sob pressão em materiais saturados e determina a vulnerabilidade do concreto a penetração de agentes externos (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Segundo SATO (2000), o ensaio de absorção se mostra mais interessante, em muitos casos, no estudo da durabilidade de concretos do que a determinação da permeabilidade propriamente dita, uma vez que permite a avaliação da porosidade capilar da superfície do concreto, caminho preferencial da penetração de gases e líquidos.

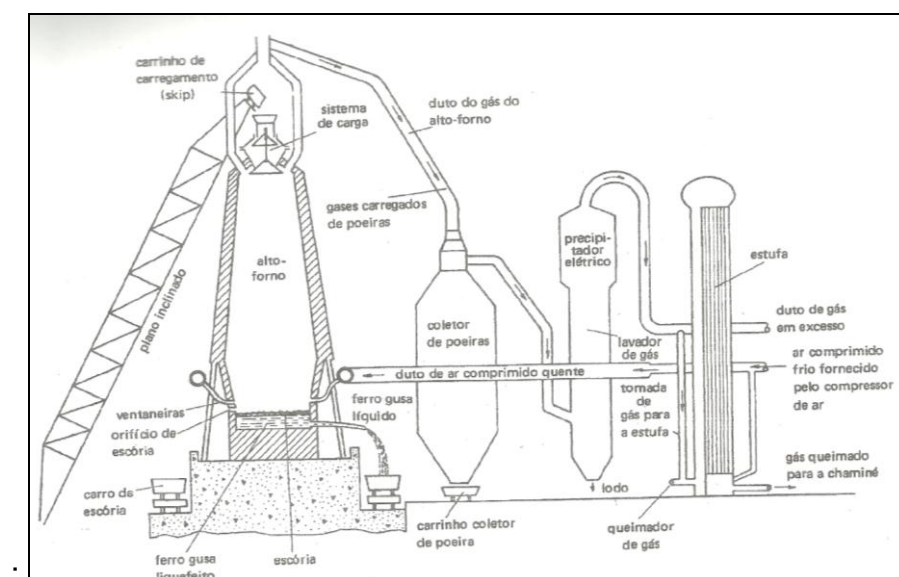
O ensaio de absorção também permite a obtenção de resultados em um curto período de tempo, não exigindo equipamentos complexos, sendo um importante indicativo da durabilidade superficial do concreto, uma vez que a velocidade de penetração da água por capilaridade é mais elevada do que no ensaio de permeabilidade (SATO, 2000).

### 3.3 Escória de alto forno

A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico não metálico, proveniente, sobretudo do processo de produção do ferro gusa, contendo principalmente silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos, é obtida pela combinação da canga (impurezas) dos minérios dos metais com fundentes apropriados e cinzas do carvão utilizado (ALMEIDA, 2009; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A produção de ferro gusa é realizada, geralmente, em altos fornos, Figura 5, os quais alcançam temperatura de até 1500 °C, neles são introduzidos o minério de ferro, o combustível (carvão mineral ou vegetal) e os fundentes. À medida que as reações se processam, esses materiais vão descendo até atingir a parte inferior do forno, chegando sob forma de gusa e escória líquidos, a separação dos dois materiais se dá pela diferença de suas densidades (ALMEIDA; 2009).

Figura 5: Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo os equipamentos auxiliares principais. Fonte: CHIAVERINI (1986).



A principal função do fundente é combinar-se com as impurezas (ganga) do minério e com as cinzas do carvão, formando as escórias de alto forno. O calcário, de fórmula  $\text{CaCO}_3$  é o mais utilizado na produção de gusa (SILVA, 2006).

Geralmente, a escória de alto-forno é encontrada próxima às indústrias siderúrgicas, formando "montanhas" de material, que é deixado ao ambiente em contato direto de intempéries, e no decorrer dos anos a escória se expande (BRANCO 2004).

SILVA (2006) cita que os principais constituintes da escória são: óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), estes representam 95% da composição desse material; os óxidos de

manganês e ferro também fazem parte da composição, sendo elementos secundários.

A composição química e o método de resfriamento empregado influenciam diretamente nas características físicas da escória como a densidade, a porosidade e o tamanho da partícula (SILVA, 2006).

LIDUÁRIO et al (2004) ressaltam que a composição química da escória está relacionada à qualidade do minério de ferro, à natureza do fundente, ao tipo de combustível (coque ou carvão vegetal), ativador da redução e à viscosidade.

A escória de alto-forno é o coproduto com maior volume de geração, na faixa de 210 a 310 kg por tonelada de ferro gusa produzido, devido ao elevado volume gerado, é de suma importância seu reaproveitamento (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

### 3.3.1 Classificação das escórias de alto forno

ALMEIDA (2009) classifica as escórias de alto forno de acordo com a forma de resfriamento em:

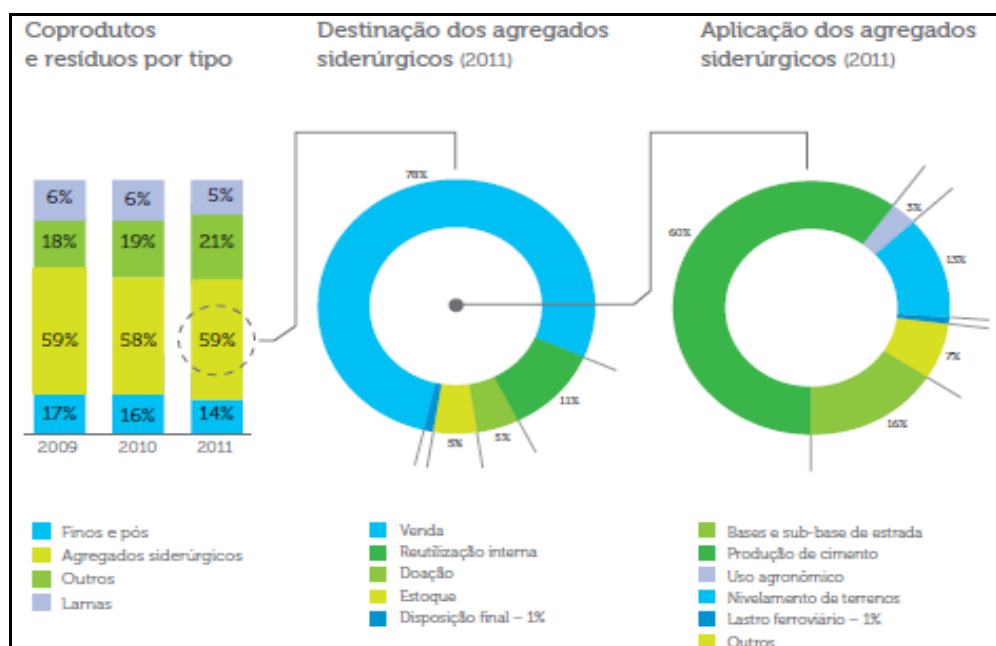
- Escória de alto forno resfriada ao ar ou bruta: é resfriada lentamente num poço ao ar livre, ocorrendo à cristalização do material, podendo ser reaproveitada depois de britada e classificada como agregado graúdo em concretos, base para pavimentação, lastro de via férrea e cobertura de solo, funcionando, também, como adubo para melhorar as condições de solo.

