

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO
SIDERÚRGICO NA PERFORMANCE DO
CONCRETO**

Janaína Alves Almeida

Belo Horizonte
2009

Janáina Alves Almeida

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO NA PERFORMANCE DO CONCRETO

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil da Universidade
federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Construção Civil
Linha de Pesquisa: Resíduos
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2009

Almeida, Janaína Alves

A447i Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto
[manuscrito] / Janaína Alves Almeida. – 2009.
xiv, 60f., enc. : il

Orientadora: Carmen Couto Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 58-60.

1. Concreto – Teses. 2. Resíduos – Teses. 3. Construção Civil – Teses. 4. Escória – Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 666.972 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO
SIDERÚRGICO NA PERFORMANCE DO CONCRETO

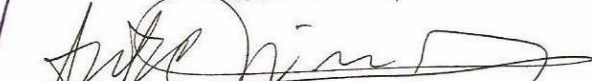
Janaína Alves Almeida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisitos parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

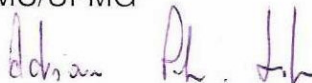
Comissão examinadora:



Prof^a. Dr^a. Carmem Couto Ribeiro
DEMC/UFMG – (orientadora)



Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
DEMC/UFMG



Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
DEMC/UFMG



Prof^a. Mestre Jacqueline Maria Flor
DEES/UFMG

Belo Horizonte, 07 de Agosto de 2009

**“Obstáculos são aquelas coisas
difíceis que você vê quando tira
os olhos do seu objetivo.”**

**Aos meus pais, José Almeida e
Maria de Fátima,
meus irmãos, Josie e Júnior; pois
sem a dedicação de vocês este
sonho não teria se realizado.
Grata pelo carinho, compreensão
e incentivo que sempre me
dedicaram.**

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a participação de muitas pessoas, porém dificilmente eu conseguiria registrar todos que de alguma forma me auxiliaram. No entanto, mencionarei aqueles que estiveram presentes nos momentos de maior necessidade expressando os meus mais sinceros agradecimentos.

À Prof^a. Dr^a. Carmen Couto Ribeiro, por sua dedicação em formar um pesquisador crítico e consciente do papel da academia perante a sociedade, assim como pelo exemplo de ética e compromisso com a arte do ensinar;

À Prof^a Joana Darc da Silva, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo exemplo como pesquisadora, pela oportunidade de seguir seus passos e por suas importantes considerações neste trabalho.

À Ivonete dos Santos Magalhães, secretária da pós-graduação, pela dedicação e presteza na solução de questões acadêmicas. E aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, Isa Marques, Ricardo Barbosa, Adimilson Caetano e Gilmar pelo apoio e presteza.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

Aos coordenadores administrativos, engenheiros e técnicos das obras “Mina do Pico” (Itabirito/MG), “Urbanização da Vila São José” (BH/MG) e “5^a Linha de Brucutu” (São Gonçalo do Rio Abaixo/MG) da empresa na qual estive presente durante o andamento desta pesquisa. Obrigada pela compreensão durante as minhas ausências.

A todos, muito obrigada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. JUSTIFICATIVA	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1 Adições em Concretos	4
4.1.1 Influência das Adições no Concreto.....	5
4.2 Resíduos	7
4.2.1 Conservação Ambiental.....	8
4.3 Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente.....	9
4.3.1 Sustentabilidade.....	9
4.3.2 Gestão Ambiental	11
4.3.3 Benefícios Ambientais da Reciclagem de Resíduos	12
4.3.4 Impactos da Reciclagem.....	14
4.3.5 Reciclagem de resíduos no Brasil.....	15
4.4 Escória de Alto-forno	18
4.4.1 Histórico da utilização da escória de alto-forno	19
4.4.2 Histórico Brasileiro	19
4.4.3 Produção de Escória de alto-forno	21
4.4.4 Resfriamento da escória de alto-forno.....	25
4.4.5 A Escória de alto-forno como aglomerante.....	26
4.4.6 A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto.....	27
5. METODOLOGIA.....	29
5.1 Dosagem do concreto	29
5.2 Produção do concreto	30
5.3 Análise do concreto fresco	31
5.4 Análise do concreto no estado endurecido	31
5.4.1 Moldagem dos corpos-de-prova	31

5.4.2 Resistência à compressão	32
5.4.3 Absorção da água do concreto.....	33
5.4.4 Ataque por ácido ao concreto	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
6.1 Caracterização dos materiais	37
6.1.1 Cimento	37
6.1.2 Escória de alto-forno	37
6.1.3 Agregados.....	38
6.1.4 Aditivo.....	40
6.1.5 Água	40
6.2 Dosagem do Concreto	40
6.3 Resistência à compressão	41
6.4 Influência da Absorção antes do ataque com ácido.....	44
6.4.1 Absorção do concreto de referência antes do ataque com ácido	44
6.4.2 Absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido.....	45
6.4.3 Absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido	46
6.4.4 Absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido	46
6.5 Influência da Absorção após ataque com ácido.....	48
6.5.1 Absorção do concreto de referência após ataque com ácido	48
6.5.1 Absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno após ataque com ácido	49
6.5.1 Absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno após ataque com ácido	50
6.5.1 Absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno após ataque com ácido	51
6.6 Análise comparativa da absorção antes e após ataque com ácido.....	52
6.6 Influência da Escória de alto-forno ao ataque ácido.....	53
6.7 Inspeção Visual	54
7. CONCLUSÕES.....	56
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Modelo de produção linear - adaptado de JOHN, 1999.	12
Figura 4.2 – Ciclo de produção fechado - adaptado de JOHN, 1999.	13
Figura 4.3 – Esquema geral para seleção de alternativas para reciclagem (JOHN; ÂNGULO; AGOPYAN, 2008)	15
Figura 4.4 – Geração de Resíduos por Tipo (2007), retirado do Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS.	20
Figura 4.5 – Representação esquemática de um alto-forno – adaptado de JACOMINO, 2002 et al. apud MASSUCATO, 2005.	22
Figura 4.6 – Produção da Escória de Alto-Forno e Aciaria – adaptado de CASELATO, 2004.	24
Figura 4.7 – Granulação da escória – adaptado de JACOMINO et al, 2002 apud MASSUCATO, 2005.	26
Figura 5.1 – Corpos-de-prova.....	32
Figura 5.2 – Ruptura do Concreto à Compressão	33
Figura 5.3 – Corpos-de-provas no ensaio de absorção (a) nas 4 primeiras horas (b) nas primeiras 8 horas (c) nas primeiras 12 horas, totalmente submersos...	34
Figura 5.4 – Dados do ácido utilizado no ataque do concreto	35
Figura 5.5 – Corpos-de-prova imersos em solução de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) a 2,5%.	36
Figura 6.1 – Resultados à Compressão dos concretos antes do ataque.....	42
Figura 6.2 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência antes do ataque com ácido	44
Figura 6.3 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido.....	45
Figura 6.4 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido	46
Figura 6.5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido	47
Figura 6.6 – Média dos resultados do ensaio de absorção antes do ataque com ácido sulfúrico a 2,5%.....	48
Figura 6.7 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência após do ataque com ácido	49

Figura 6.8 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno após do ataque com ácido	50
Figura 6.9 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno após do ataque com ácido.....	51
Figura 6.10 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno após do ataque com ácido.....	51
Figura 6.11 – Média dos resultados do ensaio de absorção após ataque com ácido sulfúrico a 2,5%.....	52
Figura 6.12 – Concreto submetido à imersão em ácido sulfúrico com concentração de 2,5% por 7 dias.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Caracterização do Cimento CP III-32.....	37
Tabela 6.2: Caracterização da escória de alto-forno	38
Tabela 6.3: Caracterização da Areia (NBR 7217/87).	38
Tabela 6.4: Caracterização da Brita (NBR 7217/87)	39
Tabela 6.5: Tabela de traços	41
Tabela 6.6: Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias antes do ataque	42
Tabela 6.7: Comparativo da redução na resistência dos concretos na substituição do cimento por escória de alto-forno	43
Tabela 6.8: Controle dos Corpos-de-prova	43
Tabela 6.9: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência antes do ataque com ácido	44
Tabela 6.10: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido.....	45
Tabela 6.11: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido	46
Tabela 6.12: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido	47
Tabela 6.13: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência após ataque com ácido	49
Tabela 6.14: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno após ataque com ácido.....	50
Tabela 6.15: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno após ataque com ácido	50
Tabela 6.16: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno após ataque com ácido	51
Tabela 6.17: Comparativo das média dos resultados do ensaio de absorção por imersão nos concretos antes e após ataque com ácido	52
Tabela 6.18: Resultados de Perda de Massa	53

RESUMO

A reinserção de resíduos a processos produtivos visando atender à questão ambiental, vem sendo amplamente discutida em foros nacionais e internacionais. Diante da constatação que indústrias de fabricação e transformação produzem resíduos que nem sempre são convenientemente aproveitados, deve-se propor estudos visando aliar a utilização de resíduos a questões relacionadas à sustentabilidade.

Este trabalho avalia a influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto. Os concretos foram produzidos com a substituição de parte do cimento por escória de alto-forno, material obtido em quantidades significativas nas siderúrgicas, no processo de redução do minério de ferro. A influência da adição foi avaliada através da comparação de um concreto de referência com concretos com substituição de parte do cimento por escória de alto-forno nas porcentagens de 12,5%, 20% e 35%.

A avaliação da durabilidade dos concretos, tanto o de referência quanto dos concretos com substituição de parte do cimento por escória de alto-forno, submetidos a ataque químico foi feita através de ensaios de absorção e de perdas de massa, antes e após ataque por ácido sulfúrico, numa concentração de 2,5%.

Os concretos com as diferentes substituições foram comparados ao concreto de referência através dos resultados de ensaios, demonstrando que o concreto com substituição de 12,5% é o mais indicado por apresentar uma resistência à compressão de 26MPa, uma absorção de 5% e não ter uma perda de massa significativa comparativamente ao concreto de referência.

Pode-se concluir que a interface entre as diversas áreas do conhecimento representa uma condição fundamental para atender às questões econômicas, culturais e sociais visando uma sociedade igualitária e sustentável.

Palavras chaves: concreto, escória de alto-forno, sustentabilidade.

ABSTRACT

The reinsertion of waste production processes seeking to attend the environmental issue is being widely discussed in national and international forum. In the face of the observation that industries of manufacture and processing produce waste which are not always properly used, must-propose studies aiming at alliance the use of waste to issues related to sustainability

This work evaluates the influence of adding steel residue in the performance of concrete. The concrete were produced with the replacement of part of cement by blast furnace slag, material obtained in significant quantities in steel, in the process of reduction of iron ore. The influence of adding was evaluated by comparing a concrete reference with concrete replacing part of cement by blast furnace slag in percentages of 12.5%, 20% and 35%.

The assessment of the durability of concrete, both of reference for the concrete replacing part of cement by blast furnace slag, subjected to chemical attack was performed through absorption tests and losses in mass, before and after attack by sulfuric acid, a concentration of 2,5%.

The concrete with the various substitutes were compared with the concreteness of reference of the results of tests, demonstrating that the concrete with replacement of 12.5% is the most indicated by presenting a compression resistance of 26MPa, an absorption of 5% and not to have a significant loss of mass compared with the concreteness of reference.

May-conclude that the interface between the different knowledge areas represents a fundamental condition to take account of the economic, cultural and social aiming an equal society and sustainable development.

Keywords: concrete, blast furnace slag, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a reinserção de resíduos a processos, visando atender a questão ambiental, que nos últimos anos é bastante discutida em foros nacionais e internacionais. Como as indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem certa quantidade de resíduos que nem sempre são aproveitados ou têm um destino ecologicamente incorreto, a proposta de ampliar a utilização de resíduos atende plenamente as demandas por uma sociedade mais sustentável.

Considerando as adições empregadas no concreto com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades, dentre elas a durabilidade cada vez mais abordada em função da agressividade ambiental e da importância do aumento da vida útil das estruturas, torna-se necessário um melhor conhecimento das características do material, bem como a compreensão das reações e alterações promovidas pelas adições.

Neste contexto, este trabalho se propõe a fazer uma avaliação da eficiência da substituição de parte do cimento por escória de alto-forno em concretos C30, verificando o desempenho no quesito da durabilidade do concreto. Dentro desta proposta, foi feito um estudo comparativo de concretos com diferentes proporções de escória de alto-forno (12,5%, 20% e 35%) analisando aspectos quanto à absorção, perda de massa e à degradação por ataque de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com concentração de 2,5%, de forma a investigar a utilização em concretos na busca de destinos economicamente sustentáveis.

2. OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a avaliar a adição de resíduo siderúrgico em concreto, a partir da adição de diferentes proporções de escória de alto-forno, visando sua reinserção no processo produtivo, de forma a diminuir a quantidade deste resíduo no meio ambiente, e conseqüentemente alcançar parâmetros de sustentabilidade.

O efeito da adição da escória de alto-forno foi avaliado em traços de concreto com os teores de 12,5%, 20% e 35% de escória na mistura. Comparativamente, os traços de concreto foram avaliados com adições de escórias de alto-forno e sem adição de escória. O efeito das adições foi avaliado através da resistência à compressão de um concreto com consistência seca medida pelo abatimento do tronco de cone, e por ensaio de absorção de acordo com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Em seguida, foram avaliadas as performances dos diferentes concretos ao ataque de ácido sulfúrico (H_2SO_4) numa concentração de 2,5%. Foi feita uma análise das absorções, das perdas de massa e principalmente da degradação do concreto em função do ataque por ácido, de forma a avaliar o papel da escória de alto-forno na minimização dos efeitos do ácido sulfúrico.

Desta forma, este estudo se processou de acordo com as etapas abaixo:

- Produção de concreto C30, com características de durabilidade;
- Análise da resistência dos concretos em função da substituição de parte do aglomerante por escória de alto-forno;
- Análise da performance dos concretos, de acordo com as devidas substituições nas porcentagens de escória, em meio agressivo;
- Avaliação da metodologia proposta visando ampliar a reinserção de resíduo.

3. JUSTIFICATIVA

A eficiência dos processos de reutilização de materiais descartados, tornando-os energeticamente eficientes e não poluentes, bem como o uso racional de materiais primários, contribui significativamente na diminuição do acúmulo de lixo no globo terrestre, melhorando a qualidade de vida da população.

No mundo contemporâneo, no qual muitos problemas são globalizados, deve existir um comprometimento em aliar a propulsão do desenvolvimento com a preservação do meio ambiente, havendo um real e sadio interesse na reciclagem de manufaturados.

A geração de resíduos tem aumentado em quantidade e diversidade nas últimas décadas em todo o mundo, em decorrência da explosão demográfica e do crescimento econômico. Também por estas mesmas razões têm surgido limitações em termos energéticos, de matérias-primas e do espaço para deposição final de resíduos.

