



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES
NORMATIVAS RELATIVAS À PRODUÇÃO
DE CONCRETO NO BRASIL:
UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA**

Gustavo Celso da Fonseca

Belo Horizonte

2010

**ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES
NORMATIVAS RELATIVAS À PRODUÇÃO
DE CONCRETO NO BRASIL:
UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA**

Gustavo Celso da Fonseca

Gustavo Celso da Fonseca

**ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES
NORMATIVAS RELATIVAS À PRODUÇÃO
DE CONCRETO NO BRASIL:
UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Construção Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios

Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2010

F676a	<p>Fonseca, Gustavo Celso da Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil [manuscrito] : uma abordagem epistêmica / Gustavo Celso da Fonseca. – 2010. 105 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Abdias Magalhães Gomes.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>1. Engenharia Civil – Teses. 2. Materiais de construção – Teses. 3. Concreto – Teses. I. Gomes, Abdias Magalhães. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia III. Título.</p> <p>CDU: 666.97 (043)</p>
-------	--

GUSTAVO CELSO DA FONSECA

**ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES NORMATIVAS
RELATIVAS À PRODUÇÃO
DE CONCRETO NO BRASIL:
UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA**

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

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2010

Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes (DEMC/UFMG)

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

Prof. Dr. Eduardo Chahud (DEMC/UFMG) (FEA/FUMEC)

À Bethânia e Ana Luiza

AGRADECIMENTOS

Ao único que é digno de receber toda a honra, o Criador da vida e sustentador do universo, o Senhor Deus.

À minha querida esposa Maria Bethânia, por seu incansável apoio e pela decisão de caminhar mais esta jornada ao meu lado, por tantas vezes abrindo mão do tempo e do próprio bem-estar em prol desta conquista.

À amada e tão desejada filha Ana Luiza, que mesmo antes de vir ao mundo é minha fonte de inspiração e motivação para continuar.

Aos meus queridos pais Afonso e Ivana, pelo eterno legado dos valores essenciais que norteiam minha vida e profissão, pelo apoio incondicional no presente e pela fé em um futuro além das possibilidades.

Aos irmãos Rodrigo, Carolina e Cristiana, ao Moisés e Beatriz, a todos os familiares e amigos, que sempre estiveram presentes com palavras e atitudes de incentivo e bom ânimo.

Ao Ricardo Djahjah, pela valiosa contribuição nos artigos e textos em inglês.

Ao digníssimo professor e orientador Abdias, pela habilidade em fazer deste trabalho uma agradável jornada pelo mundo do conhecimento, conduzindo o processo com a sabedoria de um mestre e a simplicidade de um amigo.

Aos mestres, doutores e funcionários do DEMC e aos colegas de mestrado, que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e concretização deste projeto.

Aos colegas do TJMG, pelo companheirismo, pela troca de experiências e apoio mútuo, fatores tão importantes para o sucesso deste trabalho.

RESUMO

As adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas, sendo grande parte delas composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termelétricas, indústrias e mineradoras – como a sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto-forno e filler.

Historicamente consideradas como resíduos sólidos, as escórias siderúrgicas adquiriram uma nova conotação nos mercados de todo o mundo em função de seu grande potencial de reutilização como matéria-prima ou insumo para outros processos. A produção de escórias de alto-forno no Brasil é absorvida de forma quase exclusiva pelas indústrias cimenteiras, para as quais se destina a maior parte do volume de escórias produzidas, para a fabricação de cimento.

As exigências impostas pelas normas brasileiras preconizadas pela ABNT – que estabelece os critérios de preparo, controle e recebimento para o concreto e também define os parâmetros de aceitação dos cimentos contendo adições – são controversas e representam obstáculos para o uso sustentável das escórias. Concreteiras, consumidores e empresas beneficiadoras de escórias em geral se amparam em normas internacionais que reconhecem o uso das escórias como adição mineral diretamente ao concreto, enquanto as normas brasileiras restringem seu uso apenas como componente a ser incorporado na fabricação de cimento.

Tendo-se em foco a prática mundialmente adotada da utilização de escórias de alto-forno diretamente ao concreto como substitutivo parcial ao cimento Portland, sob a ótica do desenvolvimento sustentável e da durabilidade das construções, faz-se necessária uma análise crítica comparada da estrutura dos setores produtivos de cimento e concreto, bem como das disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil e as implicações a serem geradas no mercado da construção civil e na sociedade como um todo.

Palavras-chave: adições minerais, escória granulada de alto-forno, concreto, cimento Portland, sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of mineral admixtures as input for civil construction has been increasing at a fast pace in the last decades and most of them derive from steel plants, thermoelectric power plants and industries – such as silica fume, fly ash, blast-furnace slags and filler.

Historically treated as solid waste, metallurgical slags are now valued in markets worldwide due to their potential for reuse as raw material or as input for other processes. Blast-furnace slag production in Brazil is almost exclusively absorbed by the cement industry.

The demands imposed by the Brazilian standards recommended by the ABNT – which establishes the criteria for preparation, control and delivery of concrete and defines the parameters of acceptance of cements containing additions – are controversial and represent obstacles to the sustainable use of slags. Concrete producers and slag processors in Brazil keep to international standards that acknowledge the use of slags as mineral admixtures directly to concrete, while Brazilian standards allow their use only as a component to be incorporated in the cement manufacturing.

Considering the common international practice of adding blast furnace slags directly to concrete as a partial cement replacement, a critical analysis of the Brazilian concrete industry is indispensable from the standpoints of sustainable development and durability of constructions. Such analysis will encompass not only the configuration of the Brazilian cement and concrete industries, but also Brazilian regulations pertaining to the use of mineral admixtures in concrete manufacturing and the consequences of such regulations for the civil construction industry and for society as a whole.

Key words: mineral admixtures, blast-furnace slag, concrete, Portland cement, sustainability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	17
1.2. Organização do trabalho.....	17
1.3. Justificativa e relevância do tema.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE	20
2.1. Concreto	20
2.1.1. Definição e Histórico.....	20
2.1.2. Tipos de Concreto	21
2.1.3. Constituintes do Concreto	23
2.1.3.1. Cimento	23
2.1.3.2. Água	27
2.1.3.3. Agregados	28
2.1.3.4. Aditivos	30
2.1.3.5. Adições Minerais.....	33
2.2. Adições Minerais na Composição do Concreto.....	35
2.2.1. Histórico	35
2.2.2. Tipos de Adições Minerais	36
2.2.2.1. Pozolanas naturais	36
2.2.2.2. Cinzas Volantes	38

2.2.2.3.	Sílica Ativa	40
2.2.2.4.	Metacaulim.....	42
2.2.2.5.	Cinza de Casca de Arroz	43
2.2.2.6.	Filler	44
2.2.2.7.	Escória de Aciaria	45
2.2.2.8.	Escória Granulada de Alto-forno.....	46
2.2.3.	Aplicações das Adições Minerais em Obras de Concreto	48
2.3.	Influência das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto	50
2.3.1.	Influência das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto Fresco..	52
2.3.1.1.	Aspectos reológicos e exsudação.....	52
2.3.1.2.	Consumo de água.....	54
2.3.1.3.	Calor de hidratação.....	55
2.3.2.	Influência das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto Endurecido.....	57
2.3.2.1.	Resistência à compressão	57
2.3.2.2.	Resistência à tração	59
2.3.2.3.	Resistência à flexão.....	60
2.3.2.4.	Fluência ou deformação lenta.....	60
2.3.2.5.	Retração térmica.....	61
2.3.2.6.	Módulo de deformação	62
2.3.2.7.	Retração por secagem.....	63
2.3.3.	Efeitos das Adições Minerais na Durabilidade do Concreto	63
2.3.3.1.	Porosidade capilar e permeabilidade	63
2.3.3.2.	Resistência a sulfatos	64
2.3.3.3.	Ciclos de congelamento e descongelamento	65
2.3.3.4.	Reação álcali-agregado	66

2.3.3.5. Corrosão de armaduras	67
2.3.3.6. Carbonatação	68
2.3.3.7. Resistência ao fogo	68
2.4. Visão de Sustentabilidade	69
2.4.1. Construção Sustentável	69
2.4.2. Importância das Adições Minerais para o Desenvolvimento Sustentável.	70
3. ANÁLISE CRÍTICA	73
3.1. Produção Siderúrgica no Brasil	73
3.2. Indústria Cimenteira	74
3.3. Normas Brasileiras	76
3.3.1. Disposições Normativas sobre a Produção de Concreto	76
3.3.2. Disposições Normativas sobre a Composição de Cimentos	81
3.4. Normas Internacionais	83
3.5. Documentos Técnicos	85
3.6. Adições Minerais na Ótica da Sustentabilidade	87
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
4.1. Aspectos Técnicos	90
4.2. Aspectos ambientais	91
4.3. Aspectos mercadológicos	92
4.4. Recomendações Finais	93
5. PROPOSTA PARA NOVOS TRABALHOS	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de redução da exsudação na pasta de cimento pela adição de sílica ativa.....	42
Figura 2 - Granulação da escória.....	47
Figura 3 - Exsudação em concretos com sílica ativa	54
Figura 4 - Efeito da substituição de pozolana natural sobre o calor de hidratação de um cimento Portland.....	57
Figura 5 - Efeito do aumento de temperatura durante a cura no desenvolvimento da resistência à compressão em concretos	58
Figura 6 - Deformação lenta em concreto com e sem escória granulada de alto-forno, com relação tensão-resistência constante de 25%	61
Figura 7 - Influência das pozolanas no aumento da temperatura do concreto	62
Figura 8 - Resistência a sulfatos em argamassas com adição de escória	65
Figura 9 - Expansão média em função do tempo e da porcentagem de substituição de cinza de casca de arroz.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais tipos de concreto dosado em central e suas características....	23
Tabela 2 - Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil	26
Tabela 3 - Propriedades do concreto endurecido contendo CCA	59
Tabela 4 - Principais tipos de cimento produzidos no Brasil	75
Tabela 5 - Referências normativas da NBR 12655:1996 e NBR 12655:2006	78
Tabela 6 - Exigências químicas para os principais tipos de cimento Portland	82
Tabela 7 - Análise de Escória Moída Padrão	83
Tabela 8 - Gás carbônico incorporado (ECO_2) em diversas misturas de concreto ...	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

ACI – American Concrete Institute

Al_2O_3 – Óxido de alumínio (alumina)

ASTM – American Society for Testing and Materials

BC – Baixo Calor de Hidratação

BOF – Basic Oxygen Furnace (Forno a Oxigênio)

C_2S – Silicato dicálcico

C_3A – Aluminato tricálcico

C_3S – Silicato tricálcico

C_4AF – Ferroaluminato tetracálcico

$Ca(OH)_2$ – Portlandita

CAD – Concreto de alto desempenho

CaO – Óxido de cálcio

CH – Hidróxido de cálcio

CO_2 – Gás carbônico

CP – Cimento Portland

CPB – Cimento Portland Branco Estrutural

CPI – Cimento Portland Comum

CPII-E – Cimento Portland Composto com Escória

CPII-F – Cimento Portland Composto com Filler

CPIII – Cimento Portland de Alto Forno

CPII-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana

CPI-S – Cimento Portland Comum com Adição

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CSI – Cement Sustainability Initiative

ECO₂ – Embodied carbon dioxide (Gás carbônico incorporado)

FEA – Forno Elétrico a Arco

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

IBEC – Insumos Básicos Especiais para Construção Civil

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

K₂O – Óxido de potássio

MgO – Óxido de magnésio

Na₂O – Óxido de sódio

NBR – Norma Brasileira

RS – Resistente a Sulfatos

SiO₂ – Óxido de silício (sílica)

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento

SO₃ – Óxido de enxofre

USGS – United States Geological Survey

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção de concreto bem como os procedimentos para o seu controle de qualidade são regidos por normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e também por uma série de recomendações técnicas provenientes de empresas e órgãos ligados à construção civil, como cadernos de encargos, especificações e manuais diversos. Atualmente, a norma técnica da ABNT que estabelece os critérios de preparo, controle e recebimento para o concreto é a NBR 12655:2006, elaborada e revisada no Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB-18), pela Comissão de Estudo de Controle de Qualidade do Concreto, sendo esta formada por representantes dos setores envolvidos, como: produtores, consumidores, universidades, laboratórios e outros.

Tendo em vista a utilização de adições minerais – em especial a escória granulada de alto-forno – como substitutivo parcial ao cimento Portland, nota-se que a NBR 12655:2006, em seu texto atual, comete um grave equívoco na abordagem deste assunto, pois, ao fornecer a definição de concreto, suprime as adições minerais do texto da norma, eliminando a possibilidade da aplicação de escórias diretamente ao concreto.

A indústria cimenteira, por sua vez, canaliza quase toda a produção de escórias para as fábricas de cimento, afetando negativamente as condições de competição no mercado de concreto.

Diante dos fatos, uma análise crítica das disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil – com enfoque no tratamento dado às adições minerais – será feita à luz do desenvolvimento sustentável e da atual configuração das indústrias de cimento e concreto, no contexto da construção civil brasileira.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de demonstrar a importância do uso de adições minerais em substituição parcial ao cimento no concreto fabricado no Brasil e suas vantagens em termos técnicos, econômicos e ambientais, em contraponto com os malefícios decorrentes da vigência do texto atual da norma NBR 12655:2006 – que elimina a possibilidade das adições minerais diretamente ao concreto. Busca-se também destacar as consequências geradas na sociedade, à luz da ética do mercado concorrencial envolvendo interesses de grupos cimenteiros, concreteiras e produtores de concreto em geral.

1.2. Organização do trabalho

Para o desenvolvimento deste trabalho realiza-se, em primeiro lugar, uma pesquisa bibliográfica a respeito do concreto, destacando-se o papel de cada um de seus constituintes na sua composição. Na descrição destes componentes, uma ênfase especial é dada às adições minerais e seus diversos tipos, com destaque para a influência do uso das adições minerais nas propriedades do concreto em seus estados fresco e endurecido, bem como sua inegável importância ambiental para a construção sustentável.

Em seguida é realizada uma análise crítica comparada das disposições normativas sobre a produção de concreto no Brasil, tendo-se em foco as mudanças ocorridas na NBR 12655:2006, bem como as prescrições das normas brasileiras relacionadas à fabricação dos diversos tipos de cimentos compostos contendo adições. Normas internacionais de diversos países são citadas com o intuito de demonstrar que, além de ser uma prática comum, o uso de adições minerais é merecedor de atenção especial no tocante à sua regulamentação e ao estabelecimento de critérios de qualidade para a sua aplicação.

Esta análise crítica também aborda os dados mais relevantes com referência à produção siderúrgica brasileira e ao direcionamento de seus principais subprodutos (escórias de alto-forno) para a indústria cimenteira.

Ao final deste trabalho, após se demonstrar os benefícios do uso das adições minerais diretamente ao concreto através de resultados de testes e experimentos colhidos no Brasil e em outras partes do mundo, procura-se trazer à tona a reflexão sobre os efeitos negativos que a norma atual representa para a indústria do concreto no país e a necessidade de abertura de novos canais de discussão na comunidade científica e na sociedade sobre este relevante tema.

A análise crítica comparada e avaliação do estado da arte com referência ao uso de adições minerais no concreto são importantes no sentido de contribuir para o amadurecimento das posturas atualmente adotadas na comunidade técnica brasileira, as quais necessitam ser discutidas e revistas, sob a ótica da sustentabilidade, segurança e durabilidade das construções.

1.3. Justificativa e relevância do tema

No mundo atual, a incorporação de práticas de sustentabilidade na construção tornou-se um imperativo para todos os agentes da sociedade, tais como governos, consumidores, investidores, construtores e associações. De acordo com o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008), para ser sustentável, qualquer empreendimento humano deve atender, de modo equilibrado, não somente a requisitos de viabilidade econômica, justiça social e aceitação cultural, como também de adequação ambiental.

O uso de adições minerais na construção civil é um importante exemplo de prática sustentável, onde as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias, os quais seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando riscos de contaminação do solo e fontes de água (DAL MOLIN, 2005).

A utilização de resíduos – como as escórias de alto-forno – nos diversos campos da engenharia, traz benefícios ao meio-ambiente, pois representa uma redução da quantidade de material a dispor em aterros ou estocar em pilhas, como também uma diminuição significativa do consumo de recursos naturais primários e não renováveis, como brita, areia, calcário, rocha fosfática e outros. Soma-se a isso a possibilidade de

substituir parcialmente o clínquer (calcário calcinado) no processo de fabricação do cimento, reduzindo o consumo energético e as emissões de CO₂ na atmosfera.

Sabe-se que a incorporação de adições minerais em geral resulta na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, uma vez que modificam a estrutura interna do concreto no estado fresco. Essas adições trazem diversos benefícios que aumentam a durabilidade e resistência do concreto no estado endurecido, como: redução na porosidade capilar, diminuição das fissuras de origem térmica, melhoria na resistência a ataque por sulfatos, melhoria na resistência a reação álcali-sílica, entre outros.

O uso de adições minerais, tanto ao cimento quanto ao concreto, é prática comum em várias partes do mundo, como nos Estados Unidos e em países da Europa, onde normas internacionais consideram o uso de adições minerais e cimentícias, especificando com muita propriedade e qualidade as condições que cada uma das adições deve apresentar para serem utilizadas na produção de concreto.

Diante de tantas evidências sobre as vantagens técnicas, econômicas e ambientais envolvendo a utilização das adições minerais, torna-se relevante e necessária uma análise mais aprofundada das posturas adotadas no Brasil sobre as adições minerais como substitutivo parcial ao cimento nos concretos, com um olhar crítico sobre as disposições normativas vigentes e seu alinhamento frente às tendências mundiais na visão de desenvolvimento sustentável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

2.1. Concreto

2.1.1. Definição e Histórico

O concreto é o material mais largamente utilizado em construção, sendo normalmente constituído de uma mistura de cimento Portland, agregados (grãos e miúdos), água, aditivos e adições minerais.

O concreto tem sua aplicação nos mais variados tipos de estruturas, desde grandes barragens até sofisticados edifícios com estruturas pré-tensionadas. Comparado aos metais, cerâmicas e materiais poliméricos, o concreto é sempre o menos dispendioso, apresenta resistência e durabilidade adequadas e requer menos energia para ser produzido.

Na definição de Coutinho (1997), o concreto é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, aditivos e adições. Graças à propriedade que os produtos da reação do ligante com a água têm de endurecer, a mistura ganha coesão e resistência, permitindo que sirva como material de construção.

Há indícios de que o material cimentante mais antigo foi descoberto nas margens do rio Danúbio, em 5600 a.C. Julga-se também que a mistura de inertes com um ligante, provavelmente cal ou gesso, foi utilizada na construção das pirâmides do Egito. Nesse mesmo país, há uma descrição do emprego de argamassa e um material semelhante ao concreto num mural de Tebas, datado de 1950 a.C. O uso deste material se estendeu por toda a região do Mediterrâneo, chegando a ser empregado pelos romanos, que utilizavam misturas com características pozolânicas de pedra, areia, cal e água, na construção de pontes, aquedutos e outras grandes obras públicas. Construções de fundações e pavimentos térreos também foram feitas com estes

materiais no período da Idade Média e Renascimento, mas o emprego do concreto só chegou a proporções mais amplas após a invenção do cimento Portland, por Louis Vicat (Coutinho, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o consumo mundial total de concreto em 1993 foi estimado em três bilhões de toneladas, correspondendo a uma tonelada por ser humano vivo. Dados mais recentes indicam que este patamar de consumo anual de concreto por habitante se manteve, o que significa em termos atuais que a produção mundial de concreto é da ordem de 6,5 bilhões de toneladas (CALAES, 2005), fazendo do concreto o segundo material mais consumido pelo homem, depois da água.

2.1.2. Tipos de Concreto

Há vários tipos de concreto, que variam conforme a forma de classificação adotada para o concreto e seus componentes. De acordo com a norma NBR 12655:2006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o concreto pode ser classificado em três categorias, conforme sua massa específica no estado endurecido:

- Concreto normal: possui massa específica maior do que 2.000 kg/m^3 , mas não excede 2.800 kg/m^3 . Constituído normalmente de areia natural, pedra britada ou seixo rolado.
- Concreto leve: possui massa específica não menor que 800 kg/m^3 , mas não excede 2.000 kg/m^3 . Constitui-se de agregados naturais ou processados termicamente que possuem baixa densidade (agregados expandidos de argila, escória siderúrgica, vermiculita, ardósia, resíduos de esgoto sinterizado e outros).
- Concreto pesado: massa específica maior que 2.800 kg/m^3 . Constituído de agregados de alta densidade, como barita, magnetita, limonita e hematita.

