



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração
em concretos com elevados teores de escória de alto-
forno**

Maria Antonina Magalhães Coelho

Vitória, 2002

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto- forno

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Maria Antonina Magalhães Coelho

Orientadores: Prof^a Dr^a Maristela Gomes da Silva

Prof. MSc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza

Prof^a Dr^a Eliana Zandonade

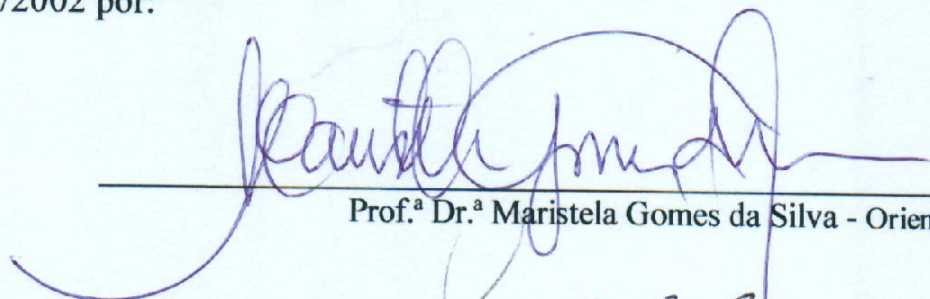
Vitória, 2002

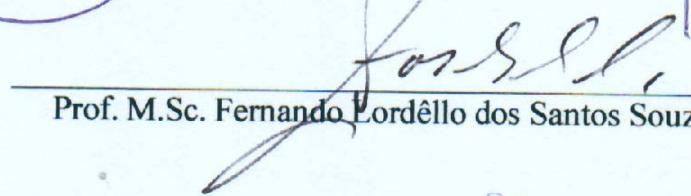
Contribuição ao Estudo da Carbonatação e Retração em Concretos com Elevados Teores de Escória de Alto-Forno

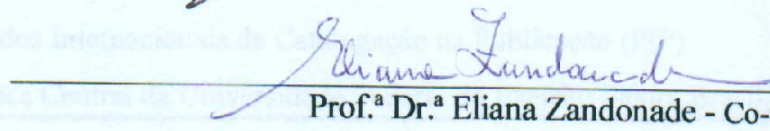
Maria Antonina Magalhães Coelho

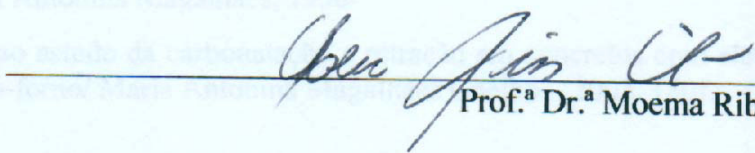
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Centro Tecnológico - Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

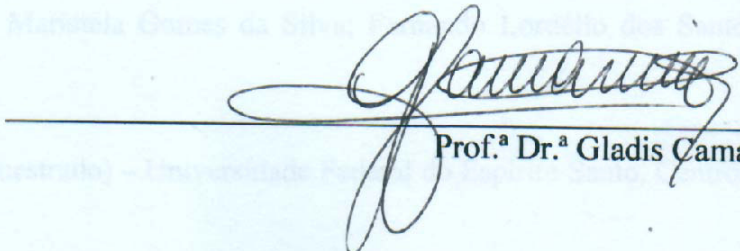
Aprovada em 29/04/2002 por:


Prof.ª Dr.ª Maristela Gomes da Silva - Orientador, UFES


Prof. M.Sc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza - Co-Orientador, UFES


Prof.ª Dr.ª Eliana Zandonade - Co-Orientador, UFES


Prof.ª Dr.ª Moema Ribas Silva - UFES


Prof.ª Dr.ª Gladis Camarini - UNICAMP)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (PIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil)

Coelho, Maria Antonina Magalhães, 1956-

Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno/ Maria Antonina Magalhães Coelho – 2002. 180f.

Orientadores: Maristela Gomes da Silva; Fernando Lordêllo dos Santos Souza; Eliana Zandonade.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Concreto. 2. Concreto de alto desempenho. 3. Escória de alto-forno. 4. Carbonatação. 5. Retração. I. Silva, Maristela gomes da. II. Souza, Fernando Lordêllo dos Santos. III. Zandonade, Eliana. IV. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

A Luiz, que nunca deixou de acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

Este não foi um trabalho solitário. Muitas mãos colaboraram e espero não me esquecer daqueles que contribuíram para que fosse concluído.

Agradeço em primeiro lugar à professora Maristela pelo apoio, paciência e pela orientação competente e tão de perto.

Ao professor Fernando pelo aprendizado constante no laboratório, pela disposição em sempre atender, enfim, pelo apoio que foi indispensável para a realização dos ensaios.

À professora Eliana pelo tratamento estatístico dos dados dos ensaios e pela pessoa especial que é.

Também agradeço à equipe de laboratoristas e auxiliares do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Tecnológico da UFES, pela dedicação e apoio prestados durante os ensaios, estando todos eles presentes em algum momento. Obrigada Carlos, Márcio, Tião, Jorge e Loriato.

Um agradecimento especial aos colegas Sayonara, Karla, Tatiana, Flávio, Milton, Geórgia e Rosane que sempre tiveram um incentivo amigo e à Érica pela ajuda gráfica.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e às empresas Companhia Siderúrgica de Tubarão, Holcim, Mizu, Diaton e Masterbuilders pelo apoio material.

Aos meus filhos Lucas, Mirian e Denis pela paciência em alguns momentos e compreensão em outros por não terem a mãe tão disponível de antes e à Luiz pelo incentivo constante e apoio companheiro e técnico.

It doesn't matter if you try and try and try again, and fail.

It does matter if you try and fail, and fail to try again.

C. F. Kettering

Não importa se você tentar e tentar e tentar de novo, e falhar.

Importa se você tentar e falhar e não tentar outra vez.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTAS DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	Estrutura da dissertação	4
1.4	Experiências de utilização de escórias de alto-forno granuladas como agregado miúdo	5
1.4	Considerações Finais	8
2	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	10
2.1	Introdução	10
2.2	Tipos de escória de alto-forno e suas aplicações	11
2.3	A escória de alto forno como aglomerante	17
2.3.1	Histórico	17
2.3.2	Reatividade da escória granulada de alto-forno	19
2.3.2.1	Características que influenciam a reatividade da escória	19
2.3.2.2	Métodos para avaliação da atividade hidráulica da escória de alto-forno	22
2.3.3	Ativação da escória de alto-forno	25
2.3.4	Hidratação da escória de alto-forno	28
2.3.5	Hidratação do cimento de alto-forno	31
2.4	A escória granulada de alto-forno como agregado miúdo	33
2.4.1	Características	33