- Escória de alto forno granulada: é formada pelo resfriamento rápido da escória líquida numa estrutura química vitrificada, utilizando jatos de água em alta pressão lançados diretamente na saída da escória fundida, nesse processo não ocorre à cristalização do material, possibilitando o seu uso na produção de cimentos ou como agregado miúdo em concretos.

- Escória de alto forno expandida: obtida pelo rápido vazamento da escória fundida em poços de paredes inclinadas, molhadas no fundo, que permite que o vapor penetre na escória quando líquida. Conforme BAUER (2008), a escória expandida poderá ser utilizada como agregado graúdo e miúdo no preparo de concretos leves em peças isolantes térmicas e acústicas, e também em concretos estruturais, com resistência aos 28 dias da ordem de 8-20 MPa.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2012 do Instituto Aço Brasil, em 2011, dos coprodutos e resíduos gerados 59% são agregados siderúrgicos (escórias), desse percentual 70% são comercializados, principalmente para as empresas cimenteiras (60%) e para construtoras de bases e sub-bases de estradas (16%), como também para uso agrônômico (3%), nivelamento de terrenos (13%), lastro ferroviário (1%) e outros (7%). Assim, as escórias, tratadas pelo setor siderúrgico de agregado, são utilizadas em diversos segmentos, principalmente relacionados à construção civil, como se pode observar na Figura 6.

Figura 6: Geração de resíduos siderúrgicos e reaproveitamento. Fonte: Instituto Aço Brasil (2012).



### 3.3.2 Reaproveitamento das escórias siderúrgicas na construção civil

As oportunidades de utilização das escórias siderúrgicas, na construção civil, segundo POLISSENI (2005) são:

- na produção cimento Portland;
- em obras e lastros rodoviários;
- em concretos e argamassas como substituição ou adição ao cimento;
- como agregados em concretos.

#### 3.3.2.1 Utilização da escória produção de cimento Portland

O conhecimento do poder aglomerante da escória de alto forno vem desde meados do século XIX (1865), quando na Alemanha, produziu-se o primeiro aglomerante hidráulico de escória ativada por cal. O subproduto precisa ser moído para funcionar como aglomerante e receber adição de substâncias ativadoras, dentre as quais a cal hidratada (hidróxido de cálcio), a soda (hidróxido de sódio), a gipsita (sulfato de cálcico dihidratado) e outros (MARQUES e TANGO, 1994).

O primeiro cimento Portland de alto forno fabricado no Brasil foi em 1952, pela Cimento Tupi S.A, em Volta Redonda, normalizado pela NBR 5735 (ABNT, 1980), mas somente em 1977, foi aceito a adição de até 10% de escória no cimento Portland comum através da norma NBR 5732, antiga EB-1, e em 1991 foi normalizado o cimento Portland de alto-forno (ALMEIDA,2009).

Hoje, está consagrada, mundialmente, a utilização da escória de alto-forno como adição ou como constituinte principal ao cimento Portland, devido às vantagens proporcionadas como à economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer, baixo custo por se tratar de um resíduo siderúrgico industrial, diminuição da formação de gases, especialmente o CO<sub>2</sub>, este nocivo à atmosfera e pelas propriedades específicas comparadas ao cimento Portland comum (ALMEIDA, 2009).

Os cimentos nacionais comercializados que possuem adição de escória de alto forno são o CP II - E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de



alto forno), o primeiro possui adição de 6 a 34% de escória e o segundo de 35 a 70% (SCHNEIDER, 2005).

JÚNIOR (2009), citando os estudos de OSBORNE (1999), referente à durabilidade e o desempenho de concretos de cimento Portland com escória de alto forno, relata que o uso do resíduo siderúrgico beneficiou as propriedades do concreto tais como a redução do calor de hidratação, aumento da impermeabilidade, maiores resistência à compressão em idades avançadas, diminuição da penetração de íons de cloreto e aumento da resistência ao ataque do sulfato e reação álcali agregados.

Estudos realizados por diversos pesquisadores comprovaram que o concreto de cimento Portland com adição de escória de alto forno pode ser de dez a cem vezes menos permeável do que àqueles fabricados com cimento Portland comum, pois, dificultam a entrada de íons agressivos, colaborando de forma significativa para prevenção da corrosão (JUNIOR, 2009).

A inserção da escória de alto forno na produção de cimento está contribuindo para diminuição do impacto da construção civil e de outras indústrias sobre o meio ambiente, por reduzir o volume de extração de matéria-prima e ao utilizar grandes quantidades de resíduos que seriam descartados (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

### 3.3.2.2 Utilização de escória em obras e lastros rodoviários

A principal opção de reciclagem da escória de aciaria é como camada inferior na construção de estradas ou, em menor escala, como substituto do agregado em mistura asfáltica. Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Japão e Coreia do Sul já estão utilizando o resíduo siderúrgico em sub-bases e pavimentação asfáltica em substituição dos agregados naturais como brita e areia de rio (MACHADO, 2000; POLISSENI, 2005).