Segundo Mehta e Monteiro (1997), a classificação do concreto também pode ser feita a partir de critérios de resistência à compressão (f_{ck} aos 28 dias), dividindo-se nas seguintes categorias:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Ainda com referência à resistência, a NBR 12655:2006 define como concreto de alta resistência o concreto com classe de resistência à compressão maior que 50 MPa.

Nesta mesma norma, diversas outras formas de classificação e terminologias são utilizadas para identificar o concreto: concreto-massa, concreto aerado, concreto espumoso, concreto projetado, concreto dosado, concreto prescrito, etc.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil – ABESC, os concretos comumente utilizados podem ser classificados de acordo com sua aplicação em obra, uma vez que o sucesso de uma construção dependerá da correta definição do tipo de concreto a ser utilizado. Os principais tipos de concreto e suas características podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1 - Principais tipos de concreto dosado em central e suas características (ABESC, 2007)

TIPO	APLICAÇÃO
Rolado	Barragens, pavimentação rodoviária (base e sub-base) e urbana (pisos, contrapisos)
Bombeável	De uso corrente em qualquer obra. Obras de difícil acesso. Necessidade de vencer alturas elevadas ou longas distâncias
Resfriado	Peças de elevado volume como bases ou blocos de fundações
Colorido	Estruturas de concreto aparente, pisos (pátios, quadras e calçadas), guarda-corpo de pontes, etc.
Projetado	Reparo ou reforço estrutural, revestimento de túneis, monumentos, contenção de taludes, canais e galerias
Alta Resistência Inicial	Estruturas convencionais ou protendidas, pré-fabricados (estruturas, tubos etc.)
Fluido	Peças delgadas, elevada taxa de armadura, concretagens de difícil acesso para a vibração
Pesado	Como lastro, contrapeso, barreira à radiação (câmaras de raios-X ou gama, paredes de reatores atômicos) e lajes de subpressão
Leve (600 a 1200 kg/m ³)	Elementos de vedação (paredes, painéis, rebaixos de lajes, isolante termo-acústico e nivelamento de pisos)
Leve estrutural	Peças estruturais, enchimento de pisos e lajes, painéis pré-fabricados
Pavimentos Rígidos	Pavimentos rodoviários e urbanos, pisos industriais e pátios de estocagem
Alto Desempenho (CAD)	Elevada resistência (mecânica, física e química), pré-fabricados e peças protendidas
Convencional (a partir de 20 MPa)	Uso corrente na construção civil
Submerso	Plataformas marítimas
Com fibras e aço, plásticas ou de polipropileno	Reduz a fissuração
Grout	Agregados de diâmetro máx. 4,8 mm

2.1.3. Constituintes do Concreto

2.1.3.1. Cimento

Em termos gerais, cimento é todo material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto (NEVILLE, 1982).

O uso de materiais com propriedades cimentícias para fins construtivos é uma atividade muito antiga na história da civilização. Sabe-se que os assírios e babilônios

se utilizavam de argilas não cozidas, geralmente misturadas com fibras vegetais, para confecção de moradias. Com a construção das pirâmides, os egípcios introduziram argamassas de cales e gesso e, posteriormente, os povos gregos melhoraram esses materiais, utilizando calcário calcinado. Mas foi com os romanos que se deu a produção de um cimento de notável durabilidade, ao serem acrescentadas cinzas vulcânicas às argamassas de argila e cal (LEA, 1970, apud KIHARA e CENTURIONE, 2005).

As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorini ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, as quais possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

Com a Idade Média veio um declínio geral na qualidade e uso do cimento, podendo-se registrar um avanço na tecnologia dos cimentos somente no século XVIII. Em 1756, um grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Já em 1818, o francês Vicat, considerado o inventor do cimento artificial, obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários.

Posteriormente, em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin realizou um experimento onde foram queimadas pedras calcárias e argila conjuntamente, transformando-se em um pó fino. Aspdin então percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções, uma vez que a mistura não se dissolvia em água. Ao produto obtido foi dado o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

O cimento Portland fabricado hoje é constituído de clínquer, um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação, a uma temperatura aproximada de 1450°C, de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados para garantir o quimismo da mistura dentro de limites específicos (KIHARA e CENTURIONE, 2005). A homogeneidade do clínquer é garantida através do controle das matérias-primas durante o processo industrial, com

base em módulos químicos empiricamente criados ao longo de décadas da evolução da indústria cimenteira.

Neville (1982) afirma que o nome cimento Portland é usado até hoje para designar um cimento obtido pela mistura apropriada de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais contendo sílica, alumina e óxidos de ferro, aquecendo tudo a uma temperatura necessária para a clínquerização e moendo-se o clínquer resultante.

Os componentes principais do cimento Portland, determinados por análise química, são: cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), magnésia (MgO), álcalis (Na₂O e K₂O) e sulfatos (SO₃). Essas substâncias reagem entre si no forno, dando origem a uma série de produtos mais complexos.

Em termos de composição química, o cimento Portland é constituído basicamente dos seguintes compostos: Silicato tricálcico (C₃S), Silicato dicálcico (C₂S), Aluminato tricálcico (C₃A) e Ferroaluminato tetracálcico (C₄AF). Os aluminatos são os responsáveis pelas primeiras reações, porém atingem valores muito baixos de resistência aos esforços mecânicos. Já os silicatos são fundamentais no tocante à resistência, sendo o C₃S nas primeiras idades e o C₂S em idades maiores. O calor desenvolvido pelas reações do aglomerante com a água é devido principalmente ao C₃A, seguido pelo C₃S, uma vez que o C₂S e o C₄AF liberam muito pouco calor no processo de hidratação (PETRUCCI, 1995). O C₃A é responsável pela pega do cimento, uma vez que é o componente mais reativo do clínquer. O C₄AF tem papel importante na resistência química do cimento, em especial ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto.

Segundo Coutinho (1997), pode-se modificar a composição da matéria-prima para se obter um cimento com determinada propriedade mais acentuada do que outras, de modo a satisfazer as exigências da construção. Disso derivam os cimentos com alta resistência inicial, endurecimento rápido, baixo calor de hidratação, resistência a sulfatos, etc.

Assim, com o desenvolvimento do cimento Portland, outros materiais começaram a ser introduzidos em sua composição, constituindo os cimentos com adições. Além de trazerem melhorias na qualidade dos cimentos, as adições permitiram a obtenção de

melhor desempenho e menor custo de produção. Dentre os principais materiais adicionados ao cimento destacam-se as escórias granuladas de alto-forno e os materiais pozolânicos naturais e artificiais.

De fato, as adições minerais modificam o equilíbrio químico no interior do cimento, pois promovem a fixação do hidróxido de cálcio dando origem a componentes menos ricos em cálcio do que os provenientes da hidratação do cimento Portland, com propriedades ligantes tão importantes quanto às daqueles. Com isso, a concentração de hidróxido de cálcio é reduzida a limites capazes de inibir as reações expansivas entre sulfatos e aluminatos, o calor de hidratação é diminuído e o cimento apresenta resistências químicas e mecânicas em geral superiores às do cimento Portland (COUTINHO, 1997).

Há uma variedade de tipos de cimento comercializados no Brasil, com diversas adições minerais e diferentes aplicações, conforme Tabela 2, que apresenta suas nomenclaturas e os conteúdos de seus constituintes especificados em normas.

Tabela 2 - Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil (KIHARA e CENTURIONE, 2005)

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filler calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Principal componente do concreto, o cimento está entre os materiais mais consumidos no planeta. Dados obtidos nos relatórios técnicos do WBCSD – World Business Council

for Sustainable Development, organismo composto de uma coligação de 160 empresas internacionais com o objetivo de assegurar o desenvolvimento sustentável apoiado nos pilares do crescimento econômico, respeito pelo ambiente e progresso social – revelam que a indústria do cimento é responsável por 5% do CO₂ produzido pelo homem em escala mundial, sendo o CO₂ o gás com efeito de estufa que mais contribui para as alterações climáticas.

Sabe-se que no ano de 2000, 1,6 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas no mundo, e que para produzir uma tonelada de cimento, é necessário o consumo de 60 a 130 Kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica (WBCSD, 2002).

2.1.3.2. Água

Os compostos presentes no cimento Portland são anidros, mas, quando postos em contato com a água, reagem com ela formando produtos hidratados. A hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis (PETRUCCI, 1995).

O processo de hidratação do cimento Portland compreende a estabilização dos minerais do clínquer pela água, metaestáveis a temperatura ambiente, gerando compostos mineralogicamente distintos, como o C-S-H, etringita e portlandita.

Esta hidratação do cimento Portland não depende exclusivamente dos componentes mineralógicos do clínquer e das adições ativas do cimento, mas também da relação água-cimento, finura, temperatura, procedimentos de cura e outros fatores físicos.

A necessidade dos componentes do clínquer em atingirem seu campo de estabilidade sob as condições ambientais está relacionada com a avidéz do cimento por água. Dessa forma, os elementos químicos, juntamente com a água, rearranjam-se em novos sistemas cristalinos, conferindo rigidez à mistura, que é a principal propriedade reológica que se espera do produto (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Na pasta de cimento ocorrem as reações que transformam o cimento Portland em agente ligante, ou seja, na presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o decorrer do tempo, dão origem à pasta de cimento

endurecida. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a hidratação dos aluminatos está diretamente relacionada com o enrijecimento e a pega do concreto, enquanto que os silicatos têm papel fundamental no desenvolvimento de resistência mecânica. Neste processo de hidratação, o gesso (sulfato de cálcio) presente na composição do cimento age como retardador de pega, evitando-se o enrijecimento imediato da pasta causado pela reação do C₃A com a água.

Na pasta endurecida do concreto, a água está presente sob formas diversas, as quais podem ser classificadas como:

- Água capilar: água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Divide-se em duas categorias: água livre (presente em vazios grandes) e água retida por tensão capilar em capilares pequenos, cuja remoção pode causar a retração do sistema.
- Água adsorvida: são as moléculas de água que estão fisicamente adsorvidas, por pontes de hidrogênio, na superfície dos sólidos da pasta. Na interação do concreto com o meio, sua movimentação é a principal causa da reologia do concreto.
- Água interlamelar ou água de gel: é a água associada à estrutura do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que somente é perdida por secagem forte. Acredita-se que uma camada monomolecular de água existe entre as camadas de C-S-H, estando esta fortemente ligada por pontes de hidrogênio.
- Água quimicamente combinada ou água de cristalização: água que é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Somente pode ser liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento.

2.1.3.3. Agregados

Na definição de Petrucci (1995), agregado é o material granular sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. Dentre suas várias aplicações estão: a elaboração de bases para calçamentos, preparação de pistas de rolamento em estradas, lastro de vias férreas,

composição de material para revestimentos betuminosos e, principalmente, a utilização como material granuloso e inerte na confecção de argamassas e concretos.

Os agregados são um importante componente cujas propriedades têm considerável influência sobre a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. Considerando-se que os agregados são interligados num todo monolítico por meio da pasta de cimento, eles conferem características técnicas extremamente vantajosas ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e maior durabilidade em relação à pasta de cimento pura (NEVILLE, 1982).

Os agregados utilizados para o concreto são classificados em agregado graúdo e agregado miúdo, conforme a dimensão das partículas, massa específica ou origem dos mesmos. Segundo a classificação de Mehta e Monteiro (1994), o termo agregado graúdo é usado para descrever partículas maiores do que 4,8 mm e o termo agregado miúdo para partículas menores do que 4,8 mm.

Quanto à sua obtenção, os agregados podem ser classificados em agregados naturais (areia, cascalho ou seixo rolado, pedras) e agregados artificiais (estéreis, resíduos e rejeitos originários das siderúrgicas, minerações e indústrias – escórias de alto-forno, lamas, cinzas volantes sinterizadas, concreto reciclado, etc.). Na categoria dos agregados artificiais também podem ser incluídos os materiais processados termicamente, tais como argila ou folhelho expandidos, que são utilizados na produção de concreto leve.

A norma NBR 12655:2006 da ABNT também classifica os agregados segundo sua massa específica: agregados leves (com massa específica $\leq 1.800 \text{ kg/m}^3$) e agregados densos ou pesados (com massa específica $\geq 3.000 \text{ kg/m}^3$).

Outras classificações utilizadas para os agregados consideram as seguintes categorias: agregados ultraleves (de massa específica inferior a 300 kg/dm^3 , como vermiculita e poliestireno expandido); leves (de massa específica entre 300 e 1200 kg/dm^3 , como argila expandida, pedra pomes e escória de alto-forno expandida); densos (de massa específica entre 1200 e 1700 kg/dm^3 , como a areia, rocha britada e seixo) e extradensos (de massa específica acima de 1700 kg/dm^3 , como a magnetita, barita, limonita e itabirito).

Segundo Petrucci (1995), outra classificação para os agregados, levando em consideração a massa específica aparente, subdivide-os em agregados leves (pedra pomes, vermiculita, argila expandida, etc.), agregados normais (areia, seixos e pedras britadas) e agregados pesados (barita, magnetita e limonita).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto incluem porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura artificial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes.

A influência exercida pelo agregado graúdo sobre as propriedades fundamentais do concreto fresco (trabalhabilidade) e do concreto endurecido (resistência à compressão, estabilidade dimensional e durabilidade) está intimamente ligada às características próprias do agregado, como: diâmetro máximo, granulometria e forma do grão.

Há de se destacar nos dias atuais o atual desenvolvimento dos agregados artificiais, oriundos do reaproveitamento de estéreis, rejeitos ou resíduos gerados pela indústria e mineração em geral. Sua utilização está condicionada a uma análise prévia da qualidade e pertinência de uso mediante critérios normalizados de avaliação de desempenho frente a: reatividade álcali-agregado; ciclo gelo e degelo; ataque de sulfatos de sódio e potássio; ciclagem térmica; reatividade potencial pelo método químico ou Sul-Africano. Nesta situação o agregado será classificado como inócuo (passível de uso) ou de potencial deletérril (poderá comprometer a durabilidade e performance dos concretos e também de argamassas produzidas).

2.1.3.4. Aditivos

Aditivos são as substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto, com o fim de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização (PETRUCCI, 1995).

Segundo a norma NBR 12655:2006 da ABNT, aditivos são materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Os aditivos mais usuais são os seguintes:

- Tenso-ativos (plastificantes, superplastificantes, redutores de água): melhoram a fluidez e plasticidade dos concretos (aumentam o índice de consistência), permitindo melhor compactação com menor dispêndio de energia; reduzem a quantidade de água, diminuindo a retração, aumentando a resistência ou economizando aglomerante.
- Incorporadores de ar: aumentam a durabilidade dos concretos (maior resistência à ação deletéria de líquidos agressivos), melhoram a plasticidade, melhoram o comportamento do material durante o transporte (menor possibilidade de segregação), contribuem para a redução da exsudação e aumentam a resistência do concreto aos ciclos de congelamento e descongelamento. São utilizados em concretos submetidos a grandes variações de temperatura (gelo e degelo, câmaras frigoríficas, etc.) e também em concreto-massa, pois diminuem o atrito entre os agregados.
- Aceleradores de pega: aumentam a velocidade de crescimento da resistência, permitindo a desforma mais rápida e liberando mais cedo a construção para serviços. São usados quando o concreto deve ser lançado em temperaturas baixas ou em casos de serviços urgentes de reparos. Também são utilizados na execução de pré-moldados e de concreto projetado.
- Retardadores de pega: são úteis para evitar as juntas frias (mantêm o concreto plástico por um período maior, evitando-se que as sucessivas camadas lançadas criem juntas frias com descontinuidade estrutural); ajudam na concretagem em tempo quente, quando a pega normal é acelerada pela temperatura mais alta (melhoram o balanço térmico pela maior facilidade de dissipação do calor gerado e evitam grande aumento de temperatura); são utilizados no retardamento do endurecimento do concreto quando se deseja obter um acabamento arquitetônico com agregado exposto; ajudam no controle de grandes unidades estruturais para manter o concreto trabalhável durante o lançamento.

- Impermeabilizantes: agem por ação repulsiva com relação à água ou por obturação dos poros; reduzem a penetração de umidade sob pressão e de elementos agressivos; são utilizados em argamassas de reparo, rejuntas e nos concretos de reservatórios.
- Produtores de gás ou espuma: são capazes de produzir, na massa do concreto, bolhas de gás ou de espuma, dando origem aos concretos porosos, celulares ou aerados, que possuem baixo peso específico e melhor desempenho no isolamento térmico e proteção contra o fogo. São utilizados em pisos, lajes e recuperação de estruturas.
- Fungicidas, germicidas e inseticidas: controlam o crescimento de algas ou líquens no concreto endurecido durante um determinado tempo.
- Inibidores de corrosão de armaduras: são efetivos no controle e redução das taxas de corrosão das armaduras; são utilizados nos materiais de reparo e em concretos submetidos à ação de cloretos.

Dentre as principais finalidades do emprego dos aditivos no concreto, podemos destacar as seguintes ações: melhorar a trabalhabilidade; acelerar a pega; retardar a pega; acelerar o endurecimento nas idades iniciais; aumentar tensões nas primeiras idades, aumentar resistência gelo x degelo; diminuir a permeabilidade aos líquidos; diminuir a retração; diminuir o calor de hidratação; impedir segregação e sedimentação em caldas; criar expansão; aumentar aderência do agregado aos cimentos; produzir concretos coloridos; produzir concreto leve; produzir propriedades fungicidas, germicidas e inseticidas; inibir corrosão das armaduras e ajudar no bombeamento e elevação mecânica.

Segundo Andrade e Helene (2007), a utilização de concretos de maior resistência e durabilidade se tornou possível com o surgimento dos aditivos superplastificantes, que permitem a obtenção de concretos plásticos com a redução da relação água/cimento. O uso desses aditivos provoca mudanças na reologia da pasta, tornando-a mais fluida, pois dispersa as partículas de cimento e faz com que menos água seja necessária para se atingir uma dada trabalhabilidade.

Os superplastificantes permitiram também o emprego de pozolanas de alta reatividade – como o metacaulim e a sílica ativa – para a produção de concretos de alto desempenho, que têm como função melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade das pastas, produzindo concretos com maior durabilidade.

2.1.3.5. Adições Minerais

Na definição de Malhotra e Mehta (1996), o termo adição, de forma abrangente, refere-se a qualquer material além de água, agregados e cimento, que é utilizado como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura. Na literatura geral sobre concreto, entretanto, há uma definição distinta para as adições, que não se confundem com os aditivos. As adições são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento (devido às suas propriedades semelhantes às do cimento), enquanto que os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto.

Conforme sua ação físico-química no concreto, as adições minerais podem ser classificadas em três grupos distintos: materiais pozolânicos, material cimentante e filler.

O material pozolânico, de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 1992) e a ASTM C 618 (1978), é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, a temperaturas ambientes, para formar compostos com propriedades cimentantes. Quanto à sua origem, os materiais pozolânicos são classificados pela NBR 12653 em pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar e as pozolanas artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, sílica ativa, etc.).

O material cimentante é aquele capaz de formar produtos cimentantes, como o C-S-H, sem a necessidade do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland. Sua auto-hidratação é lenta, porém quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, sua hidratação é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita, como é o caso da escória granulada de alto-forno.

O filler é um material finamente dividido sem atividade química, cuja atuação é basicamente um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

As adições minerais comumente utilizadas em concretos para fins estruturais variam conforme sua forma de ação, podendo ser classificadas da seguinte forma (RILEM et al., 1998 apud DAL MOLIN, 2005):

- Cimentantes: escória granulada de alto-forno.
- Cimentantes e pozolânicos: cinza volante com alto teor de cálcio.
- Superpozolanas: sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz predominantemente amorfa.
- Pozolanas comuns: cinza volante com baixo teor de cálcio, argilas calcinadas, cinzas vulcânicas.
- Pozolanas pouco reativas: escórias de alto-forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina.
- Filler: calcário, pó de quartzo, pó de pedra.

2.2. Adições Minerais na Composição do Concreto

2.2.1. Histórico

Segundo Malhotra e Mehta (1996), o uso de adições minerais iniciou-se no período de 1.500 a.C., na Grécia, onde se extraía um material de origem vulcânica na ilha Santorini. Em seguida, essas adições foram difundidas por todo o império romano para a execução de diversas obras, tendo o monte Vesúvio como a principal fonte das cinzas vulcânicas. Ainda durante o período romano, outro material pozolânico conhecido como Trass, um tufo vulcânico, foi extensivamente utilizado na Alemanha. Há também evidências de que os materiais naturais, como cinzas vulcânicas e tufos, não foram a única fonte de pozolanas nos compósitos usados nas construções de estruturas antigas. Posteriormente, outras adições, como a argila calcinada, surgiram para suprir o mercado onde a cinza vulcânica era indisponível.