2.5	Influência da escória granulada de alto-forno nas principais propriedades de pastas, argamassas e concretos	34
2.5.1	Considerações iniciais	34
2.5.2	Consistência e pega	35
2.5.3	Calor de hidratação	36
2.5.4	Resistências mecânicas	37
2.5.4.1	Resistência à compressão	37
2.5.4.2	Resistência à flexão	39
2.5.5	Porosidade e permeabilidade	40
2.5.6	Retração	41
2.5.7	Durabilidade	43
2.5.7.1	Carbonatação	43
2.5.7.1.1	Mecanismo da carbonatação	43
2.5.7.1.2	Evolução da carbonatação	45
2.5.7.1.3	Carbonatação e a indução de corrosão	47
2.5.7.1.4	Indicadores de carbonatação	48
2.5.7.2	Resistência a sulfatos	48
2.5.7.3	Reação álcali-sílica	49
2.5.7.4	Resistência a cloretos	50
2.6	Considerações Finais	52
3	<u>O ALTO DESEMPENHO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</u>	53
3.1	Introdução	53
3.2	A relação resistência-durabilidade no contexto do concreto de alto desempenho	55
3.3	Materiais	57
3.3.1	Considerações iniciais	57
3.3.2	Agregados	57
3.3.3	Adições minerais	58

3.3.4	Aditivos superplastificantes	59
3.4	Considerações sobre a dosagem do concreto de alto desempenho	61
3.5	Principais Características e Propriedades do concreto de alto desempenho	62
3.5.1	Considerações iniciais	62
3.5.2	Massa unitária	62
3.5.3	Consistência	62
3.5.4	Teor de ar	63
3.5.5	Calor de hidratação	63
3.5.6	Permeabilidade e porosidade	64
3.5.7	Resistência à compressão	65
3.5.8	Módulo de deformação	66
3.5.9	Retração	67
3.5.10	Durabilidade como requisito de desempenho	68
3.5.10.1	Considerações iniciais	68
3.5.10.2	Carbonatação	68
3.5.10.3	Resistência a sulfatos	68
3.5.10.4	Reação álcali-sílica	69
3.5.10.5	Resistência à penetração de íons cloreto	69
3.6	O papel da Escória de alto-forno no alto desempenho dos concretos	69
3.7	Tendências na tecnologia de concreto de alto desempenho	72
3.8	Considerações finais	75
4	MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL	77
4.1	Introdução	77
4.2	Materiais utilizados	78
4.2.1	Aglomerantes	78
4.2.1.1	Cimento Portland de alto-forno (CP III-32)	78
4.2.1.2	Cimento Portland de alto-forno (CP II E-32)	79
4.2.1.3	Escória de alto-forno moída	80

4.2.2	Agregado miúdo	82
4.2.2.1	Escória de alto-forno granulada A	83
4.2.2.2	Escória de alto-forno granulada B	84
4.2.2.3	Areia	86
4.2.3	Agregado Graúdo	88
4.2.3.1	Pedra Britada nº 0	88
4.2.3.2	Pedra Britada nº 1	89
4.2.4	Aditivo superplastificante	90
4.2.5	Ativadores químicos	90
4.2.5.1	Silicato de sódio	90
4.2.5.2.	Cal hidratada	91
4.3	Métodos de ensaios	91
4.3.1	Ensaio em pasta	91
4.3.1.1.	Método do mini- <i>slump</i>	91
4.3.1.2.	Tempo de início de pega de pasta	94
4.3.2	Ensaio em argamassa	94
4.3.2.1.	Consistência na mesa de queda	94
4.3.2.2.	Resistência à compressão axial	96
4.3.2.3.	Tempo de pega de argamassa	98
4.3	Dosagem do concreto	100
4.3.1	Concreto com escória	100
4.3.2	Concreto de referência	102
4.3.4	Ensaio em concreto	103
4.3.4.1.	Consistência pelo abatimento do tronco de cone	103
4.3.4.2.	Teor de ar incorporado	103
4.3.4.3.	Resistência à compressão axial	103
4.3.4.4.	Resistência à tração por compressão diametral	104
4.3.4.5.	Retração	104

4.3.4.6.	Carbonatação	106
4.3.4.7.	Massa específica, índice de vazios e absorção	110
4.4	Planejamento e projeto experimental estatístico	110
4.4.1	Estudos em pasta	110
4.4.2	Estudos em argamassa	110
4.4.3	Estudos em concreto	110
4.4.4	Análise dos resultados	110
4.4.5	Fatores e variáveis considerados	111
4.4.5.1.	Seleção do tipo de escória granulada e seleção do teor de escória moída, em substituição à escória granulada (Etapa 1)	111
4.4.5.2.	Seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)	113
4.4.5.2.1.	Estudo em pasta	114
4.4.5.2.2.	Estudos em argamassa	116
4.4.5.3.	Seleção do teor de Na ₂ O do silicato de sódio (Etapa 3)	116
4.4.5.3.1	Estudos em pasta	117
4.4.5.3.2.	Estudos em argamassa	118
4.4.5.4.	Dosagem do concreto (Etapa 4)	118
4.4.5.5.	Avaliação de propriedades (Etapa 5)	122
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	124
5.1	Introdução	124
5.2	Seleção do tipo de escória granulada e seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada (Etapa 1)	124
5.3	Seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)	133
5.3.1	Estudos em pasta	134
5.3.1.1	Espalhamento através do Método do Mini- <i>Slump</i>	134
5.3.1.2	Tempo de início de pega em pasta	141
5.3.2	Estudos em argamassa	142
5.3.2.1	Início de pega através do penetrômetro	142

5.3.2.2	Resistência à compressão em argamassas	144
5.4	Seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3)	146
5.4.1	Estudos em pasta	147
5.4.1.1	Espalhamento através do método do Mini- <i>Slump</i>	147
5.4.2	Estudos em argamassa	148
5.4.2.1	Resistência à compressão axial	148
5.5	Estudos em concreto (Etapa 5)	151
5.5.1	Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral	152
5.5.2	Teor de ar incorporado, massa específica, absorção e índice de vazios	155
5.5.3	Retração	156
5.5.4	Carbonatação	158
5.6	Considerações finais	162
6	CONCLUSÕES	164
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	- Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland	8
Quadro 2.2	- Algumas fórmulas para índice de basicidade	18
Quadro 2.3	- Algumas fórmulas para fatores hidráulicos	19
Quadro 2.4	- Estoques estimados de escória de alto-forno para 1998 (em 1000t)	29
Quadro 4.1	- Ensaio realizados e os respectivos números de corpos-de-prova ou determinações de cada um	78
Quadro 4.2	- Análise Química do Cimento Portland de alto-forno CP III - RS 32, determinada por espectrometria de raios X	79
Quadro 4.3	- Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alto-forno CP III - 32 RS	79
Quadro 4.4	- Análise Química do Cimento Portland de alto-forno CP II E - 32, determinada por espectrometria de raios X	80
Quadro 4.5	- Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alto-forno CP II E-32	80
Quadro 4.6	- Composição química da escória granulada de alto-forno da Companhia Siderúrgica de Tubarão	81
Quadro 4.7	- Características físicas da escória granulada de alto-forno	81
Quadro 4.8	- Granulometria da Escória Granulada de Alto-Forno A	83
Quadro 4.9	- Ensaio de caracterização da escória granulada de alto-forno B	85
Quadro 4.10	- Ensaio de caracterização da areia	87
Quadro 4.11	- Granulometria da Pedra Britada nº 0 (NBR-7217)	88
Quadro 4.12	- Granulometria da Pedra Britada nº 1 (NBR-7217)	89
Quadro 4.13	- Principais características dos aditivos superplastificantes	90
Quadro 4.14	- Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio	91
Quadro 4.15	- Características físicas da cal hidratada	91
Quadro 4.16	- Informações sobre os traços utilizados nos ensaios de mini- <i>slump</i>	92
Quadro 4.17	- Informações utilizados nos ensaios para medir o tempo de início de pega em pasta	94
Quadro 4.18	- Informações sobre os traços de argamassa utilizado tanto para a escória granulada EA, quanto para a escória EB; relação água/cimento=0,55	95
Quadro 4.19	- Traços de argamassa utilizados nos ensaios de consistência na mesa de queda, para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)	96
Quadro 4.20	- Traços de argamassas utilizados nos ensaios de resistência à compressão para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1), tanto para a escória granulada EA, quanto para a escória EB	96
Quadro 4.21	- Traços de Argamassa A, B e C (em massa, materiais secos) e teores adotados de escória moída em substituição à escória granulada, sobre total de agregado miúdo	97