De acordo com o CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (2008), as principais aplicações da escória de aciaria no Brasil, após o seu

processamento, são a pavimentação rodoviária, lastro ferroviário, material para enchimento e produção de cimentos. Na União Européia, as aplicações são a pavimentação rodoviária, fabricação de cimentos, fertilizantes e como material construtivo para barragens.

Enquanto na Europa as escórias são largamente empregadas na composição da camada asfáltica, no Brasil são geralmente utilizadas como base ou sub-base rodoviária (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

As escórias de alto forno com estrutura cristalina possuem aplicações semelhantes às da escória de aciaria, com possibilidade de reuso como matéria prima para produção de lastro ferroviário ou como agregado para pavimentação (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

O processamento das escórias é de fundamental importância para sua transformação em coprodutos devendo ser realizados o resfriamento controlado, britagem, separação magnética, classificação granulométrica e estabilização volumétrica, superando, assim, as restrições técnicas estabelecidas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

BRANCO (2004), em sua tese de mestrado estudou a utilização de escória de aciaria, proveniente da Gerdau Cearense S.A., como agregado em misturas asfálticas e as comparou com uma mistura asfáltica com brita de origem granítica. Através dos ensaios realizados (resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração), o autor concluiu que o resíduo tem potencialidade de uso em revestimento asfáltico.

Apesar das limitações existentes, o uso da escória de aciaria como agregado asfáltico, em substituição aos agregados naturais vem crescendo acentualmente, esta mudança promove o aparecimento de novas patologias nos pavimentos e induzem, de maneira crescente, à realização de estudos na área da tecnologia de pavimentos. Entre os fenômenos patológicos mais comuns encontradas em

pavimentos asfálticos, além da expansibilidade do agregado de escória. Destaca-se a formação da tufa (MACHADO, 2000).

### 3.3.2.3 Utilização de escórias na produção de argamassas e concretos como substituição ou adição ao cimento

JUNIOR (2009) em sua tese de mestrado substituiu, parcialmente, os cimentos Portland CPII-F e CPII-Z por escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I (destinada para assentamento de revestimentos cerâmicos em áreas internas) nas porcentagens de 5 a 20%. Realizaram-se dois traços para cada aglomerante e foram avaliados a trabalhabilidade, viscosidade, resistência de aderência e tempo em aberto. Como resultado obteve-se que a substituição aos cimentos Portland nas argamassas, não alterou a viscosidade e a trabalhabilidade do produto final, pelo contrário, foi verificado melhorias em termos de trabalhabilidade na medida em que se aumentou a proporção das adições (até 20%). E todos os traços feitos, exceto aqueles com escória e cal, apresentaram resultados de resistência de aderência à tração e tempo em aberto conforme os requisitos previstos em norma.

LIDUÁRIO et al. (2004), estudaram a utilização de escória de alto forno moída em substituição parcial do cimento em concreto convencional e compactado com rolo, dosados com diferentes teores de escória. Os autores verificaram que, em todas as propriedades analisadas (resistência à compressão, permeabilidade, reatividade potencial e elevação adiabática) os concretos com adição de escória apresentaram melhor desempenho em relação aos de referência.

SCHNEIDER (2005) analisou a penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura, é concluiu que a adição de escória de alto forno, em substituição parcial do cimento Portland, é bastante eficiente na elevação da resistência dos concretos à penetração dos cloretos, e o aumento de seu teor majora essa proteção. Entretanto, em relação à resistência à compressão axial, o efeito da adição de escória foi contrário àquele

da resistência aos cloretos, o autor ressaltou que a substituição de 50% de cimento Portland por escória provocou diminuição da resistência à compressão principalmente nas idades de 3 e 7 dias e o aumento do teor de escória para 70% resultou em redução ainda mais expressiva.

#### 3.3.2.4 Utilização de escória de alto forno como agregados em concretos

Segundo ARRIVABENI et al. (2007), a escória de alto forno tem um grande potencial de utilização como agregado para concreto, apesar da heterogeneidade do subproduto, em sua pesquisa, os autores demonstraram que pode ser viável substituir a brita comum por escória de alto forno cristalizada britada.

A escória pelotizada, que pode ser moída e misturada diretamente na betoneira ou utilizada como agregado leve em concretos, praticamente não é encontrada no mercado brasileiro, enquanto que na Inglaterra e Canadá já se produz e comercializa agregados leves a partir de pelotização da escória líquida (SILVA, 2006, BAUER 2008).

MOURA (2000) afirma que as escórias de alto forno resfriada lentamente podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou britadas para serem utilizadas como agregado graúdo.

AKINMUSURU (1991), citado por ALMEIDA (2009), estudou a viabilidade da escória de aciaria como agregado miúdo e graúdo em concretos, avaliando seu desempenho mecânico e a durabilidade quando comparado a um concreto de referência. A escória utilizada foi exposta ao ambiente por mais de três meses para minimizar futuras reações de hidratação dos óxidos, segundo o autor os resultados investigados nos concretos com escória foram superiores aos de referências.

Ribeiro et al. (2006) também obtiveram bons resultados com a utilização, parcial, de escória de alto como agregado miúdo em concretos convencionais. De acordo com os traços e os ensaios realizados, os pesquisadores concluíram que a

escória atende de forma geral aos requisitos de resistência e de durabilidade no concreto.

## **4. MATERIAIS E METODOLOGIA**

### **4.1.1 Materiais**

#### **4.1.1.1 Aglomerante hidráulico**

O cimento Portland CP IV - 32 RS foi utilizado como aglomerante hidráulico para a produção do concreto com escória de alto forno. Esse cimento é utilizado em obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados, artefatos de cimento. É notadamente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.

#### **4.1.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo (areia), Figura 7, utilizado na produção do concreto foi proveniente do município de Itupiranga, Pará, de origem natural. A Figura mostra a imagem da areia utilizada como agregado miúdo neste trabalho.