De acordo com Lea (1971) apud Malhotra e Mehta (1996), não apenas as civilizações gregas e romanas, como também as indianas e egípcias, tinham familiaridade com as propriedades de resistência à água das argamassas e concretos elaborados com cimentos feitos a partir de cal e de pozolanas cuja fonte era a argila calcinada proveniente de tijolos, telhas e cerâmicas.

A descoberta e uso de cales hidráulicas (cales impuras contendo quantidades substanciais de argila calcinada) durante o século XVIII foi um antecedente da invenção do cimento Portland em 1824, que devido às características de tempo de pega e endurecimento mais rápidos, tornou-se rapidamente o material cimentício preferido da indústria da construção.

No século XIX, dada a semelhança entre as composições químicas da escória e do cimento Portland, o engenheiro francês Louis Vicat observou as propriedades de certas escórias e a possibilidade de empregá-las na fabricação do cimento (PAPADAKIS e VENUAT, 1969 apud COUTINHO, 1997). Em 1865, na Alemanha, lançou-se no mercado um ligante hidráulico constituído por uma mistura de cal e escória e em 1882 iniciou-se a fabricação industrial do cimento Portland com adição de escórias. Foi neste período, até 1890, que as propriedades das escórias se difundiram. Porém, seu

emprego em escala industrial inicialmente encontrou grandes resistências por parte dos técnicos e dos fabricantes de cimento.

A utilização da escória, até 1950, desenvolveu-se lentamente devido à concorrência com o cimento Portland sem adição, considerado material nobre, e principalmente pelo desconhecimento das propriedades reais dos cimentos com escória. Após 1950, graças a esforços de divulgação e informação, o cimento com escória desenvolveu-se em diversos países (VENUAT, 1976 apud MASSUCATO, 2005). O êxito se deu após a Segunda Guerra Mundial, quando houve grande incremento no uso de escórias, especialmente devido à crise do carvão. O emprego da escória representou uma economia notável de combustível, uma vez que cada tonelada de clínquer substituído por escória gerava uma redução de 200 Kg no consumo de carvão (COUTINHO, 1997).

Por motivos tecnológicos, econômicos e ecológicos, grandes quantidades de materiais pozolânicos continuam a ser utilizados hoje na forma de adições minerais para as indústrias do cimento e do concreto.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), o uso de materiais pozolânicos e cimentícios nas indústrias do cimento e do concreto tem crescido acentuadamente durante os últimos cinquenta anos, com potencial de crescimento ainda maior para o futuro. Prevê-se que em um futuro próximo uma mistura de concreto sem a presença de materiais pozolânicos e cimentícios será uma exceção em vez de regra.

Atualmente, grande parte das adições minerais é composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termelétricas e indústrias – como as escórias de alto-forno, a sílica de fumo e as cinzas volantes – os quais têm substituído de forma crescente as pozolanas naturais e argilas calcinadas.

2.2.2. Tipos de Adições Minerais

2.2.2.1. Pozolanas naturais

As pozolanas naturais são materiais que procedem de rochas vulcânicas e cinzas vulcânicas, geralmente de caráter petrográfico ácido, isto é, ricos em sílica ($\geq 65\%$

SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Para serem empregados, esses materiais em geral passam pelos processos de britagem, moagem, classificação por tamanho e, em alguns casos, ativação, após os quais adquirem uma maior e mais ativa superfície específica.

Dentre as pozolanas de origem vulcânica mais conhecidas no mundo destacam-se as pozolanas encontradas em Bacoli (Itália) e na ilha de Santorini (Grécia), além da rocha conhecida como Trass, encontrada na Alemanha (PETRUCCI, 1995). Também podem ser citadas a pozolana de Shirasu no Japão e os tufos zeolíticos encontrados na China e Rússia.

As pozolanas de origem vulcânica têm sua formação a partir de erupções vulcânicas que lançam na atmosfera grandes quantidades de lava derretida, compostas basicamente de aluminossilicatos. O rápido resfriamento da lava resulta na formação de fases vítreas com estrutura desordenada e minerais pouco cristalinos. Os gases liberados e o vapor d'água imprimem no material vulcânico uma textura porosa contendo elevada área superficial. Esta combinação de efeitos é a causa da reatividade dos aluminossilicatos presentes na cinza vulcânica com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente.

As pozolanas de origem sedimentar são os *cherts* silicosos e as terras diatomáceas. O *chert* é um tipo de rocha sedimentar composta principalmente de sílica e minúsculos cristais de quartzo. As terras diatomáceas consistem de opalina ou sílica amorfa hidratada proveniente de esqueletos de diatomáceas, que são minúsculas plantas aquáticas com paredes celulares compostas de carapaças silicosas (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O material é pozolânico quando puro, mas geralmente precisa ser termicamente ativado para aumentar sua atividade pozolânica devido à presença de impurezas, como os argilominerais. Este tipo de pozolana natural é um depósito sedimentar de granulação fina que possui algumas restrições para o uso, uma vez que demanda alto teor de água devido à sua porosidade e angulosidade (NEVILLE, 1997 apud DAL MOLIN, 2005).

A classificação das pozolanas naturais segundo os critérios estabelecidos por Mehta (1987) toma por base o principal constituinte químico capaz de reagir com o hidróxido de cálcio proveniente dos produtos de hidratação do cimento. Neste contexto, as

pozolanas naturais são classificadas em quatro categorias: vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados e terra diatomácea.

2.2.2.2. Cinzas Volantes

Cinzas volantes são pequenas partículas coletadas por sistemas anti-pó das usinas termelétricas que queimam carvão em altas temperaturas. Segundo Neville (1982), elas são as cinzas precipitadas eletrostaticamente dos fumos de exaustão de centrais termoelétricas a carvão, constituindo-se nas pozolanas artificiais mais comuns.

Nas usinas termelétricas, o carvão mineral é utilizado para aquecimento da água de circulação do sistema e conseqüente geração de vapor para movimentação das turbinas a fim de produzir energia elétrica. Seu consumo é responsável pela geração de cinzas, resultantes da queima do carvão mineral em fornalhas de aquecimento. Ao passar pelas zonas de altas temperaturas na fornalha, materiais voláteis e carbono são queimados, enquanto que a maior parte das impurezas minerais se funde e permanece em suspensão no gás dos tubos de exaustão. Ao deixarem a zona de combustão, as partículas fundentes de cinzas são resfriadas rapidamente e se solidificam na forma de partículas esféricas e vítreas. Uma parte do material fundido se aglomera no fundo para formar a cinza pesada, mas a maior parte escapa através dos fumos de exaustão, recebendo o nome de cinza volante. Na etapa subsequente, a cinza volante é recolhida por uma série de separadores mecânicos e precipitadores eletrostáticos ou filtros de manga.

A elevada quantidade de cinzas produzidas varia em função da qualidade do carvão, podendo-se classificá-las em dois tipos: cinza pesada e cinza volante, sendo esta última correspondente a mais de 80% do total de cinza gerada. (IOPPI, 2009).

A ação da temperatura devido à queima do carvão faz com que as cinzas (compostas de argilas, materiais silicosos e aluminosos) adquiram propriedades pozolânicas. Devido às suas características mineralógicas e granulométricas peculiares, a cinza volante geralmente não necessita passar por nenhum processo de beneficiamento antes de ser utilizada como adição mineral.

Segundo a definição da NBR-5736 (ABNT, 1991), as cinzas volantes são materiais finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado. Este material finamente particulado compõe-se de partículas esféricas simples, cenosféricas ou angulosas. Por suas características químicas, são materiais sílico-aluminosos, sílico-cálcicos ou sulfo-cálcicos, cuja composição varia de acordo com as impurezas contidas na queima do carvão da usina de energia. Dependendo das variações em parâmetros do processo em fornos industriais, é possível que se obtenha dois exemplares de cinzas volantes com características químicas similares, porém com diferentes composições mineralógicas e características de desempenho em concretos.

Em função das diferenças significativas de composição mineralógica e propriedades, Mehta e Monteiro (1994) explicam que as cinzas volantes podem ser divididas em duas categorias que diferem entre si quanto ao teor de cálcio. A cinza com baixo teor de cálcio é geralmente um produto de combustão de antracito e carvões betuminosos, contendo quantidades de CaO total menores do que 10%. A cinza com alto teor de cálcio contém normalmente de 15 a 30% de CaO e geralmente é um produto de combustão de lignito ou de carvões sub-betuminosos. Esta variedade de cinza é mais reativa, pois contém a maior parte do cálcio na forma de compostos cristalinos reativos.

As cinzas volantes podem ser usadas no concreto como correção da granulometria do agregado miúdo, como substituto parcial do cimento ou nas duas funções simultaneamente. Quando adicionada na fabricação de cimentos, a cinza volante está presente no cimento Portland pozolânico (CP IV) e no cimento Portland composto com pozolana (CP II Z).

As características de superfície, a distribuição granulométrica das partículas e a morfologia da cinza volante empregada como adição mineral ao concreto exercem grande influência sobre o consumo de água, a trabalhabilidade do concreto fresco e a velocidade de desenvolvimento da resistência no concreto endurecido.

O uso de cinzas volantes como substituto parcial do cimento diminui a exsudação, facilita o bombeamento, retarda o início de pega e faz aumentar a trabalhabilidade do concreto fresco. No concreto endurecido, o uso das cinzas reduz a resistência nas idades iniciais, mas pode levar a resistência nas idades finais a valores iguais ou superiores às do cimento Portland sem adição. Com uma cura úmida adequada, os

concretos com cinzas volantes apresentam menor permeabilidade, aumentando a proteção das armaduras.

2.2.2.3. Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como sílica de fumo, sílica volatilizada ou microsílica, é um material relativamente recente cuja utilização na indústria do concreto tem crescido muito desde a década de 80 (MALHOTRA E MEHTA, 1996).

A sílica ativa é um subproduto da produção do silício metálico (utilizado na fabricação de componentes eletrônicos, silicones e alumínio), das ligas de ferro-silício (utilizado na produção de aços comuns) e de outras ligas de silício, produzidos em grandes fornos de fusão, do tipo arco elétrico. Um arco elétrico é resultante de uma ruptura dielétrica de um gás a qual produz uma descarga de plasma, resultante de um fluxo de corrente em meio normalmente isolante tal como o ar. O arco ocorre em um espaço preenchido de gás entre dois eletrodos condutivos (frequentemente feitos de carbono) e isto resulta em uma temperatura muito alta, capaz de fundir ou vaporizar virtualmente qualquer coisa, inclusive o quartzo.

Durante a redução da sílica, quartzo de elevada pureza e carvão são introduzidos em forno elétrico no qual, dentro do arco elétrico, um gás (monóxido de silício gasoso – SiO) é produzido e escapa para a parte superior da carga. Este gás resfria-se, condensa e oxida na forma de sílica (SiO₂), que é captada por filtros de manga antes da sua saída para a atmosfera, sendo devidamente armazenada para a sua posterior utilização. Nesta forma amorfa, as partículas são extremamente reativas e o seu pequeno tamanho relativo facilita a reação química com o Ca(OH)₂ produzido na hidratação do cimento Portland (KORMANN et al., 2001).

Há diferentes tipos de sílica ativa com relação à composição química, cor, distribuição granulométrica e outras características. Esta variação existe em função do tipo de liga produzida, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas.

Muito usada em concretos de alto desempenho, a sílica ativa é umas das adições minerais de maior reatividade, graças ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas e à sua natureza amorfa. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem

vezes menor que o do cimento. Por terem uma área específica elevada e granulometria mais fina que os cimentos, as partículas da sílica ativa densificam a zona de transição por ação física e química, gerando uma microestrutura mais densa e homogênea, com reduzido volume de vazios. Para o aproveitamento ideal deste material altamente pozzolânico faz-se necessária a utilização de aditivos redutores de água, pois sua finíssima distribuição granulométrica tende a provocar um considerável consumo de água no concreto.

Em composições cimentícias, a sílica ativa tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade, graças à ocorrência de reações pozzolânicas e ao efeito físico filler. As reações pozzolânicas ocorrem devido à interação com o hidróxido de cálcio do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), material mais resistente e estável, que favorece a durabilidade dos compósitos, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema devido ao processo de refinamento dos poros. Já o efeito filler ocorre em função da diminuição da porosidade total do sistema promovida pelo preenchimento dos vazios de empacotamento, de poros capilares e de gel (ROMANO et al., 2006).

No concreto fresco, a introdução de sílica ativa contribui para a diminuição da exsudação e da segregação, sendo o uso de plastificantes e superplastificantes necessário para garantir a trabalhabilidade da mistura. O efeito físico do empacotamento das finíssimas partículas da sílica ativa provoca a redução dos espaços vazios e conseqüentemente do consumo de água necessário para dar plasticidade ao sistema, conforme demonstrado na Figura 1.

No concreto endurecido, a adição de sílica ativa em proporções adequadas aumenta a resistência à compressão dos concretos. A permeabilidade e a porosidade são diminuídas, aumentando a resistência aos agentes agressivos, uma vez que as finas partículas da sílica ativa ocupam os vazios entre as partículas do cimento e do agregado, tornando o conjunto mais denso (COUTINHO, 1997).

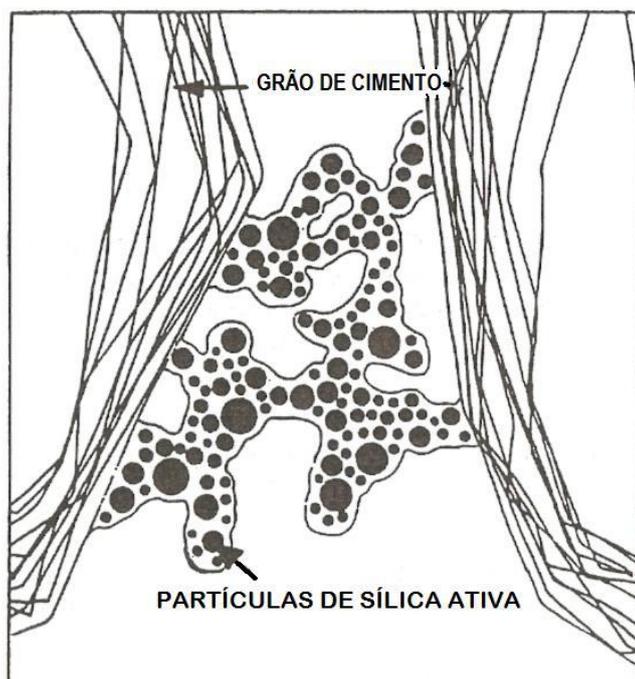


Figura 1 - Mecanismos de redução da exsudação na pasta de cimento pela adição de sílica ativa (L. HJORTH apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

A combinação dos efeitos físicos e químicos da sílica ativa tem como resultado uma mudança microestrutural do concreto, principalmente na zona de transição, melhorando a aderência pasta-agregado e pasta-armadura, a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

2.2.2.4. Metacaulim

O metacaulim é originado da calcinação do rejeito do beneficiamento do caulim, sendo um subproduto sílico-aluminoso proveniente da calcinação de argilas cauliníticas entre 600°C e 900°C. Após este tratamento térmico, que é precedido pela lavagem da argila caulinítica para remoção de impurezas não reativas, forma-se a partir dos argilominerais um componente amorfo e de grande instabilidade química – a metacaulinita – que é responsável pela atividade pozolânica. O processo de produção é rigorosamente controlado, razão pela qual se obtém um produto de alta pureza e reatividade.

Segundo Dal Molin (2005), convencionou-se chamar o metacaulim proveniente de argilas extremamente finas – com elevados teores de caulinita – de metacaulim de alta reatividade (MCAR). O MCAR também pode ser obtido através do tratamento do resíduo da indústria produtora de cobertura de papel.

O metacaulim constitui-se basicamente de sílica e alumínio no estado amorfo, que reagem com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidroaluminossilicato de cálcio. Sabe-se que a incorporação de metacaulim em pastas de cimento Portland contribui para o aumento da resistência à compressão e durabilidade, pois proporciona a formação de uma estrutura de poros de tamanhos menores. Suas propriedades físicas e químicas melhoram as propriedades mecânicas dos concretos.

Na definição de Helene et al. (2003) apud Tavares (2008), o metacaulim é um produto constituído principalmente por compostos à base de sílica e alumina na fase vítrea (amorfa), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto, sendo recomendado para uso indiscriminado em concretos de cimento Portland.

Rocha (2005) cita que a alta reatividade do metacaulim se explica por sua reação química com o hidróxido de cálcio livre presente na pasta de cimento, associada à sua finura, que produz o efeito de micro-preenchimento de poros da mistura.

2.2.2.5. Cinza de Casca de Arroz

A cinza da casca de arroz é o material obtido após a combustão da casca de arroz, nas usinas beneficiadoras de arroz, onde a cinza é queimada para se gerar calor e vapor nos processos de beneficiamento dos grãos. A casca de arroz é uma fonte de energia renovável que também se tornou bastante atrativa como substituto dos combustíveis fósseis em usinas geradoras de energia. Estima-se que cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, o que por combustão gera 40 kg de cinzas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O silício presente na casca de arroz ocorre geralmente em uma forma amorfa hidratada de sílica, com uma estrutura em estado similar ao vítreo ou na forma de gel. Durante a

combustão, parte da massa da casca se transforma em cinza, obtendo-se uma estrutura celular e porosa, com elevada superfície específica e grande quantidade de sílica (HOUSTON, 1972 apud DAL MOLIN, 2005).

As cinzas obtidas através de processos de combustão controlada, com temperaturas entre 500°C e 700°C, têm características amorfas e possuem alta pozolanicidade, produzindo efeitos benéficos sobre as propriedades do concreto.

A microporosidade e a elevada área superficial das partículas da cinza da casca de arroz contribuem para a sua alta atividade pozolânica. Uma das grandes vantagens técnicas de sua utilização como adição mineral está na capacidade de reduzir drasticamente a permeabilidade do concreto.

A cinza de casca de arroz constitui-se em um dos resíduos agro-industriais de maior produção no mundo. Seu aproveitamento como material pozolânico na construção civil é de extrema importância, tanto econômica quanto ecologicamente, pois impede seu descarte em forma de aterro, que seria um fator gerador de problemas ambientais de poluição do solo, do ar e de rios e córregos.

2.2.2.6. Filler

O filler é um material finamente dividido, com partículas de diâmetro médio próximo ao do cimento, podendo ser constituído de materiais naturais ou materiais inorgânicos processados.

Segundo Petrucci (1995), utiliza-se o filler principalmente nos seguintes casos: espessador de asfaltos fluidos; fabricação de mástiques betuminosos; preparação de argamassas betuminosas; preparação de concretos hidrocarbonatos; adição a cimentos; fabricação de borracha artificial; adição a concretos com consumos baixos de cimento para colmatar os vazios.

O filler possui propriedades que corrigem os finos da areia e melhoram a qualidade e durabilidade do concreto, quando presentes em pequenas quantidades no mesmo. Dentre as propriedades de melhor desempenho estão: a trabalhabilidade, a massa

específica, a permeabilidade, a exsudação e a tendência à fissuração (NEVILLE, 1995 apud DAL MOLIN, 2005).

Outros tipos de adições minerais que podem ser citados são os materiais com características não reativas que possuem a finalidade específica de dar cor às argamassas e concretos, como o pó de tijolo.

2.2.2.7. Escória de Aciaria

Grandes quantidades de escórias siderúrgicas são produzidas em todo o mundo, sendo as indústrias de ferro e aço as principais responsáveis pela geração destes materiais. As escórias de alto-forno são produzidas durante a produção de ferro-gusa a partir do minério de ferro e as escórias de aciaria são produzidas durante a conversão do ferro-gusa em aço.

A escória de aciaria e a escória de alto-forno resfriada ao ar são tradicionalmente utilizadas como agregado para base de estradas, devido às suas características adequadas de durabilidade, dureza, drenagem livre e resistência ao esmagamento por longos períodos. Outras importantes aplicações das escórias siderúrgicas são: base para lastro ferroviário, fabricação de lã mineral, uso agrônômico para condicionamento de solos e preparação de terrenos e aterros.

Em países da Ásia, onde há incentivos através de subsídios ao transporte do produto até os locais de aplicação, as escórias são amplamente utilizadas em recuperação de terrenos ao mar e aumento de área territorial.

As escórias de aciaria são, portanto, resíduos siderúrgicos provenientes da fabricação do aço. Por serem ricas em óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio, normalmente apresentam características expansivas, razão pela qual necessitam passar por um processo de envelhecimento prévio, para então poderem ser utilizadas como adição mineral. Este processo de estabilização preliminar é necessário para transformar o CaO em hidróxido de cálcio.

As escórias de aciaria são muito usadas como agregados para pavimentos asfálticos, enchimentos e bases de rodovias, uma vez que apresentam características

apropriadas de densidade, forma angular e coesão entre partículas. Também podem ser utilizadas como um substituto parcial da pedra calcária e de alguns materiais naturais (rochas), para servir de matéria-prima para os alto-fornos de cimento.