Por outro lado a demanda por pesquisas referentes à durabilidade do concreto tem levado ao desenvolvimento de inúmeros trabalhos que propõem novas metodologias de análise, no que diz respeito, à substituição de parte do cimento por materiais alternativos, tais como a escória de alto-forno, microsilica, cinza volante, cinza de casca de arroz.

Nesta perspectiva, este trabalho se justifica na medida em que busca avaliar o comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido, ao substituir parte do cimento por escória de alto-forno. Desta forma, o tratamento adequado nas escórias de alto-forno pode ampliar o consumo deste produto como adição mineral diretamente nas centrais de concreto, com a vantagem de ser uma fonte renovável de energia, eliminando este resíduo que se acumula nos pátios das usinas siderúrgicas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Adições em Concretos

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 incorporação de adições minerais no cimento, substituindo parte do clínquer, contribui na diminuição do impacto da construção civil e de outras indústrias sobre o meio ambiente, ao reduzir o volume de extração de matéria-prima e ao utilizar grandes quantidades de resíduos que seriam descartados.

Adições minerais, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994, p.290), são materiais silicosos finamente moídos, adicionados em quantidades relativamente grandes à massa de cimento Portland. As adições minerais podem ser cimentantes (escória granulada de alto-forno) e/ou pozolânicos (sílica ativa), que apresentam ganhos de resistência aos concretos atribuídos ao efeito filler (preenchimento de vazios), devido suas características físicas.

As adições minerais são comumente classificadas conforme sua ação físico-química em:

- Material pozolânico, definido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso finamente moído, que na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, resultando em compostos com propriedades cimentantes. Os materiais pozolânicos podem ser naturais ou artificiais como a sílica ativa, a cinza da casca de arroz e o metacaulim;
- Material cimentante é um material que forma produtos cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sem necessariamente ter

que entrar em contato com o do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , presente no cimento Portland, como por exemplo, a escória granulada de alto-forno.

- Filler, material finamente dividido que não apresenta nenhuma atividade química, contribuindo na continuidade granulométrica servindo como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

Alguns exemplos de resíduos adicionados são: escória de alto-forno, cinza de casca de arroz, entulho da construção civil e materiais pozolânicos; sendo que a composição resultante da incorporação dos resíduos pode apresentar função estrutural ou não.

4.1.1 Influência das Adições no Concreto

As adições são empregadas no concreto com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades dentre elas, a durabilidade, que vem sendo cada vez mais abordada em função da agressividade ambiental e da importância do aumento da vida útil das estruturas. Contudo, diferenças nas características físicas e químicas desses materiais (consequência da diversidade de tipos e de origem das adições) dificultam a escolha da melhor adição e do teor adequado a ser aplicado no concreto. Dessa forma, torna-se necessário um melhor conhecimento das características do material, bem como a compreensão das reações e alterações promovidas pelas adições no material.

As pozolanas podem ser naturais, materiais de origem vulcânica, geralmente ácidos, ou de origem sedimentar; podendo também ser artificiais, materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos com atividade pozolânica. (NBR 5736 (ABNT, 1991)).

As adições mais utilizadas, já supracitadas, são aquelas que têm em sua composição: sílica amorfa como sílica ativa, a escória de alto-forno, a cinza volante e a cinza de casca de arroz.

A utilização de pozolanas traz benefícios para diversas propriedades do concreto. Por se tratar de um material extremamente fino, sua adição proporciona um efeito físico através da redução dos poros, que diminui os

vazios e o efeito químico, pela produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), através das reações pozolânicas. Assim, contribui para menor porosidade, o que permite ganhos de resistência mecânica, além de proporcionar um concreto com baixa permeabilidade, garantindo uma proteção à estrutura frente a agentes agressivos, que promovem a deterioração do concreto.

A proporção para substituição no cimento por adições varia de acordo com o tipo de adição. Experimentos realizados por diversos pesquisadores indicam que os valores mais usados de 5 a 20% para sílica ativa, 55 a 70% com escória de alto-forno, 25 a 60 % de cinza volante, 15 a 25% com cinza de casca de arroz e 10 a 50% para filler calcáreo. (MORAES, 2001; HOPPE FILHO, 2002).

A seguir apresenta-se a influência das adições mais utilizadas na atualidade:

- Sílica ativa

A sílica ativa é uma das pozolanas mais utilizadas em concreto de alto desempenho em todo o mundo. Sua contribuição, para o concreto, consiste na alta reatividade nas primeiras idades, o que induz em um aumento nas resistências mecânicas iniciais e finais.

A sílica produz, no concreto fresco, baixa exsudação e aumenta a coesão; no concreto endurecido, produz alta resistência inicial e baixa permeabilidade. Seus efeitos benéficos não se limitam à reação pozolânica, pois há um efeito físico das partículas finas se posicionarem na interface agregado-pasta, que é a região mais porosa do concreto, obstruindo esses poros (NEVILLE, 2004).

Resumidamente, a sílica ativa contribui efetivamente para a modificação da estrutura dos poros. O aumento do seu volume provoca diminuição do diâmetro dos poros e menor comunicação entre eles, o que reflete diretamente na diminuição da taxa de absorção e no aumento da resistência capilar.

- Cinza Volante

As cinzas volantes, do ponto de vista físico, são esféricas e de grande finura. Sua adição em concretos traz vantagens significativas no estado fresco do concreto, pois melhora a trabalhabilidade e a coesão, diminuindo a exsudação

e a segregação, facilitando a operação do transporte, lançamento e o acabamento, uma vez que ocorre o retardamento do tempo de pega e baixo calor de hidratação.

Em relação à resistência mecânica à compressão, segundo FRIZZO (2001), esta é afetada em comparação ao concreto de referência, constituído somente de cimento. Em observações de seus parâmetros de durabilidade, verificou-se uma redução considerável nos coeficientes de permeabilidade ao oxigênio, sendo que o mesmo ocorreu com os coeficientes capilar de água. Portanto, as vantagens de utilizar cinzas volantes aos concretos traduz na redução da permeabilidade e, conseqüentemente, aumento da durabilidade.

- Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz tem comportamento similar ou até melhor que a sílica ativa. Por esta razão, alguns pesquisadores a consideram como uma “superpozolana”, quando obtida por meio de queima controlada.

A alta reatividade da cinza de casca de arroz deve-se ao fato de ser formada a baixas temperaturas, facilitando assim a formação do silicato de cálcio.

- Escória de alto-forno

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).

4.2 Resíduos

As indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem certa quantidade de resíduos que nem sempre são aproveitados ou têm um destino ecologicamente incorreto. O elevado volume de resíduos gerados na siderurgia

faz com que esse tipo de atividade industrial mantenha-se em permanente busca de destinos que possibilite minimizar o impacto ambiental negativo e o custo. O setor adota práticas que promovem reciclagem e reutilização dos resíduos gerados pelos processos produtivos, de forma a minimizar os impactos ambientais e reduzir os custos relativos à disposição em aterros. As empresas siderúrgicas têm realizado diversas pesquisas em conjunto com universidades e instituições tecnológicas para o desenvolvimento de alternativas técnica, ambiental e economicamente viáveis para utilização de resíduos, transformando-os em co-produtos reutilizados no próprio processo de produção de aço, ou comercializados como insumos para utilização em outras atividades.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS – Instituto Brasileiro de siderurgias, em 2007, 94% dos materiais gerados pelas empresas do setor foram reaproveitados, no próprio processo ou por terceiros, e apenas 6% foram dispostos em aterros ou incinerados, seguindo procedimentos autorizados pelos órgãos competentes. Do total de resíduos e co-produtos gerados, os agregados siderúrgicos representaram o maior percentual, 60%. A sucata de ferro e aço representou 14% deste total, e os demais 26% dividiram-se entre finos, pós, lamas e outros. Cerca de 81% do total de agregados siderúrgicos foram comercializados, principalmente para a produção de cimento e para uso como base e sub-base de estradas.

4.2.1 Conservação Ambiental

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS – Instituto Brasileiro de siderurgias, As empresas siderúrgicas buscam aperfeiçoar continuamente a ecoeficiência de seus processos e produtos. Adotam medidas que visam à proteção do meio ambiente, norteadas não só pela legislação ambiental como por referências das melhores tecnologias e práticas operacionais. Atuam em conjunto com universidades e outras instituições de pesquisa, com o objetivo de desenvolver tecnologias mais limpas e processos técnica e ambientalmente mais eficientes.

Assim, considerando que a questão ambiental vem sendo amplamente discutida nos foros nacionais e internacionais nos últimos anos e que tem mobilizado a opinião pública assumindo um papel preponderante nas comunidades, a proposta de ampliar a utilização de resíduos atende plenamente as demandas por uma sociedade preocupada com a sustentabilidade.

O conceito de sustentabilidade como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental.

4.3 Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente

4.3.1 Sustentabilidade

Em 1986, a explosão de um reator da usina nuclear de Chernobyl, na Ucrânia, causou um desastre sem proporções na história humana. O acidente lançou à atmosfera uma quantidade de radiação equivalente à de 500 bombas atômicas como a de Hiroshima, levando à evacuação de uma área de 140 mil quilômetros. Cerca de 3,4 milhões de pessoas foram afetadas, 15 mil morreram e 50 mil se feriram. Tal acontecimento gerou comoção internacional o que reforçou o questionamento já expresso pela ONU na Conferência de Estocolmo, em 1972; dando assim um alerta de que a sobrevivência do planeta corria riscos com a crescente e irracional interferência do homem no meio ambiente (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2008).

A resposta da ONU sobre o comportamento predatório do desenvolvimento econômico foi consolidada com a publicação do relatório *Nosso Futuro Comum*, em 1987. Neste, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento criticava o modelo adotado pelos países desenvolvidos e defendia um novo tipo de desenvolvimento, capaz de manter o progresso em todo o planeta e de, no longo prazo, partilhá-lo entre países em desenvolvimento e desenvolvidos. Assim, nascia o conceito de

desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade. A idéia se popularizou nas conferências do Rio de Janeiro, em 1992, a *Rio 92*, e de Johannesburgo, *Rio+10*, em 2002. Desde então, o debate sobre desenvolvimento sustentável está presente na sociedade civil, governos, empresas, organismos internacionais, ONG's, entre outros.

Desta forma, sustentabilidade é um conceito sistêmico, relacionado com a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana. Portanto, a sustentabilidade propõe-se a ser um meio de configurar a civilização e atividades humanas, de tal maneira que a sociedade, seus membros e suas economias possam preencher as necessidades expressando o seu maior potencial no presente, ao mesmo tempo preservando a biodiversidade e os ecossistemas naturais, planejando e agindo de forma a atingir pró-eficiência na manutenção indefinida desses ideais.

A qualidade de vida da população mundial dependerá, ao longo do tempo, cada vez mais da eficiência dos processos de reutilização de materiais descartados, tornando-os energeticamente mais eficientes e menos poluentes, bem como do uso racional dos materiais primários, contribuindo assim com a diminuição do acúmulo de lixo no globo terrestre.

Assim no mundo contemporâneo, onde muitos problemas são globalizados, existe grande comprometimento em aliar a propulsão do desenvolvimento com a preservação do meio ambiente, ocorrendo um real e sadio interesse pela reciclagem de manufaturados que assolam o globo.

Nos últimos anos a comunidade da construção civil vem demonstrando grande preocupação em contribuir para o desenvolvimento sustentável global, sendo constante os estudos referentes ao reaproveitamento de materiais tidos como inservíveis, visando observar as possíveis vantagens no uso destes resíduos e de maneira geral colaborando com a preservação do meio ambiente.

Para um empreendimento ser tido como sustentável, quatro requisitos básicos, deverão ser considerados:

- Ecologicamente correto;

- Economicamente viável;
- Socialmente justo;
- Culturalmente aceito.

Assim, abordar o desenvolvimento sustentável sob os aspectos da indústria da construção civil, é incentivar o desenvolvimento de projetos e de novas tecnologias que proporcionem o uso racional de recursos naturais tais como a energia e a água, redução da geração de resíduos, da utilização e/ou reutilização de materiais ambientalmente corretos, bem como determinar parâmetros para avaliação ambiental das construções. O aproveitamento de resíduos é uma das ações que devem ser incluídas nas práticas comuns de produção de edificações, visando a sua maior sustentabilidade, proporcionando economia de recursos naturais e minimização do impacto no meio-ambiente. O potencial do reaproveitamento e reciclagem de resíduos da construção, bem como de demais indústrias é enorme, e a exigência da incorporação destes resíduos em determinados produtos pode vir a ser extremamente benéfica, já que proporciona economia de matéria-prima e energia.

Portanto, certamente a construção de uma sociedade realmente sustentável passa por uma radical transformação nos padrões de consumo e processos de produção. O conceito cultural de desenvolvimento, bem estar, etc. deverá ser radicalmente transformado. Desta forma, esta será uma tarefa para uma ou mais gerações e, neste período, é necessário que a atual estrutura produtiva seja transformada gradualmente.

4.3.2 Gestão Ambiental

A gestão ambiental (GA) é uma prática muito recente, que vem ganhando espaço nas instituições públicas e privadas. Através dela é possível a mobilização das organizações para se adequar à promoção de um meio ambiente ecologicamente equilibrado.

Seu objetivo é a busca de melhoria constante dos produtos, serviços e ambiente de trabalho, em toda organização, levando-se em conta o fator ambiental.

Atualmente ela começa a ser encarada como um assunto estratégico, porque além de estimular a qualidade ambiental também possibilita a redução de custos diretos (redução de desperdícios com água, energia e matérias-primas) e indiretos (por exemplo, indenizações por danos ambientais).

4.3.3 Benefícios Ambientais da Reciclagem de Resíduos

No modelo atual de produção (Figura 4.1), os resíduos sempre são gerados, seja para bens de consumo duráveis ou não duráveis. Nesse processo, a produção utiliza de matérias-primas não renováveis de origem natural. Esse modelo, antigamente, não apresentava problemas em função da abundância de recursos naturais e menor quantidade de consumidores (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2008).