Figura 7: Agregado miúdo. Fonte: autora.



#### 4.1.1.3 Agregado graúdo de escória de alto forno

A escória de alto forno, Fig.8, proveniente da empresa SIDEPAR (Siderúrgica do Pará), localizada no município de Marabá, Pará, foi utilizada como agregado graúdo na confecção do concreto. O resíduo já estava sazonado, devido ao contato com intemperes durante meses para evitar possíveis expansões dos seus compostos.

Figura 8: Escória de alto forno. Fonte autora.



#### 4.1.1.4 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado na produção do concreto foi um plastificante retardador de pega e redutor de água.

#### 4.1.1.5 Água

A água utilizada na dosagem dos concretos foi proveniente de águas subterrâneas obtida por meio de um poço artesiano e atende aos critérios da NM NBR 15900:2009 “Água para amassamento do concreto”, sendo potável para consumo humano.

#### 4.1.2 Metodologia

A metodologia consistiu em avaliar o desempenho de concretos com escória de alto forno como agregado graúdo, produzidos em uma central dosadora. Para isso, foram desenvolvidos os seguintes estudos:

- Verificação da dosagem do concreto com escória de alto forno;
- Caracterização física dos materiais utilizados;
- Análise da trabalhabilidade (consistência) do concreto fresco pelo ensaio de Slump Test (Abatimento do Tronco de Cone);
- Avaliação de propriedades mecânicas do concreto endurecido por resistência à compressão axial;
- Verificação da aplicação prática do concreto com escória em estudo em obras civis.

##### 4.1.2.1 Produção e dosagem do concreto

O concreto abordado nesta pesquisa foi produzido por uma empresa de serviço de concretagem, conforme a NBR 7212: 2012 - “Procedimento - Execução de Concreto Dosado em Central”. A central dosadora de concretos efetuava as operações de dosagem e transporte de materiais em um caminhão betoneira, veículo dotado de dispositivo que efetuava a mistura e mantinha homogeneidade do concreto por simples agitação.

O concreto com escória de alto forno foi dosado para apresentar resistência à compressão de 20 MPa e baixa absorção de água aos 28 dias de idade, slump de  $10 \pm 2$  cm (trabalhabilidade do concreto fresco) e fator água/cimento igual a 0,5. A Tabela 3 mostra a dosagem para fabricação de um metro cúbico do concreto estudado.

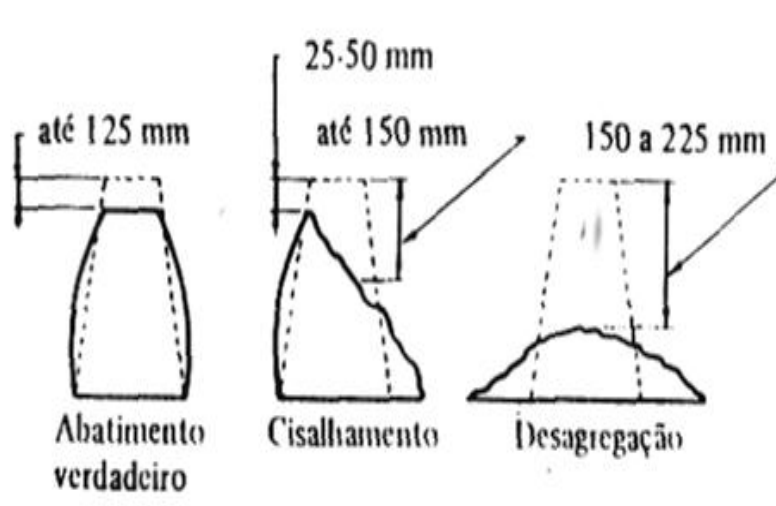
Tabela 3: Dosagem do concreto com escória de alto forno

<b>Cimento CP IV 32-RS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Escória (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Água (l/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Aditivo (l/m<sup>3</sup>)</b>
280	980	780	180	2,1

#### 4.1.2.2 Avaliação do concreto fresco

A avaliação do concreto fresco foi realizada através do estudo da trabalhabilidade, por meio do ensaio de abatimento de cone, conforme a Figura 9, normalizado pela NBR NM 33: 2003 “Concreto - Amostragem de concreto fresco”, que permite avaliar a consistência do material, cuja finalidade é verificar o abatimento e a performance do concreto, garantindo a hidratação e a homogeneização da pasta. Devido à facilidade do ensaio, o mesmo é bastante empregado durante a etapa de dosagem (em laboratórios), como em canteiro de obras.

Figura 9: Avaliação do abatimento de cone. Fonte: VAL, 2007.



O ensaio tem como principal função controlar a uniformidade da produção de concreto de diferentes betonadas, medindo a consistência e as características de fluidez de um concreto.

#### 4.1.2.3 Caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização física dos agregados foram realizados nos laboratórios de “Ensaio de Solos” das empresas CMT Engenharia e Construfox Construções e Incorporações Ltda, ambas localizadas no município de Marabá, estado do Pará. Na Construfox foi efetuado apenas o ensaio de abrasão de “Los



Angeles” e os demais foram realizados na CMT, todos os testes foram efetuados com auxílio de um laboratorista das empresas.

#### 4.1.2.3.1 Agregado miúdo

Conforme as prescrições da NBR NM 26:2009 – “Agregados - Amostragem” e NBR NM 27:2001 - 2001 - “Agregados - redução da amostra de campo para ensaios de laboratório” foram coletadas as amostras para os ensaios de caracterização física do agregado miúdo. De acordo com a Tabela 4, realizou-se a caracterização física do agregado.

Tabela 4: Métodos de caracterização do agregado miúdo.

<b>ENSAIOS REALIZADOS</b>	<b>NORMAS DA ABNT</b>
Dimensão máxima característica	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Massa Específica	NBR NM 52:2009
Massa Unitária	NBR NM 45:2006
Teor de Materiais Pulverulentos	NBR NM 46:2003
Impurezas orgânicas húmicas	NBR NM 49:2001
Absorção	NBR NM 30:2001
Classificação	NBR 7211:2009

#### 4.1.2.3.2 Agregado graúdo

De acordo com as normas NBR NM 26:2009 e NBR NM 27:2001 foram coletadas as amostras para os ensaios de caracterização física do subproduto da produção de ferro gusa. Conforme a Tabela 5 realizou-se a caracterização física do agregado graúdo.