Quando utilizadas na fabricação do cimento, tornam o processo menos dispendioso em termos de consumo de energia, com menores emissões de CO₂, uma vez que não necessitam passar pela etapa de pré-moagem.

2.2.2.8. Escória Granulada de Alto-forno

A escória de alto-forno é um subproduto não-metálico da produção de ferro-gusa em altos-fornos, obtido pela reação, em elevadas temperaturas, do minério de ferro, fundentes e cinzas de carvão vegetal ou carvão mineral (coque). Este material constitui-se de uma mistura de cal, sílica e alumina, ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, porém em proporções diferentes (NEVILLE, 1982).

A escória granulada de alto-forno é definida pela Norma Brasileira NBR 5735:1991 como sendo o subproduto do tratamento do minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. A Norma Européia EN 197-1:2000 também define a escória granulada de forma semelhante, além de estabelecer que ela deve conter no mínimo dois terços em massa de partículas vítreas e possuir propriedades hidráulicas quando adequadamente ativada.

Segundo Coutinho (1997), a proporção entre a produção de escória e a do ferro é de cerca de 0,75 a 1,25 toneladas de escória por 1 tonelada de ferro, que varia segundo a riqueza em ferro do minério.

Quando a escória de alto-forno sofre um resfriamento lento, obtém-se a escória resfriada ao ar ou escória expandida, que apresenta coloração que varia entre cinza escuro e marrom. Esta escória não deve ser usada como material cimentício, porém pode ser usada como agregado para concretos, asfaltos e lastros.

Quando a escória passa por um processo de resfriamento rápido – normalmente através de jatos de água ou vapor d'água sob alta pressão – obtém-se a escória

granulada ou peletizada, que é um material predominantemente amorfo e potencialmente reativo (DAL MOLIN, 2005). A granulação altera completamente as propriedades da escória, mantendo-a num estado semelhante a um líquido subarrefecido, ou seja, conserva no estado sólido a estrutura do líquido, apresentando-se no estado amorfo. A escória granulada apresenta estrutura vítrea e coloração amarelada, bege ou cinza, podendo apresentar propriedades cimentícias quando finamente moída.

Diferentemente das cinzas volantes, a escória de alto-forno precisa ser moída até se atingir um nível desejável de tamanho das partículas ou de área superficial, dependendo do grau de ativação necessário e de fatores econômicos. Para ser utilizada como adição mineral, a escória de alto-forno também precisa passar pelo processo de secagem antes de ser moída.

A representação esquemática da granulação da escória é apresentada na Figura 2, onde a escória em fusão cai sobre uma roda dentada que projeta pequenos grãos, resfriada por meio de jato d'água.

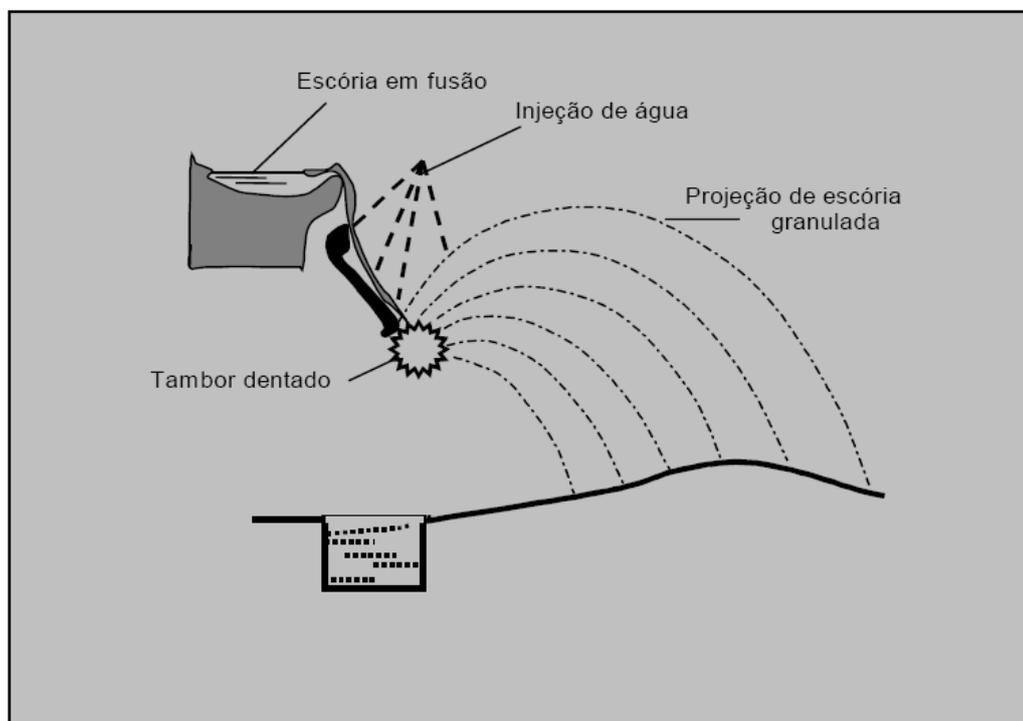


Figura 2 - Granulação da escória (JACOMINO et al., 2002 apud MASSUCATO, 2005)

A escória resfriada ao ar é geralmente aproveitada como agregado para bases de estradas e pavimentos asfálticos e também pode ser usada como agregado leve para o concreto e para isolamentos térmicos. Já a escória granulada é utilizada como adição ou substituto parcial do cimento Portland em misturas de concreto em betoneiras, bem como na fabricação de cimentos compostos, onde está presente no cimento Portland de alto-forno (CP III) e no cimento Portland composto com escória (CP II E).

Alguns fatores que afetam a hidraulicidade das escórias de alto-forno são: grau de vitrificação, composição química, composição mineralógica e finura (moagem).

Diferentemente das pozolanas, a escória de alto-forno finamente moída tem propriedades auto-cimentantes, ou seja, não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes como o C-S-H. Porém, quando a escória de alto-forno hidrata-se por si só, a quantidade de produtos cimentantes gerados e as taxas de formação não são suficientes para a aplicação do material com fins estruturais. Combinada com o cimento Portland, a escória tem sua hidratação acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita.

Os concretos compostos com escória granulada de alto-forno apresentam as seguintes características: boa durabilidade, alta resistência a meios sulfatados, menor calor de hidratação e maior ganho de resistência mecânica a longo prazo (LITTLE, 1999).

2.2.3. Aplicações das Adições Mineraias em Obras de Concreto

Por questões de ordem econômica e de durabilidade, as adições mineraias são empregadas como substituto parcial do cimento Portland no concreto.

Nos concretos de alta resistência, a substituição parcial de cimento por pozolana se justifica em função dos altos teores de cimento, a fim de se minimizar o risco de fissuração térmica. Soma-se a isso uma maior homogeneidade do produto final e a redução de custos.

Concretos de alta resistência contendo superplastificantes de baixo fator água/cimento, alto teor de cimento e uma pozolana de boa qualidade possuem grande

impermeabilidade e durabilidade. São exemplos de aplicações os pisos sujeitos a severos processos químicos e físicos de degradação, em indústrias químicas de alimentos e revestimentos de tabuleiros de pontes.

Adotando-se dosagens adequadas de pozolanas naturais e cinzas volantes de baixo teor de cálcio, obtém-se concretos com resistências iniciais reduzidas até 28 dias, porém com aumento nas resistências finais. Concretos com adição de escória de alto-forno e cinzas volantes de alto teor de cálcio apresentam resistências mais baixas até 3 dias, mas ganhos de resistência significativos após 7 dias de cura. Concretos contendo pozolanas altamente reativas (como a cinza de casca de arroz e a sílica ativa) associadas a aditivos redutores de água, possuem resistências elevadas tanto nas idades iniciais quanto nas idades finais. Estes são os concretos mais utilizados em edifícios de grande estatura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Dal Molin (2005) cita que o uso de escórias de alto-forno e pozolanas (cinzas volantes e argilas calcinadas) é recomendável principalmente em obras onde há necessidade de redução no calor de hidratação, como barragens, e em ambientes agressivos, para evitar a penetração de cloretos e umidade e proteger o concreto contra a corrosão de armaduras. Em obras onde a prevenção contra a reação álcali-agregado é um fator essencial, utiliza-se o metacaulim de alta reatividade, que também contribui para a redução da permeabilidade do concreto.

Coutinho (1997) afirma que as pozolanas são aplicadas especialmente com a finalidade de baixar o calor de hidratação do cimento – propriedade muito apreciada no concreto em grandes massas (barragens) – e evitar a formação de sulfoaluminato expansivo, propriedade importante no concreto sujeito à ação dos sulfatos.

Outras adições minerais, como a sílica ativa, são utilizadas tanto em obras de grande porte – pontes, barragens e altos edifícios – quanto em obras menores em concreto, pisos industriais, pré-moldados, concreto projetado e em locais com meio-ambiente agressivo, para alcançar resistências mais altas e aumentar a durabilidade das estruturas. Sendo a sílica ativa uma das adições de maior reatividade, sua incorporação ao concreto proporciona melhor estabilidade à mistura (concreto fresco), alta resistência e estabilidade (concreto endurecido).

De forma crescente, os concretos com adições minerais estão sendo preferidos como material construtivo em ambientes potencialmente agressivos, como águas ácidas ou sulfatadas, ambientes marinhos e locais de clima gelado, quente ou árido e estruturas de sustentação e armazenagem para a produção de petróleo e gás. Podem ser citadas também as estruturas de concreto utilizadas para abrigar reatores nucleares, capazes de conter gases e vapores em elevadas temperaturas e pressões. Em todas estas aplicações, as adições minerais desempenham um papel fundamental no aumento da durabilidade dos concretos.

Em diversos países produtores como Coréia do Sul, Japão e no Reino Unido, o incentivo à reutilização da escória é muito grande, principalmente no que tange ao seu uso na produção do “*slag cement*”, ou cimento de escória, com até 100% de escória em sua composição.

Outro exemplo de aplicação das adições minerais é através de sua associação com fibras de várias formas e tamanhos, produzidas em aço, plástico, vidros, borracha e materiais naturais. A mistura contendo cimento hidráulico, água, agregados graúdos e miúdos e fibras descontínuas é chamada de concreto reforçado com fibras, cujas características específicas aumentam substancialmente a resistência à tração e a resistência à flexão, combatendo a propagação de microfissuras.

2.3. Influência das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto

A incorporação de adições minerais permite a produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, pois provocam mudanças na estrutura interna da pasta de cimento hidratada. Dentre os principais benefícios decorrentes das adições minerais estão: a redução na porosidade capilar do concreto – responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio – e a diminuição das fissuras de origem térmica em função da redução do calor de hidratação (DAL MOLIN, 2005).

As heterogeneidades na microestrutura da pasta de cimento hidratada, especialmente a existência de grandes poros e cristais na zona de transição, podem ser

consideravelmente reduzidas com a introdução das partículas finas presentes nas adições minerais. À medida que as reações pozolânicas e cimentícias estão em curso, ocorre um declínio gradual no tamanho dos poros e dos produtos cristalinos de hidratação.

Segundo Kihara e Centurione (2005), as adições minerais podem produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto.

Como efeito químico das adições minerais, temos a sua capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento Portland, na formação adicional do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o responsável principal pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

Dentre os diversos efeitos físicos decorrentes das adições minerais ao concreto, temos: o efeito microfiller (aumento da densidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições inferiores às partículas do cimento); o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento; alteração da microestrutura da zona de transição (redução da exsudação, com diminuição da espessura da zona de transição e interferência no crescimento dos cristais), com conseqüente aumento de desempenho do concreto em termos de resistência mecânica e durabilidade. A resistência a ataques químicos e à fissuração térmica são aspectos da durabilidade do concreto que melhoram significativamente devido à incorporação das adições minerais.

Várias propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, são afetadas positivamente com o uso das adições minerais. A eficiência de uma adição mineral no comportamento do concreto pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da sua composição química, mineralógica e granulométrica. Porém, de uma maneira geral, os mecanismos pelos quais as adições minerais influenciam as propriedades do concreto fresco e endurecido dependem mais do tamanho, forma e textura das partículas do que da sua composição química.

Mehta e Monteiro (1994) ressaltam que as adições minerais podem certamente melhorar as propriedades do concreto, no entanto não se deve esperar que venham compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto ou de um traço pobre.

2.3.1. Influência das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto Fresco

2.3.1.1. Aspectos reológicos e exsudação

O uso das adições minerais altera as características reológicas do concreto devido à presença de grãos menores na mistura, pois o aumento na relação do volume de sólidos para o volume de água produz uma pasta com maior plasticidade e coesão. Dessa forma, os efeitos da exsudação e da segregação são reduzidos, em função do maior volume de finos e do menor consumo de água necessário para uma dada trabalhabilidade. Como consequência, características melhores são obtidas em relação a diversos aspectos, como a trabalhabilidade e a facilidade de bombeamento e acabamento do concreto.

A segregação consiste na separação dos constituintes do concreto fresco, formando uma massa desuniforme. Para Mehta e Monteiro (1994), há dois tipos de segregação. O primeiro tipo é uma característica das misturas secas e consiste na separação dos agregados da argamassa do concreto, sendo uma de suas causas principais a vibração excessiva. O segundo tipo de segregação consiste na exsudação, que é característica das misturas de concreto muito fluidas.

A exsudação resulta da inabilidade dos materiais componentes do concreto em reterem toda a água da mistura em estado disperso, enquanto os sólidos mais pesados estiverem assentando. Segundo Neville (1982), a exsudação é uma forma de segregação onde parte da água da mistura tende a subir para a superfície do concreto recém aplicado, em função da incapacidade dos sólidos da mistura em reter toda a água de amassamento quando eles se acomodam. Ela faz com que a parte superior do concreto se torne excessivamente úmida, tendendo a produzir um concreto poroso e menos resistente, sujeito à desintegração pela percolação da água.

Segundo Dal Molin (2005), pode-se afirmar que os concretos com adições minerais tendem a ser mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e exsudação, quando comparados a um concreto sem adição. Malhotra e Mehta (1996) relatam que concretos contendo cinzas volantes geralmente apresentam redução na segregação e exsudação, sendo desta forma adequados para o lançamento de concreto bombeável. Segundo estes mesmos autores, as escórias de alto-forno em geral são moídas até uma finura maior que a do cimento Portland comum e, portanto, uma dada massa de escória possui uma área superficial maior do que a massa correspondente de cimento Portland. Sendo assim, nos concretos onde uma determinada quantidade de cimento Portland é substituída por uma quantidade equivalente de escória, a exsudação não será um problema.

A exsudação em concretos contendo sílica ativa é consideravelmente mais baixa do que nos concretos de cimento Portland sem adição. Conforme mostrado na Figura 1, as partículas extremamente finas de sílica ativa se distribuem entre as partículas de cimento, reduzindo os canais de exsudação e permitindo que apenas uma pequena quantidade de água livre suba até a superfície do concreto recém consolidado. A Figura 3 mostra o efeito da redução significativa da exsudação com o aumento na substituição do cimento por sílica ativa.

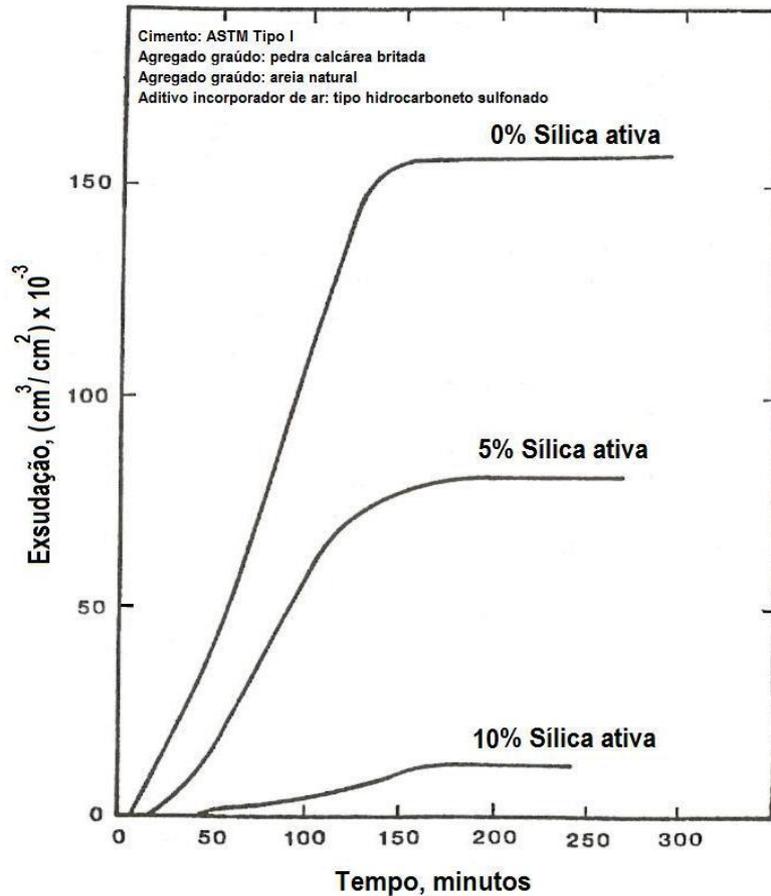


Figura 3 - Exsudação em concretos com sílica ativa (CANMET, 1985 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

2.3.1.2. Consumo de água

O consumo de água de concretos contendo adições minerais é um fator que depende principalmente das características físicas da adição mineral.

Muitos pesquisadores têm relatado que a substituição parcial de cimento Portland por certas adições minerais, como as cinzas volantes e a escória de alto-forno, provoca a redução no consumo de água em argamassas e concretos.

O pequeno tamanho e a forma essencialmente esférica das partículas de cinza volante com baixo teor de cálcio exercem influência nas propriedades reológicas da pasta de cimento, causando uma redução no consumo de água necessário para um dado grau de trabalhabilidade. Segundo Neville (1997), as pequenas partículas de cinza volante mantêm os grãos de cimento adsorvidos em suas superfícies eletricamente

carregadas, provocando um efeito dispersor no sistema, semelhantemente ao que ocorre com os aditivos redutores de água orgânicos.

Assim como as cinzas volantes, as escórias tornam possível reduzir a quantidade de água requerida para uma dada consistência, em função do tamanho pequeno e estrutura vítrea de suas partículas. Segundo Meusel e Rose (1979) apud Malhotra e Mehta (1996), com um aumento na proporção de escória de alto-forno como material cimentício no concreto, há um aumento na medida do *slump*, indicando assim um menor consumo de água para o concreto com escória.

Outras adições minerais, como a sílica ativa e a cinza da casca de arroz, podem provocar a necessidade de aumento no consumo de água quando adicionadas ao concreto, devido à sua extrema finura. Este problema, entretanto, pode ser resolvido com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes.

2.3.1.3. Calor de hidratação

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os compostos do cimento Portland são produtos que estão em um estado de energia elevada, por serem formados a partir de reações a altas temperaturas que não estão em equilíbrio. As reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas, ou seja, os compostos do cimento reagem com a água para atingir estados de baixa energia, havendo neste processo a liberação de energia em forma de calor. O calor de hidratação é muitas vezes prejudicial à formação do concreto, sobretudo em estruturas de concreto massa, sendo motivo de grande preocupação por parte de calculistas e construtores.

De maneira geral, com a substituição do cimento pelas adições minerais, o calor de hidratação gerado é reduzido, uma vez que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação. Dessa forma, o aumento de temperatura em grandes massas de concreto pode ser reduzido se o cimento for substituído por adições com reação lenta – como a escória de alto-forno, as pozolanas naturais, as argilas calcinadas ou a cinza volante – pois grande parte do calor é dissipado à medida que vai sendo gerado (DAL MOLIN, 2005).

Considerando-se que a temperatura máxima em concreto massa é atingida em torno de sete dias após o lançamento, devido ao calor de hidratação, o uso de adições minerais contribui para reduzir a elevação de temperatura proporcionalmente à quantidade de cimento Portland substituído. Considera-se em geral o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo adições minerais como sendo a metade do valor médio produzido pela hidratação do cimento Portland.

A redução do calor de hidratação está diretamente relacionada com a durabilidade dos concretos à fissuração térmica. Sabe-se que concretos feitos em obras sem adições minerais sofrem uma perda de resistência em função do microfissuramento no esfriamento, porém concretos contendo adições minerais em geral apresentam ganho de resistência, pois se beneficiam com a ativação térmica causada pela aceleração da reação pozolânica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Adições minerais de atividade moderada, como as pozolanas naturais e as cinzas volantes com baixo teor de cálcio, não apresentam interações químicas significativas com os produtos de hidratação do cimento durante os primeiros sete dias do processo de hidratação. Após este tempo é que as reações pozolânicas e cimentícias destes materiais geralmente se iniciam. As fissuras de origem térmica em idades iniciais causadas pelo rápido esfriamento do concreto quente podem, portanto, ser controladas através da substituição parcial de cimento por uma pozolana com estas características. Os efeitos da substituição de uma pozolana natural sobre o calor de hidratação de um cimento Portland podem ser vistos através do gráfico mostrado na Figura 4.