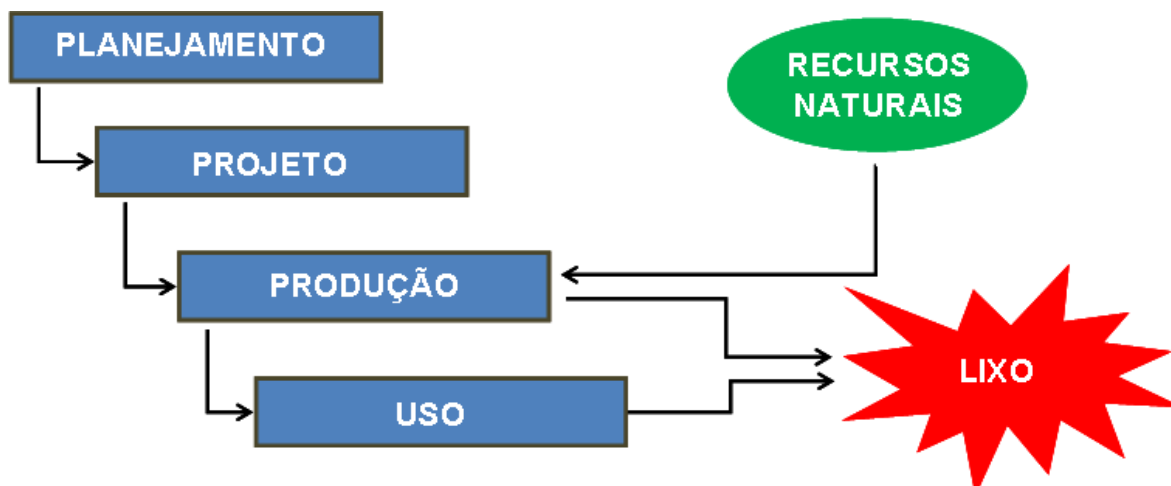


Figura 4.1 – Modelo de produção linear - adaptado de JOHN, 1999.

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).

Devido a tal cenário, durante a *ECO-92* e a definição da *Agenda 21*, houve destaque a necessidade de se implementar um adequado sistema de gestão

ambiental para os resíduos sólidos (GÜNTHER, 2000). Dentre os problemas apresentados a reciclagem de resíduos é uma das formas de solução, principalmente a construção civil que tem grande potencial de utilização dos resíduos, uma vez que consome um número significativo de recursos naturais. Mas na verdade, essas ações pontuais não irão solucionar os problemas em geral, pois as indústrias devem tentar fechar o ciclo produtivo de maneira tal que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não renovável.

Assim, um novo modelo de produção faz-se necessário, onde a utilização dos recursos empregados seja otimizada e a geração de resíduos reduzida a um mínimo, que possa ser reciclado. A Figura 4.2 apresenta uma adaptação do modelo de ciclo fechado que pode ser empregado na construção civil, pois o desafio embutido no conceito é imenso e a viabilidade desse modelo em toda a sua profundidade e todos os bens são necessários ao desenvolvimento da humanidade.

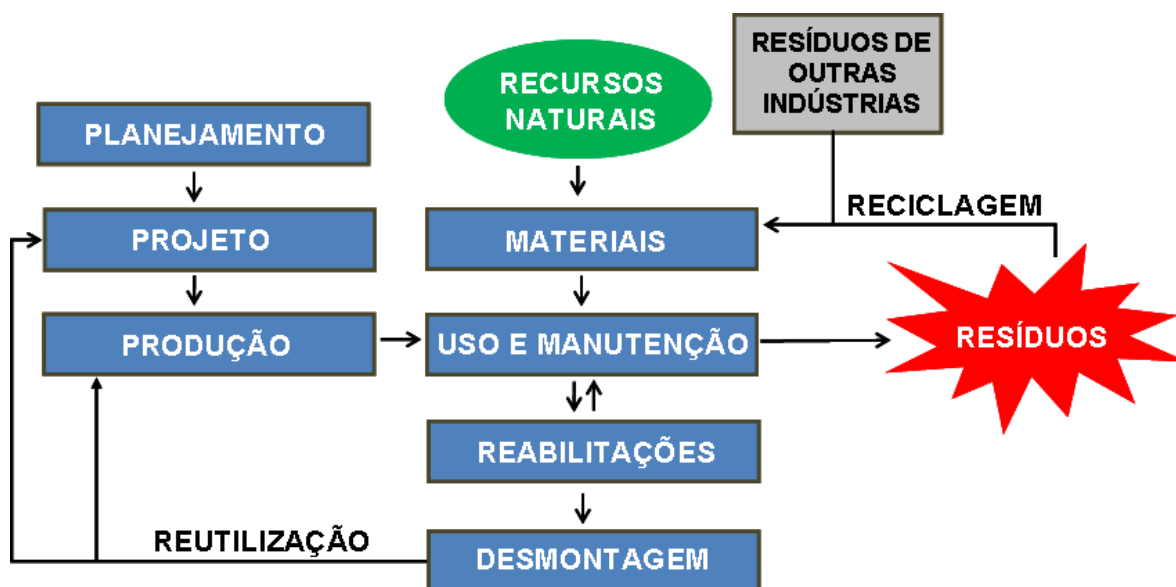


Figura 4.2 – Ciclo de produção fechado - adaptado de JOHN, 1999.

Desta forma, estes ciclos para a construção tentam aproximar a construção civil do conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como um processo que leva às mudanças na exploração de recursos, na direção de investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, com um propósito único, a harmonia e o entrelaçamento nas aspirações e

necessidade humanas presentes e futuras. Conceito tal que envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2008).

Seja a redução na geração de resíduos uma ação necessária, esta é limitada (existem impurezas na matéria-prima), pois envolve custos e desenvolvimento tecnológico (JOHN, 2008).

Contudo, a reciclagem pode gerar inúmeros benefícios citados a seguir:

- Redução no consumo de recursos naturais não renováveis, ao serem substituídos por resíduos;
- Minimização do volume de resíduos pela reciclagem, e conseqüente redução de áreas de depósito;
- Redução do consumo de energia durante o processo de produção;
- Redução da poluição.

4.3.4 Impactos da Reciclagem

A própria reciclagem, como qualquer outra atividade humana, pode causar impactos ao meio ambiente, isto em função de algumas variáveis tais como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada e a utilização proposta para o resíduo. Desta forma, será necessário analisar os riscos que o processo de reutilização do resíduo pode acarretar verificando quais riscos ambientais precisam ser adequadamente gerenciados.

A quantidade de energia e de materiais necessários ao processo de reutilização de um resíduo pode apresentar um grande impacto ambiental, uma vez que o processo de reutilização necessita de energia para transformar o resíduo ou tratá-lo de maneira a torná-lo apropriado à reinserção em uma nova cadeia produtiva.

Além disso, a reutilização pode gerar novos resíduos, que nem sempre são tão ou mais simples que aqueles que os originaram, podendo ser mais agressivos ao homem e ao meio ambiente. Dependendo de sua periculosidade e

complexidade estes rejeitos podem causar novos problemas, tais como a impossibilidade de serem reutilizados, falta de tecnologia para tratá-los, falta de locais para dispô-los, bem como o custo que isto ocasionaria.

Desta forma, a escolha da adequada reutilização de um resíduo deve ser criteriosa, ponderando todas as alternativas possíveis com relação ao consumo de energia e matéria-prima pelo processo de reciclagem escolhido (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2008), conforme Figura 4.3 a seguir:

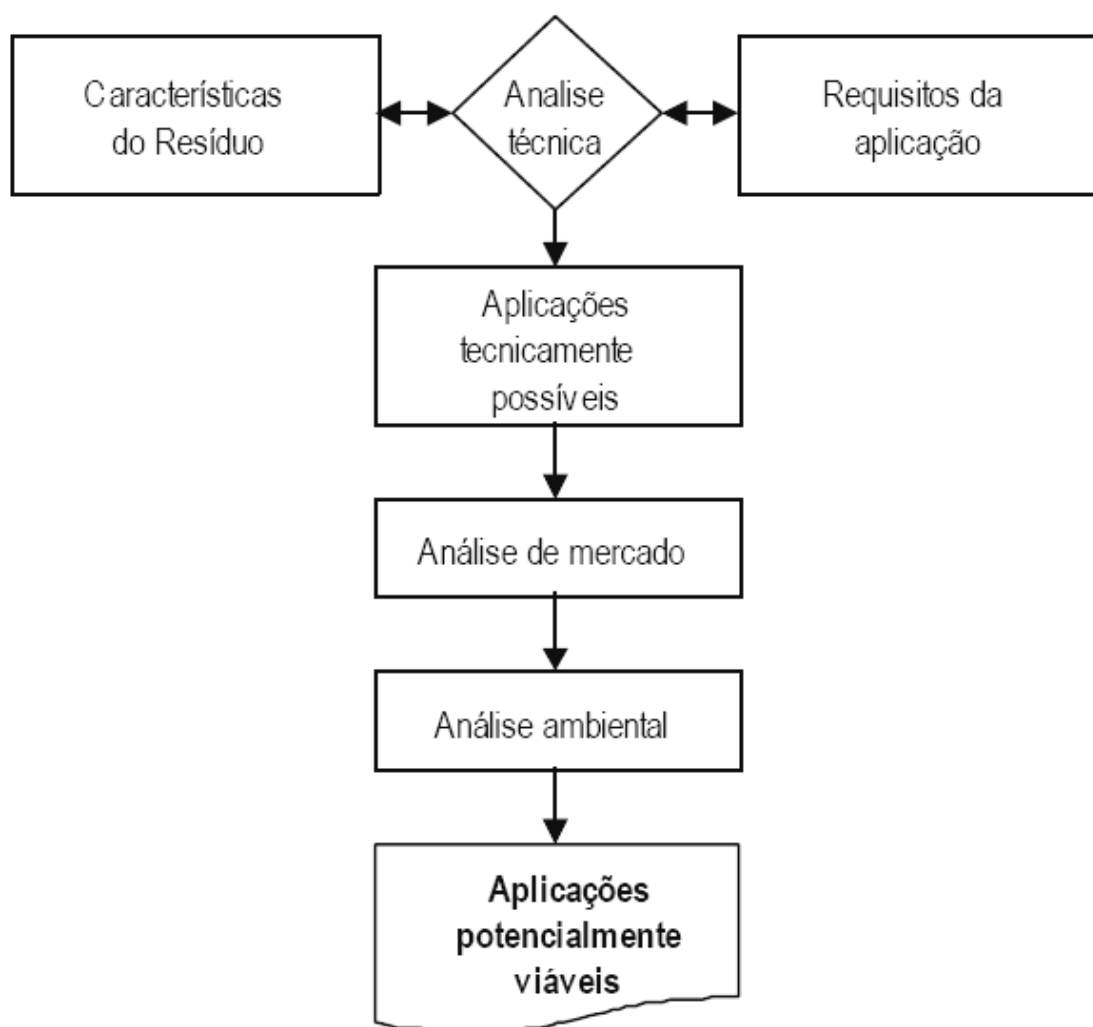


Figura 4.3 – Esquema geral para seleção de alternativas para reciclagem (JOHN; ÂNGULO; AGOPYAN, 2008)

4.3.5 Reciclagem de resíduos no Brasil

No Brasil, a reciclagem de resíduos, em comparação com países do primeiro mundo, é pequena, podendo-se verificar uma discussão com maior frequência

somente no âmbito técnico-científico. Este atraso tem vários componentes, principalmente os repetidos problemas econômicos e sociais que ocupam as discussões políticas.

Desta forma, a questão ambiental no Brasil, ainda é tratada como sendo um problema de preservação da natureza, particularmente florestas e animais em extinção, deposição em aterros adequadamente controlados, controle da poluição do ar, com o estado exercendo o papel de polícia.

Este quadro necessita ser alterado, visto que o processo de desenvolvimento sustentável na construção civil brasileira ocorre bem lentamente. Para tal, é necessário que ocorra regulamentação e fiscalização eficientes, e principalmente uma mudança cultural para o setor de maneira a derrubar os paradigmas, seja por parte dos profissionais de tomarem providências para implementação de novos processos e/ou desenvolvimento de pesquisas.

Segundo JOHN; ÂNGULO; AGOPYAN (2008), recentemente o governo federal criou um grupo de trabalho inter-ministral com o objetivo de elaborar proposta de programa de reciclagem que estabeleça diretrizes que incrementem e valorizem a utilização de resíduos industriais, minerais e agropecuários como matérias-primas.

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).

Assim, um dos principais problemas enfrentados pelo setor siderúrgico relacionado à questão ambiental é a geração dos resíduos sólidos. A diversidade dos resíduos e a grande quantidade do volume gerado é a maior preocupação. Estes resíduos constituem uma fonte de poluição do solo, ar e água, caso não sejam dispostos adequadamente.

A utilização da escória de alto-forno reduz o aquecimento global em virtude da diminuição da produção do dióxido de carbono (CO₂) no processo de

fabricação de cimento, por exemplo. O dióxido de carbono é gerado pela queima de combustíveis, para produzir as altas temperaturas necessárias na produção de clínquer.

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).

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

Como a maioria das siderúrgicas com alto-forno à carvão vegetal utiliza o resfriamento ao ar, gerando escória sem atividade hidráulica, o setor agrega menor valor ao produto, inviabilizando o uso como adição mineral.

Algumas siderúrgicas à carvão vegetal entendem que a utilização da escória como substituto do cimento Portland no concreto não é vantajoso. A fabricação de cimento é de uso universal e de significativo “market-share” para o caso da escória granulada de alto-forno (JACOMINO, 2002 et al. *apud* MASSUCATO, 2005).

Contrariando esta visão, várias empresas, no Estado de Minas Gerais, foram viabilizadas com a moagem de escória de alto-forno para utilização como adição mineral no concreto, com venda direta para as centrais de concreto (MASSUCATO, 2005).

4.4 Escória de Alto-forno

Dentre os resíduos abordados é importante analisar o papel da produção de escória no Estado de Minas Gerais pelo impacto ambiental causado por montanhas deste rejeito. A escória de alto-forno é um produto não metálico consistindo essencialmente de silicatos e aluminatos silicatos de cálcio e outras bases. É formado pelo resfriamento rápido da escória de alto-forno fundida tornando em um produto vítreo ou não cristalino (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O carregamento do forno é feito introduzindo-se minério, o combustível e os fundentes, os quais, à medida que as reações se processam, vão descendo até atingir a parte inferior onde chegam sob forma de gusa e escória líquidos. Uma vez iniciada a corrida, a separação dos dois materiais se dá pela diferença de suas densidades. A composição química da escória é determinada pelos elementos que contribuem na sua formação: a ganga (material inerte do minério), os fundentes (substâncias ou materiais que auxiliam a fusão dos metais) e as cinzas do combustível utilizado (carvão vegetal ou coque).

Além disso, a escória fundida ao sair do alto-forno pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento que conferem ao material características particulares. Se o resfriamento for obtido com grandes quantidades de água, o material produzido será escória granulada, a qual é parcialmente utilizada pela indústria cimenteira e que também pode ser empregada como agregado miúdo. No caso de a escória ser resfriada ao ar e com pouca água, obtém-se uma escória em blocos denominada bruta, que depois de britada e classificada pode ser utilizada como agregado graúdo em concretos. Isto porque, a escória de alto-forno, rejeito siderúrgico obtido no processo de redução do minério de ferro, possui um potencial pozolânico (COUTO et al, 1991).

4.4.1 Histórico da utilização da escória de alto-forno

Antes da patente do cimento Portland, já se questionava sobre a capacidade aglomerante da escória de alto-forno.

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).