Tabela 5: Métodos de caracterização do agregado graúdo de escória de alto forno

<b>ENSAIOS REALIZADOS</b>	<b>NORMAS DA ABNT</b>
Análise granulométrica	NBR NM 248:2003
Dimensão máxima característica	NBR NM 248:2003
Materiais Pulverulentos	NBR NM 46:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Massa específica	NBR NM 53:2009
Massa unitária	NBR NM 45:2006

Absorção	NBR NM 53:2009
Abrasão “Los Angeles”	NBR NM 51:2001
Classificação	NBR 7211:2009

#### 4.1.2.4 Resistência à compressão axial

Conforme a NBR 7212:2012 – “Procedimento - Execução de concreto dosado em central”, foi coletada uma amostra de concreto para confecção dos corpos-de-prova no intervalo de descarga de 0,15 a 0,85 do volume transportado pelo caminhão betoneira.

De acordo com a norma NBR 5738:2003 – “Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto”, foram moldados 30 corpos-de-prova de forma cilíndrica de (100x200) mm, como mostra a Fig. 10, para a execução dos ensaios de compressão axial.

Figura 10: Confecção dos corpos-de-prova. Fonte: autora.



Após a moldagem, os corpos-de-prova ficaram à temperatura ambiente pelas primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados, identificados e imersos em tanque com água.

Os exemplares permaneceram em tanque com água para cura, Figura 11, conforme a norma NBR 9479:2006 – “Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concretos”, até as idades de 7 (sete), 14 (quatorze) e 28 (vinte e oito) dias para realização dos ensaios de compressão axial.

Figura 11: Corpos-de-prova em cura. Fonte: autora.



O ensaio de resistência à compressão nos corpos-de-prova foi realizado no laboratório de Ensaios Destrutivos, na Faculdade de Engenharia de Materiais, campus de Marabá, conforme a norma NBR 5739:2007 – “Resistência à compressão axial”, com a finalidade avaliar as resistências das amostras nas idades de 7 (sete), 14 (quatorze) 28 (vinte e oito) dias.

Os corpos-de-prova foram ensaiados com baixa umidade, uma vez que corpos-de-prova secos apresentam resistências da ordem de 20 a 25% maiores que aqueles em condição saturada (FURQUIM, 2006). NT tabela, encontra-se o planejamento do experimento para determinação da resistência à compressão axial nos exemplares.

Tabela 6: Programa do ensaio de resistência à compressão axial nos corpos-de-prova

<b>NORMA</b>	<b>IDADE (DIAS)</b>	<b>QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA</b>
Resistência à compressão axial (NBR 5739:2007)	7	4
	14	4
	28	4

Utilizou-se a equação abaixo para calcular a resistência à compressão axial:

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão, em megapascal (MPa).

$F$  = Força máxima, em N (Newton).

$D$  = diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova, em milímetros.

O equipamento utilizado no ensaio de resistência foi uma prensa manual, marca SOLOTEST, com capacidade para 120 toneladas (Figura 12).

Figura 12: Ensaio de compressão. Fonte: autora.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Agregado miúdo

O resultado da distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia natural) está apresentado na Tabela 7.

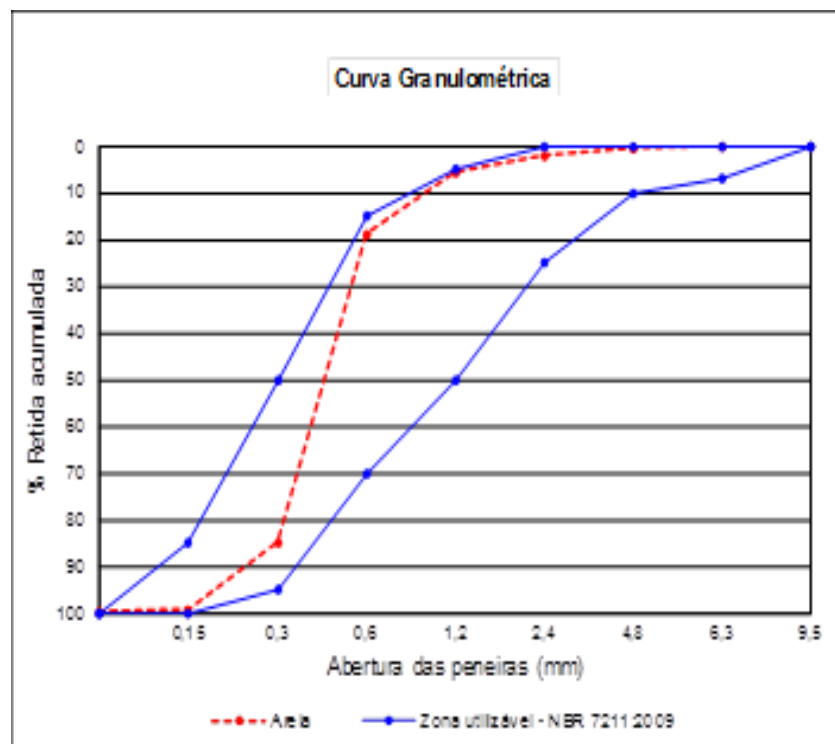
Tabela 7: Ensaio de granulometria do agregado miúdo.

PENEIRA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)			RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA		
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,8	0,0	0,4	0,1	0,1
4,8	1,8	2,8	2,3	0,4	0,5
2,4	8,9	8,5	8,7	1,6	2,1
1,2	19,7	20,4	20,1	3,6	5,7

0,6	70,2	76,7	73,5	13,2	18,9
0,3	364,6	367,6	366,1	65,9	84,8
0,15	79,8	80,5	80,2	14,4	99,2
<b>FUNDO</b>	2,3	2,0	2,2	0,4	99,6

A partir dos dados do ensaio de granulometria do agregado miúdo, foi plotado o gráfico referente à curva granulométrica (Figura 13).