Uma importante vantagem do uso de pozolanas em concretos de alta resistência é que o risco de fissuração térmica é reduzido, pois relativamente menor calor de hidratação é liberado por unidade de resistência.

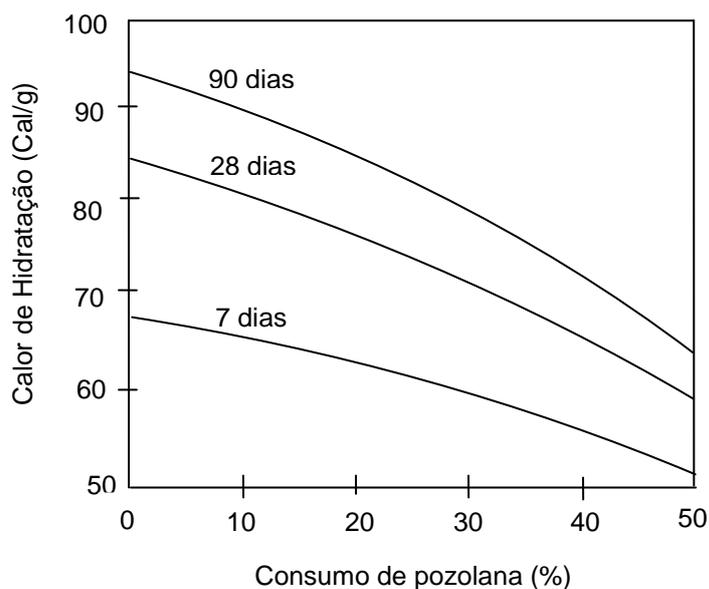


Figura 4 - Efeito da substituição de pozolana natural sobre o calor de hidratação de um cimento Portland (MASSAZZA e COSTA, 1978 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

2.3.2. Influência das Adições Mineraias nas Propriedades do Concreto Endurecido

2.3.2.1. Resistência à compressão

O uso de adições mineraias, sobretudo a adição de pozolanas mais ativas ao concreto (sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz), causa uma melhora notável na sua resistência à compressão (DAL MOLIN, 2005). O aumento da resistência mecânica dos concretos com adições mineraias está diretamente relacionado com o aumento da resistência da matriz na zona de transição, devido ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento.

Segundo Mehta (1987), aos 7 dias, a resistência à compressão nos concretos sem adição de pozolanas ainda é superior, se comparado ao concreto com adição, uma vez que a reação de hidratação das pozolanas ainda não foi suficiente para afetar a resistência. Porém, aos 28 dias, misturas contendo 10% de pozolanas já apresentam resistências superiores.

O resultado da resistência à compressão de concretos com utilização de escória de alto-forno como substituto do cimento depende de alguns fatores, como o tipo, a finura e a proporção de escória utilizada, o tipo de cimento e a relação água/aglomerante (MALHOTRA, 1987). Em geral, nos primeiros dias, a resistência dos concretos com escória é inferior à resistência dos concretos convencionais. Após 7 dias os valores das resistências se tornam próximos e, com 28 dias em diante, as resistências nos concretos com escória tendem a ser maiores.

Segundo Malhotra e Mehta (1996), quando o concreto de cimento Portland é curado em temperaturas que excedem 30°C, observa-se um aumento na resistência nas primeiras idades, porém um decréscimo acentuado na resistência do concreto endurecido. Já um concreto com adição de cinzas volantes comporta-se de forma completamente diferente. Conforme o gráfico da Figura 5, que mostra a forma como a temperatura atingida durante os primeiros dias de cura influencia na resistência do concreto aos 28 dias, percebe-se que, em contraste com a perda de resistência que ocorre com o cimento Portland comum, os concretos contendo cinza volante apresentam ganho de resistência devido ao aquecimento. Isto possui grande valor em construções envolvendo concreto massa ou em construções de concreto em elevadas temperaturas.

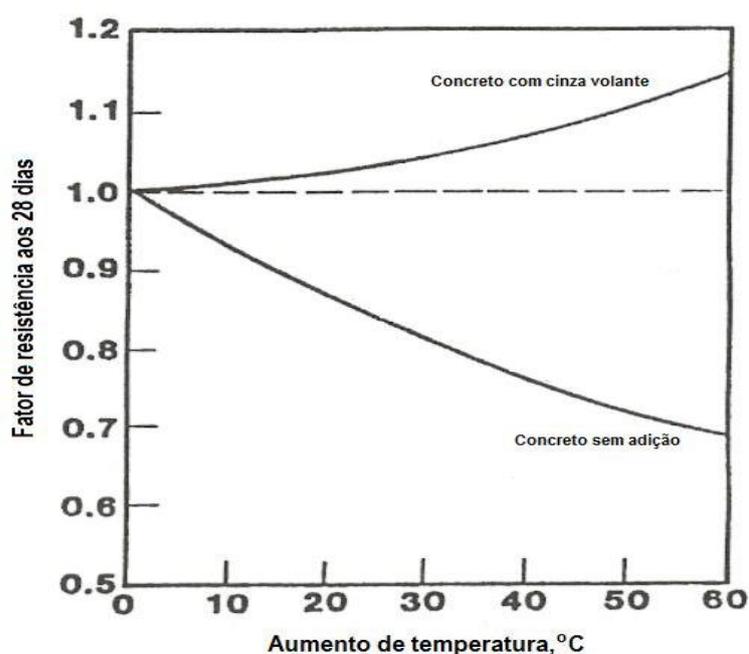


Figura 5 - Efeito do aumento de temperatura durante a cura no desenvolvimento da resistência à compressão em concretos (BAMFORTH, 1980 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

Dados sobre o desenvolvimento da resistência à compressão em concretos com adição de cinza de casca de arroz são mostrados na Tabela 3, onde se verifica que um concreto com adição de 10% de cinza de casca de arroz possui valores de resistência à compressão ligeiramente superiores nas várias idades até aos 180 dias, se comparado ao concreto sem adições.

Tabela 3 - Propriedades do concreto endurecido contendo CCA (ZHANG e MALHOTRA, 1995)

Mistura N°.	CCA* (%)	Sílica ativa (%)	A/C ou A/C+CCA	Peso unitário (kg/m ³)	Propriedades de Resistência (MPa)								Módulo E (GPa)
					Compressão						Tração	Flexão	
					1d	3d	7d	28d	90d	180d	28d	28d	
C0	0	0	0,40	2350	20,9	25,5	28,9	36,4	42,5	44,2	2,7	6,3	29,6
R10	10	---	0,40	2320	22,1	26,2	31,1	38,6	47,0	48,3	3,5	6,8	29,6

* CCA = Cinza de casca de arroz

Vários fatores exercem influência sobre a resistência final do concreto com adições minerais, como: condições de cura, quantidade da adição mineral, tamanho das partículas, relação água/cimento, presença de superplastificantes, etc. Em geral, a adição de superplastificantes é essencial para se alcançar uma dispersão eficiente das adições minerais no concreto, pois age no sentido de compensar a maior demanda de água pelas partículas menores, potencializando o efeito físico-químico da adição pozolânica.

2.3.2.2. Resistência à tração

Com as adições minerais, os fatores que levam ao aumento na resistência à compressão dos concretos – como a redução na porosidade da matriz e da zona de transição – são basicamente os mesmos que levam ao aumento na resistência à tração. Porém, segundo Dal Molin (2005), o aumento da resistência à compressão decorrente do efeito microfiller não corresponderá a um aumento proporcional na resistência à tração. Isso porque a resistência à tração só terá um aumento significativo a partir da consolidação das reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

2.3.2.3. Resistência à flexão

A resistência à flexão em concretos com adição de escória de alto-forno, com idade a partir de 7 dias, é geralmente igual ou superior à resistência correspondente em concretos sem adição, conforme avaliação de Hogan e Meusel (1981) apud Malhotra e Mehta (1996). O aumento na resistência à flexão no concreto com escória se deve em parte à maior aderência entre os aglomerantes (escória-cimento) e os agregados, devido à forma e superfície das partículas de escória.

Quanto aos concretos contendo cinzas volantes e sílica ativa, pesquisas apontadas por Malhotra e Mehta (1996) mostram que, sob condições normais de cura, a resistência à flexão é basicamente a mesma em relação aos concretos com cimento Portland sem adições.

2.3.2.4. Fluência ou deformação lenta

Segundo Bamforth (1980) apud Malhotra e Mehta (1996), estudos de fluência feitos com concretos adicionados com cinzas volantes e escória granulada de alto-forno mostram que nos concretos com idade acima de 24 horas submetidos a carregamento, os efeitos causados pela adição de cinzas volantes e escória foram de reduzir significativamente a magnitude da deformação lenta (Figura 6).

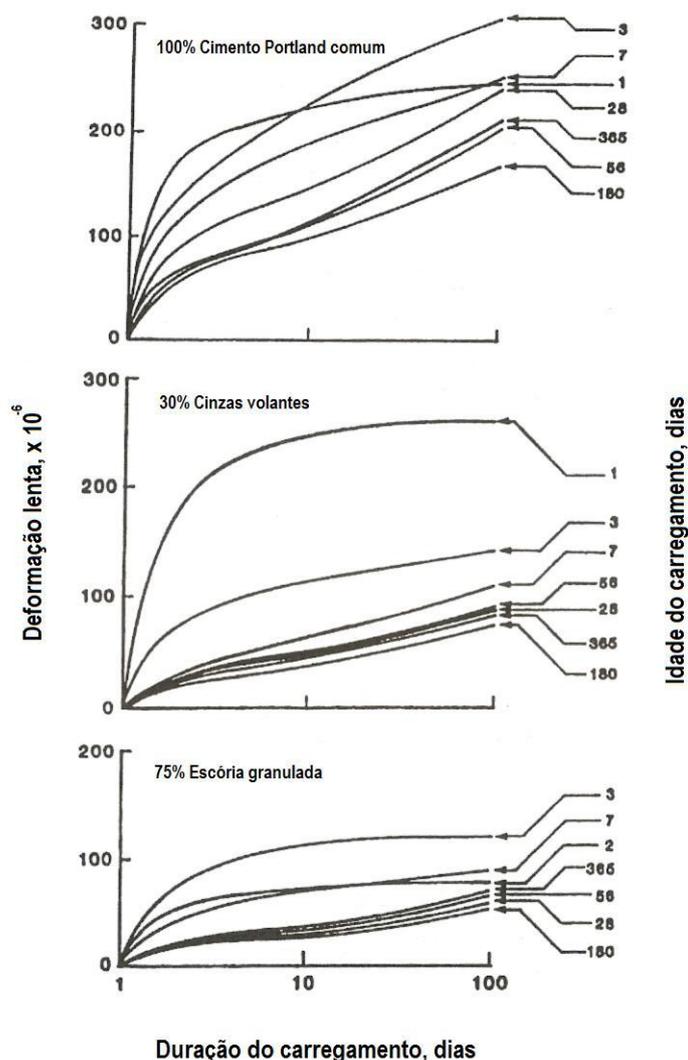


Figura 6 - Deformação lenta em concreto com e sem escória granulada de alto-forno, com relação tensão-resistência constante de 25% (BAMFORTH, 1980 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

2.3.2.5. Retração térmica

A hidratação ou pega da pasta de cimento Portland é seguida pela evolução do calor que leva a um aumento na temperatura do concreto. De uma forma geral, a substituição de cimento Portland por adições minerais resulta em uma redução significativa neste aumento de temperatura, tanto no concreto fresco quanto endurecido. Esta propriedade tem importância especial no concreto massa, onde o resfriamento subsequente a um aumento de temperatura pode levar à fissuração. Dados obtidos por Elfert (1973) apud Malhotra e Mehta (1996) mostram o efeito redutor que a adição de cinzas volantes e de folhelho diatomáceo calcinado provoca no aumento de temperatura do concreto massa (Figura 7).

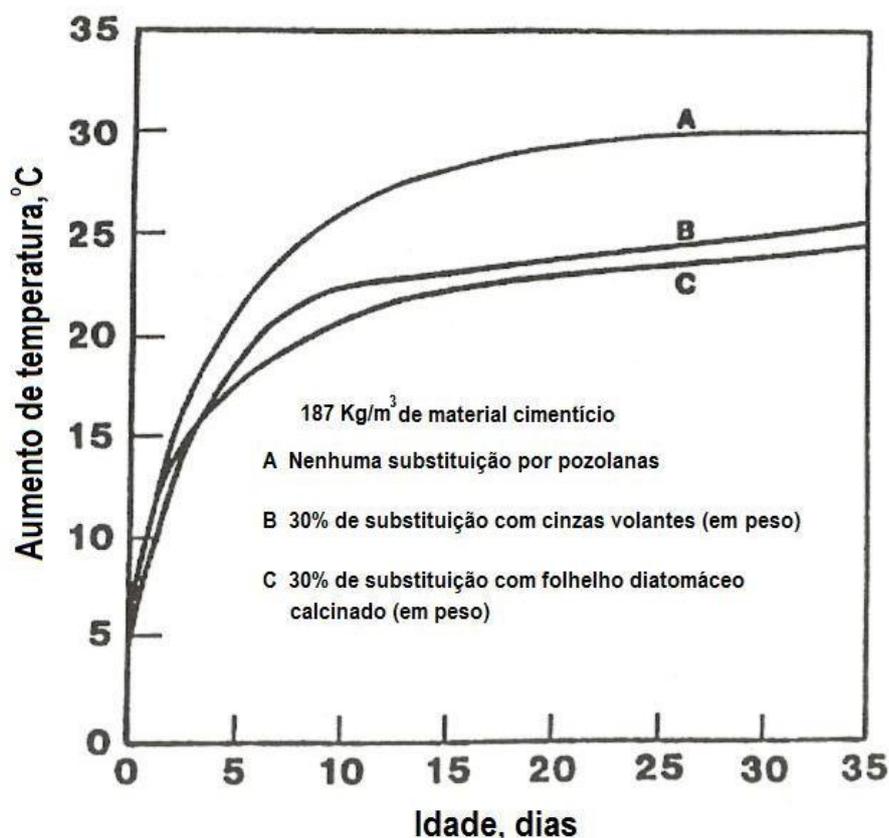


Figura 7 - Influência das pozolanas no aumento da temperatura do concreto (ELFERT, 1973 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996)

2.3.2.6. Módulo de deformação

Para Dal Molin (2005), embora estudos comprovem a existência de relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão, os aumentos nos níveis de resistência à compressão obtidos em concretos com adições minerais não se reproduzem com o mesmo grau de intensidade nos valores de módulo de deformação, pois o fator limitante para as causas do seu aumento está relacionado com as características do agregado.

Segundo Rocha (2005), com a utilização de metacaulim de alta reatividade em concretos de cimento Portland, o módulo de elasticidade do concreto pode ter um aumento de até 15%.

2.3.2.7. Retração por secagem

Para Coutinho (1994), a substituição de cimento por pozolana leva ao aumento da retração nas primeiras idades, porém, a longo prazo, maiores extensões somente são observadas com porcentagens de substituição superiores a 20%. O mesmo autor ainda sugere que, quando se introduz escória de alto-forno ao concreto, a retração em geral não é afetada, a não ser em casos de baixa relação água/cimento (a/c) ou cura inicial de curta duração, quando um pequeno aumento da retração pode ser observado. De forma semelhante, a introdução de sílica ativa também não altera a retração se a relação água/cimento se mantiver inalterada. Segundo Rocha (2005), a retração por secagem de pastas de cimento com a utilização de metacaulim é menor, se comparada às pastas de cimento sem adições.

2.3.3. Efeitos das Adições Minerais na Durabilidade do Concreto

2.3.3.1. Porosidade capilar e permeabilidade

A confecção de concretos com baixa porosidade capilar é de extrema importância para a durabilidade das construções, pois os processos de deterioração estão relacionados com os mecanismos de absorção, através dos quais íons agressivos penetram juntamente com a água no interior do concreto.

Dentre todas as causas relacionadas com a falta de durabilidade do concreto, a mais importante é a permeabilidade excessiva. Concretos permeáveis são vulneráveis ao ataque químico da maioria das classes de agentes agressivos. Para que o concreto seja durável, o concreto de cimento Portland deve ser relativamente impenetrável.

As adições minerais atuam no sentido de formar um concreto com maior capacidade de impedir a passagem de água em seus poros capilares. Isto se deve ao fato de reagirem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando compostos estáveis e resistentes – como os silicatos e os sílico-aluminatos de cálcio hidratado – que se precipitam nos canais capilares da pasta de cimento endurecida, causando redução na permeabilidade e absorção do concreto.

A incorporação de adições minerais como cinzas volantes, sílica ativa, escória granulada de alto-forno e pozolanas naturais ao concreto resulta em produtos cristalinos de menor dimensão e poros mais finos na pasta de cimento hidratada, em especial na zona de transição agregado/pasta de cimento, levando a um decréscimo na permeabilidade. Esta redução na permeabilidade é muito maior nos concretos com adição de sílica ativa e cinza de casca de arroz, devido à sua alta pozolanicidade.

2.3.3.2. Resistência a sulfatos

A incorporação de adições minerais ao concreto geralmente melhora a resistência a águas ácidas, sulfatadas e marinhas, devido à reação pozolânica, a qual é acompanhada por uma redução na permeabilidade e no teor de hidróxido de cálcio do produto hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A resistência a sulfatos e ácidos nos concretos contendo adições minerais é influenciada pelos seguintes fatores: o tipo e quantidade do cimento utilizado, o tipo e quantidade da adição mineral, as características físicas da adição, a relação água/material cimentício e as condições de cura.

O uso de adições minerais contribui para o aumento da resistência química a sulfatos dos concretos, pois reduzem a permeabilidade do concreto, dificultando o acesso e difusão dos sulfatos na matriz de cimento. As adições minerais também reagem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), reduzindo a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para combinar com os sulfatos presentes e gerar compostos com características expansivas, como a etringita.

Estudos feitos por Fiskaa (1973) apud Malhotra e Mehta (1966), com vários tipos de concretos expostos a águas ácidas e sulfatadas por longos períodos, revelam que o concreto com adição de sílica ativa apresenta alta resistência a sulfatos, devido aos seguintes fatores: o refinamento dos poros na estrutura do concreto, resultando em transporte reduzido de íons agressivos; a baixa quantidade de hidróxido de cálcio na pasta de cimento hidratada; o aumento na quantidade de alumínio incorporado aos

produtos de hidratação, reduzindo a quantidade de óxido de alumínio disponível para a formação de etringita.

Bakker (1983) descobriu que concretos contendo grandes quantidades de escória apresentam uma elevação na resistência a sulfatos, devido à redução na permeabilidade do concreto aos íons e água. Hogan e Meusel (1981) comprovaram que misturas de cimento e escória granulada de alto-forno em 40 a 65% de substituição resultaram em argamassas com resistência superior a ataques por sulfatos (Figura 8).

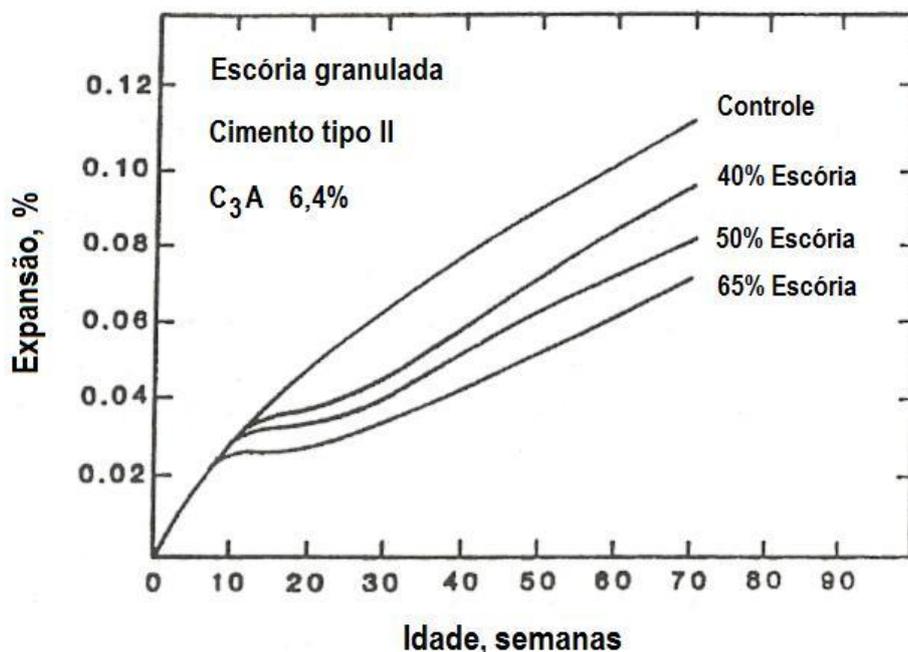


Figura 8 - Resistência a sulfatos em argamassas com adição de escória (HOGAN e MEUSEL, 1981)

2.3.3.3. Ciclos de congelamento e descongelamento

De maneira geral, concretos com incorporação de adições minerais possuem excelente durabilidade aos ciclos repetitivos de congelamento e descongelamento, desde que tenham atingido a devida maturação e possuam sistema de vazios de ar adequado.