4.4.2 Histórico Brasileiro

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.

Hoje, o uso da escória de alto-forno, como adição ao cimento Portland ou como constituinte principal, está consagrado no mundo todo, tendo em vista as vantagens que oferece relativamente à economia de energia, baixo custo por se tratar de um resíduo siderúrgico industrial e pelas propriedades específicas superiores ao cimento Portland comum.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2007 do IBS – Instituto Brasileiro de siderurgias, em 2006, a geração média de resíduos (pós, lamas e agregados siderúrgicos) pelo setor foi equivalente a 420kg por tonelada de aço produzido, dos quais a escória representa 78%. Dos resíduos gerados, 22% são reutilizados internamente e 78%, vendidos a terceiros. Como exemplo, cita-se a utilização de agregados siderúrgicos na produção de cimento. Essa medida reduz a emissão de gases de efeito estufa na produção de cimento e a demanda por calcário e silicatos, recursos naturais de origem não renovável. Assim, as escórias, tratadas pelo setor siderúrgico de agregado, são utilizadas em diversos setores, principalmente ligados à construção civil, como se pode observar em dados apresentados na Figura 4.4 a seguir:

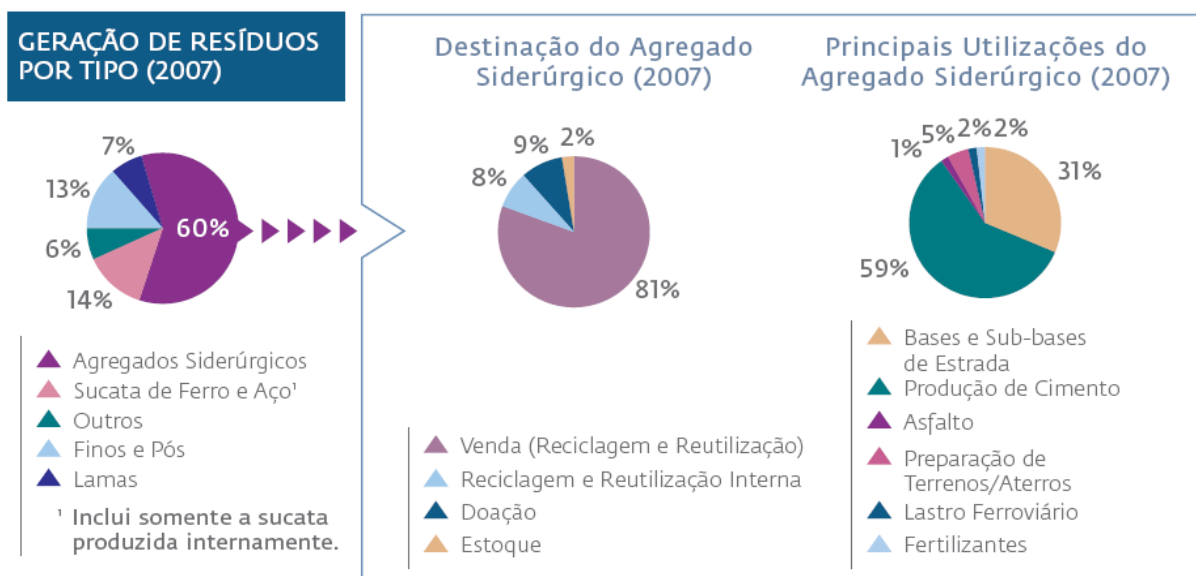


Figura 4.4 – Geração de Resíduos por Tipo (2007), retirado do Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS.

4.4.3 Produção de Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é um material predominantemente vítreo 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. Não é por consequência objeto de qualquer fabricação especial, sendo sempre um subproduto de outras fabricações.

Geralmente encontramos escória de alto-forno próximo à grandes indústrias siderúrgicas, formando "montanhas" de material, que é deixado ao ambiente. Com o contato direto de intempéries, a escória expande.

Todas as impurezas contidas no minério de ferro e nos combustíveis, coque ou carvão vegetal, passam para a escória de alto-forno. As impurezas podem resultar numa mistura com ponto de fusão muito alto, tornando o processo antieconômico. Desta forma, do ponto de vista químico, a escória tem uma composição muito constante que deve ser observada pelos metalurgistas, pois desvios no processo causam demandas significativas de energia e custos adicionais.

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 combustíveis utilizados no alto-forno podem ser o carvão vegetal e o coque. Apesar de ambos serem fontes de carbono, existem diferenças básicas entre os processos, como por exemplo, a origem do carvão vegetal e do coque.

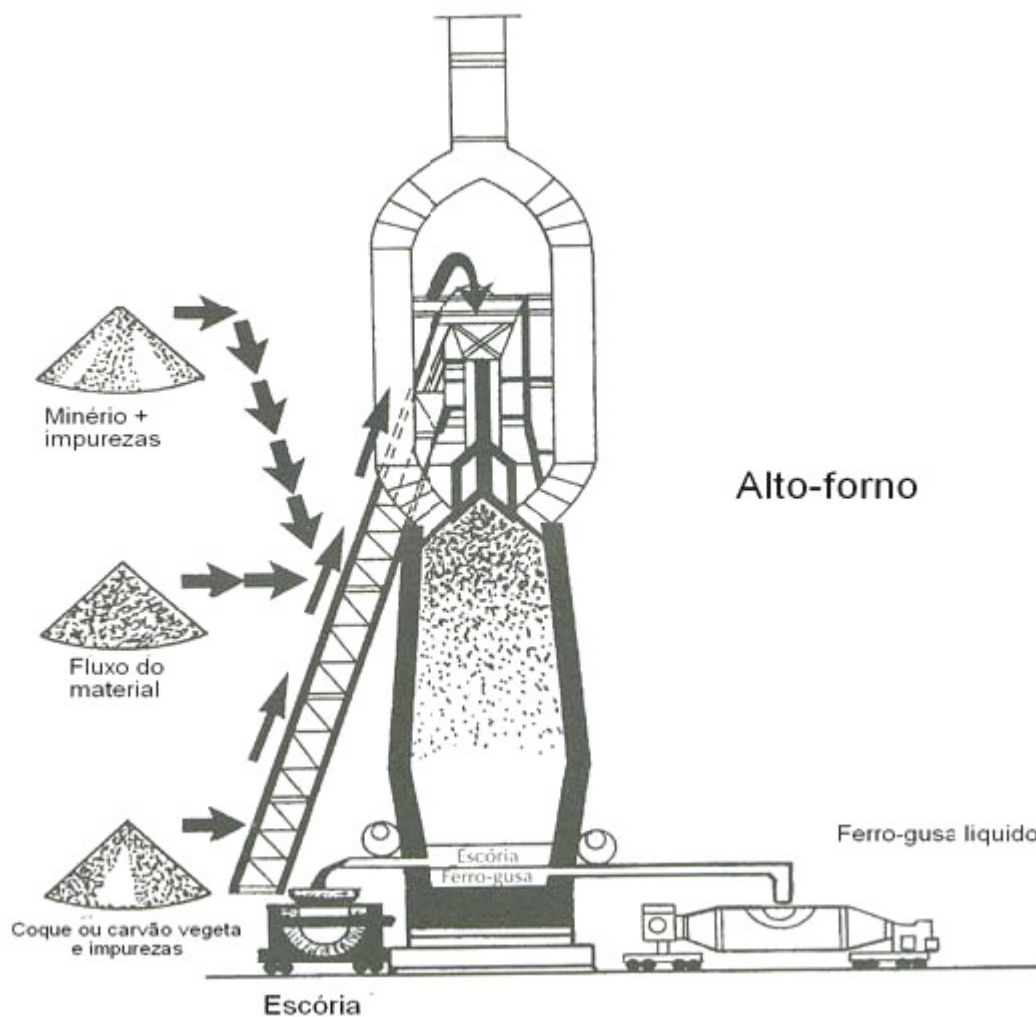


Figura 4.5 – Representação esquemática de um alto-forno – adaptado de JACOMINO, 2002 et al. apud MASSUCATO, 2005.

Os principais constituintes da escória de ferro são: óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), 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_2 , 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:

$$V = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

Onde:

$V \Rightarrow$ Índice de Basicidade;

$\%CaO \Rightarrow$ Porcentagem de Óxido de Cálcio;

$\%SiO_2 \Rightarrow$ Porcentagem de Dióxido de Silício.

Assim, tem-se que se:

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

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

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).

A seguir são apresentados dados dos índices médios de geração de resíduos siderúrgicos (Figura 4.6), tanto para a escória de alto-forno como para a escória de aciaria no Brasil comparados aos outros países. Neste observa-se que a produção de escória de alto-forno e aciaria é respectivamente de 270 Kg/t de gusa e 100 a 150 Kg/t de aço bruto (CASELATO, 2004).

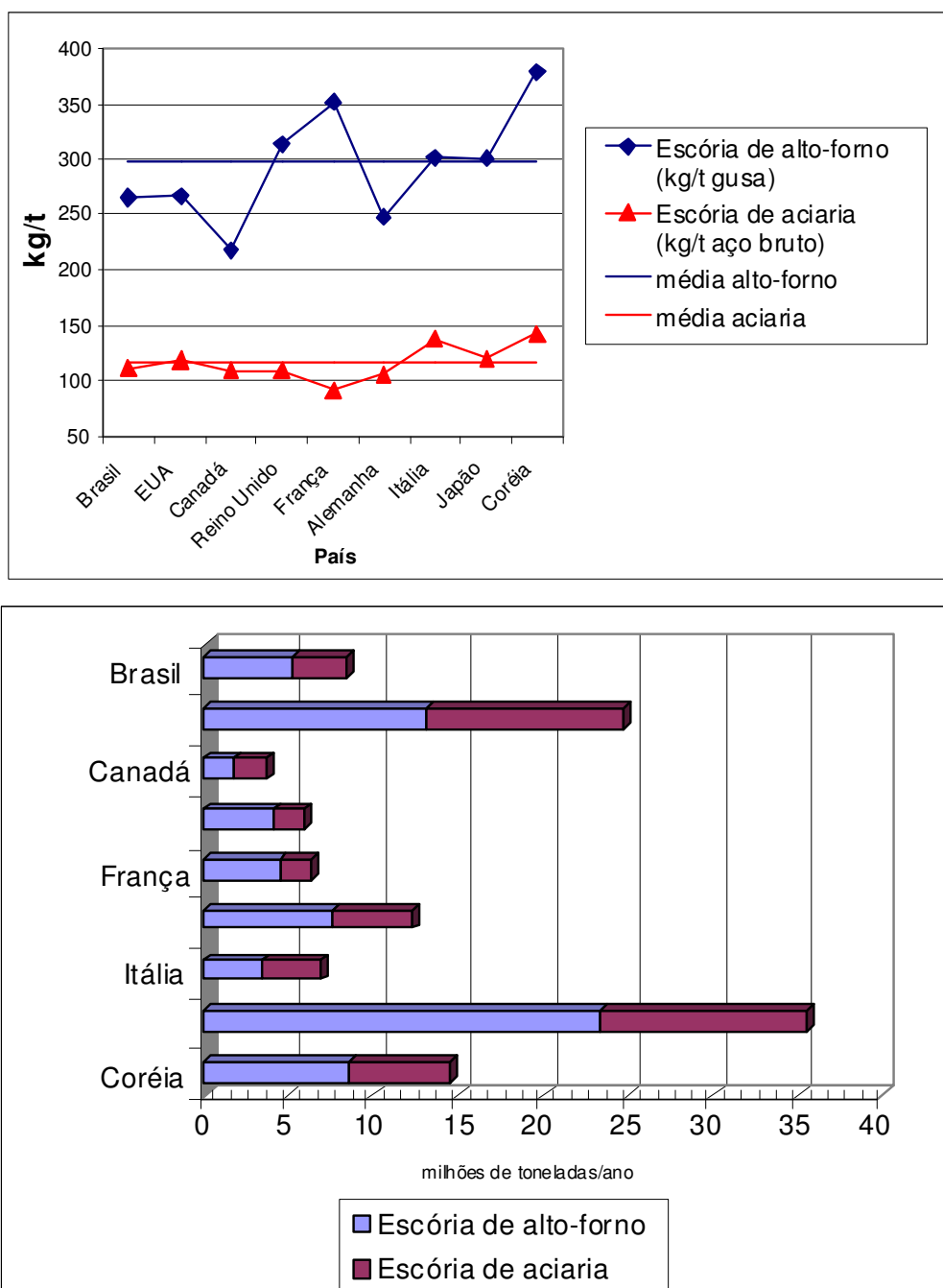


Figura 4.6 – Produção da Escória de Alto-Forno e Aciaria – adaptado de CASELATO,2004.

4.4.4 Resfriamento da escória de alto-forno

È importante analisar o resfriamento da escória, pois sua atividade hidráulica depende de vários fatores, inclusive da forma de resfriamento.

Quanto à forma de resfriamento, a escória de alto-forno classifica-se como:

- Escória de alto-forno resfriada ao ar ou bruta;
- Escória de alto-forno granulada;
- Escória de alto-forno expandida.

Sendo assim, a escória de alto-forno resfriada ao ar ou bruta é formada pelo resfriamento lento num poço ao ar livre. Em contrapartida, a escória de alto-forno granulada é obtida pelo resfriamento rápido da escória líquida numa estrutura química vitrificada, pois jatos de água em alta pressão são lançados diretamente na saída da escória fundida. Já a escória expandida é 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.

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).

Desta forma, a Figura 4.7 apresenta esquematicamente a granulação da escória, onde a escória em fusão cai sobre uma roda dentada que projeta pequenos grãos, resfriada por meio de jato d'água.

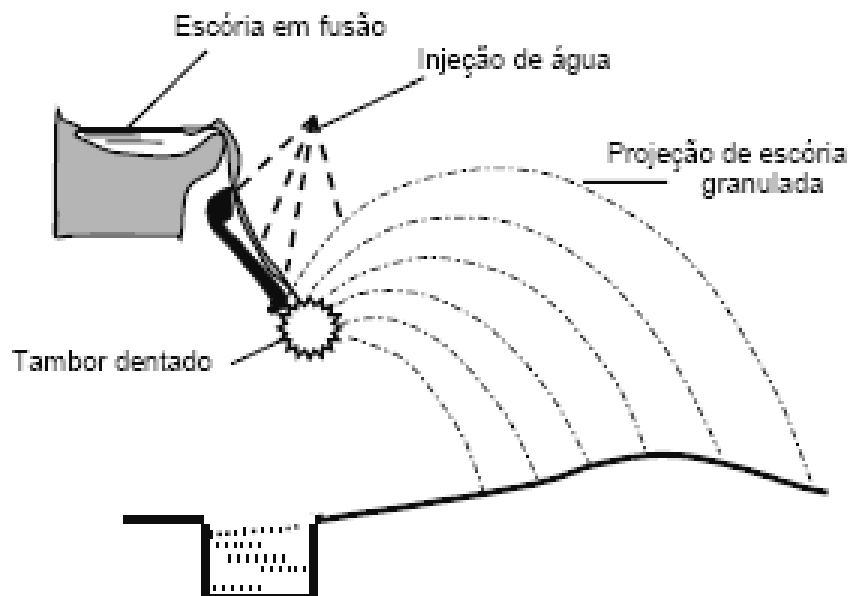


Figura 4.7 – Granulação da escória – adaptado de JACOMINO et al, 2002 apud MASSUCATO, 2005.