Quadro 422 - Traço da Argamassa B utilizada nos ensaios de resistência à compressão para os estudos de seleção de Na ₂ O do silicato de sódio (Etapa 3)	98
Quadro 4.23 - Traços de argamassa utilizados nos ensaios de início de pega em argamassa através do penetrômetro e dados complementares	99
Quadro 4.24 - Informações sobre os traços 1, 2 e 3 de concreto	101
Quadro 4.25 - Traços C4, C5 e C6 de concreto com cimento CP II E-32	103
Quadro 4.26 - Consumo de materiais para os traços de concreto 1: 1,344:0,849:0,849 (materiais cimentícios : (72% escória granulada + 28% de areia) : brita 0 : brita 1) e relação a/mc	103
Quadro 4.27 - Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada	112
Quadro 4.28 - Dados dos traços de argamassa utilizados tanto para a escória granulada EA quanto para a escória EB; relação água/cimento=0,55	113
Quadro 4.29 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa; relação água/cimento=0,55	113
Quadro 4.30 - Fatores e variáveis adotados na seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante nos estudos em pasta	114
Quadro 4.31 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em pasta; relação água/materiais cimentícios=0,30	115
Quadro 4.32 - Fatores e variáveis adotados na seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante nos estudos em argamassa	116
Quadro 4.33 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa para ensaios de resistência à compressão axial para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante, relação água/materiais cimentícios=0,28	116
Quadro 4.34 - Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de silicato de sódio, nos estudos em pasta	117
Quadro 4.35 - Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de silicato de sódio nos estudos em argamassa	118
Quadro 4.36 - Quantidades de materiais utilizados nos estudos em argamassa para seleção do teor de Na ₂ O do silicato de sódio. Argamassa B 1 : 1 : 2,7 (cimento : escória moída : agregado miúdo) relação água/materiais cimentícios=0,3	118
Quadro 4.37 - Fatores e variáveis adotados na determinação da dosagem do concreto	119
Quadro 4.38 - Consumo de materiais cimentícios (kg por m ³ de concreto), relação água/materiais cimentícios, teor água/materiais secos, teor de sólidos do aditivo e consistência os concretos estudados	120
Quadro 4.39 - Consumo de materiais para os concretos C1, C2, C3, C4, C5, e C6	121
Quadro 4.40 - Fatores e variáveis adotados na determinação da dosagem do concreto	123
Quadro 5.1 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa para ensaios de resistência à compressão axial para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante, relação água/materiais cimentícios=0,28	134
Quadro 5.2 - Tipo de aditivo e menor teor de sólido, do aditivo que apresentou tempo mínimo de manutenção de consistência de 180 minutos	141
Quadro 5.3 - Tempos da manutenção de consistência obtidos para diferentes teores de Na ₂ O do silicato e teores de sólidos do aditivo superplastificante	148

Quadro 5.4 -	Traços dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6, em massa, materiais secos	151
Quadro 5.5 -	Consumo de materiais cimentícios (kg por m ³ de concreto), relação água/materiais cimentícios, teor água/materiais secos, teor de sólidos do aditivo e consistência os concretos estudados	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Tipos de tratamento das escórias nas saídas dos alto-fornos nos principais países produtores de escória no mundo e no Brasil	12
Tabela 5.1	- Resultados dos ensaios de consistência e resistência à compressão, em argamassa, utilizando escória granulada EA, relação água/cimento=0,55	125
Tabela 5.2	- Resultados dos ensaios de consistência e resistência à compressão, em argamassa, utilizando escória granulada EB, relação água/cimento=0,55	126
Tabela 5.3	- Resultado dos ensaios de início de pega com os diferentes aditivos	141
Tabela 5.4	- Tempo de início de pega para os ADT 2, 3 e 4 para o traço 1:1:2,7	142
Tabela 5.5	- Resultados de resistências à compressão, medidas de consistências e ar incorporado das argamassas para os traços A, B e C para os aditivos 2, 3 e 4	144
Tabela 5.6	- Resultados de resistência à compressão e consistência em mesa de queda, para relação a/mc = 0,28 para, diferentes teores de Na ₂ O do silicato de sódio (MS=1,6), traço 1 : 1 : 2,7 (cimento:escória moída:escória granulada)	149
Tabela 5.7	- Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e a medida de consistência das argamassas, com relação a/mc = 0,30, para diferentes teores de Na ₂ O do silicato de sódio (MS=1,6), traço 1 : 1 : 2,7 (cimento:escória moída:escória granulada)	150
Tabela 5.8	- Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral para os concretos C1, C2 e C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32	152
Tabela 5.9	- Teor de ar incorporado obtido pelo método pressométrico para os concretos C1,C2,C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída, e para os concretos C4,C5 e C6, confeccionados com CP II E-32	155
Tabela 5.10	- Absorção, índice de vazios, massa específica dos concretos C1, C2 e C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída, e para os concretos C4, C5 e C6, confeccionados com CP II E-32	146
Tabela 5.11	- Resultados de retração dos concretos C1, C2 e C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída, e para os concretos C4, C5 e C6, confeccionados com CP II E-32	147
Tabela 5.12	- Profundidades de carbonatação dos concretos C1, C2 e C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída, e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Esquema de diferentes tratamentos da escória à saída do alto-forno	9
Figura 2.2	- Resfriamento brusco da escória de alto-forno, por jatos d'água na Companhia Siderúrgica de Tubarão	10
Figura 2.3	- Escória granulada de alto-forno nos pátios da Companhia Siderúrgica de Tubarão	10
Figura 2.4	- Esquema do resfriamento da escória de alto-forno pelo processo GALEX	12
Figura 2.5	- Aplicações da escória de alto-forno (a) no Brasil e (b) nos principais países produtores de escória	13
Figura 2.6	- Representação esquemática: (a) escória com estrutura cristalina e (b) escória com estrutura vítrea	16
Figura 2.7	- (a) Difratoograma de raios X de uma escória totalmente vitrificada; (b) Difratoograma de raios X de uma escória com fases cristalinas	20
Figura 2.8	- Representação esquemática dos vários estágios de hidratação do cimento Portland	25
Figura 2.9	- Modelos de hidratação da escória: (a) taxa de evolução de calor da hidratação da escória em presença da água; (b) taxa de evolução de calor da hidratação da escória ativada com NaOH e (c) taxa de evolução de calor da hidratação da escória ativada com silicato de sódio	26
Figura 2.10	- Curvas calorimétricas de cimento de alto forno hidratado a várias temperaturas: (a) 15° C, (b) 27° C e (c) 38° C	28
Figura 2.11	- Os gráficos ilustram picos de temperatura para cimentos hidratados com diferentes teores de escória moída a temperaturas de 38° C e 60° C	35
Figura 2.12	- Calor liberado, acumulado, de cimento Portland comum e cimento com 50% de escória, a 27° C e 60° C	36
Figura 2.13	- Desenvolvimento médio de resistência à compressão do cimento Portland e cimento de alto-forno	37
Figura 2.14	- Grau de carbonatação em função da umidade relativa	46
Figura 3.1	- Representação esquemática de duas pastas frescas de cimento com a relação água/cimento igual a (a) 0,65 e (b) 0,25	64
Figura 4.1	- Difratoograma de raios X da escória de alto-forno	82
Figura 4.2	- Micrografias da escória de alto-forno moída (microscopia ótica por luz refletida)	82
Figura 4.3	- Curva granulométrica da escória A e as curvas dos limites granulométricos da zona 3 da NBR 7211	84
Figura 4.4	- Curvas granulométricas das escórias B e as curvas dos limites granulométricos da zona 2 da NBR 7211	85
Figura 4.5	- Micrografias da escória de alto-forno granulada: (a) escória granulada A e (b) escória granulada B	86
Figura 4.6	- Curva granulométrica da areia e as curvas dos limites granulométricos das zonas 2 da NBR 7211	87
Figura 4.7	- Curva granulométrica da brita 0 e as curvas dos limites granulométricos segundo a NBR 7211	89