Estudos realizados em cimentos contendo adições minerais, quando iniciados após períodos de cura mais longos, indicam que os mesmos desenvolvem resistências superiores ao congelamento e descongelamento, se comparadas às resistências do

cimento Portland sem adições (BROWN et al., 1976 apud MALHOTRA e MEHTA 1996).

Segundo Virtanen (1983) apud Malhotra e Mehta (1996), concretos com ar incorporado contendo adições de escórias de alto-forno, cinzas volantes ou sílica ativa, apresentam uma melhor resistência ao congelamento do que os concretos de cimento Portland correspondentes. Tal desempenho também foi observado em concretos com incorporação de cinzas de casca de arroz.

2.3.3.4. Reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado caracteriza-se pela expansão e fissuração do concreto como resultado de reações químicas envolvendo íons alcalinos do cimento e outras fontes (aditivos, agregados contaminados com sais, penetração de água do mar, etc.), íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes no agregado. Tal fenômeno leva o concreto à perda de resistência, elasticidade e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A presença das adições minerais com atividade química tem papel fundamental no combate à reação álcali-agregado, ao inibir ou atenuar as reações expansivas que ocorrem entre os álcalis do cimento e os agregados potencialmente reativos. Segundo Dal Molin (2005), isso ocorre porque as adições minerais: a) reduzem a permeabilidade do concreto, resultando em menor absorção de água, que é responsável pela expansão do gel álcali-sílica; b) provocam a redução do total de álcalis do aglomerante ao substituir parte do cimento; c) provocam o consumo de parte dos álcalis pela reação pozolânica, reduzindo a quantidade disponível para reagir com os agregados reativos.

Pesquisas realizadas com concretos para verificar a atuação de uma cinza de casca de arroz sobre a reação álcali-agregado (ANDRADE et al., 1993 apud DAL MOLIN, 2005) comprovaram que a incorporação da cinza de casca de arroz reduziu de maneira significativa a expansão média, conforme gráfico na Figura 9.

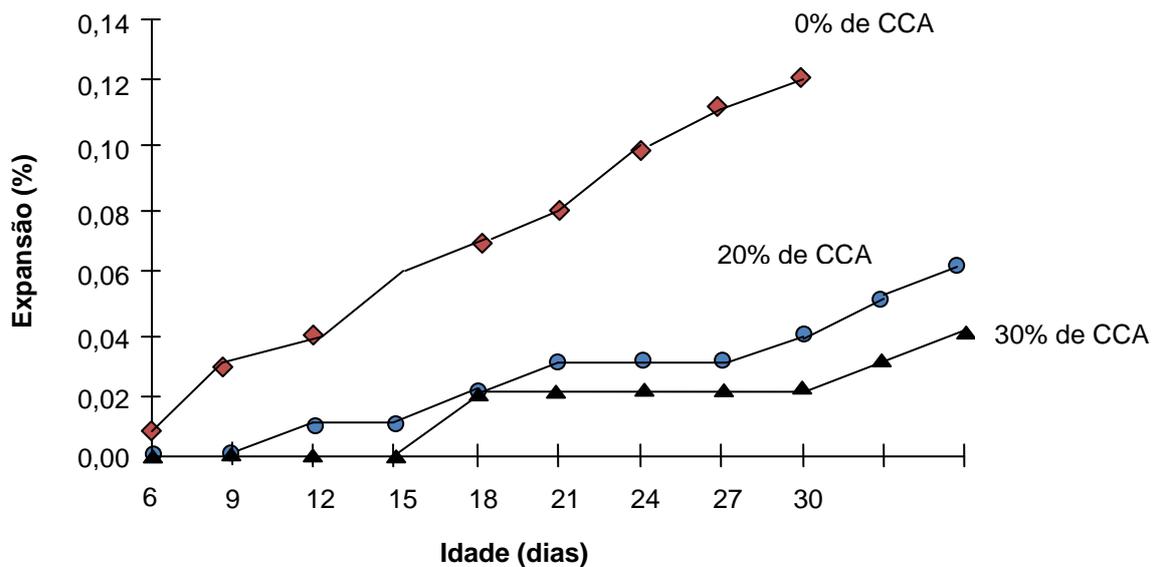


Figura 9 - Expansão média em função do tempo e da porcentagem de substituição de cinza de casca de arroz (ANDRADE et al., 1993 apud DAL MOLIN, 2005)

2.3.3.5. Corrosão de armaduras

A permeabilidade aos íons cloreto é um ponto crítico em estruturas de concreto armado expostas a ambientes contendo agentes agressivos, como águas marinhas e sais de degelo. Os íons cloreto destroem a camada passivadora de óxido de ferro presente sobre a armadura, tornando-a vulnerável à corrosão. Assim, como medida de proteção contra a corrosão, deve-se reduzir a mobilidade dos íons cloreto para dentro do concreto.

Devido à diminuição da permeabilidade provocada pelo refinamento dos poros e pelo aumento da densidade na matriz no concreto, as adições minerais, como a sílica ativa, contribuem para reduzir a penetração de cloretos e a entrada de umidade e oxigênio no interior do concreto, aumentando a sua resistividade e atuando na prevenção contra a corrosão das armaduras.

Pesquisas têm mostrado que a incorporação de escória granulada de alto-forno à pasta de cimento contribui para a transformação de grandes poros presentes na pasta em poros menores, levando assim a um decréscimo na permeabilidade da matriz e, conseqüentemente, do concreto.

2.3.3.6. Carbonatação

O processo de carbonatação consiste na formação de carbonato de cálcio a partir do hidróxido de cálcio e, em menor escala, dos silicatos e aluminatos de cálcio na pasta de cimento hidratada, que reagem em condições de umidade com o dióxido de carbono da atmosfera. A carbonatação reduz a alcalinidade do concreto, podendo levar à destruição da camada protetora de óxido de ferro que está normalmente presente na superfície das armaduras de aço. A taxa com que o concreto sofre a carbonatação é determinada pela sua permeabilidade, pelo grau de saturação com água e pela massa de hidróxido de cálcio disponível.

Independente do tipo de adição mineral utilizada no concreto, o grau de carbonatação dos concretos com adições não será diferente dos concretos de cimento Portland sem adições, dentro das mesmas condições de cura e com relação água/cimento equivalente. Como o concreto contendo adições minerais leva mais tempo para atingir o mesmo nível de maturação do concreto de cimento Portland comum, torna-se importante realizar uma cura apropriada do mesmo.

De maneira geral, a carbonatação não representa um problema em concretos adequadamente curados, com baixa relação água/cimento e bom controle de qualidade. Isto também se aplica a todos os concretos contendo adições minerais.

2.3.3.7. Resistência ao fogo

De acordo com estudos realizados por Jahren (1989) apud Malhotra e Mehta (1996), há pouca ou nenhuma evidência de que as adições minerais, como a sílica ativa, causem algum efeito adverso na resistência ao fogo de concretos de alta resistência, tendo como fatores intervenientes mais importantes as características físicas do sistema após o endurecimento e as condições de uso do concreto.

2.4. Visão de Sustentabilidade

2.4.1. Construção Sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável diz respeito ao modo de desenvolvimento que tem como alvo o alcance da sustentabilidade. De acordo com o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008), o desenvolvimento sustentável trata do processo de manutenção do equilíbrio entre a capacidade do ambiente e as demandas por igualdade, prosperidade e qualidade de vida da população humana.

Conforme a definição cunhada em 1987 pela Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável é o tipo de desenvolvimento que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, juntamente com a Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura e outras instituições apresentam uma série de princípios básicos da construção sustentável, dentre os quais se destacam:

- Aproveitamento de condições naturais locais.
- Utilizar mínimo de terreno e integrar-se ao ambiente natural.
- Não provocar ou reduzir impactos no entorno.
- Gestão sustentável da implantação da obra.
- Uso de matérias-primas que contribuam com a eco-eficiência do processo.
- Redução do consumo energético.
- Reduzir, reutilizar, reciclar e dispor corretamente os resíduos sólidos.
- Educação ambiental – conscientização dos envolvidos no processo.

A visão de construção sustentável deve estar presente em todo o ciclo de vida de um empreendimento, desde sua concepção até sua requalificação, desconstrução ou demolição.

Segundo Silva (2007), dentre os aspectos ambientais de sustentabilidade ligados à construção sustentável, referenciados pelos principais sistemas de avaliação de

sustentabilidade e certificação voluntária de edifícios – BREEAM (Reino Unido), CASBEE (Japão), GBTool (Internacional) e LEED (Estados Unidos) – destacam-se: gestão do uso da água, gestão do uso de energia, gestão de materiais e resíduos, prevenção de poluição, gestão ambiental, qualidade dos serviços e desempenho econômico.

Sob o prisma da sustentabilidade, materiais e resíduos devem ser tratados conjuntamente, pois a correta seleção e utilização de materiais reduzem a geração de resíduos, bem como os impactos por ela ocasionados.

Podemos perceber que, nos últimos anos, há uma busca cada vez maior por uma evolução da indústria do cimento e do concreto pela via do desenvolvimento sustentável – destacadamente nas áreas de proteção climática (estratégias para mitigar as alterações climáticas), produtividade dos recursos, redução das emissões, inovação e gestão ambiental.

Sabe-se que um plano de ação para o desenvolvimento sustentável passa pela compreensão e criação de novas oportunidades de mercado através de processos inovadores que garantam uma maior eficiência de recursos/energia e uma redução dos custos – o que significa a procura de novas utilizações para os subprodutos das indústrias e para os desperdícios da produção (WBCSD/CSI, 2002).

No processo de seleção de materiais e fornecedores adequados com as premissas da sustentabilidade, o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008) recomenda a adoção de materiais locais, reutilizáveis, recicláveis ou reciclados. Dentre estes, pode-se destacar não somente o cimento Portland composto com escória ou outros produtos minerais reaproveitáveis, como também as adições minerais aplicadas diretamente ao concreto.

2.4.2. Importância das Adições Minerais para o Desenvolvimento Sustentável

Milhões de toneladas de subprodutos de usinas e indústrias – como fornos de usinas termoelétricas que empregam carvão como combustível e fornos metalúrgicos que

produzem ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício – são produzidos a cada ano nos países industrializados.

O acúmulo destes subprodutos em aterros representa não só uma perda de material como também uma fonte de graves problemas de poluição ambiental. Seu aproveitamento como agregado para concreto e em subleitos de rodovias é uma alternativa de descarte que não utiliza o potencial destes materiais pozolânicos e cimentantes. Com adequado controle de qualidade, tais subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, seja na forma de cimentos Portland compostos, seja como adições minerais. Na condição de substituto parcial do cimento Portland no concreto, estes materiais proporcionam uma economia notável de energia e custos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como substituto parcial do clínquer calcário calcinado na fabricação do cimento, o uso da escória representa uma considerável redução no consumo de energia e nas emissões de CO₂ na atmosfera, já que a fabricação do clínquer é baseada na queima de óleo, gás e/ou carvão em altas temperaturas, durante o processo de calcinação.

A redução de poluição gerada na produção de cimentos com adição de escórias e pozolanas é muito significativa, em função da redução das emissões de gás carbônico, considerando que, para cada tonelada de clínquer produzido, uma tonelada de CO₂ é lançada no meio ambiente (DAL MOLIN, 2005).

A energia associada à produção de concretos pode ser consideravelmente reduzida, pois o cimento Portland é o componente que mais requer energia para ser produzido na mistura de concreto, enquanto que os subprodutos pozolânicos e cimentícios provenientes de usinas térmicas e metalúrgicas requerem pouco ou nenhum dispêndio de energia em sua produção. John (1995) apud Dal Molin (2005) afirma que a utilização de escórias e pozolanas permite a produção de cimentos sem a calcinação da matéria-prima, gerando uma redução no consumo energético de até 80%.

Com a incorporação de adições minerais na produção de cimentos e concretos a redução no consumo de energia ocorre não apenas porque esses produtos incorporam grandes quantidades de energia, como também porque as distâncias de transporte de matérias-primas são geralmente reduzidas.

Segundo Isaia & Gastaldini (2004) apud Dal Molin (2005), após estudos feitos em concretos com baixo consumo de cimento e elevado conteúdo de adições minerais (substituição de cimento por 70% de escória e 20% de cinzas volantes), verificou-se que é possível reduzir o consumo de energia, a emissão de CO₂ e o custo do metro cúbico do concreto em torno de 55%, 88% e 5% respectivamente, podendo-se ao mesmo tempo aumentar em 40% o índice médio de durabilidade, em comparação com os concretos sem adições. Conclui-se também que, se apenas 3,5% da produção mundial de concreto fosse realizada com 90% de adições minerais, a produção de clínquer não necessitaria ser aumentada além dos níveis atuais, tornando a indústria do cimento e concreto sustentável.

Segundo Little (1999), a utilização de resíduos, a exemplo das escórias, é benéfica ao meio-ambiente, na medida em que se pode substituir minerais não metálicos cuja extração impacta o meio-ambiente, como brita, areia, calcário, rocha fosfática e outros. O uso da escória – tanto como adição mineral quanto como substituto parcial do clínquer na fabricação de cimento – reduz a necessidade de consumo destes recursos naturais primários e não renováveis, além de representar uma redução na quantidade de material a dispor em aterros ou estocar em pilhas, redução no consumo de energia e diminuição nas emissões de CO₂ – fatores estes que geram grande impacto ambiental.

Segundo Coutinho (1997), outro fator ligado ao grande desenvolvimento da aplicação de subprodutos industriais, como as cinzas volantes, resulta da necessidade do aproveitamento dos produtos de despoeiramento dos fumos que vão poluir a atmosfera dos grandes centros industriais.

3. ANÁLISE CRÍTICA

3.1. Produção Siderúrgica no Brasil

O Brasil é atualmente o 8º produtor de aço bruto no mundo, estando 95% da produção brasileira concentrada na região Sudeste (40% no Estado de Minas Gerais). Há no país um total de 26 usinas produtoras de aço, administradas por oito grupos empresariais, sendo que 12 delas dispõem de altos-fornos para a redução do minério de ferro (integradas). Dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2008) apontam uma produção anual em torno de 34 milhões de toneladas de aço bruto por processo de aciaria, sendo 76% proveniente de fornos a oxigênio (BOF) e 24% de fornos elétricos (FEA). A produção de ferro gusa no ano de 2008 foi de 30,8 milhões de toneladas, o que posiciona o Brasil entre os cinco maiores produtores no mundo.

A quantidade de escória produzida pelas siderúrgicas varia em função do tipo de forno e das matérias-primas alimentadas no forno. Segundo Little (1999), enquanto um alto-forno alimentado com minério de alto teor de ferro gera em média 300 Kg/t de escória, a alimentação com minério de mais baixo teor pode gerar até 1.000 Kg de escória por tonelada de gusa produzida. Dados da USGS (2008) indicam que a produção mundial de escórias de alto-forno é da ordem de 240 a 290 milhões de toneladas e a de escórias de aciaria entre 115 e 170 milhões e toneladas, com base nas proporções típicas relativas à produção de ferro-gusa e aço respectivamente.

Quando não recicladas na própria usina, as escórias de alto-forno e de aciaria geralmente são estocadas por certo tempo antes de serem transportadas para seu destino final. No caso das escórias de aciaria, é indispensável haver um tempo de espera para permitir a sua pré-expansão. Após este processo de estabilização, as escórias de aciaria podem então ser aproveitadas em aplicações específicas, inclusive como adição mineral.

A escória granulada de alto-forno é tipicamente usada no Brasil como substituto parcial para o clínquer de cimento Portland e, pelas suas propriedades hidráulicas, apresenta valor muito maior que o da escória resfriada ao ar. Em função da grande demanda das cimenteiras em relação à escória de alto-forno, é comum termos suas instalações construídas nas proximidades das siderúrgicas, para a produção de cimentos compostos com escória.

A produção das escórias de alto-forno possui as seguintes características: de maneira geral a destinação da escória básica (granulada) está concentrada nas cimenteiras e a da escória ácida (britada ou granulada) divide-se entre cimenteiras e estoque de pilhas. Quanto ao beneficiamento das escórias (moagem), 95% da escória é moída conjuntamente com o clínquer nas cimenteiras e apenas 5% é moída fora das cimenteiras, por empresas especializadas.

De forma geral, pode-se afirmar que a produção de escórias no Brasil, cujas proporções são cada vez mais relevantes no cenário mundial, é caracterizada por uma relação de exclusividade em relação às indústrias cimenteiras, para as quais se destina a quase totalidade do volume de escórias produzidas, para a fabricação de cimento.

3.2. Indústria Cimenteira

A indústria cimenteira no mundo possui uma produção anual média de 2,6 bilhões de toneladas de cimento, sendo a maior parte destinada à fabricação de concreto. É uma das maiores indústrias do planeta, sendo responsável por mais de 5% de todas as emissões de dióxido de carbono produzido pelo homem.

No Brasil, a indústria de cimento é composta de 10 fábricas com 65 unidades produtoras espalhadas pelo país, com capacidade de produção de 63 milhões de toneladas de cimento por ano. O Estado de Minas Gerais representa 23% da produção da indústria cimenteira brasileira. Os principais tipos de cimento existentes no Brasil e sua respectiva produção estão representados na Tabela 4:

Tabela 4 - Principais tipos de cimento produzidos no Brasil (SNIC, 2008)

Tipo de cimento	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco	Outros	Total
Produção (x 1000 ton)	1.034	29.754	7.659	3.876	3.211	115	940	46.589

De acordo com a Norma EN 197-1:2000 do Comitê Europeu de Normalização: o CPI - Cimento Portland Comum contém até 5% de componentes minoritários adicionados à sua composição; o CII - Cimento Portland composto contém até 34% de outros componentes; o CIII - Cimento Portland de Alto-forno constitui-se de cimento Portland e altas porcentagens de escória granulada de alto-forno (até 70%); o CIIV - Cimento Portland Pozolânico possui cimento Portland e uma baixa porcentagem de escória granulada de alto-forno e pozolana ou cinzas volantes (até 5%). Os materiais que são permitidos na composição dos cimentos Portland compostos são: escória granulada de alto-forno, sílica ativa, pozolanas naturais e industriais, cinzas volantes silicosas ou calcárias, argilas e folhelhos calcinados.

A indústria cimenteira se harmonizou para defender seus próprios interesses, buscando adquirir cada vez mais para si a exclusividade na comercialização da escória produzida nas siderúrgicas (que na maioria dos casos pertence ao mesmo grupo de empresas), sendo a produção totalmente direcionada para a fabricação de cimento Portland.

A granulação e venda de escória para a fabricação de cimento Portland ocorre no Brasil mediante contratos de médio e longo prazo entre siderúrgicas e cimenteiras, envolvendo grandes quantidades de escória. Este compromisso unilateral entre as siderúrgicas e cimenteiras impede a competição direta da escória moída (*slag cement*) com o cimento Portland, como ocorre no Reino Unido e Japão. Tampouco favorece a comercialização da escória entre as usinas siderúrgicas e os fornecedores independentes e concreteiras, devido à perda dos canais de venda das adições minerais (escória de alto-forno, cinzas volantes e outros), restringindo esta comercialização apenas para as cimenteiras, cujo poder de barganha aumenta, configurando-se em perda de ambiente competitivo.

Diante da força dos grandes grupos empresariais, inclusive multinacionais, mudanças neste cenário nacional são de difícil implantação, haja vista que há também um

componente conjuntural importante: a grande maioria dos engenheiros no país não possui conhecimento técnico-científico profundo a respeito do cimento, de sua composição química e de seus diferentes tipos e características. Dessa forma, poucos são os profissionais com capacidade de discernimento e visão crítica a respeito deste material tão essencial para a indústria da construção.

3.3. Normas Brasileiras

3.3.1. Disposições Normativas sobre a Produção de Concreto

A principal norma brasileira que dispõe sobre a produção de concreto é a NBR 12655, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Em sua atual versão, válida desde 14.09.2006, a referida norma se intitula: “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento”.

Diversas outras normas técnicas, a exemplo da NBR 6118:2003, que trata do Projeto de estruturas de concreto, contêm disposições que, ao serem citadas no escopo da NBR 12655:2006, constituem prescrições para a mesma.