4.4.5 A Escória de alto-forno como aglomerante

As características, peculiaridades e efeitos quando adicionados aos cimentos ou como adição mineral no concreto, fazem com que as escórias de alto-forno gerem mudanças nas propriedades do concreto.

São necessárias algumas considerações sobre o mecanismo de ativação das escórias e sobre os produtos de hidratação formados para o entendimento das mudanças nas propriedades do concreto.

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).

As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, endurecendo quando misturadas com água. As reações de hidratação das escórias são tão lentas, que limitaria a sua aplicação comercial, se os ativadores não acelerassem o processo de hidratação.

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).

4.4.6 A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto

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).

As obras de engenharia, por utilizarem grandes quantidades de materiais, apresentam um grande potencial para o emprego dos mais diversos resíduos gerados pela indústria, sendo portanto, um caminho promissor para minimizar os danos gerados pelos resíduos através de sua reutilização ou reciclagem.

O concreto quer preparado com cimento Portland de alto-forno ou resultante da adição da escória de alto-forno em substituição à parte do cimento, tem resistências menores do que os preparados apenas com cimento Portland, mas posteriormente conseguem resistências iguais nos dois casos. Verificou-se que a trabalhabilidade do concreto com adição foi maior, possibilitando a redução

da relação água/aglomerante de um concreto com o mesmo teor de argamassa. Os concretos com adição apresentaram menor temperatura durante o processo de hidratação e o coeficiente de dilatação térmica reduziu em 10% (NEVILLE, 1982 *apud* MASSUCATO, 2005).

Hoje, o uso da escória de alto-forno, como adição ao cimento Portland ou como constituinte principal, está consagrado no mundo todo, tendo em vista as vantagens que oferece relativamente à economia de energia, baixo custo por se tratar de um resíduo siderúrgico industrial e pelas propriedades específicas comparadas ao cimento Portland comum.

5. METODOLOGIA

A metodologia consiste da avaliação de adições minerais empregadas no concreto, com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades, levando em consideração características físicas e químicas desses materiais, bem como algumas características específicas, e da análise das reações e alterações que possam ocorrer no concreto em função dessas adições.

É importante destacar que a resistência do concreto e conseqüentemente sua durabilidade são influenciadas por aspectos relativos ao processo de produção (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura), principalmente no que se refere a maior possibilidade de reduzir o volume de vazios.

5.1 Dosagem do concreto

O concreto abordado neste trabalho foi dosado a partir de resultados obtidos em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, levando em consideração os métodos de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT), com o objetivo de se obter um concreto de qualidade e com a resistência proposta.

A dosagem do concreto foi feita a partir dos dados obtidos através da caracterização dos materiais empregados – cimento e agregados – enfocando aspectos como a qualidade e a composição granulométrica destes.

O estudo de dosagem partiu da definição de características que o concreto deveria apresentar aos 28 dias, como resistência à compressão de 30MPa e baixo valor de absorção. A obtenção dessas duas características foi possível em função de se utilizar um baixo fator água/cimento e do emprego de aditivo superplastificante.

Com o objetivo de se avaliar a influência da substituição de parte do cimento por escória de alto-forno, foram dosados concretos com e sem escória de alto-

forno. O concreto sem utilização de escória de alto-forno em sua composição será tratado como concreto de referência, enquanto que os demais serão especificados conforme as diferentes porcentagens de escória de alto-forno, sendo estas adotadas de 12,5%, 20% e 35% em relação à quantidade de cimento adotada no concreto de referência.

5.2 Produção do concreto

Os concretos foram produzidos a partir dos estudos de dosagem, utilizando os equipamentos disponíveis no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG. O processo de produção corresponde à obtenção da homogeneidade dos materiais empregados, a um correto adensamento e a uma cura adequada.

A homogeneidade do concreto foi garantida através do processo de mistura de seus constituintes, utilizando-se uma betoneira durante um período que variou de três a cinco minutos.

O adensamento buscou eliminar os vazios da massa, a fim de aumentar a resistência e a impermeabilidade. Para tal, utilizou-se um vibrador de imersão com um curto tempo de vibração nos corpos-de-prova de dimensões 10 X 20 cm e adensamento manual nos corpos-de-prova de dimensões de 5 X 10 cm, de forma a evitar a segregação dos compostos do concreto.

A cura do concreto é feita após o adensamento, devendo-se tomar um conjunto de medidas destinadas a evitar a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e que deverá reagir com o cimento, hidratando-o. A cura evita o fenômeno da retração, que é responsável pelo aparecimento de fissuras e trincas (COUTO et al, 1991).

Os corpos-de-prova ficaram à temperatura ambiente pelas primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida, onde permaneceram até a data dos ensaios de resistência à compressão aos 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias.

5.3 Análise do concreto fresco

A avaliação do concreto fresco foi feita através do estudo da trabalhabilidade, por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone ou Teste de Slump normalizado pela NBR 7223 (ABNT, 1992), que permite determinar a consistência do material. Este método consiste no enchimento de um molde tronco-cônico com concreto e, em seguida, o molde é vagarosamente suspenso. Em decorrência do peso próprio, o concreto é abatido na ausência do molde e a diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto. Ressalta-se que a qualidade e quantidade dos aglomerantes alteram esta medida.

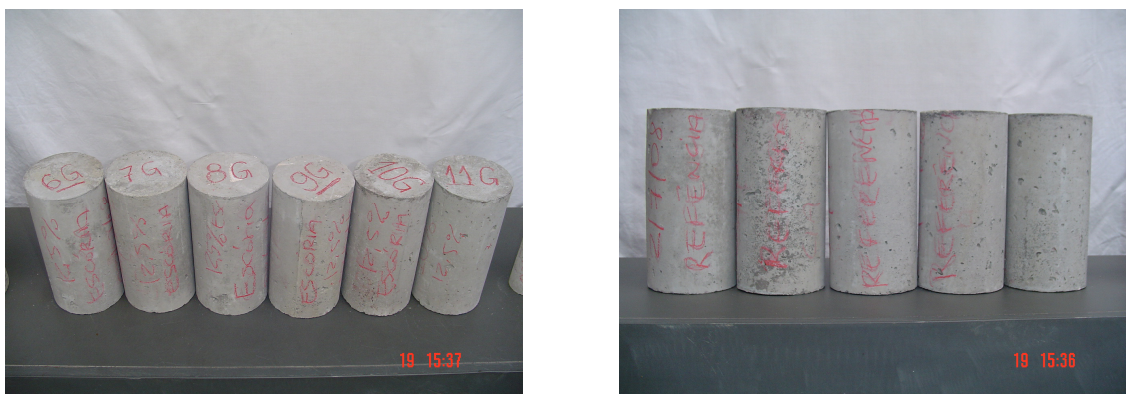
Este ensaio é muito utilizado tanto em laboratório, durante a fase de dosagem, como em canteiro de obras, por sua facilidade de execução.

A determinação da trabalhabilidade visou avaliar a influência do fator água/cimento de 0,50, aliado ao aditivo proposto, a fim de verificar o abatimento e a performance do concreto, assim como garantindo a hidratação e a homogeneização da pasta.

5.4 Análise do concreto no estado endurecido

5.4.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Foram moldados corpos-de-prova de forma cilíndrica de (5 x 10)cm e (10 x 20)cm, que permaneceram por 28 dias em cura úmida. De acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003), os moldes de forma cilíndrica de (5 x 10)cm foram preenchidos com concreto em camadas e adensadas manualmente, já os moldes de forma cilíndrica de (10 x 20)cm foram adensados com vibrador mecânico tipo mangote de diâmetro às dimensões características dos agregados (Figura 5.1).



(a) Corpos-de-prova de (10 x 20)cm



(b) Corpos-de-prova de (5 x 10) cm

Figura 5.1 – Corpos-de-prova

5.4.2 Resistência à compressão

O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto está normalmente associado às reações de hidratação da pasta.

A resistência à compressão do concreto geralmente é considerada como sendo o parâmetro mais importante. Diversas outras propriedades do concreto estão relacionadas com a resistência à compressão. No projeto de estruturas de concreto o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No estudo da utilização da escória de alto-forno como substituinte de parte do cimento foi determinada a propriedade mecânica de resistência à compressão de acordo com NBR 5739 (ABNT, 1994).

A resistência à compressão foi, portanto obtida pelo rompimento dos corpos-de-prova aos 28 dias, idade considerada padrão para este tipo de ensaio, conforme Figura 5.2. Para tal, foi tomado o cuidado para que os corpos-de-prova apresentassem baixa umidade, já que em ensaios de compressão, observa-se que corpos-de-prova secos apresentam resistências da ordem de 20 a 25% maiores que corpos de prova correspondentes, ensaiados em condição saturada (FURQUIM,2006).

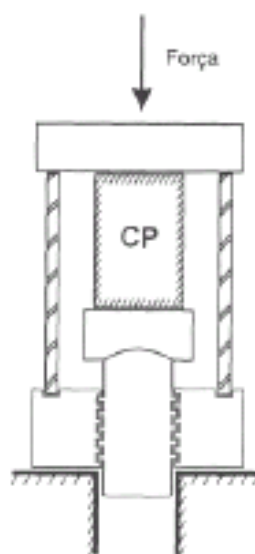


Figura 5.2 – Ruptura do Concreto à Compressão

5.4.3 Absorção da água do concreto

O concreto apresenta poros de diferentes tipos e tamanhos, distribuídos aleatoriamente na microestrutura. Esta porosidade tem implicação nas propriedades mecânicas e possibilita o ingresso de fluidos capazes de provocar a degradação do concreto. Logo, a facilidade que um determinado fluido tem em penetrar e se deslocar no interior do concreto influi na sua durabilidade.

A absorção do concreto pode ser avaliada através de dois métodos de ensaio normalizados: por imersão, segundo a NBR 9778 (ABNT, 1990); e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 1990). Na pesquisa de utilização de escória em substituição de parte do cimento, foi realizado o método de ensaio de absorção por imersão, que avalia o volume total de poros, conforme Figura 5.3.

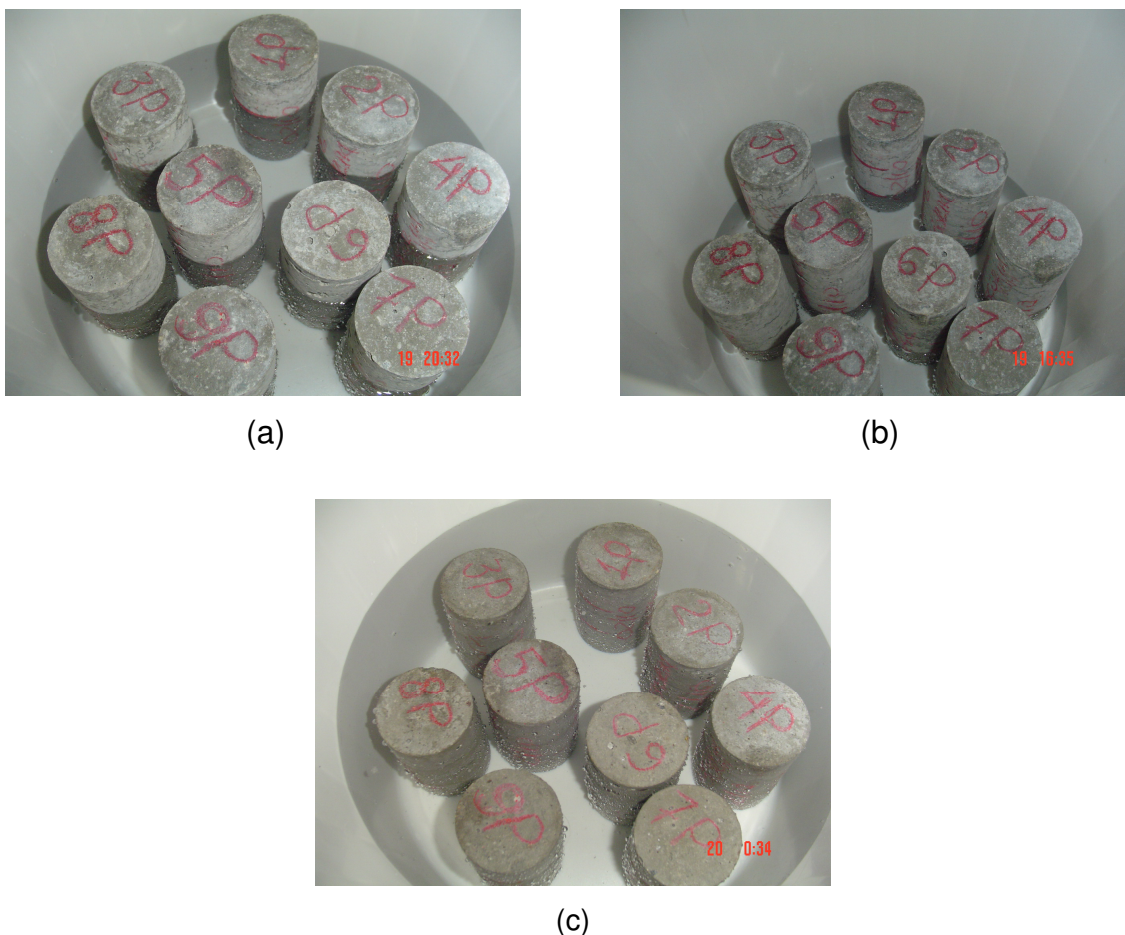


Figura 5.3 – Corpos-de-provas no ensaio de absorção (a) nas 4 primeiras horas (b) nas primeiras 8 horas (c) nas primeiras 12 horas, totalmente submersos

5.4.4 Ataque por ácido ao concreto

A água, quando não contém substâncias nocivas, é de grande importância para o concreto, principalmente na fase de cura. Porém, quando contém algumas substâncias químicas, pode reagir com constituintes da pasta de cimento, formando compostos expansivos que geram tensões internas, podendo provocar a fissuração e desagregação, reduzindo significativamente a resistência e rigidez do concreto. Se a ação do ataque for suficientemente forte, poderá comprometer mesmo o concreto de melhor qualidade ao longo do tempo.