Figura 13: Curva granulométrica do agregado miúdo (areia), de acordo com a norma NBR 7211:2009.



A curva granulométrica do agregado miúdo está situada na zona utilizável definida pela NBR 7211:2009, ou seja, a distribuição granulométrica da areia está de acordo com as exigências estabelecida na norma.

Agregado miúdo se enquadrar na Zona 1 (material muito fino) conforme os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 7211:2009, que relaciona o percentual retido acumulado obtido no ensaio de distribuição granulométrica com diferentes zonas.

Na tabela, encontram-se listados os resultados de caracterização da amostra de areia utilizada nesse estudo.

Tabela 8: Caracterização física do agregado miúdo.

<b>ENSAIOS</b>	<b>NORMA</b>	<b>RESULTADOS</b>
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248:2003	2,4
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003	2,11
Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 53;2009	2794
Massa Unitária (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1510
Teor de Materiais Pulverulentos (%)	NBR NM 46:2003	0,19 %
Impurezas Orgânicas	NBR NM 49:2001	A solução obtida no ensaio foi mais clara do que a solução-padrão
Classificação	ZONA 1 (muito fina)	

O módulo de finura da areia correspondeu a 2,11 podendo ser classificada por esse parâmetro como areia fina, de acordo com a norma NBR 7211:2009. Segundo BAUER (2008), o módulo de finura do agregado miúdo influi na definição da quantidade de água e, portanto, na quantidade de cimento, quanto menor o módulo de finura tanto mais água será necessária e, portanto, mais cimento para manter o fator água/cimento preestabelecidos.

O agregado miúdo estudado apresentou massa específica igual a 2794 Kg/m<sup>3</sup>, sendo classificado pela NBR 7211:2009 como agregado normal e a massa unitária foi de 1510 kg/m<sup>3</sup>. Esse último parâmetro é importante na dosagem de concretos, pois converte traços em peso para volume e vice-versa, bem como para cálculos de consumo de materiais empregados por metro cúbico de concreto.

O teor de materiais pulverulentos, partículas de argilas e siltes, na areia foi de 0,19% valor bem abaixo por aqueles exigidos na norma NBR 7211:2009 a qual

estabelece 3% para os concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para os demais .

O teor de impurezas orgânicas no agregado estudado estava conforme o estabelecido pela norma NM 49:2001, uma vez que solução obtida no ensaio da areia foi mais clara do que a solução padrão. Essas impurezas, geralmente são formadas por partículas de húmus, agem prejudicando a pega e o endurecimento das argamassas e dos concretos.

## 5.2 Agregado graúdo (escória de alto forno)

O resultado da distribuição granulométrica do agregado graúdo, escória de alto forno, está apresentado na Tabela 9.

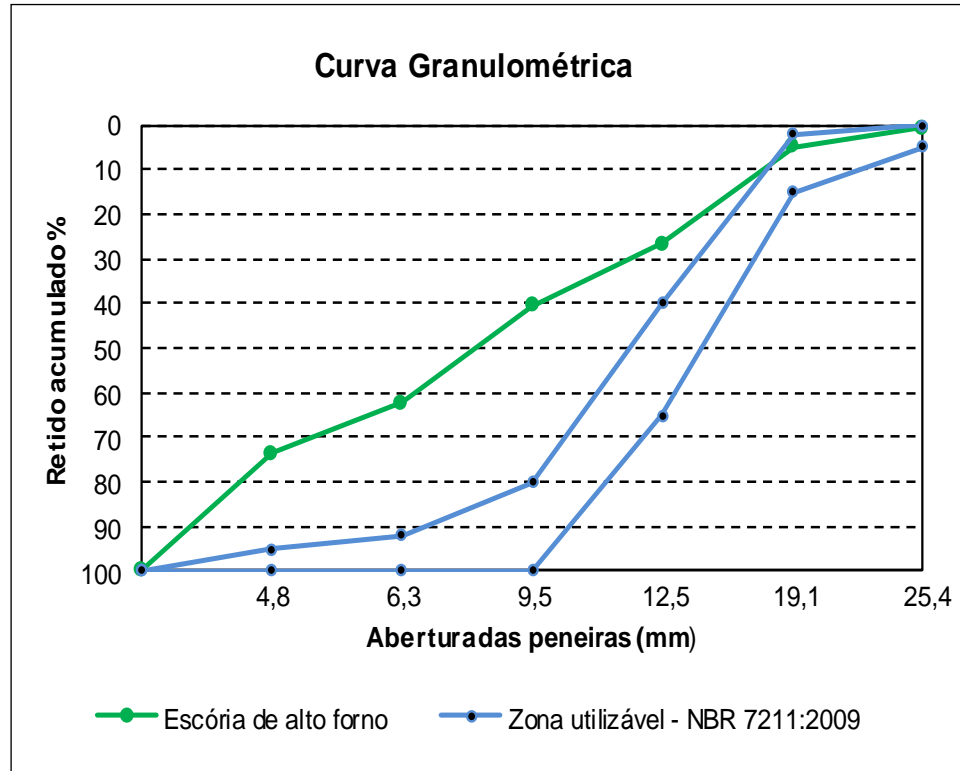
Tabela 9: Ensaio de granulometria do agregado graúdo.

PENEIRA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)			RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA		
25,4	11,8	28,2	20,0	0,8	0,8
19,1	130,8	70,7	100,8	4,2	5,0
12,5	607,8	446,1	527	21,8	26,8
9,5	363,2	307,3	335,3	13,9	40,6
6,3	583,6	461	522,3	21,6	62,2
4,8	292,6	251,7	272,2	11,3	73,5
<b>FUNDO</b>	693,1	585,6	639,4	26,4	99,9

A partir dos dados do ensaio de granulometria do agregado graúdo, foi gerado o gráfico da Figura 1.4

Figura 14: Curva granulométrica do agregado graúdo (escória de alto forno), de acordo com a norma NBR 7211:2009.