Em sua última edição – NBR 12655:2006 – a norma trouxe algumas mudanças em relação à sua versão anterior – NBR 12655:1996 – sendo as adições minerais o assunto de maior relevância, com impacto nos processos de produção de concreto no Brasil.

Para uma melhor visualização dessas mudanças, apresenta-se a seguir uma compilação das principais diferenças entre as duas versões citadas, tendo como base a estrutura de tópicos da norma:

a. Objetivos (aplicabilidade da norma):

A versão anterior (1996) fixa condições para a execução de estruturas de concreto e define sua aplicabilidade para os seguintes tipos de concreto:

simples, armado ou protendido. As exceções na aplicação da norma vão para o concreto projetado, pavimentos ou concreto-massa para barragens.

A versão atual (2006) define de forma mais ampla o campo de atuação para a execução de concreto: tipos de estruturas (estruturas moldadas na obra, estruturas pré-moldadas e componentes estruturais pré-fabricados); tipos de produção de concreto (misturado na obra, pré-misturado e produzido em usina de pré-moldados); tipos de concreto por peso específico (normais, pesados e leves).

A versão de 2006 também define as exceções onde a norma não se aplica: concreto-massa, concretos aerados, espumosos e com estrutura aberta. Cita também outras aplicações que requerem exigências adicionais às prescrições da norma: estruturas especiais (viadutos, estruturas marítimas, etc.); uso de outros materiais (como fibras); tecnologias especiais ou inovadoras no processo de produção; concreto leve e concreto projetado.

b. Referências normativas:

As citações de outras normas técnicas cujas disposições constituem prescrições para a NBR 12655 podem ser vistas em ambas as versões, podendo-se destacar as diferenças entre elas através da Tabela 5.

Nota-se a partir desta tabela que a NBR 12655:2006 substitui algumas referências normativas por suas versões mais atualizadas (como a NBR 5738, NBR 5750, NBR 6118, NBR 7211, NBR 7223 e NBR 9606), inclui diversas normas que fixam condições exigíveis no recebimento dos cimentos Portland (vários tipos) e exclui as normas que definem as terminologias dos agregados e dos aglomerantes de origem mineral.

Tabela 5 - Referências normativas da NBR 12655:1996 e NBR 12655:2006

NORMA REFERENCIADA	NBR 12655	
	1996	2006
ABNT NBR 5732:1991 - Cimento Portland comum – Especificação		X
ABNT NBR 5733:1991 - Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificação		X
ABNT NBR 5735:1991 - Cimento Portland de alto-forno - Especificação		X
ABNT NBR 5736:1991 - Cimento Portland pozolânico - Especificação		X
ABNT NBR 5737:1992 - Cimentos Portland resistentes a sulfatos - Especificação		X
ABNT NBR 5738:1994 - Concreto - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - Método de ensaio	X	
ABNT NBR 5738:2003 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova		X
ABNT NBR 5739:1994 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio	X	X
ABNT NBR 5750:1992 - Amostragem de concreto fresco - Método de ensaio	X	
ABNT NBR NM 33:1998 - Concreto - Amostragem de concreto fresco		X
ABNT NBR 6118:1980 - Projeto e execução de obras de concreto armado - Procedimento	X	
ABNT NBR 6118:2003 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento		X
ABNT NBR 7211:1983 - Agregado para concreto - Especificação	X	
ABNT NBR 7211:2005 - Agregados para concreto - Especificação		X
ABNT NBR 7212:1984 - Execução de concreto dosado em central - Especificação	X	X
ABNT NBR 7223:1992 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Método de ensaio	X	
ABNT NBR NM 67:1998 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone		X
ABNT NBR 8953:1992 - Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência - Classificação	X	X
ABNT NBR 9606:1992 - Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone - Método de ensaio	X	
ABNT NBR NM 68:1998 - Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff		X
ABNT NBR 9833:1987 - Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico		X
ABNT NBR 9935:1987 - Agregados - Terminologia	X	
ABNT NBR 11172:1989 - Aglomerantes de origem mineral - Terminologia	X	
ABNT NBR 11578:1991 - Cimento Portland composto - Especificação		X
ABNT NBR 11768:1992 - Aditivos para concreto de cimento Portland - Especificação	X	X
ABNT NBR 12654:1992 - Controle tecnológico de materiais componentes do concreto - Procedimento	X	X
ABNT NBR 12989:1993 - Cimento Portland branco - Especificação		X
ABNT NBR 13116:1994 - Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação		X
ASTM C 1218:1997 - Test method for water-soluble chloride in mortar and concrete		X

c. Definições:

Enquanto a versão de 1996 da NBR 12655 aplica as definições prescritas nas normas NBR 6118, NBR 9935, NBR 11172 e NBR 11786, a versão de 2006 define todos os termos técnicos em seu próprio texto, sendo o maior destaque dado ao item 3.1.1, sobre a definição do concreto do cimento Portland:

Item 3.1.1 – concreto de cimento Portland: Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Para os efeitos desta Norma, o termo “concreto” se refere sempre a “concreto de cimento Portland”.

Nota-se que a norma de 2006 considera como componentes adicionais ao concreto apenas os aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa, os quais foram denominados “componentes minoritários”. Ao fornecer a definição de concreto, a norma atual exclui a possibilidade das adições minerais diretamente ao concreto, na medida em que estas não são citadas, diversamente ao que ocorre na sua versão anterior.

Ainda na norma atual, a mistura de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno ou materiais carbonáticos é citada no item 3.1.22 (definição de cimento Portland), porém considerando-se apenas a adição dos mesmos ao clínquer, durante o processo de fabricação do cimento.

d. Atribuições de responsabilidades:

O texto da norma atual que dispõe sobre modalidades de preparo do concreto prevê outras modalidades além das previstas anteriormente (concreto preparado pelo executante da obra e por empresa de serviços de concretagem), citando como exemplo o caso em que a mistura e o transporte do concreto são realizados por empresa de serviços de concretagem, sendo o estudo de dosagem e a escolha dos materiais indicada por pessoa legalmente qualificada.

e. Requisitos para o concreto:

No texto da norma atual foram introduzidos vários requisitos para o concreto, os quais são divididos em:

- Requisitos básicos: os requisitos para os materiais componentes do concreto têm ênfase nos cuidados quanto à adequação dos materiais ao uso pretendido no concreto e no controle tecnológico dos mesmos, em concordância com a NBR 12654. Normas técnicas adicionais são referenciadas para cada um dos componentes do concreto (cimento Portland, agregados e aditivos), para que seus requisitos sejam igualmente cumpridos. Nota-se que as adições minerais também não foram mencionadas neste contexto.

- Requisitos e condições de durabilidade da construção: as exigências de durabilidade das estruturas de concreto passam pelo cumprimento da Norma 6118, com ênfase em: condições de exposição da estrutura, correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto e condições especiais de exposição (gelo-degelo, sulfatos, cloretos, etc.).

Quanto aos requisitos de armazenamento dos materiais componentes do concreto, a versão anterior da norma incluía as adições minerais (item 6.1.5), caracterizando-as como “sólidos minerais em estado seco na forma pulverulenta, inertes ou ativos”. Já na versão atual da norma, o termo “adições minerais” desaparece, introduzindo-se um novo item (5.3.5), que faz menção apenas à sílica ativa e ao metacaulim.

A partir da análise destas mudanças ocorridas na Norma NBR 12655, observa-se que houve um grande retrocesso na legislação técnica brasileira quanto ao tratamento dado às adições minerais, pois, ao fornecer a definição de concreto, suprimiram-se as adições minerais do texto da norma, eliminando-se a possibilidade de sua aplicação diretamente ao concreto.

3.3.2. Disposições Normativas sobre a Composição de Cimentos

Há várias exigências postuladas pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, as quais exercem grande caráter limitador, quando não impeditivo, da utilização das escórias como material constituinte do cimento e do concreto.

No âmbito das normas brasileiras, há critérios técnicos estabelecidos que não são consensuais no meio acadêmico-científico, revelando fortes indícios de que interesses comerciais de caráter restrito têm predominância sobre os aspectos técnicos relacionados à utilização sustentável das escórias. Esta inconsistência pode ser observada através dos valores definidos para os índices de Resíduo Insolúvel e Perda ao Fogo, que são parâmetros de exigências químicas esperados na composição dos cimentos produzidos no Brasil (Tabela 6).

O Resíduo Insolúvel indica a quantidade de componentes não-hidráulicos no cimento. Em outras palavras, as normas limitam o teor de Resíduo Insolúvel não só para garantir que a combinação entre sílica, alumina e óxido de ferro tenha sido a melhor possível durante a fabricação do cimento, mas também para evitar fraudes, como adições de substâncias inertes ao cimento.

A Perda ao Fogo também é um parâmetro limitado pelas normas, para garantir que não seja utilizado cimento envelhecido (com reações de hidratação incipientes) e também para se determinar a adição de substâncias estranhas, inertes, em quantidade superior à permitida. No caso das cinzas volantes, a perda ao fogo é geralmente atribuída ao material carbonático não queimado que, devido à elevada área superficial, aumenta a demanda por água para obtenção da consistência padrão e aumenta a dosagem necessária de aditivos redutores de água e incorporadores de ar.

Tabela 6 - Exigências químicas para os principais tipos de cimento Portland

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Norma Brasileira	Exigências químicas - Limites máximos (%)	
			Resíduo Insolúvel	Perda ao Fogo
Comum	CPI	NBR 5732	≤ 1,0	≤ 2,0
Comum com Adição	CPI-S	NBR 5732	≤ 5,0	≤ 4,5
Composto com Escória	CPII-E	NBR 11578	≤ 2,5	≤ 6,5
Composto com Pozolana	CPII-Z	NBR 11578	≤ 16,0	≤ 6,5
Composto com Filler	CPII-F	NBR 11578	≤ 2,5	≤ 6,5
Alto Forno	CPIII	NBR 5735	≤ 1,5	≤ 4,5
Pozolânico	CPIV	NBR 5736	-	≤ 4,5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	NBR 5733	≤ 1,0	≤ 4,5

A partir da análise dos limites máximos de Resíduo Insolúvel e Perda ao Fogo, percebe-se que, para o cimento tipo CPIII (Cimento Portland de alto-forno), que pode conter até 70% de escória de alto forno em sua composição, há um rigor muito maior nas exigências químicas estabelecidas pelas normas brasileiras. Enquanto exige-se um limite máximo de 5% de Resíduo Insolúvel para o cimento tipo CPI-S e 16% para o cimento tipo CPII-Z, o valor arbitrado para o cimento CPIII é de apenas 1,5%. Quanto ao limite estabelecido para a Perda ao Fogo, o percentual de 4,5% exigido para o cimento tipo CPIII ainda é inferior ao estabelecido para os cimentos compostos (tipo CPII), cujo limite é de 6,5%.

Corroborando com esta análise crítica, a Tabela 7 mostra o resultado de testes realizados com uma amostra de escória moída padrão, considerada de boa qualidade, a qual apresenta índice de finura Blaine superior ao mínimo recomendável ($415 \text{ m}^2/\text{Kg} \geq 350 \text{ m}^2/\text{Kg}$) e uma boa composição química (Índice IB=1,39 ≥ 1), que a torna adequada para ser adicionada ao concreto. Para esta escória, porém, o índice de Resíduo Insolúvel encontrado foi de 3,21%, o que a torna reprovada, uma vez que este valor está acima do limite estabelecido pelas normas brasileiras para os cimentos contendo escória.

O extremo rigor encontrado nos valores dos limites estipulados pelas normas brasileiras para o Resíduo Insolúvel e Perda ao Fogo é um importante fator inibidor do uso das adições minerais por empresas de pequeno porte e grupos terceiros,

diferentemente do que ocorre com os grandes produtores de cimento, cuja produção não sofre prejuízo.

Tabela 7 - Análise de Escória Moída Padrão (IBEC, 2009)

ANÁLISE DE ESCÓRIA MOÍDA PADRÃO			
ANÁLISE QUÍMICA		ANÁLISE FÍSICA	
Data	13/06/2009	Data	13/06/2009
Característica	Valor	Característica	Valor
SiO ₂ (%)	37,40	Finura Blaine (m ² /Kg)	415
CaO (%)	38,40	Resíduo #325 (%)	9,40
Al ₂ O ₃ (%)	9,80	Resistência Ferret (MPa)	7,41
MgO	3,89	* Índice de Hidraulicidade = (CaO + MgO + Al ₂ O ₃) / SiO ₂ ≥ 1.0	
Hidraulicidade * (%)	1,39		
Resíduo Insolúvel - RI (%)	3,21		

3.4. Normas Internacionais

Há diversas normas internacionais que tratam sobre as adições minerais e o concreto. Nos Estados Unidos, as normas existentes prevêem adições tanto no cimento quanto no concreto, estando estas adições sujeitas às normas da American Society for Testing Materials – ASTM. Dentre elas, destacam-se:

- ASTM C989 – Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars.
- ASTM C465 – Standard Specification for Processing Additions for Use in the Manufacture of Hydraulic Cements.
- ASTM C595 – Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
- ASTM C618 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM C 1157 – Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.

Outras recomendações técnicas, como as publicações da Portland Cement Association (PCA) e da Federal Highway Administration, ligada ao Departamento de Transportes dos Estados Unidos, corroboram com as normas técnicas americanas, admitindo o uso de adições minerais tanto no cimento quanto no concreto.

No âmbito da Portland Cement Association, admite-se o uso de escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas naturais e sílica ativa, quer misturados individualmente com cimento Portland comum ou composto, quer utilizados em diferentes combinações.

No caso da Federal Highway Administration, o guia técnico deste órgão estabelece que, devido às suas propriedades cimentícias, a escória granulada de alto-forno pode ser usada como um material cimentício suplementar, tanto em sua pré-mistura com cimento Portland ou calcário hidratado para produzir cimento composto (durante o processo de produção do cimento), quanto em sua mistura com o concreto, como uma adição mineral. Há também citações que prevêm a mistura de cinzas volantes e escória granulada de alto-forno ao cimento Portland, seja anteriormente à produção do concreto, seja posteriormente como adição direta à mistura de concreto.

Outras normas internacionais também revelam que as adições minerais, tanto ao cimento quanto ao concreto, são comumente aceitas. Dentre elas estão:

- ACI 233R-95 – Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete (EUA).
- ACI 318-02 – Building Code Requirements for structural concrete (EUA).
- AFNOR NF EM 197-4 – Ciment – Partie 4: composition, spécifications et critères de la conformité pour les premiers ciments du blastfurnace de la force bas (França).
- CAN/CSA-A23.5-98 – Supplementary Cementing Materials. Canadian Standards Association (Canadá).
- DIN 4301 – Ferrous and non-ferrous metallurgical slag for civil engineering and building construction use (Alemanha).

- DIN 14227 – Hydraulically bound mixtures – Specifications – Slag bound admixtures (Alemanha).
- BS 4246:1996 – Specification for high slag blastfurnace cement (Reino Unido).
- BS 6699:1986 – Specification for ground granulated blastfurnace slag for use with Portland cement (Reino Unido).

As normas acima condicionam o uso de adições minerais e cimentícias em concretos, a partir de estudo prévio de viabilidade em laboratório especializado, para se ajustar percentuais de acréscimos passíveis de incorporação no concreto, sem prejuízo às propriedades físicas e mecânicas dos concretos frescos e endurecidos.

Nos países europeus há normas regulamentadoras para todas as aplicações mais relevantes da escória, dentre elas: produção de cimento, produção de concreto e construção de estradas. Apesar das diferenças existentes em cada norma local, todas elas têm como ponto comum a classificação da escória como matéria-prima de uso corrente, ao mesmo nível em que são classificados outros materiais construtivos.

3.5. Documentos Técnicos

O papel das adições minerais na produção do concreto tem se tornado cada vez mais relevante na construção civil brasileira. Tal grau de importância pode ser avaliado ao longo dos anos através dos anais do Congresso Brasileiro do Concreto, realizado pelo Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, órgão este que melhor retrata o Brasil em termos de pesquisa de concreto. Pode-se verificar que no ano de 2001, por exemplo, dentre todos os trabalhos científicos apresentados neste congresso, em torno de 25% deles abordavam as adições minerais, revelando a importância deste tema no contexto global desde o início da década. Analisando-se os Anais de 2007 e 2008 deste mesmo congresso, nota-se que este índice manteve-se no patamar acima de 20% do total dos trabalhos, confirmando a mesma tendência e conferindo às adições minerais uma posição de destaque no mercado brasileiro.

Analogamente, o controle da qualidade na fabricação e comercialização de cimento no Brasil é um dos aspectos de grande importância para o setor da construção civil, pois o mesmo influi diretamente na qualidade do concreto e, por conseqüência, na durabilidade das construções. Prova disso é a publicação, pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, de uma nota técnica de alerta aos consumidores de cimento, chamando a atenção da sociedade e dos comerciantes quanto à venda de cimento em desacordo com as normas vigentes, com características distintas dos produtos normalizados, que muitos prejuízos poderiam causar à construção civil e aos consumidores do produto. Neste documento a ABCP afirma:

A indústria brasileira do cimento tem como premissas básicas a produção e a oferta de produtos de qualidade que atendam às normas vigentes, preconizadas pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

(...)

A entidade segue procedimentos de controle estabelecidos por normas internacionais, garantindo o atendimento às normas estabelecidas pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

(...)

A responsabilidade pelos danos causados pelo cimento fornecido em desacordo com as normas da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) envolve não só o fabricante como o comerciante do produto.

Tal preocupação da ABCP quanto à qualidade do cimento só vem reforçar a necessidade de se buscar os fundamentos para a normatização das adições minerais no Brasil. Trata-se, portanto, de não impedir, mas sim regulamentar e estimular o uso responsável das adições minerais, balizando-se as ações com a supervisão de um responsável técnico habilitado.

Diante do enorme potencial de utilização das adições minerais, é de fundamental importância que se desenvolva uma especificação padrão unificada cobrindo todas as adições minerais. A norma canadense CSA-A23.5 (Canadian Standard Specification) é um exemplo de como as adições minerais, como as pozolanas naturais, escória de alto-forno e sílica de fumo podem ser incluídas em uma única especificação padrão.

Relatórios técnicos publicados pela NSA – National Slag Association (EUA) enfatizam o grande valor que se atribui aos processos que utilizam as características químicas e físicas das escórias de alto-forno e escórias de aciaria para otimizar a produção de clínquer, levando-se em conta a sinergia existente entre os processos de fabricação do cimento e de manufatura do aço. Dentre os resultados esperados, destacam-se a eficiência e estabilidade operacional na produção do clínquer e a redução de emissões de dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio na atmosfera.

Publicações referentes a congressos sobre concreto realizados pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), em conjunto com a ACI (American Concrete Institute), Canmet (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), grupos cimenteiros e as principais universidades brasileiras, apontam para a importância de se aumentar a durabilidade e a resistência do concreto através da adição de escória e de pozolanas (rejeitos industriais), os quais têm a capacidade de diminuir o calor de hidratação e a alcalinidade do cimento Portland, melhorando a ligação deste com os agregados e, conseqüentemente, reduzindo o fissuramento e a penetração de agentes agressivos.

Dentre os relatórios técnicos de relevância internacional destacam-se também os boletins informativos publicados pelo Comité Euro-International du Béton – CEB-FIP (Comité Europeu de Concreto), que regulamentam e definem parâmetros para o uso das adições minerais como componente dos concretos.

3.6. Adições Minerais na Ótica da Sustentabilidade

O setor da construção responde por até 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (SJÖSTRÖM, 1996 apud DAL MOLIN, 2005). Nos dias atuais, não somente os aspectos relacionados às propriedades de engenharia dos materiais e os custos são levados em consideração, como também suas propriedades ecológicas, como a devastação ou o desmatamento necessários para obter as matérias-primas, o consumo de água e energia, a poluição e os resíduos produzidos no processo de fabricação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Há na sociedade moderna uma conscientização cada vez maior em relação à preservação dos recursos naturais não-renováveis, abandonando-se a cultura do desperdício em prol da conservação do planeta e da sobrevivência das futuras gerações. Como consequência, os processos de produção têm sido reformulados de forma a se buscar matérias-primas e insumos alternativos a partir de materiais reciclados, bem como a substituição de combustíveis fósseis por outros menos poluentes ou agressores ao meio-ambiente.

Deve-se lembrar que, além dos aspectos ligados às alterações climáticas, a sustentabilidade abrange aspectos ambientais, sociais e econômicos.

Do ponto de vista técnico, econômico e ecológico, a melhor alternativa para se poder utilizar em larga escala as milhões de toneladas de subprodutos pozolânicos e cimentícios gerados nas usinas e indústrias (como as escórias de alto-forno e as cinzas volantes) é através da adição destes materiais ao concreto.