Neste estudo, analisou-se o ataque do concreto de forma acelerada, para o concreto de referência e concretos com variações na substituição de parte do cimento por escória de alto-forno. Desta maneira, os corpos-de-prova foram

imersos numa solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentração de 2,5% (SULFAL – Química Limitada, lote: RU-SQL: 0905414/COMIMIUQ-2009/36), conforme Figuras 5.4 e 5.5, por um período de 7(sete) dias.



(a) Recipientes empregados



(b) Ácido utilizado no ataque

Figura 5.4 – Dados do ácido utilizado no ataque do concreto



(a) Corpos-de-prova de (5 x 10)cm

(b)



b) Corpos-de-prova de (10 x 20)cm

Figura 5.5 – Corpos-de-prova imersos em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 2,5%.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização dos materiais

A seguir são descritos os materiais empregados para a fabricação dos concretos, bem como os ensaios adotados para a caracterização dos mesmos.

6.1.1 Cimento

O cimento utilizado na elaboração dos traços de concreto foi o cimento CP III-32 (Lafarge). Este cimento foi escolhido por tratar-se de um material de fácil disponibilidade no mercado e, principalmente, por ser o cimento geralmente utilizado na produção dos elementos construtivos, bem como da adição de escória de alto-forno na sua fabricação.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização, para o cimento adotado na realização dos ensaios experimentais.

Tabela 6.1: Caracterização do Cimento CP III-32

ENSAIOS/ MATERIAIS	CIMENTO CP III - 32	NORMA
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,1	NBR 7251
Massa Específica ((Kg/dm ³)	3,0	NBR 9776
Finura - Método de Blaine (m ² /Kg)	290,0	NBR 11579
Finura - Peneira nº 200 - 75µm (%)	2,5	NBR 11579

6.1.2 Escória de alto-forno

O conhecimento da composição química da escória é de fundamental importância para um melhor entendimento das reações que acontecerão a partir da sua utilização. Na Tabela 6.2 pode-se verificar a caracterização da escória de alto-forno granulada utilizada no estudo.

Tabela 6.2: Caracterização da escória de alto-forno

ENSAIOS/ MATERIAIS	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	NORMA
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,17	NBR 7251
Massa Específica ((Kg/dm ³)	2,6	NBR 9776
Finura - Método de Blaine (m ² /Kg)	180,0	NBR 11579
Finura - Peneira nº 200 - 75µm (%)	29,2	NBR 11579

6.1.3 Agregados

Os agregados utilizados nos ensaios foram caracterizados de acordo com normas da ABNT, conforme especificado nas Tabelas 6.3 e 6.4.

- **Areia lavada média**

Tabela 6.3: Caracterização da Areia (NBR 7217/87).

PENEIRA	MATERIAL RETIDO (g)	RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)
9,5	4	0,8	0,8
(6,3)	8	1,6	2,4
4,8	5	1	3,4
2,4	30	6	9,4
1,2	80	16	25,4
0,6	195	39	64,4
0,3	114	22,8	87,2
0,15	44	8,8	96
FUNDO	20	4	100
	500	100	

ENSAIOS/ MATERIAIS	AREIA LAVADA	NORMA
Módulo de Finura	2,9	NBR 7217
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8	NBR 7217
Massa Específica (Kg/dm ³)	2,6	NBR 9776
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,43	NBR 7251
Impurezas Orgânicas (ppm)	<300	NBR 7220
Teor de Materiais Pulverulentos (%)	0,27	NBR 7219
Teor de Argila e Torrões (%)	4,8	NBR 7218

- **Brita de gnaiss**

Tabela 6.4: Caracterização da Brita (NBR 7217/87)

PENEIRA	MATERIAL RETIDO (g)	RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)
19	0	0	0
-12,5	0	0	0
9,5	92	9,2	9,2
-6,3	300	30	39,2
4,8	271	27,1	66,3
2,4	222	22,2	88,5
1,2	33	3,3	91,8
0,6	20	2	93,8
0,3	13	1,3	95,1
0,15	12	1,2	96,3
FUNDO	37	3,7	100
	1000	100	

ENSAIOS/ MATERIAIS	BRITA DE GNAISSE	NORMA
Módulo de Finura	5,8	NBR 7217
Dimensão Máxima Característica - Brita 0 (mm)	12,5	NBR 7217
Massa Específica (Kg/dm ³)	2,72	NBR 9776
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,56	NBR 7251

6.1.4 Aditivo

No estudo foi utilizado aditivo superplastificante de 1,5%, na quantidade especificada pelo fabricante.

6.1.5 Água

A água utilizada foi proveniente da concessionária COPASA na cidade de Belo Horizonte.

6.2 Dosagem do Concreto

O concreto adotado neste trabalho resultou de pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, com base nos métodos de dosagem do ACI e IPT. A definição do traço adotado levou em consideração alguns parâmetros para a produção de um concreto com características de durabilidade nas condições impostas pelo meio agressivo.

Para tal, dosou-se um concreto de referência, que servirá de comparativo aos demais concretos. Estes últimos dosados com diferentes porcentagens de escória de alto-forno.

A resistência de dosagem aos 28 dias foi estabelecida como 30 MPa. Além da resistência, o concreto deveria apresentar uma baixa absorção, de forma a dificultar a penetração do líquido agressivo. Estas duas características foram alcançadas adotando-se um fator água/cimento de 0,50 e alto consumo de cimento (CP III) de 370kg/m³.

Devido ao baixo fator água/cimento adotado, foi necessária a utilização de um aditivo plastificante polifuncional, de forma a garantir uma boa trabalhabilidade do concreto fresco. Assim, foram calculados os demais constituintes do concreto de referência, sendo o traço de 1:2:3 e relação de água/cimento de 0,50.

Determinado o traço do concreto de referência, dosou-se os concretos com variações da quantidade de cimento substituído por escória de alto-forno,

conforme Tabela 6.5. Para tal, foram dosados os concretos com as seguintes quantidades de escória de alto-forno:

- Concreto com 12,5 % de substituição do cimento por escória de alto-forno;
- Concreto com 20,0 % de substituição do cimento por escória de alto-forno;
- Concreto com 35,0 % de substituição do cimento por escória de alto-forno.

Tabela 6.5: Tabela de traços

CONCRETO **	NOMECLATURA	FATOR A/C	CONSUMO DE MATERIAIS POR M ³ DE CONCRETO					
			Cimento (Kg/m ³)	Escória de alto-forno (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Brita (Kg/m ³)	Água (L/m ³)	Aditivo (%)*
Concreto Referência	CR	0,5	370,00	0,00	740,00	1110,00	185,00	1,50
Concreto c/ 12,5% escória	CE 12,5	0,5	323,75	46,25	647,50	971,25	161,88	1,50
Concreto c/ 20,0% escória	CE 20,0	0,5	296,00	74,00	592,00	888,00	148,00	1,50
Concreto c/ 35,0% escória	CE 35,0	0,5	240,50	129,50	481,00	721,50	120,25	1,50

* Quantidade especificada pelo fabricante ** Utilizou-se CP III (Lafarge)

6.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi avaliada pelo rompimento dos corpos-de-prova aos 28 dias, de concretos com e sem substituição de parte do aglomerante, de maneira a analisar a influência da substituição na resistência e durabilidade do concreto.

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos conforme o método NBR 5739/94 da ABNT, em corpos-de-prova cilíndricos. O comportamento da resistência à compressão do concreto foi analisado nas idades de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias e antes do ataque. A relação água/cimento utilizada foi de 0,50 e foi tomado como referência o concreto sem adição de escória, conforme Tabela 6.6 e Figura 6.1.

Tabela 6.6: Resultados da resistência à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias antes do ataque

CONCRETO	Nomeclatura	RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 dias	28 dias
Concreto Referência	CR	20,0	30,0
Concreto c/ 12,5% escória	CE 12,5	20,0	26,0
Concreto c/ 20,0% escória	CE 20,0	18,0	25,0
Concreto c/ 35,0% escória	CE 35,0	18,6	23,0

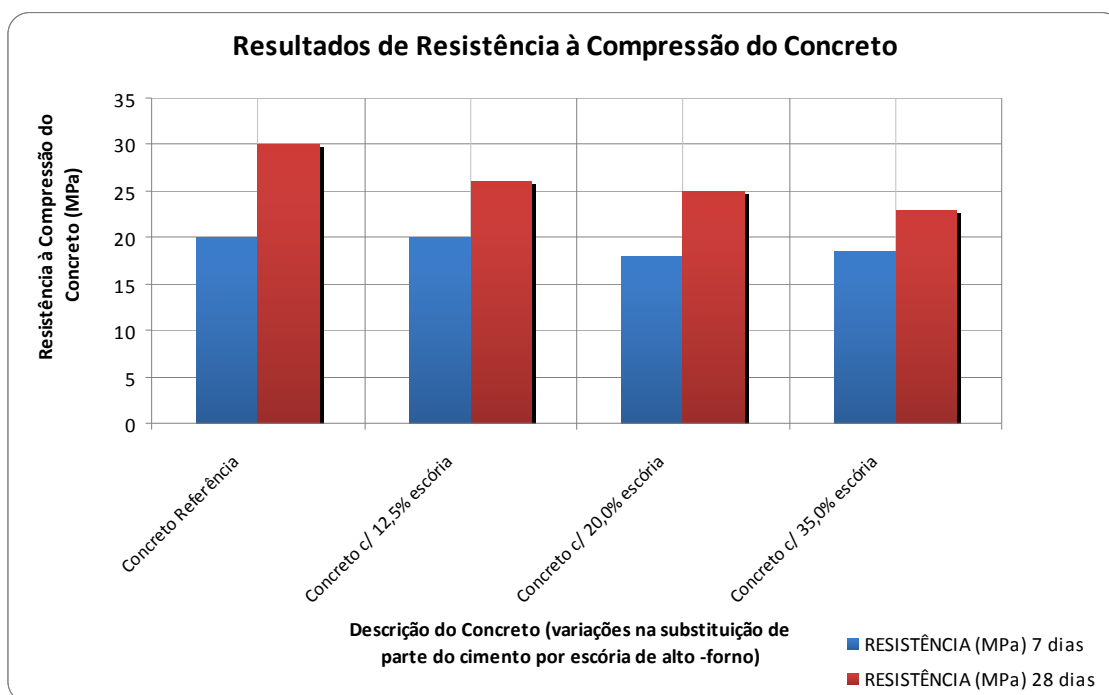


Figura 6.1 – Resultados à Compressão dos concretos antes do ataque

Analisando os resultados de resistência à compressão obtidos, foi verificado que em comparação ao concreto sem adição de escória (concreto de referência - CR) os traços com adição de escória de alto-forno apresentaram resistência à compressão menores que o concreto sem adição de escória de alto forno; esses resultados são apresentados na tabela 6.6.

Observa-se que os concretos com adição de escória de alto-forno não atingiram, aos 28 dias, resistência de 30 MPa (resistência de dosagem). A resistência à compressão dos concretos com adição de escória de alto-forno apresentou queda de 13%, 17% e 23% na idade de 28 dias, para as dosagens com substituições de cimento por escórias nas porcentagens de 12,5%, 20% e

35% respectivamente, se comparadas com o concreto de referência, conforme Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Comparativo da redução na resistência dos concretos na substituição do cimento por escória de alto-forno

Concreto	Nomeclatura	Resistência (Mpa) aos 28 dias	Redução da resistência (%)
Concreto Referência	CR	30,0	-
Concreto c/ 12,5% escória	CE 12,5	26,0	13
Concreto c/ 20,0% escória	CE 20,0	25,0	17
Concreto c/ 35,0% escória	CE 35,0	23,0	23

Para melhor compreensão dos resultados apresentados a seguir, adotou-se a seguinte nomenclatura para os corpos-de-prova, conforme tabela 6.8.

Tabela 6.8: Controle dos Corpos-de-prova

CORPOS DE PROVAS		
NUMERAÇÃO (CONTROLE)	TAMANHO	DESCRIÇÃO
CR-1	10 x 20	Concreto de referência
CR-2	10 x 20	Concreto de referência
CR-3	10 x 20	Concreto de referência
CR-4	10 x 20	Concreto de referência
CR-5	10 x 20	Concreto de referência
CE 12,5%-1	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 12,5%-2	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 12,5%-3	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 12,5%-4	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 12,5%-5	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 12,5%-6	10 x 20	Concreto c/ 12,5% de escória de alto-forno
CE 20,0%-1	5 x 10	Concreto c/ 20% de escória de alto-forno
CE 20,0%-2	5 x 10	Concreto c/ 20% de escória de alto-forno
CE 20,0%-3	5 x 10	Concreto c/ 20% de escória de alto-forno
CE 20,0%-4	5 x 10	Concreto c/ 20% de escória de alto-forno
CE 20,0%-5	5 x 10	Concreto c/ 20% de escória de alto-forno
CE 35,0%-1	5 x 10	Concreto c/ 35% de escória de alto-forno
CE 35,0%-2	5 x 10	Concreto c/ 35% de escória de alto-forno
CE 35,0%-3	5 x 10	Concreto c/ 35% de escória de alto-forno
CE 35,0%-4	5 x 10	Concreto c/ 35% de escória de alto-forno

6.4 Influência da Absorção antes do ataque com ácido

Em função do ataque que o concreto sofreria, foi necessária a avaliação da absorção do concreto através do método de ensaio normalizado por imersão, segundo a NBR 9778 (ABNT, 1990). A análise da absorção foi feita de acordo com a proporção de escória de alto-forno adotada.

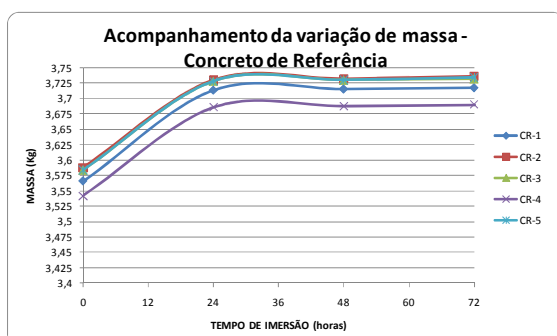
6.4.1 Absorção do concreto de referência antes do ataque com ácido

A absorção do concreto de referência obtida, antes do ataque por ácido, foi na média de 4,2%, conforme Tabela 6.9 e Figura 6.2.