Figura 4.8 - Curva granulométrica da brita 1 e as curvas dos limites granulométricos segundo a NBR 7211	90
Figura 4.9 - Placa de vidro sobre papel milimetrado, cone tronco-cônico em acrílico transparente e equipamentos auxiliares	93
Figura 4.10 - (a) Medida de espalhamento sobre a placa de vidro e (b) uma medida sem espalhamento	93
Figura 4.11 - Amostras de argamassas com ADT2, ADT3 e ADT4 para o ensaio de início de pega, através da resistência à penetração com utilização de penetrômetro	99
Figura 4.12 - Betoneira de eixo inclinado e tambor giratório basculante com capacidade de mistura de 320 litros	102
Figura 4.13 - Corpo-de-prova sendo ensaiado para obtenção de resistência à compressão axial	104
Figura 4.14 - Corpos-de-prova para medidas de retração nas formas	105
Figura 4.15 - Corpos-de-prova para medidas de retração dispostos na câmara seca	105
Figura 4.16 - Corpos-de-prova para medidas de retração, utilizando micrômetro	106
Figura 4.17 - Corpos-de-prova em ambiente de laboratório, para posterior colocação na câmara de carbonatação	106
Figura 4.18 - Corpo-de-prova, marcados as posições a serem seccionadas transversalmente para posterior medida de profundidade de carbonatação	107
Figura 4.19 - Corpo-de-prova seccionado mostrando o interior do corpo-de-prova em vermelho carmim e uma faixa externa carbonatada	108
Figura 4.20 - Câmara de carbonatação com os corpos-de-prova cilíndricos	109
Figura 4.21 - Fluxograma do estudo para seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1)	111
Figura 4.22 - Fluxograma da seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)	113
Figura 4.23 - Fluxograma da seleção do teor de Na ₂ O do silicato de sódio (Etapa 3)	117
Figura 4.24 - Fluxograma da dosagem do concreto (Etapa 4)	119
Figura 4.25 - Abatimento de tronco de cone do concreto base (a) aos 10 minutos e (b) aos 65 minutos	121
Figura 4.26 - Corpos de prova de concreto em moldes para ensaios de resistência à compressão axial (150x300)mm e para ensaios de resistência à tração na flexão e carbonatação (100x200)mm	122
Figura 4.27 - Fluxograma do estudo da avaliação das propriedades do concreto (Etapa 5)	122
Figura 5.1 - Fluxograma mostrando os materiais utilizados nos ensaios e o objetivo da seleção do tipo de escória granulada e do teor de escória moída em substituição à escória granulada (Etapa 1).	124
Figura 5.2 - Curvas das resistências à compressão dos vários traços para: (a) escória EA e (b) escória EB nas idades de 7 e 28 dias, a/c=0,55	127
Figura 5.3 - Curvas das resistências à compressão, sobrepostas, dos vários traços de argamassa para as escórias EA e EB nas idades de 7 e 28 dias, a/c=0,55.	127
Figura 5.4 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 2, sem escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, a/c=0,55	129

Figura 5.5 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 3, com escória granulada com granulometria da areia normal, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$	129
Figura 5.6 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 5, com 10% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$	129
Figura 5.7 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 6, com 17% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$	129
Figura 5.8 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 7, com 23% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$	130
Figura 5.9 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 8, com 33% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$	130
Figura 5.10 - Consistências das argamassas com escória granulada EA, $a/c=0,55$: (a) traço da Argamassa 7, (b) traço da Argamassa 8 e (c) traço da Argamassa 9	131
Figura 5.11 - Consistências das argamassas com escória granulada EB, $a/c=0,55$: (a) traço da Argamassa 7, (b) traço da Argamassa 8 e (c) traço da Argamassa 9	132
Figura 5.12 - Fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapap 2)	133
Figura 5.13 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini- <i>slump</i> , para o ADT 2 no teor de 0,47% de sólidos	135
Figura 5.14 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini- <i>slump</i> , para o ADT 3, no teor de 0,16% de sólidos	135
Figura 5.15 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini- <i>slump</i> , para o ADT 4, no teor de 0,38% de sólidos	135
Figura 5.16 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 1, para diferentes teores de sólidos	136
Figura 5.17 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 2, para diferentes teores de sólidos	136
Figura 5.18 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 3, para diferentes teores de sólidos	137
Figura 5.19 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 4, para diferentes teores de sólidos	137
Figura 5.20 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para os melhores teores de sólidos dos ADT 1, 2, 3 e 4, para diferentes teores de sólidos	138
Figura 5.21 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para teor de aditivo de 0,19%	138
Figura 5.22 - Área de espalhamento da pasta ao longo do tempo para teor de aditivo de 0,28%	139
Figura 5.23 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para teor de aditivo de 0,38%	139