Muitos destes subprodutos contêm elementos tóxicos que podem ser danosos se sua destinação final não for feita de maneira segura. Quando resíduos industriais são despejados ou utilizados como aterros ou bases de rodovias, tais elementos tóxicos tendem a encontrar passagem até as águas subterrâneas.

Sabe-se também que o despejo destes subprodutos em rios e lagos provoca a liberação de metais tóxicos, ainda que presentes em pequenas quantidades, e sua estocagem no solo é fonte geradora de poluição no ar. Por isso o uso destes materiais como adições minerais no concreto ou como constituintes do cimento Portland composto representa uma solução para a disposição adequada dos elementos tóxicos presentes, pois a maioria dos metais tóxicos pode combinar-se quimicamente de forma permanente com os produtos de hidratação do cimento Portland.

No aspecto econômico, a vantagem da utilização das adições minerais está no seu baixo custo, considerando que o reaproveitamento de subprodutos industriais elimina a necessidade de se produzir parte dos componentes do concreto. Quanto às pozolanas naturais, tem-se apenas o custo da extração dos materiais na natureza. No caso das pozolanas artificiais, sua produção é mais barata que a do cimento, pois não se gasta tanto combustível como na fabricação do clínquer. Assim, como substitutivo ao

cimento, em geral na proporção de 20% a 60% em massa, o uso destes subprodutos no concreto pode resultar em uma economia substancial de energia (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Sabe-se que cada tonelada de cimento Portland produzido gera uma quantidade similar de dióxido de carbono como subproduto, o qual é liberado na atmosfera. Esta carga substancial de CO₂ no meio ambiente é um fator que contribui diretamente para o aumento do efeito estufa.

A Tabela 8 mostra diferentes tipos de concreto e suas respectivas taxas de emissão de CO₂ gerado na produção, para obras e estruturas de concreto diversas. Através deste comparativo pode-se perceber claramente o efeito benéfico das adições minerais no sentido de reduzir as emissões de gás carbônico na atmosfera.

Tabela 8 - Gás carbônico incorporado (ECO₂) em diversas misturas de concreto (Concrete Centre, 2006)

CONCRETO	TIPO DE CONCRETO	ECO ₂ (kg CO ₂ /m ³)		
		Concreto de Cimento Portland Comum	Concreto com 30% de cinzas volantes	Concreto com 50% de escória granulada de alto-forno
Grandes fundações	GEN1 70 mm	173	124	98
Pequenas fundações	GEN1 120 mm	184	142	109
Fundações armadas	RC30 70 mm	318	266	201
Pisos	RC35 70 mm	315	261	187
Estruturas	RC40 70 mm	372	317	236
Concreto de alta resistência	RC50 70 mm	436	356	275

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. Aspectos Técnicos

As adições minerais, tanto nos dias atuais como ao longo da história das construções, têm uma importância inequívoca na execução de obras de concreto, seja em sua aplicação diretamente ao concreto como substitutivo parcial ao cimento Portland, seja na produção de cimentos, substituindo parcialmente o clínquer.

Inúmeras são as aplicações das adições minerais, as quais, como todo componente do concreto, precisam ser objeto de constante atenção quanto ao controle de qualidade de suas características, seja na execução correta dos serviços de concretagem, seja na escolha adequada dos materiais e seu proporcionamento na mistura.

Cada adição mineral é única em suas particularidades, devendo sua seleção ser feita com base nas exigências do projeto construtivo, disponibilidade e custos. Conforme afirmam Malhotra e Mehta (1996), em princípio nenhum concreto deveria ser confeccionado e lançado sem a incorporação de adições minerais.

É consenso geral que a presença das adições minerais na pasta de cimento em hidratação gera processos de refinamento do tamanho de poros e de grãos, reduzindo o tamanho e o volume dos vazios e microfissuras, bem como dos cristais de hidróxido de cálcio no concreto, causando assim um ganho substancial em sua resistência e impermeabilidade. O uso cada vez mais freqüente das adições minerais no mundo é fruto da conscientização de que sua aplicação produz um material mais homogêneo e economicamente viável, permitindo a execução de estruturas com alta estabilidade dimensional e alta durabilidade em serviço.

Sabe-se que o mecanismo pela qual as reações pozolânicas exercem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto é o mesmo, quer o material pozolânico

tenha sido adicionado como uma adição mineral quer como constituinte de cimentos Portland compostos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Todas as pesquisas em geral apontam que, exceto para a resistência nas idades iniciais, a substituição de cimento por escória granulada e moída de alto-forno confere ao concreto melhores resultados de resistência final, melhores características de assentamento e compactação, maior resistência quanto à retração térmica e gradientes de temperatura, melhor resistência a ataques por sulfatos e melhor resistência a ambientes marinhos. Em resumo, podemos destacar os seguintes benefícios proporcionados pela escória de alto-forno nos concretos:

- aumento na durabilidade do concreto;
- melhoria na resistência à compressão e à flexão;
- melhoria na resistência química a ataque por sulfatos;
- melhoria na resistência à reação álcali-agregado;
- aumento na resistência à corrosão de armaduras;
- redução da tensão térmica (menor calor de hidratação);
- diminuição da permeabilidade do concreto.

4.2. Aspectos ambientais

Inúmeros são os benefícios da utilização das escórias de alto-forno como substituto parcial do cimento no concreto e em diversas outras aplicações, dentre os quais se destacam:

- a preservação de recursos naturais, substituídos pela escória, reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora e prolongando a vida útil das reservas naturais.
- a redução do volume de aterros e pilhas, reduzindo o potencial de contaminação do lençol freático por substâncias químicas e disponibilizando áreas ocupadas para a utilização da comunidade.
- a redução do consumo energético na produção de cimento.

- a redução da poluição e do aquecimento global, em função da menor emissão de CO₂ na atmosfera, no processo de fabricação do cimento.

Visando os interesses de proteção ambiental, é desejável que o aumento da demanda de cimento no mundo seja correspondido pela utilização de adições minerais como material cimentício suplementar em proporções cada vez maiores, ao invés de se ter um aumento na produção de cimento Portland.

4.3. Aspectos mercadológicos

A eliminação da possibilidade das adições minerais ao concreto, imposta pela Norma NBR 12655 em sua versão atual, pode não representar diferenças na obtenção final do produto concreto, mas sim nas condições de concorrência que venham a prevalecer no mercado do concreto.

A verticalização da indústria cimenteira produz efeitos diretos no segmento de concretagem, uma vez que, ao expandirem suas atividades para as etapas mais avançadas da cadeia produtiva, as cimenteiras influem de forma nociva nas condições de concorrência no mercado de concreto, criando barreiras artificiais às concreteiras e às diversas empresas ligadas ao beneficiamento de escórias. As questões concernentes à atual normatização do processo de produção e uso do cimento e do concreto no Brasil, por sua vez, servem para agravar ainda mais esta situação.

No contexto anterior às mudanças normativas, as adições podiam ser feitas tanto pelas cimenteiras – durante a fabricação do cimento – quanto pelas concreteiras, que podiam adquirir cimentos com diferentes dosagens de adições e complementá-las durante a fabricação do concreto, conforme as necessidades de seus clientes.

No contexto atual, a tendência é que as concreteiras – sobretudo as independentes, que não pertencem a grupos também produtores de cimento – percam a oportunidade de baratear seus custos para oferecer o mesmo produto, uma vez que as adições minerais, por suas características, são adquiridas a preços inferiores ao cimento.

Para que a escória de alto-forno produzida no Brasil seja efetivamente aproveitada em todo o seu potencial, com maior agregação de valor e gerando impactos positivos ao desenvolvimento sustentável, deve-se incentivar cada vez mais a sua comercialização direta junto aos setores de concreto, para ser utilizada como substituto parcial do cimento. A competição direta entre os produtores independentes e os fabricantes de cimento deverá ser uma consequência natural desta situação, criando-se a necessidade de negociações entre as partes envolvidas e a acomodação de interesses, que são características salutaras às economias de mercado.

4.4. Recomendações Finais

Ao final deste trabalho, torna-se clara a importância das adições minerais para a construção civil em termos técnicos, econômicos e ambientais, chamando-se a atenção para os aspectos ligados aos problemas concorrenciais surgidos a partir da alteração da Norma 12655 da ABNT. Paralelamente à questão ética e concorrencial, a restrição ao uso de adições minerais diretamente ao concreto também traz como consequência uma redução do consumo destes produtos no mercado como um todo, gerando efeitos desfavoráveis ao desenvolvimento sustentável.

Ações mitigadoras contra estes efeitos devem envolver necessariamente uma revisão nos parâmetros legais estabelecidos pelas normas brasileiras, abrindo-se espaço para que um número maior de empresas produtoras e beneficiadoras de adições minerais possa oferecer, em condições justas e igualitárias, estes produtos ao mercado.

É sabido que o uso de adições minerais como substituto parcial ao cimento do concreto é um fator que contribui para a redução nas emissões de CO₂ na atmosfera e preservação de recursos minerais não-renováveis. Portanto, ao se restringir o seu consumo, toma-se um caminho cuja direção está no sentido oposto à sustentabilidade, cujas bases estão calcadas na conservação do meio-ambiente e na utilização de recursos renováveis.

Diante do imenso potencial a ser explorado no Brasil, a adição de escória como substituto ao cimento Portland pode ocorrer em diversas aplicações, como: confeção de concreto projetável, fabricação de artefatos e pré-moldados de concreto (blocos,

vigotas, lajes, pisos, tubos, anéis, etc.), argamassas, fibro-cimento e outras. As concreteiras e os consumidores industriais de cimento que fabricam estes produtos representam em média 20% do consumo brasileiro de cimento. Entretanto, o consumo de escória como substitutivo ao cimento Portland não chega a atingir 1% do total do cimento consumido. Em outros países, o percentual de utilização da escória de alto-forno para esta aplicação chega a representar até 16% do total de escória produzido. Isto revela o quanto ainda pode ser feito no Brasil para se incrementar a pesquisa, a produção e o uso de escórias de alto-forno.

Assim como ocorre em outros países, é de fundamental importância que haja uma ação conjunta no país envolvendo a comunidade científica, as empresas de siderurgia, as concreteiras e todos os demais setores envolvidos no mercado de escórias, na busca de se normatizar suas diversas aplicações, não somente para se agregar maior valor ao material, como também para estabelecer parâmetros seguros para sua aplicação como adição mineral ao concreto.

O primeiro passo a ser dado em relação à normatização do uso das escórias no Brasil está na sua reclassificação de resíduo não inerte para co-produto da siderurgia, o que representaria um avanço não somente no aspecto mercadológico, mas também sob a ótica ambiental e de sustentabilidade. De acordo com a assertiva de Little (1999), tendo-se a escória como um produto devidamente adequado em termos técnicos, econômicos e ambientais, todas as questões regulatórias de classificação e uso da mesma poderão ser desenvolvidas de forma objetiva junto aos órgãos de normatização e do meio-ambiente, bem como junto aos setores usuários da escória.

A implantação de regulamentações mais efetivas para as adições minerais, principalmente as escórias de alto-forno, é um passo importantíssimo para o aumento do seu consumo, contribuindo para a abertura de novos mercados e favorecendo o desenvolvimento sustentável.

5. PROPOSTA PARA NOVOS TRABALHOS

O presente trabalho busca cumprir o importante papel de estimular engenheiros e tecnólogos do concreto a incorporar cada vez mais materiais pozzolânicos e cimentícios ao concreto. Desta forma, é necessário estimular a realização de pesquisas e experimentos na busca de novos materiais a serem empregados como adições minerais e novas formas de aplicação dos mesmos.

A correta compreensão a respeito das adições minerais na durabilidade do concreto é fundamental para a sua adequada aplicação de forma econômica e sustentável. Assim, cria-se uma enorme demanda por novos trabalhos envolvendo a regulamentação e o estabelecimento de critérios de qualidade no seu emprego na construção.

Neste contexto, é mister que sejam realizados trabalhos no Brasil envolvendo a microlização das escórias de alto forno, ácidas e básicas, avaliando a performance quando moídas em finuras superiores a $1000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, I.R. **Concretos de alto desempenho**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 233R-95**: Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. Farmington Hills, Michigan, 1995.

_____. **ACI 318-02**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C595**: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. West Conshohocken, PA, 2003.

_____. **ASTM C618**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. West Conshohocken, PA, 1978.

_____. **ASTM C989**: Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars. West Conshohocken, PA, 2003.

_____. **ASTM C1157**: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA, 2003.

_____. **ASTM C1218**: Test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Philadelphia, 1997.

ANDRADE, T; HELENE, P. **Concreto de cimento Portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON. São Paulo, 2007.

ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL – ABESC. **Manual do concreto dosado em central**. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf>>. Acesso em 05/07/2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5743**: Cimentos Portland - Determinação de perda ao fogo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5744**: Cimentos Portland - Determinação de resíduo insolúvel - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central – Especificação. Rio de Janeiro, 1984.

- _____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência – Classificação. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 9935:** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 11172:** Aglomerantes de origem mineral – Terminologia. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12654:** Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12655:** Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 12655:** Preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12989:** Cimento Portland branco – Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 13116:** Cimento Portland de baixo calor de hidratação – Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR EB-2:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR EB-208:** Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 10:** Cimento Portland – Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 68:** Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 201:** Cimento Portland pozolânico - Determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1999.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Pini, 2000.

ALDRED, J.M; et al.. **Guide for the use of silica fume in concrete.** Reported by ACI – American Concrete Institute – Committee 234, 2006.

BAKKER, R.F.M. **Permeability of blended cement concretes.** Proceedings, First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete. Canadá, 1983.

BARATA, M.S; DAL MOLIN, D.C.C. **Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa.** ANTAC, 2002.

- BATTAGIN, A.F. **Uma breve história do cimento Portland.** Disponível em <http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml>. Acesso em: 02/03/2009.
- BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1994. 435 p.
- BUENO, Francisco da Silveira. **Minidicionário da Língua Portuguesa.** São Paulo: FTD, 1996. 703 p.
- CALAES, G.D. **Bases para a conciliação da produção de agregados com o desenvolvimento urbano sustentável.** Rio de Janeiro, 2005. In: Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil. Gestão de Negócios. Disponível em: <<http://www.cetec.br/agregados/conteudo/Contribuição%20Gilberto%20Dias%20Calaes.PDF>>. Acesso em 05/07/2009.
- CÂMARA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Guia de Sustentabilidade na Construção.** Belo Horizonte: FIEMG, 2008. 60p.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CAN/CSA-A23.5-98.** Supplementary Cementing Materials. Canadian Specification. Etobicoke, Ontario, Canadá, 1998.
- CÁNOVAS, M. F. **Hormigón.** Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, Madrid, 1996.
- CLAUDIO, S.N. **Agregados para concreto.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 324-343.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997. 401 p.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural.** In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 036:**
Cimento Portland - recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 1995.

ENVIRONMENTAL COUNCIL OF CONCRETE ORGANIZATIONS. **EV 27:** LEED
Green Building Rating System and Concrete. Skokie, Illinois, 2003.

EN 197-1, 2000 - **Cement** - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria
for common cements

EN 934-2, 2001 - **Admixtures for concrete, mortar and grout** - Part 2: Concrete
admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling.

FONSECA, G.C; GOMES, A.M. **A Visão de Sustentabilidade das Escórias de alto-
forno no Brasil: Análise crítica DEMC** - UFMG. Belo Horizonte, 2010.

GOMES, A.M; OLIVEIRA, C.A.S. **Escória de Alto-forno**. Belo Horizonte: IBEC, 2004.

HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: Concreto: Ensino,
pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439-471.

HELENE, P. et al.. **Estudo da Influência do MetacaulimHP como adição de alta
eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2003.

HOGAN, F.J; MEUSEL, J.W. **The evaluation for durability and strength
development of ground granulated blast-furnace slag**. ASTM Cement,
Concrete and Aggregates, 3 (1): 40-52, 1981.

IBRACON, **Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2001**. Foz do
Iguaçu, 2001. (CD-ROM).

_____. **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2008**. Salvador,
2008. (CD-ROM).

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. **Produção Siderúrgica Brasileira**.
Outubro, 2009. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>.

- IOPPI, V. **Cimento ecológico: cinzas volantes ativadas por solução composta de resíduos de tijolos refratários dolomíticos e hidróxido de sódio.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS. In: Prêmio Odebrecht: contribuições da engenharia para o desenvolvimento sustentável: livro comemorativo 2008: compilação dos melhores projetos - Salvador, BA. Fundação Odebrecht, 2009.
- ISAIA, G. C. **O Concreto: da Era Clássica à contemporânea.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p.1-43.
- KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322.
- KORMANN, A.C.M. et al.. **Metodologias de reparos em estruturas hidráulicas de barragens. Parte I, Estudos preliminares.** In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2001.
- LIMA, M.G. et al.. **Inibidores de corrosão: compatibilidade cimento-aditivo.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1996.
- LITTLE, A. D. et al.. **Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas.** Preparado para: Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas. 1999.
- MALHOTRA, V.M. **Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag.** In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.
- MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Advances in concrete technology. Volume 1, Canadá, 1996.
- MALINOWSKI, R., GARFINKEL. **Prehistory of concrete.** Concrete International. Detroit, 1991.
- MARTIN, J.F.M. **Aditivos para Concreto.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 381-406.

MASSUCATO, C.J. **Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto.** Campinas, 2005.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolans.** In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1 ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION – NSA. **Steel slag - A premier construction aggregate.** Technical Bulletin. USA

_____. **CemStar Process: Slag usage raises productivity, operational efficiency, lowers emissions.** Technical Bulletin. USA, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 1 ed. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, C.A.S. **Escória Ativada.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG – CPGEM, 2001.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland.** 13. ed. São Paulo, 1995.

RIBEIRO, C.C et al.. **Materiais de Construção Civil.** Belo Horizonte, 2000. 96 p.

PAULON, V.A. **A Microestrutura do Concreto Convencional.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 584-604.

ROCHA, G.G.N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade.** Belo Horizonte, 2005.

ROMANO, R.C.O. et al.. **Influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa.** Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2006. In: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-111-020.pdf>>. Acesso em 18/07/2009.

SCHLORHOLTZ, S. **Development of performance properties of ternary mixes: scoping study**. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University. Sponsored by Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Final Report, June 2004. Disponível em: <http://www.intrans.iastate.edu/reports/ternary_mixes.pdf>.

SELLEVOLD, E.J; NILSEN, T. **Condensed Silica Fume in Concrete: a world review**. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.

SILVA, V.G. **Levantamento do estado da arte: canteiro de obras**. FINEP: São Paulo, 2007. In: Projeto Finep 2386/04 – Tecnologias para construção habitacional mais sustentável. Disponível em: <http://www.habitacaosustentavel.pcc.usp.br/pdf/D5__metodologias_de_avaliacao.pdf>. Acesso em 01/03/2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO - SNIC. **Press Kit 2008**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>

SLAG CEMENT ASSOCIATION (SCA). **Does slag cement change the hardened properties of concrete?** Disponível em: <<http://www.slagcement.org>>. Acesso em 01/07/2009.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

STEHLING, M. P; GOMES, A. M. **CO₂ Emissions from Brazilian Cement Manufacture Industry**. DEMC - UFMG. Belo Horizonte, 2009.

SUSTAINABLE CONCRETE. **Embodied carbon dioxide (ECO₂) of concrete mixes**. May, 2009. Retrieved from <<http://www.sustainableconcrete.org.uk>>

TANGO, C.E.S. **Produção, Transporte e Controle do Concreto**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 17, p. 495-525.

TAVARES, L.R.C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições.** DEMC - UFMG. Belo Horizonte, 2008.

TÉCHNE. **Concreto sustentável.** Revista Técnica, São Paulo, edição 139, outubro, 2008. Disponível em <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/139/concreto-sustentavel-105373-1.asp>>. Acesso em 06/02/2010.

THOMAZ, E. **Execução, Controle e Desempenho das Estruturas de Concreto.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 527-581.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY-USGS. **Iron and steel slag.** Mineral Commodity Summaries, January 2009. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/mcs-2009-fesla.pdf>. Acesso em 14/06/2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Energy Efficiency in Buildings – Business realities and opportunities.** Summary report. Outubro de 2007.

_____. **Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI) – Plano de Acção.** Julho de 2002. Disponível em: <<http://www.wbcds.org/DocRoot/nIYHAK4ECDi7EEcarBSH/csi-brochure.pdf>>. Acesso em: 25/02/2009.

WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>>. Acesso em 14/06/2009.

YEGUL, F. **Roman Building Technology and Architecture.** Disponível em: <<http://id-archserve.ucsb.edu/arhistory/152k/concrete.html>>. Acesso em: 01/07/2009.

ZHANG, M.H; MALHOTRA, V. M. **High-performance concrete incorporating rice-husk ash as a supplementary cementing material.** Canmet Division Report MSL 95-007 (OP&J), 25 pp, 1995.