A curva granulométrica do agregado graúdo está situada fora da zona utilizável definida pela NBR 7211:2009, ou seja, a distribuição granulométrica da areia não está de acordo com as exigências granulométricas estabelecida na norma. O agregado não se enquadrou em nenhuma graduação prescrita pela norma, isso se deve pela descontinuidade acentuada dos diâmetros dos grãos (tamanho), ficando na intermediação entre as graduações 4,75/12,5 e 9,5/25 que correspondem respectivamente a Brita 0 e Brita 1.

De acordo com BAUER (2008) a distribuição granulométrica é um dos fatores que afeta a trabalhabilidade, por depender dela a quantidade de água necessária à obtenção de água/cimento desejado, e na permeabilidade do concreto.

Agregados que não têm uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

Na tabela, encontram-se listados os resultados de caracterização da amostra de areia utilizada nesse estudo.

Tabela 10: Caracterização física do agregado graúdo (escória de alto forno).

<b>ENSAIOS</b>	<b>NORMA</b>	<b>RESULTADOS</b>
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248:2003	19,1
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003	6,19
Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 53;2009	2200
Massa Unitária (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1204
Absorção (%)	NBR NM 53:2009	3,72
Ensaio de abrasão de “Los Angeles” (%)	NBR NM 51:2001	Índice de desgaste igual a 35,7 % em massa do material inicial
Teor de materiais pulverulentos (%)	NBR NM 46:2003	3,38%
Classificação	-	

Dimensão máxima característica do agregado graúdo (escória de alto forno) foi de 19,1 mm. Essa dimensão é classificada, comercialmente, de acordo com FRANÇA (2004), citado por MAGALHÃES (2007), como Brita 1.

O agregado graúdo estudado apresentou massa específica igual 2200 Kg/m<sup>3</sup>, caracterizando como agregado graúdo normal pela NBR 7211:2009.

A escória de alto forno obteve uma baixa absorção de água que correspondeu a 3,72%, característica importante para produção de concretos com bons desempenhos, já que a resistência desses, não depende somente da resistência mecânica dos agregados, mas também, de sua absorção e de suas características de aderência.

O teor de materiais pulverulentos correspondeu a 3,38% valor bem acima do que é permitido na norma NM NBR 7211:2009, cujo teor máximo é de 1%. Segundo MAGALHÃES (2007), um excesso de partículas finas presentes nos agregados aumenta o consumo de água e de cimento na produção de concretos, aumentando a

retração quando esse é endurecimento, aumentando também o grau de reatividade dos minerais dos agregados com os álcalis do cimento.

O índice de desgaste por abrasão do agregado graúdo (escória de alto forno) foi de 37,5 % em massa do material inicial, portanto, o agregado analisado por esse parâmetro está em conformidade com a norma NBR NM 51:2001 (ensaio de abrasão de “Los Angeles) que exige um índice inferior a 50% em massa do material inicial. Logo, a escória de alto forno é capaz de não se desintegrar quando manuseada por carregamento ou basculamento ou estocagem.

O ensaio de abrasão de “Los Angeles” avalia também de forma indireta a resistência mecânica nos agregados graúdos, pois essa característica está relacionada com a resistência ao desgaste superficial dos grãos de agregados, ou seja, a escória possuía uma resistência mecânica satisfatória para uso em concretos.

### 5.3 Avaliação do concreto fresco

A avaliação do concreto fresco com escória foi realizada de acordo com a norma NBR NM 33: 2003 – “Amostragem de concreto fresco”, é o slump (trabalhabilidade) correspondeu a 12 cm, portanto, o valor está de acordo com a determinação pretendida da dosagem, ou seja, a trabalhabilidade requerida foi alcançada.

### 5.4 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado conforme a norma NBR 5739:2007, em corpos-de-prova cilíndricos de (100x200) mm. O comportamento da resistência à compressão do concreto foi analisado nas idades de 7 (sete), 14 (quatorze) e 28 (vinte e oito) dias, para cada idade foram rompidos 4 (quatro) corpos-de-prova. Os resultados do ensaio de compressão nas amostras estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias de idades.

CONCRETO	RESISTÊNCIA (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
CP 1	15,66	19,35	20,73
CP 2	15,10	19,22	20,62
CP 3	14,9	18,97	20,69
CP 4	15,40	19,48	20,81

Todos os corpos-de-prova de concreto com escória de alto forno ensaiados atingiram aos sete dias de idade mais de 70% da resistência à compressão prevista na dosagem. E aos vinte oito dias as amostras alcançaram resistência mínima estabelecida pela normalização brasileira para utilização em concreto estrutural (20 MPa), a maior resistência foi de 20,81MPa. Logo, a escória de alto forno estudada nesse trabalho tem potencial de ser empregada como agregado graúdo em substituição da brita em concretos convencionais de 20 MPa, uma vez que a resistência é utilizada como parâmetro que indica a qualidade do concreto.

### 5.5 Aplicação prática do concreto com escória de alto forno

Os concretos com escória de alto forno com resistência a compressão de 20 MPa foram empregados, satisfatoriamente, em obras que requeriam resistência à compressão moderada tais como bases para equipamentos, Fig. 15 (a), (b) e (c) pisos, lajes não estruturais e etc., apresentando boa trabalhabilidade como mostra a Fig.(d).

Figura 15: Aplicação do concreto com escória em bases. (a) Bases para equipamentos; (b) detalhe da estrutura da base; (c) Moldagem do concreto. Fonte: autora.



(a)



(b)



(c)

## 5. CONCLUSÕES

A escória de alto forno estudada nesse trabalho apresentou potencialidade de reaproveitamento como agregado graúdo em concretos convencionais de 20 MPa. Isso foi comprovado a partir dos ensaios de resistência à compressão

realizada nos concretos com o subproduto, os quais atingiram valores acima de 20 MPa em idades de 28 dias.