Figura 5.24 - Área de espalhamento da pasta ao longo do tempo para teor de aditivo de 0,57%	139
Figura 5.25 - Ensaio de referência, utilizando o método do mini- <i>slump</i> , para pasta, no traço 1:1 (cimento : escória moída), sem aditivo, para o tempo de 0 minutos	140
Figura 5.26 - Exemplos de ensaios em pasta mostrando a área de espalhamento com o ADT 1, para o teor de 0,76%, (a) 0 minutos e (b) 180 minutos	140
Figura 5.27 - Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 2, (à base de lignossulfato+naftaleno sulfonado+melamina sulfonada)	142
Figura 5.28 - Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 3(à base de carboxilato)	143
Figura 5.29 - Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 4 (à base de melamina sulfonada)	143
Figura 5.30 - Comparação entre as resistências à penetração, ao longo do tempo, para os ADT 2, 3 e 4	143
Figura 5.31 - Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, traço A (1:1:2), para os ADT 2, ADT 3 e ADR 4	145
Figura 5.32 - Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, do traço B (1:1:2,7), para os ADT 2, ADT 3 e ADT 4	145
Figura 5.33 - Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, do traço C (1:1:2,4), para os ADT 2, ADT 3 e ADT 4	145
Figura 5.34 - Fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo de compatibilidade entre material cimentício-aditivo-silicato de sódio (Etapa 3)	147
Figura 5.35 - Fluxograma as propriedades a serem avaliadas nos concretos (Etapa 5)	151
Figura 5.36 - Resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias para os concretos 1, 2, 3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos 4, 5 e 6 confeccionados com CP II E-32	153
Figura 5.37 - Curvas de resistência à compressão versus relação água/materiais cimentícios, para os concretos 1, 2, 3, 4, 5, e 6: (a) aos 7 dias, (b) aos 28 dia e (c) aos 91 dias	154
Figura 5.38 - Índice de vazios versus relação água/mat. cimentícios, para os concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32	156
Figura 5.39 - Evolução da retração dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32	157
Figura 5.40 - Profundidades de carbonatação dos concretos para as idades de 63, 77 e 91 dias	159
Figura 5.41 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 63 dias, após a moldagem, antes de serem colocados na câmara de carbonatação	159
Figura 5.42 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 77 dias	160
Figura 5.43 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 91 dias	160
Figura 5.44 - Influência da relação água/materiais cimentícios, na profundidade de carbonatação aos (a) 63, (b) 75 e (c) 91 dias	161

Figura 5.45 - Relação da resistência à compressão dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6, aos 91 dias, com a profundidade de carbonatação de cada concreto

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO E DA RETRAÇÃO EM CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Maria Antonina Magalhães Coelho¹

Resumo

O benefício que a utilização de escória traz ao meio ambiente é grande, pois novas jazidas de calcário deixam de ser exploradas, a emissão de dióxido de carbono gerado na fabricação do clínquer é reduzida, havendo, ainda, economia de energia na produção do cimento com escória. Estas considerações econômicas e ambientais são ampliadas quando a incorporação de escória ao concreto é aumentada incluindo as alternativas de utilização como adição mineral e agregado.

Neste trabalho a influência de elevados teores de escória de alto-forno como adição mineral e agregado miúdo em concretos é estudada, analisando seus efeitos na resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral, no teor de ar incorporado, na massa específica, na absorção, no índice de vazios, na retração e na profundidade de carbonatação de concretos em comparação com concretos com baixos teores de escória de alto-forno.

Foram dosados concretos com CP III-32 RS com adição de 100% de escória de alto-forno moída; relações água/materiais cimentícios iguais a 0,33, 0,40 e 0,44; 72% de escória granulada e 28% de areia como agregado miúdo e britas graníticas zero e um como agregado graúdo. A segunda família de concreto, usada como referência, foi confeccionada com o mesmo traço, porém, utilizou cimento CP II-E 32, relações água/materiais cimentícios iguais a 0,33, 0,38 e 0,44, areia como agregado miúdo e britas graníticas zero e um usadas como agregado graúdo.

Os resultados experimentais comprovaram a possibilidade de utilização de altos teores de escória como adição mineral e agregado miúdo em concretos, sem grande influência na carbonatação e retração dos concretos, quando comparados com concretos confeccionados com baixos teores de escória de alto-forno de mesma resistência à compressão, aproximadamente 40 MPa, e desde que sua dosagem seja adequada e a cura eficiente.

¹Eng. Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES. E-mail: antonina@escelsa.com.br.

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF CARBONATION AND SHRINKAGE IN CONCRETE WITH HIGH CONTENT OF BLAST FURNACE SLAG

Maria Antonina Magalhães Coelho¹

Abstract

There is a great environmental benefit in adding slag to cement. Because new calcareous rock deposits are not exploited, the emission of carbon dioxide in the manufacturing of clinker is reduced and there is also an energy economy associated to the substitution of cement production by slag addition. These economic and environmental considerations are extended when the amount of slag to the concrete is increased through mineral addition and aggregate use.

This paper outlines the influence of concrete incorporating high volume of blast furnace slag in addition to the Portland cement and granulated blast furnace slag as fine aggregate, analyzing its effect in the compressive strength, in the tensile strength for diametrical compression, the air content, the specific mass, the absorption, the emptiness index, the shrinkage and the depth of carbonation of concrete when compared with concrete with low blast furnace slag.

Concrete was prepared using CP III-32 RS cement with 100% addition of blast furnace slag; water/cimentitious materials ratio of 0.33, 0.40 and 0.44; 72% of granulated blast furnace slag and 28% of natural sand as fine aggregate, and crushed stone as coarse aggregate. A second group of concrete, used for control, was manufactured with the same mixture proportions, however, using CP II-E 32 cement, water/cimentitious materials ratio of 0.33, 0.38 and 0.44, sand as fine aggregate and crushed stone as coarse aggregate.

The experimental results have proven the viability of using concrete with high volume of blast furnace slag as mineral addition and as fine aggregate, without significant influence on the concrete carbonation and shrinkage, when compared with concrete manufactured with low volume of blast furnace slag of same compressive strength, approximately 40 MPa, with a well adjusted mixture proportion and an efficient cure.

¹Civil Engineer, Msc student of PPGEC/UFES. E-mail: antonina@escelsa.com.br.

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo desenvolvimento sustentável vem adicionar uma nova dimensão para a reciclagem de subprodutos e demonstrar a sua importância, através da *percepção de que a ação da raça humana tem causado transformações não previstas na natureza* (GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995).

A Construção Civil, dentre os setores industriais, é um dos que mais tem possibilidades de aproveitamento de grandes quantidades de subprodutos, devido ao número de insumos e volume de matéria-prima que consome. O *déficit* habitacional e os altos custos dos insumos básicos incentivam os estudos de materiais e tecnologias alternativas como, por exemplo, a maior utilização de escórias siderúrgicas (JOHN, 2000).

Da mesma forma, a conscientização das questões ambientais e as políticas estatais sobre preservação ambiental vêm fazendo com que surjam, novos sistemas de reciclagem de subprodutos. No caso de uso de escórias de alto-forno em substituição ao clínquer do cimento Portland, benefícios ambientais merecem destaque, como a redução do volume escavado de jazidas para a produção de cimento, com conseqüente diminuição da degradação da camada vegetal; redução da utilização de explosivos, que geram partículas em suspensão no ar e diminuição de áreas necessárias ao descarte de resíduos industriais, além de uma diminuição no consumo de energia e na liberação de dióxido de carbono no ar atmosférico, o que faz com que haja interesse também econômico nesta aplicação, pois o processamento da tonelada de escória consome menos de 20% do processamento de 1 tonelada de cimento Portland (ALDASORO, 1985; SOUZA *et al*, 1995; JOHN, 1996).