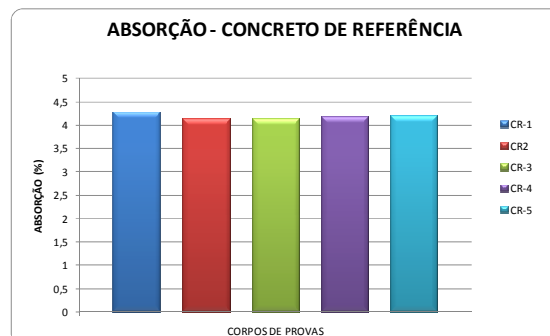
Tabela 6.9: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência antes do ataque com ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS-DE-PROVA		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
Referência	CR-1	3,5657	3,714	3,716	3,718	4,3	4,2
	CR-2	3,5877	3,73	3,732	3,736	4,1	
	CR-3	3,5837	3,728	3,73	3,732	4,1	
	CR-4	3,5417	3,686	3,688	3,69	4,2	
	CR-5	3,5837	3,728	3,73	3,734	4,2	



(a)



(b)

Figura 6.2 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência antes do ataque com ácido

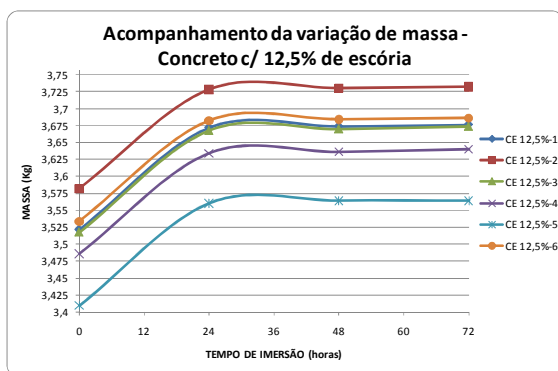
6.4.2 Absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido

A absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno obtida, antes do ataque por ácido, foi na média de 4,4%, conforme Tabela 6.10 e Figura 6.3.

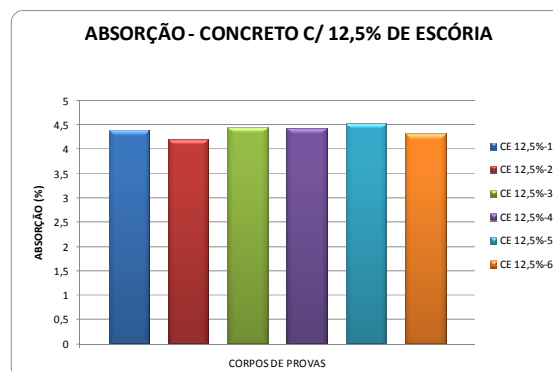
Tabela 6.10: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS-DE-PROVA		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 12,5% de escória	CE 12,5%-1	3,5217	3,672	3,674	3,676	4,4	4,4
	CE 12,5%-2	3,5817	3,728	3,73	3,732	4,2	
	CE 12,5%-3	3,5177	3,668	3,67	3,674	4,4	
	CE 12,5%-4	3,4857	3,634	3,636	3,64	4,4	
	CE 12,5%-5	3,4097	3,56	3,564	3,564	4,5	
	CE 12,5%-6	3,5337	3,682	3,684	3,686	4,3	



(a)



(b)

Figura 6.3 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

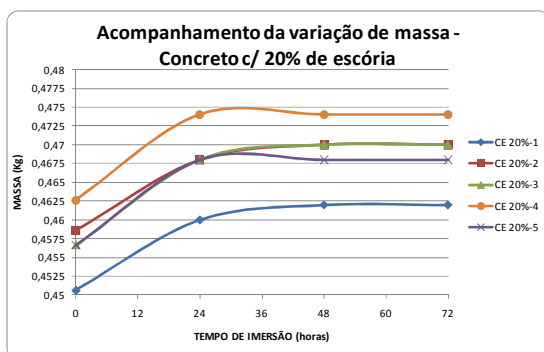
6.4.3 Absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido

A absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno obtida, antes do ataque por ácido, foi na média de 2,6%, conforme Tabela 6.11 e Figura 6.4.

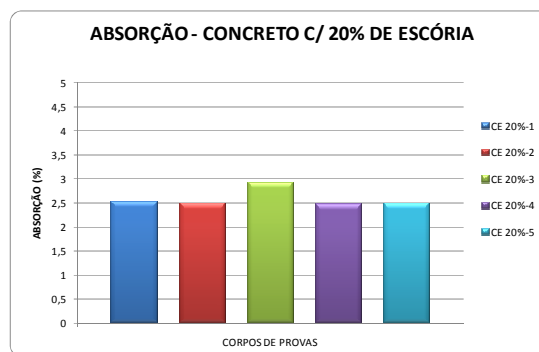
Tabela 6.11: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS-DE-PROVA		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 20% de escória	CE 20%-1	0,4506	0,46	0,462	0,462	2,5	2,6
	CE 20%-2	0,4586	0,468	0,47	0,47	2,5	
	CE 20%-3	0,4566	0,468	0,47	0,47	2,9	
	CE 20%-4	0,4626	0,474	0,474	0,474	2,5	
	CE 20%-5	0,4566	0,468	0,468	0,468	2,5	



(a)



(B)

Figura 6.4 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

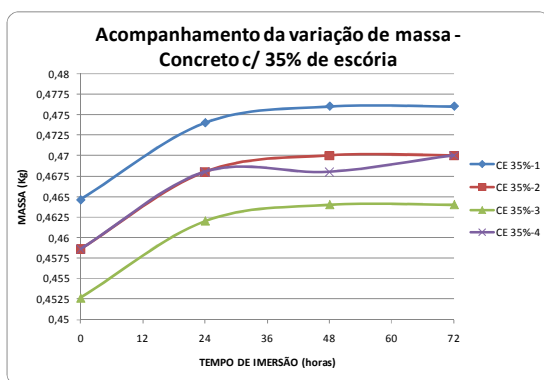
6.4.4 Absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno antes do ataque com ácido

A absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno obtida, antes do ataque por ácido, foi na média de 2,5%, conforme Tabela 6.12 e Figura 6.5.

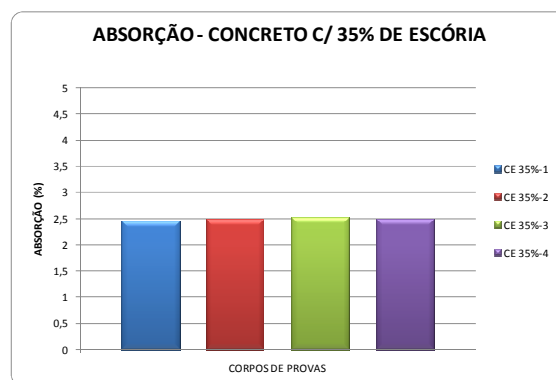
Tabela 6.12: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS-DE-PROVA		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 35% de escória	CE 35%-1	0,4646	0,474	0,476	0,476	2,5	2,5
	CE 35%-2	0,4586	0,468	0,47	0,47	2,5	
	CE 35%-3	0,4526	0,462	0,464	0,464	2,5	
	CE 35%-4	0,4586	0,468	0,468	0,47	2,5	



(a)



(b)

Figura 6.5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno antes do ataque por ácido

Analisando as Figuras 6.2(b), 6.3(b), 6.4(b) e 6.5 (b) calculou-se as médias das absorções dos concretos de diferentes proporções de escórias de alto-forno (0%; 12,5%; 20% e 30%), antes do ataque com ácido sulfúrico conforme Figura 6.6.

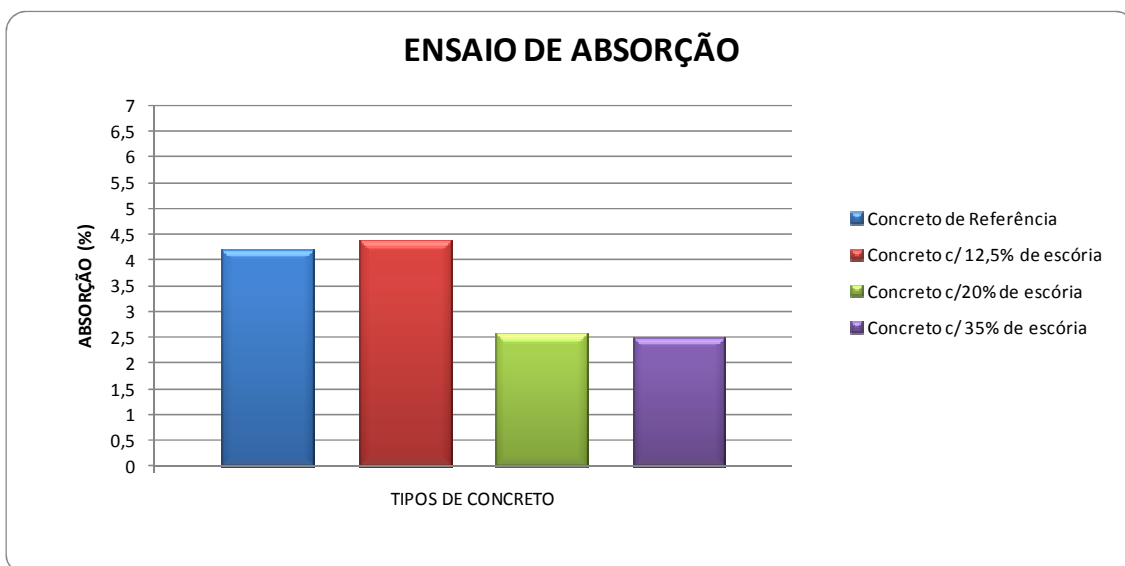


Figura 6.6 – Média dos resultados do ensaio de absorção antes do ataque com ácido sulfúrico a 2,5%

A partir destes resultados, observa-se que à medida que substituímos o cimento por escória de alto-forno, a absorção destes aumenta, e conseqüentemente a uma redução da durabilidade.

6.5 Influência da Absorção após ataque com ácido

Executado o ataque dos concretos, onde os corpos-de-prova ficaram imersos em ácido sulfúrico com concentração de 2,5% por um período de 07 (sete) dias, foi realizado o ensaio de absorção de forma a verificar as alterações quanto a capacidade de absorção dos concretos em estudo após o ataque propriamente dito.

Para a realização deste ensaio de absorção adotou-se dois corpos-de-prova para cada tipo de concreto, sendo um com a maior e o outro com a menor absorção por imersão antes do ataque.

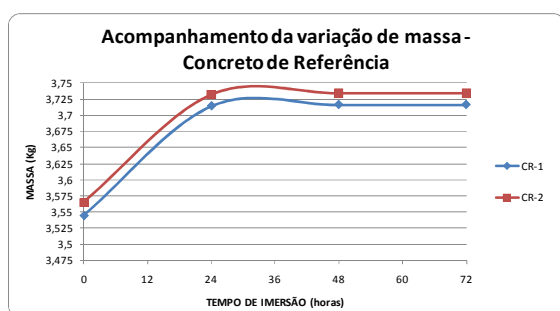
6.5.1 Absorção do concreto de referência após ataque com ácido

A absorção do concreto de referência obtida, após ataque por ácido, foi na média de 4,8%, conforme Tabela 6.13 e Figura 6.7.

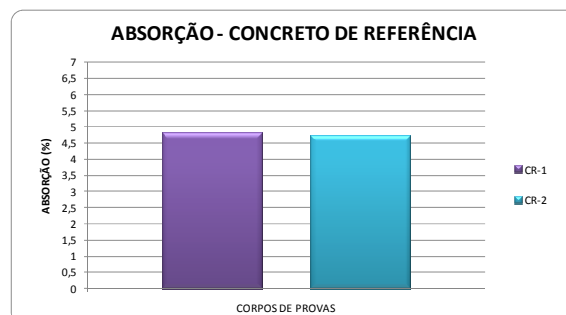
Tabela 6.13: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência após ataque com ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS DE PROVAS		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
Referência	CR-1	3,545	3,714	3,716	3,716	4,8	4,8
	CR-2	3,565	3,732	3,734	3,734	4,7	



(a)



(b)

Figura 6.7 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto de referência após do ataque com ácido

6.5.1 Absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno após ataque com ácido

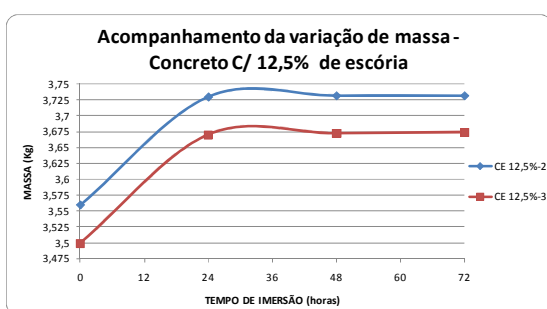
A absorção do concreto com 12,5% de escória de alto-forno obtida, após ataque por ácido, foi na média de 4,9%, conforme Tabela 6.14 e Figura 6.8.

Tabela 6.14: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno após ataque com ácido

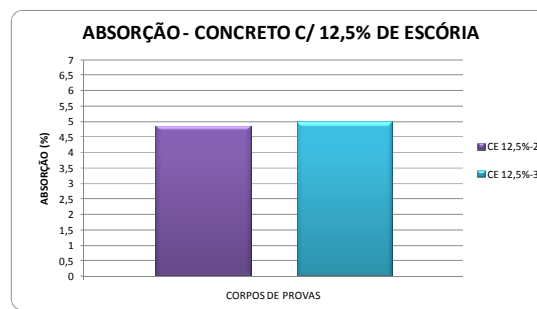
ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

CORPOS DE PROVAS		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 12,5% de escória	CE 12,5%-2	3,559	3,73	3,732	3,732	4,9	4,9
	CE 12,5%-3	3,499	3,67	3,672	3,674	5,0	



(a)



(b)

Figura 6.8 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 12,5% de escória de alto-forno após do ataque com ácido

6.5.1 Absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno após ataque com ácido

A absorção do concreto com 20% de escória de alto-forno obtida, após ataque por ácido, foi na média de 6,4%, conforme Tabela 6.15 e Figura 6.9.

Tabela 6.15: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno após ataque com ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

CORPOS DE PROVAS		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 20% de escória	CE 20%-3	0,442	0,47	0,47	0,47	6,3	6,4
	CE 20%-4	0,447	0,474	0,476	0,476	6,5	

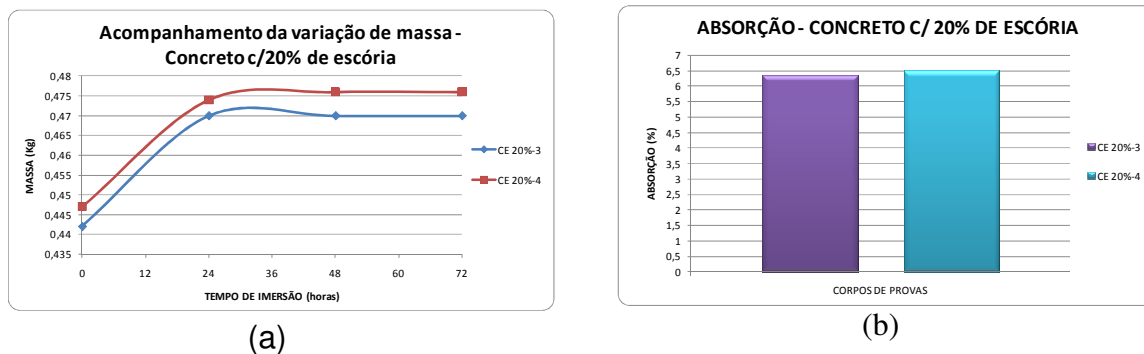


Figura 6.9 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 20% de escória de alto-forno após do ataque com ácido

6.5.1 Absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno após ataque com ácido

A absorção do concreto com 35% de escória de alto-forno obtida, após ataque por ácido, foi na média de 6,1%, conforme Tabela 6.16 e Figura 6.10.