A resistência à compressão dos concretos depende indiretamente da quantidade dos poros presentes nos agregados, uma vez que o concreto é constituído, por aproximadamente 70 % desse material. O resíduo siderúrgico (escória de alto forno), geralmente, é um material não homogêneo e bastante poroso, no entanto, nessa pesquisa, a escória estudada apresentou baixa absorção de água (3,72%), isto é, o subproduto apresentou certa quantidade de poros que não prejudicou a resistência mecânica do concreto. A escória, também apresentou uma boa resistência à abrasão (índice de desgaste igual a 37,5%), indicando que o resíduo era denso e resistente.

O teor de materiais pulverulentos e a distribuição granulométrica da escória não estavam nos padrões estabelecidos em normas, estas características desses parâmetros poderiam ter prejudicando a dosagem e a resistência mecânica dos concretos, no entanto, foi utilizado na produção do concreto um aditivo químico plastificante redutor de água e de pega.

A aplicação de escória de alto forno no Brasil está praticamente limitada na indústria de cimento Portland. A contribuição ambiental deste tipo de reciclagem é significativa. Entretanto, outras tecnologias de reuso desse subproduto podem ser desenvolvidas ampliando as possibilidades de reaproveitamento.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMEIDA. A,J. Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009,74pg. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/>

bitstream/handle/1843/ISMS8BVPZX/disserta\_\_o\_janaina.pdf?sequence=1>iiAcesso em: 5 de Janeiro, 2013.

ARRIVABENI, L. F. Contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para produção de concretos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2000. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 10 de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Manual de concreto dosado em central, 36 pg. São Paulo. 2007.

\_\_\_\_\_. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. Disponível em:<[http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf)> Acesso em: 05 de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007;

\_\_\_\_\_. NBR NM 67 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Método de ensaio Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 7211 – Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 26 – Agregados para concreto – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 27 – Agregados para concreto – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR15900 -1 – Requisito – Água para amassamento do concreto .Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46 – Agregados para concreto – Composição granulométrica. Método de ensaio Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 7218 – Agregados para concreto – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45 – Agregados para concreto – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Método de ensaio. Rio Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 7212 – Concreto – Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 9479 – Concreto e Argamassa – Câmaras úmidas de tanques para cura de corpos-de-prova. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Absorção de água, índices de vazios e massa específica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NBR 12655 – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53 – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30 – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 51 Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova

BATTAGIN ,A. F. Uma breve história do cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>> Acesso em: 08 de Janeiro, 2013.

BAUER, L. A.F. Materiais de construção 1, 5ª edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed., 471p, 2008.

BRANCO, C. F. T. V. Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004, 135 pg. Disponível em: <<http://www.redeasfalto.org>



.br/index2.php?option=com\_docman&task=doc\_view&gid=187>. Acesso em: 08 de Janeiro, 2013

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Gestão de coproduto: estudo prospectivo do setor siderúrgico. Nota Técnica. Brasília, 2008. 28 p. Disponível em:<[http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011\\_4\\_19\\_9\\_59\\_59\\_88597.pdf](http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_9_59_59_88597.pdf)> Acesso em: 14 de Fevereiro de 2013.

CETEM. Almeida, Salvador L.M; Luz, Adão B. Manual de agregados para construção civil. Rio de Janeiro, 2009. 245 pg

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. 2ª ed., McGraw Hill Editora. São Paulo, Brasil, 1986. 388 pg.

FURQUIM, V. R. P. Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006, 208 pg. Disponível em: < [http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/diss\\_paulo\\_ricardo.pdf](http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/diss_paulo_ricardo.pdf)> Acesso em: 16 de Janeiro de 2013.

IBRAM. Informações e análises da economia mineral Brasileira. 6ª Edição. Disponível em:< <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>> Acesso em: 10/01/2013.

INSTITUTO DE AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade de 2012. 2011. 93 pg. Disponível em:<[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio\\_sustentabilidade\\_2012.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf)> Acesso em: 2 de Fevereiro, 2013.

JUNIOR, R.J. Utilização de escória de alto forno como adição em argamassa colante tipo AC-I. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. 99 pg. Disponível em: < <http://www.pipe.ufpr.br/porta/defesas/dissertacao/162.pdf>>. Acesso em: 25 de Janeiro, 2013.

JOHN,V. M. A construção e o meio ambiente. Disponível em: <<http://www.recycle.pcc.usp.br//artigos1.htm>> Acesso em: 12 de Janeiro, 2013.

LIDUÁRIO,A.S; FARIAS, L.A; ALBUQUERQUE, A.C; ANDRADE, M. Utilização da escória de alto forno moída no concreto convencional e compactado ao rolo. Congresso anual da ABM – Internacioanal, 59, 2004, São Paulo.

MACHADO, T.A. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000, pg. Disponível em: <[http://recycled.pcc.usp.br/ftp/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Alexandre%20MachadoP.pdf](http://recycled.pcc.usp.br/ftp/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Alexandre%20MachadoP.pdf)> .Acesso em: 14 de Janeiro, 2013.

MAGALHÃES, G.A. Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007, 238 pg.

MARQUES, C. J; TANGO S. E. C. Escória de alto forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concretos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

METHA, P.K., MONTEIRO, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Pini,1994.

MOURA, W. A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Dissertação (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 207 pg.

POLISSENI, A. E. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 251 pg. Disponível em:<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4497/000501823.pdf?sequenc e=1>> . Acesso em: 08 de Janeiro,2013.

RIBEIRO, C. C, Pinto S. D. J, Starling T. Avaliação da resistência e da durabilidade do concreto composto com escória de alto forno brita zero e aditivos plastificantes. Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC, Florianópolis, Santa Catarina, Julho 2006.

ROSSIGNOLO, A.J. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. São Paulo, Pini,2009.

SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V.; Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2000.

SCHNEIDER, J. A. Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes período de cura. Dissertação de (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.2005.154 pg.

SILVA, A. L. Reciclagem de Escória Cristalizada para a Produção de Argamassas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006. 81 pg Disponível em: < <http://juno.unifei.edu.br/bim/0030717.pdf>>. Acesso em 8 de Janeiro, 2013.

VAL, G. J. Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto submetido a meio quimicamente agressivo. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. 85 pg.