Atualmente, a principal aplicação da escória de alto-forno ainda está na indústria cimenteira, como substituição ao clínquer do cimento Portland. O seu uso já é consagrado e, a cada dia, novos estudos vêm ratificar suas propriedades e acrescentar novas aplicações. Porém, novas pesquisas, utilizando escória de alto-forno como adição ao concreto, também vêm motivando a sua utilização em concretos de alto desempenho

No entanto, o excedente que se tem formado nas cimenteiras é um fator que causa preocupação. Atualmente, das 5,4 milhões de toneladas de escória básica, produzidas por ano no Brasil, cerca de 3 milhões são incorporadas ao cimento Portland (LITTLE & SETEPLA, 1999).

Neste contexto, a utilização da escória de alto-forno como agregado, embora possa parecer uma aplicação menos nobre, é, também, uma solução bastante viável, para o excedente gerado e para a escassez de areia natural cada vez mais crescente nas grandes cidades. As distâncias entre as partes geradoras e futuros consumidores também é um aspecto favorável, considerando que as siderúrgicas, em geral, se encontram ao lado dos centros urbanos que consumirão as escórias por elas produzidas (BATTAGIN & SCANDIUZZI, 1990).

Alguns estudos mostram as boas características do produto final e apresentam considerações sobre eventuais problemas tecnológicos com o uso de escória em substituição à areia. Estas desvantagens, porém, não comprometem o uso da escória como agregado (SILVA & ALMEIDA, 1986; BATTAGIN & SCANDIUZZI, 1990).

A utilização da escória de alto-forno como adição mineral em canteiros de obras ou em centrais de preparo pode, também, absorver parte desse excedente (MARQUES, 1994).

Segundo ISAIA (1999), o concreto de alto desempenho, quando convenientemente dosado, produz estruturas com durabilidade adequada à vida útil de projeto, sendo um material eficaz para reduzir o custo e a demanda energética do ciclo construção-reparos-demolição-reciclagem-reconstrução, tornando o processo construtivo sustentável, contribuindo para economizar recursos naturais e econômicos e colaborando para a ecoeficiência.

1.1 Justificativa

A produção de escória de alto-forno em países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia, é de cerca de 71 milhões de toneladas por ano. Estes países respondem por 51% da produção mundial de aço¹. No Brasil, a produção de escória na fabricação do aço chegou a 8,7 milhões de toneladas em 1998 (LONGO, 1985; LITTLE & SETEPLA, 1999).

A produção de escória de alto-forno está em franca expansão. Somente no estado do Espírito Santo, a Companhia Siderúrgica de Tubarão produz 1,3 milhões de toneladas de escória de alto-forno granulada por ano e está previsto um aumento de 500 mil toneladas por ano para 2003, com o funcionamento de um novo alto-forno.

¹ a produção mundial de escória de alto-forno é de aproximadamente 150 milhões de t/ano.

Somente 5% da produção brasileira de escória de alto forno não é granulada, resultando na produção de apenas 26,5 mil toneladas de escória bruta de alto-forno. Há, no entanto, uma política de granulação de 100% da produção, na maior parte das siderúrgicas nacionais que produzem escória de alto-forno básica, como é o caso da CST (LITTLE & SETEPLA, 1999).

Porém, como a indústria cimenteira não absorve toda a produção de escória de alto-forno, há um estoque considerável acumulado, nos pátios das siderúrgicas e nas fábricas de cimento, embora seja feita exportação de grande parte. Assim, existe, por parte das indústrias siderúrgicas, incentivos a pesquisas de novas aplicações para este subproduto, devido ao grande volume gerado (LITTLE & SETEPLA, 1999).

Outro fator que incentiva as pesquisas de aplicação para resíduos é o conhecimento da escassez futura de fontes de matérias-primas que, junto às razões ecológicas de não degradação da natureza e de conservação de energia, busca solução para melhorar a qualidade ambiental. Sanções mercadológicas, impostas por mecanismos internacionais a empresas que não têm propostas para reciclagem de resíduos por elas gerados, também contribuem para novos estudos (MARQUES, 1994; SILVA, 1998).

Dentro do conceito de desenvolvimento sustentável, existe uma preocupação com a construção, desde a etapa de projeto e seleção dos materiais, até a etapa de manutenção/uso e disposição final de sua vida útil. Deve-se equilibrar ecologia com economia, com o propósito de produção com menos energia, menos matéria-prima, menos desperdício, menos poluição, mais reutilização e reciclagem (ISAIA, 1999).

A utilização da escória de alto-forno atende a estes requisitos de ecoeficiência e, devido às suas boas qualidades como material cimentício e agregado miúdo, pode-se considerar a possibilidade de produção de concretos de alto desempenho com estes materiais, para produzir estruturas, não só duráveis como também benéficas ao meio ambiente e com menor custo ao longo do ciclo de vida.

Nesta dissertação são estudados os efeitos da utilização de altos teores de escória de alto-forno, como adição ao cimento e como agregado miúdo, substituindo areia comum. A perspectiva é de avaliar a influência da adição de escória de alto-forno em propriedades do concreto, tais como resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, teor de ar incorporado, massa específica, absorção e índice de vazios

permeáveis, retração e profundidade de carbonatação, atendendo às exigências de ecoeficiência, com a produção de um concreto durável.

Esta pesquisa pode trazer contribuições para várias dúvidas levantadas sobre a carbonatação e a retração de pastas e concretos, que são 2 (dois) dos principais problemas apontados para o uso mais consagrado e fundamentado da escória de alto-forno em cimentos e concretos. Atualmente, tem-se discutido a necessidade de aumento do cobrimento em concretos contendo cimentos com adição de escória de alto-forno, na revisão da NBR 6118. Este aumento poderá criar barreiras à comercialização da escória de alto-forno e à utilização do cimento CP III no Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desta dissertação é avaliar a influência de altos teores de escória moída, utilizada como adição mineral e como escória granulada, utilizada como parte do agregado miúdo, na resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral, no teor de ar incorporado, na massa específica, na absorção, no índice de vazios, na retração, na profundidade de carbonatação dos concretos, com diferentes relações água/materiais cimentícios.

1.2.2 Objetivos específicos

- estudar o efeito de aditivos superplastificantes em concretos com altos teores de escória de alto-forno moída;
- estudar o efeito de silicato de sódio como ativador da escória de alto-forno moída em sistemas clínquer-escória;
- selecionar tipo e teor de escória de alto-forno
- dosar concretos com altos teores de escória de alto-forno.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está subdividida em 6 (seis) capítulos. Na introdução desta dissertação (**capítulo 1**) é apresentada a escória de alto-forno no contexto da ecoeficiência, as

principais justificativas e os objetivos do estudo proposto, além da estrutura desta dissertação.

No **capítulo 2**, estão apresentados uma revisão da literatura sobre os tipos e aplicações da escória de alto-forno, a hidratação, os mecanismos de ativação e a influência da escória de alto-forno, nas principais propriedades de pastas, argamassas e concretos, além de exemplos de aplicação da escória de alto-forno como adição a cimentos e concretos e como agregado miúdo.

No **capítulo 3**, são discutidos a relação resistência-durabilidade em concretos de alto desempenho, o papel dos materiais e da escória de alto-forno no alto desempenho dos concretos e as suas principais tendências.