Tabela 6.16: Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno após ataque com ácido

ACOMPANHAMENTO ENSAIOS

ENSAIO DE ABSORÇÃO - NBR 9778/1990 ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO							
CORPOS DE PROVAS		Período de imersão (horas)				ABSORÇÃO (%)	MÉDIA ABSORÇÃO (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)	0	24	48	72		
		MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)	MASSA (Kg)		
c/ 35% de escória	CE 35%-1	0,447	0,476	0,476	0,476	6,5	6,1
	CE 35%-3	0,439	0,464	0,464	0,464	5,7	

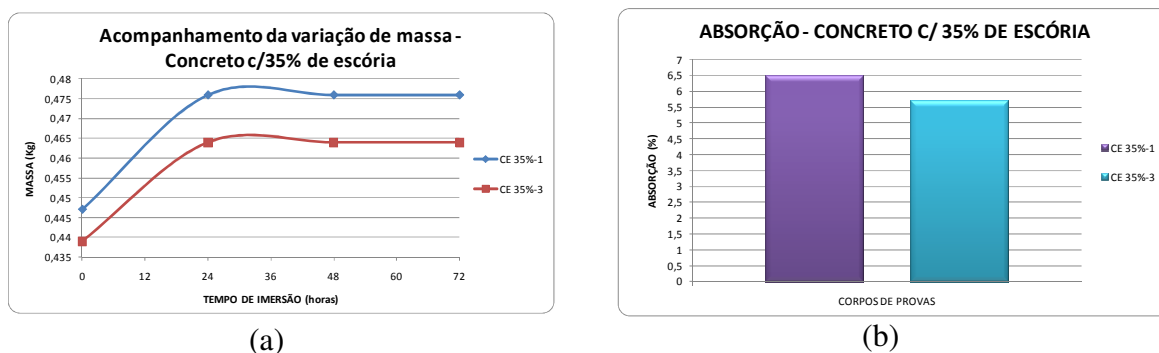


Figura 6.10 – Resultados do ensaio de absorção por imersão no concreto com adição de 35% de escória de alto-forno após do ataque com ácido

Analisando as Figuras 6.7(b), 6.8(b), 6.9(b) e 6.10 (b) calculou-se as médias das absorções dos concretos de diferentes proporções de escórias de alto-forno (0%; 12,5%; 20% e 30%) após ataque com ácido sulfúrico, conforme Figura 6.11.

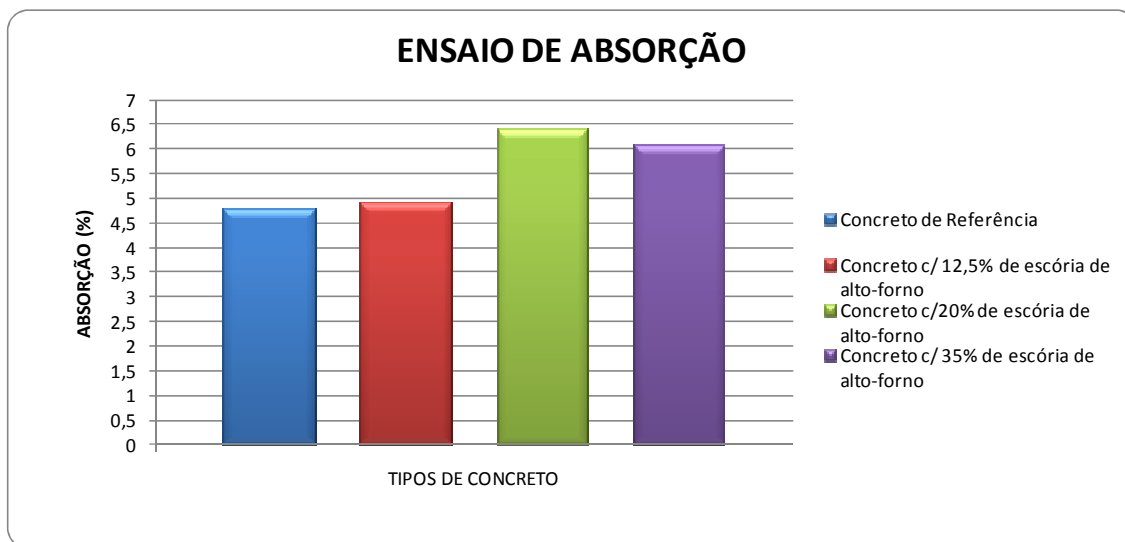


Figura 6.11 – Média dos resultados do ensaio de absorção após ataque com ácido sulfúrico a 2,5%

6.6 Análise comparativa da absorção antes e após ataque com ácido

A Tabela 6.17 apresenta um resumo comparativo dos resultados - médias dos resultados - do ensaio de absorção (NBR 9779/1990) para os diferentes tipos de concretos estudados, conforme as diferentes proporções de adição de escória de alto-forno.

Tabela 6.17: Comparativo das média dos resultados do ensaio de absorção por imersão nos concretos antes e após ataque com ácido

CONCRETO	ABSORÇÃO (%)	
	ANTES DO ATAQUE POR ÁCIDO	APÓS ATAQUE POR ÁCIDO
Concreto Referência	4,2	4,8
Concreto c/ 12,5% escória	4,4	4,9
Concreto c/ 20,0% escória	2,6	6,4
Concreto c/ 35,0% escória	2,5	6,1

A absorção menor que 10% é uma condição para a durabilidade do concreto e quando é inferior a 5% é considerado que o material tem uma baixa absorção (NEVILLE,1997).

6.6 Influência da Escória de alto-forno ao ataque ácido

A verificação da influência da escória de alto-forno ao ácido sulfúrico foi feita através da medida de perda de massa do concreto, com e sem substituição de parte do cimento, em corpos de prova imersos em ácido sulfúrico num período de 7dias, conforme Tabela 6.18.

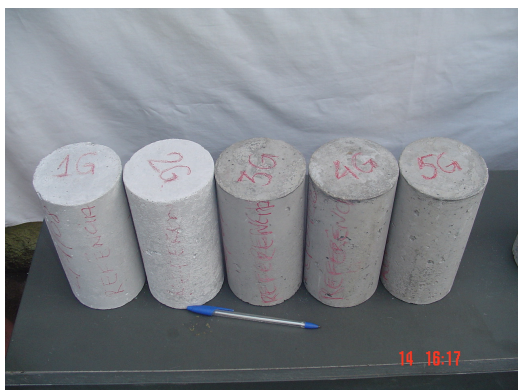
Tabela 6.18: Resultados de Perda de Massa

PERDAS DE MASSA				
CORPOS-DE-PROVA		ANTES ATAQUE MASSA (Kg)	APÓS ATAQUE MASSA (Kg)	PERDA DE MASSA (%)
TIPO DE CONCRETO	NUMERAÇÃO (CONTROLE)			
<i>Referência</i>	CR-1	3,545	3,537	0,23
	CR-2	3,565	3,557	0,22
<i>c/ 12,5% de escória</i>	CE 12,5%-2	3,559	3,551	0,22
	CE 12,5%-3	3,499	3,491	0,23
<i>c/ 20% de escória</i>	CE 20%-3	0,442	0,440	0,45
	CE 20%-4	0,447	0,445	0,45
<i>c/ 35% de escória</i>	CE 35%-1	0,447	0,445	0,45
	CE 35%-3	0,439	0,437	0,46

Pode-se observar, na Tabela 6.18, que para os concretos com escória de alto-forno apresentaram valores superiores de perda de massa comparado ao concreto sem adição de escória de alto-forno (concreto de referência). O uso da escória aumenta a perda de massa e comprova que estes concretos são mais susceptível ao ataque de ácido sulfúrico.

6.7 Inspeção Visual

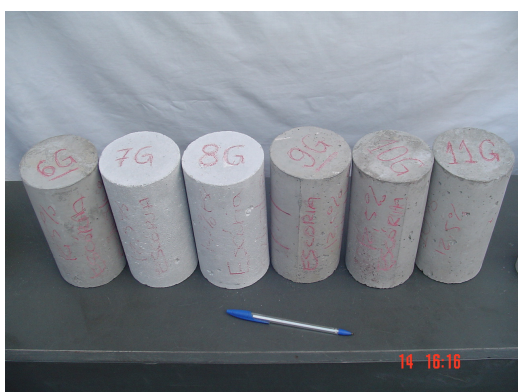
A deterioração do concreto com escória de alto-forno, quando submetido à imersão contínua pode ser observada na Figura 6.12. O ataque ácido gerou uma falta de coesão da pasta, fazendo com que se esfarelasse facilmente.



(a) Corpos-de-prova de (10 x 20)cm



(c) Corpos-de-prova de (5 x 10)cm



(b) Corpos-de-prova de (10 x 20)cm



(d) Corpos-de-prova de (5 x 10)cm

Figura 6.12 – Concreto submetido à imersão em ácido sulfúrico com concentração de 2,5% por 7 dias

A Figura 6.12 permite visualizar o processo de deterioração dos concretos diferentes porcentagens de substituição de parte do cimento por escória de alto-forno, submetido ao ciclo de imersão e secagem. O concreto submetido a este ataque, já com 07 (sete) dias, apresentou um aspecto de desagregação de seus componentes.

Comparando visualmente a deterioração final dos corpos-de-prova, entre os diferentes concretos estudados, observa-se que, mesmo mantendo o tempo de imersão do concreto na solução ácida, os concretos com adição de escória sofrem mais ao ataque ácido, principalmente em suas imperfeições, podendo desta forma comprometer a sua durabilidade.

7. CONCLUSÕES

A influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto foi avaliada através da comparação de um concreto de referência com concretos com substituição de parte do cimento por escória de alto-forno nas porcentagens de 12,5%, 20% e 35%. O concreto de referência apresentou uma resistência à compressão aos 28 dias de 30MPa e os concretos com substituição apresentaram aos 28 dias 26MPa, 25MPa e 23MPa, respectivamente, demonstrando que, mesmo com uma adição de 35% o concreto mantém uma resistência à compressão maior que 20MPa, resistência mínima estabelecida pela normalização brasileira para utilização em concreto estrutural.

A avaliação da durabilidade dos concretos, tanto o de referência quanto dos concretos com substituição de parte do cimento por escória de alto-forno, submetidos a ataque químico foi feita através de ensaios de absorção, antes e após ataque por ácido sulfúrico, numa concentração de 2,5%. Os resultados dos ensaios de absorção antes do ataque foram: concreto de referência 4,2% e concretos com substituição 4,4%, 2,6% e 2,5%. Após ataque químico, o concreto de referência teve uma absorção de 4,8% e os demais concretos de 4,9%, 6,4% e 6,1%, ou seja, todos apresentaram absorção abaixo dos 10% preconizados por pesquisas de materiais visando garantir a durabilidade do concreto.

A perda de massa após ataque químico do concreto de referência foi de 0,22%, enquanto os concretos com diferentes proporções de escória de alto-forno, tiveram perdas de 0,23%; 0,45% e 0,46%, respectivamente, demonstrando que a perda de massa de 0,23% do concreto com substituição de escória de alto-forno na porcentagem de 12,5% se situa bem próxima ao concreto de referência, após ser submetido ao ataque por ácido sulfúrico.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto, dos ensaios de absorção antes e após ataque químico e as perdas de massa dos concretos decorrentes do ataque, pode-se concluir que o concreto com substituição de 12,5% é o mais indicado por apresentar uma

resistência à compressão de 26MPa, uma absorção de 5% e não ter uma perda de massa significativa comparativamente ao concreto de referência.

Os resultados obtidos permitem comprovar que a metodologia proposta, visando ampliar pesquisas em materiais com o enfoque na durabilidade, atende à demanda de reinserção de resíduos em processos produtivos, ao confirmar a potencialidade da escória de alto-forno por suas características e propriedades. Uma vez que, as escórias de alto-forno finamente divididas e em presença de umidade, ao reagirem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento Portland, formam compostos com propriedades aglomerantes.

Este estudo está em consonância com as diretrizes contemporâneas de sustentabilidade, que vêm sendo amplamente discutidas em foros nacionais e internacionais desde a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente em Estocolmo em 1972.

Pode-se concluir também, que a interface entre as diversas áreas do conhecimento representa uma condição fundamental para atender às questões econômicas, culturais e sociais visando uma sociedade igualitária e sustentável.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12654: Concreto – Controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2005
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo e graúdo. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7219: Determinação do teor de materiais pulverulentos. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7220: Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: Determinação da massa unitária. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados através do frasco de Chapman. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1990.
15. CASELATO, Lucila – Ações institucionais da siderurgia brasileira para disseminação do uso das escórias de aciaria – Rio de Janeiro – Novembro/2004.
16. FURQUIM, Paulo Ricardo de Vargas – Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais. Dissertação de Mestrado, Santa Maria RS, 2006.
17. IBS (Instituto Brasileira de Siderurgia), SIDERURGIA BRASILEIRA - Relatório de Sustentabilidade 2007, Concepção AMCE Negócios Sustentáveis.
18. IBS (Instituto Brasileira de Siderurgia), SIDERURGIA BRASILEIRA - Relatório de Sustentabilidade 2008, Concepção AMCE Negócios Sustentáveis.

19. MARTINS, Israel Rodrigo de Freitas – Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de borracha de Pneu – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia - Ilha Solteira, 2005.
20. MASSUCATO, Carlos José – Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto. Dissertação de Mestrado, Campinas SP – Dezembro/2005.
21. MEHTA, P.K. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, São Paulo: Editora Pini Ltda, 573p. 1994.
22. NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. Cement and Concrete Research, vol. 34, nº 8, p. 1275-1296, 2004.
23. POSSAN, Edna – Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado / Possan Edna – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.
24. RIBEIRO, C. C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. Materiais de Construção Civil, 2ª ed. Revisada. Editora UFMG, 103p, 2006.
25. RIBEIRO, C. C.; STARLING, T, PINTO, J.D.S. Estudo do potencial pozolânico da escória de alto-forno. 43ª Reunião Anual da SBPC - Rio de Janeiro/RJ - Jul/1991.
26. SILVA, Alessandro Leonardo – Reciclagem de Escória Cristalizada para a Produção de Argamassas. Dissertação de Mestrado, Itajubá – Dezembro/2006.
27. VAL, Júlio Gomes – Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto submetido a meio quimicamente agressivo. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte – Dezembro/2007.
28. WESSELING, Diego Henrique - Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais / Diego Henrique Wesseling – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005.