No **capítulo 4**, é descrito o projeto de experimentos, os materiais e os métodos empregados.

No **capítulo 5**, são apresentados e discutidos os resultados obtidos em ensaios para a seleção, entre dois tipos de escória granulada e do teor de escória moída em substituição à escória granulada. A partir da escória selecionada, são apresentados os resultados de ensaios para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante e, em seguida, os resultados de ensaios, para seleção do teor de Na_2O do silicato de sódio. Após a seleção dos materiais e dos teores a serem utilizados, são apresentados e avaliados os resultados da resistência à compressão axial, e à tração por compressão diametral, do teor de ar incorporado, da massa específica, da absorção e do índice de vazios, da retração e da profundidade de carbonatação dos concretos.

No **capítulo 6**, são apresentadas as principais conclusões e uma projeção de expectativa de continuidade da pesquisa.

1.4 Experiências de utilização de escórias de alto-forno granuladas como agregado miúdo

São poucas as experiências de utilização de escórias de alto-forno granuladas como agregado miúdo. No Brasil, sabe-se de experiências de utilização na execução de muros e pavimentos em algumas fábricas de cimento e em siderúrgicas nacionais. A Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) vem utilizando a escória como agregado em concretos magros, pisos e passeios e em algumas obras de concreto estrutural, com resultados satisfatórios (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1990).

A CST realizou algumas experiências, em 1999, com a construção de 4km de muro, em sua divisa norte, em concreto armado confeccionado com escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória bruta britada como agregado graúdo. Outros 4km de muro foram construídos, em sua divisa sul, com blocos de concreto utilizando escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória bruta britada bem fina, como pedrisco.

LEE (1974) cita a construção do viaduto em Herserange, perto de Nancy, França, cujo concreto era constituído por cimento de escória e agregados graúdo e miúdo de escória bruta e granulada, respectivamente.

Aplicações da escória granulada, em estradas de rodagem, na França, desde 1960 são mencionadas por DUSSART (1979).

Na Alemanha, a escória granulada também é utilizada como agregado na construção de estradas em misturas com escórias brutas², como agregado em concretos e na confecção de blocos (BLUNK, 1979).

Um estudo de caracterização tecnológica da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo foi conduzido, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela Normalização Brasileira e/ou estrangeira por RIBEIRO *et al.* (1990). De acordo com esse estudo, a composição química da escória está dentro dos limites estabelecidos pelas normas referentes à utilização da escória como agregado (NF P 18-302³ e BS – 1047⁴).

Da mesma forma, a granulometria e os teores de impurezas orgânicas e de material pulverulentos estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras (NBR 7217/1987; NBR-7220/1987; 7219/1987). Foi encontrado um teor um pouco elevado para materiais friáveis (NBR-7218/1987), indicando a necessidade de se realizar avaliações experimentais, através da confecção de corpos-de-prova de argamassas e concretos, para avaliar como este fator pode influenciar as suas propriedades.

O ensaio de reatividade potencial indicou que o material não contribui para reações prejudiciais de expansão, fissuração e desagregação da pasta do cimento e os ensaios de

² quando a escória de alto-forno é resfriada naturalmente ao ar.

³ Association Française de Normalisation (AFNOR). Laitier granulé, NF P18-306. Paris, 1965.

⁴ British Standards Institution (BS). Air-cooled blast-furnace slag coarse aggregate for concrete; BS1047. London, 1983.

determinação dos teores de sais mostraram-se compatíveis com os limites estabelecidos, não contribuindo para o aparecimento de eflorescências.

Enfim, os resultados encontrados permitiram concluir que a escória atende, em termos gerais, aos requisitos para o seu emprego como agregado miúdo (RIBEIRO *et al*, 1990).

SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990), em estudo técnico realizado para a Associação Brasileira de Cimento Portland, avaliaram o comportamento mecânico, reológico e a durabilidade de argamassas preparadas com escória granulada como agregado miúdo. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica de emprego da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo em concretos, competindo, em termos gerais, em igualdade de condições com as areias naturais ou provenientes de rochas britadas.

Nos estudos de resistência à compressão, conduzidos por SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990), utilizando argamassas com escória de alto-forno granulada como agregado miúdo, as argamassas com escórias com maiores massa específica apresentaram os melhores resultados. Comparando-se argamassas com areia natural e argamassas com escória, os melhores resultados foram com areia natural aos 28 dias de idade. Porém, aos 91 dias as argamassas confeccionadas com escórias apresentaram resistências à compressão um pouco superiores.

Os resultados para resistências à tração não apresentaram diferenças para a idade de 28 dias e para 90 dias foram 15% superiores para as argamassas confeccionadas com escória de alto-forno como agregado miúdo. Estes resultados podem ser devido à maior aderência entre a pasta e a escória granulada de alto-forno e a uma certa atividade hidráulica tardia que foi observada, através de microscópio eletrônico de varredura. A justificativa pode estar no fato de que a única diferença entre a escória granulada de alto-forno e a escória utilizada como aglomerante no cimento é a granulometria (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1990).

SCANDIUZZI & BATTAGIN apud Numata (1990) relata que o consumo de água do concreto é um pouco superior ao concreto com areia natural, mas que este fato não afetou, consideravelmente, a qualidade do concreto. Para concretos bombeados, foi recomendado o aumento da porcentagem de agregado miúdo, no caso a escória, em cerca de 2% a 3%, para que a facilidade de bombeamento seja melhorada.

NUMATA *et al.* (1986) utilizaram escória granulada parcialmente moída como agregado miúdo em concretos com escória moída ultra fina e, através de análise por microscópio

eletrônico de varredura, constataram uma camada hidratada de C-S-H na interface dos grãos de escória. Observaram, ainda, que misturas contendo escória de alto-forno como agregado apresentaram melhores resultados a ataques de ácidos, em comparação a misturas com areia de rio como agregado miúdo, devido, provavelmente, à melhoria na interface.

ALEXANDRE & SEBILEAU (1988) consideram que a movimentação da escória granulada durante o seu transporte e durante o preparo do concreto, pode, por atrito, produzir finos que também podem justificar o aumento da aderência entre a pasta de cimento e a escória. Outro modo de obter essas vantagens é através da moagem parcial da escória granulada, até obtenção de 10 a 15% de finos, que resulta em quebra e arredondamento grosseiro dos grãos, com as dimensões máximas características passando de 5mm para 2mm.

A consistência da mistura é, assim, mais adequada à aplicação do que no caso precedente, da escória granulada sem nenhum tipo de moagem, ocorrendo, também, um aumento da resistência mecânica, pois os finos da escória se juntam aos finos do cimento (ALEXANDRE & SEBILEAU, 1988).

Os mesmos autores citam, também, o emprego de escória granulada como agregado miúdo, em mistura com cinza volante. A composição mais favorável encontrada foi, em volume, de 70% a 80% de escória para 20% a 30% de cinzas volantes. A cinza volante atenua o problema de rugosidade da escória, contribuindo para uma melhor trabalhabilidade, aumento de resistência à tração, diminuição de microfissuração interna e maior durabilidade do concreto. Este material foi utilizados em obras importantes na França, como as centrais térmicas de Ansereuilles, de Pont-sur-Sambre, de La Marche, a barragem de Eppe-Sauvage e outras construções industriais (ALEXANDRE & SEBILEAU, 1988).

1.5 Considerações finais

A preocupação com questões ambientais vem fazendo com que surjam novos sistemas de reciclagem de subprodutos. O conceito de desenvolvimento sustentável vem adquirindo importância e incentivando a transformação de resíduos em subprodutos úteis à sociedade.

A Construção Civil consome um alto volume de matéria-prima tendo, portanto, possibilidades de aproveitamento de grandes quantidades de subprodutos. O estudo de novas aplicações para subprodutos, como o caso da escória de alto-forno, cuja utilização

atual não tem sido suficiente para que o volume gerado seja totalmente consumido, se torna, assim, interessante tanto sob o ponto de vista ecológico como no econômico.

2 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

2.1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica gera escória de alto-forno como um dos subprodutos na fabricação do aço. De acordo com pesquisa realizada em nove países⁵ responsáveis por 51% da produção mundial de aço, o total de escória gerada foi de 118,5 milhões de toneladas ano, sendo 71 Mt/ano de escória gerada em alto-fornos, na produção do ferro gusa e 47 Mt/ano de escória geradas em fornos de aciaria, no refino do gusa.

O Brasil é responsável pela produção de 8,3 milhões de toneladas de escória/ano, sendo 5,4 Mt/ano de escória de alto-forno. A geração de escória varia, dependendo da composição dos materiais brutos e o índice médio de geração no Brasil fica na faixa de 270kg de escória de alto-forno por tonelada de ferro gusa produzido e de 120 kg de escória de aciaria por tonelada de aço produzido (LITTLE & SETEPLA, 1999).

Entretanto, a utilização que vem sendo dada à escória de alto-forno não tem sido suficiente para que o volume gerado seja totalmente consumido e, considerando ser a escória granulada de alto-forno um material nobre por suas características físico-químicas, que moída a uma granulometria adequada, e com a adição de ativadores, adquire propriedades aglomerantes, existe um incentivo, de vários setores da sociedade, para pesquisas de novas aplicações.

Nas últimas décadas, a maior conscientização das questões ambientais e as políticas estatais sobre preservação ambiental vêm fazendo com que surjam novas propostas de reciclagem de resíduos e de redução da quantidade de resíduos gerados. Transformar resíduos em subprodutos úteis à sociedade é de suma importância e o conceito de desenvolvimento sustentável vem sendo discutido, *resultado de uma longa percepção de que a ação da raça humana tem causado transformações não previstas na natureza*. Assim, a busca pelo desenvolvimento sustentável vem adicionar uma nova dimensão para a reciclagem de subprodutos e demonstrar a sua importância.

A Construção Civil, dentre os setores industriais, é um dos que mais tem possibilidades de aproveitamento de grandes quantidades de subprodutos, devido ao número de insumos e volume de matéria-prima que consome. O *déficit* habitacional e os altos custos dos

⁵ Brasil, EUA, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia.

insumos básicos incentivam os estudos de materiais e tecnologias alternativas como, por exemplo, a maior utilização de escórias siderúrgicas na construção civil (GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995; JOHN, 2000)

A substituição do clínquer por escória granulada de alto-forno traz benefícios ambientais merecendo destaque a redução do volume escavado de jazidas, para a produção de cimento e, conseqüentemente, a diminuição da degradação da camada vegetal, redução da utilização de explosivos que geram partículas em suspensão no ar, diminuição de liberação de dióxido de carbono no ar atmosférico e diminuição de áreas necessárias ao descarte de resíduos industriais. A diminuição do consumo de energia faz com que haja interesse, também econômico, nesta aplicação, pois o processamento da tonelada de escória granulada de alto-forno consome menos de 20% de energia comparado ao processamento de 1 tonelada de cimento Portland (ALDASORO, 1985; SOUZA *et al*, 1995; JOHN, 1996).

Neste capítulo será apresentado um breve histórico sobre a utilização da escória granulada de alto-forno como aglomerante e algumas considerações sobre a sua reatividade, ativação e hidratação. A hidratação do cimento de alto-forno será, também, discutida. As características e experiências de utilização da escória de alto-forno granulada, como agregado miúdo, bem como a influência da escória de alto-forno moída e granulada⁶ nas principais propriedades de pastas, argamassas e concreto, serão comentadas.

2.2 TIPOS DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E SUAS APLICAÇÕES

No processo de produção do ferro gusa, a escória é gerada quando da eliminação das impurezas, ou ganga, que vêm associadas aos metais no seu estado natural. Para a obtenção do metal, é necessário eliminar a ganga e, neste processo, é adicionado coque ou carvão de madeira, como combustível e um fundente que, em geral, é o calcário. Os fundentes mais usados são CaO, MgO, CaF₂ e, em alguns casos, um fundente ácido como SiO₂.

Com o uso de fundentes, é possível reduzir o ponto de fusão da ganga, obtendo a escória líquida, através da reação química entre o fundente e a ganga e, por ser mais leve do que o metal, a escória é, então, facilmente separada. As escórias são, portanto, resíduos inevitáveis nos processos siderúrgicos. Sua natureza e composição variam de acordo com

⁶ Para simplificação, será adotado o termo escória de alto-forno, para escória granulada de alto-forno moída e o termo escória granulada para a escória granulada de alto-forno não moída.

sua origem e processos utilizados (WAEKENS & CARMINE, 1985; GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995).

Na composição química das escórias de alto-forno, os óxidos mais importantes são CaO, MgO, Al₂O₃ e SiO₂, que representam 95% a 96% do total de óxidos. O enxofre e os óxidos de magnésio e de ferro são os elementos de menor importância. A composição das escórias pode variar, dependendo dos constituintes e de suas proporções nos minerais, fundentes, coque e outras matérias primas, da pureza do material a fabricar e das diferenças nos processos de fabricação, mas sempre dentro de limites relativamente estreitos. Na composição das escórias de aciaria, além dos quatro óxidos citados podem-se acrescentar outros três: FeO (Fe₂O₃), MnO e P₂O₅ (SMOLCZYK, 1980; WAEKENS & CARMINE, 1985).

O Quadro 2.1 apresenta a composição química média das escórias de alto-forno básicas⁷ e ácidas⁸ produzidas no Brasil e, como referência, a do cimento Portland.

A escória de alto-forno, separada da parte metálica por ser menos densa, sai líquida do alto-forno, a uma temperatura de aproximadamente 1500° C. Dependendo de como é feito o seu resfriamento, a escória de alto-forno se constituirá de produtos com densidades, granulometrias e características distintas. (GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995).

Quadro 2-1 - Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995)

	Escória básica (BATTAGIN & ESPER, 1988)	Escória ácida (adaptado de SOARES, 1982)	Cimento Portland (TAYLOR, 1990)
CaO	40-45	24-39	66
SiO₂	30-35	38-55	22
Al₂O₃	11-18	8-19	5
MgO	2,5-9	1,5-9	1
Fe₂O₃	0-2	0,4-2,5	3
FeO	0-2	0,2-1,5	-
S	0,5-1,5	0,03-0,2	-
CaO/SiO₂ (média)	1,31	0,68	3

Quando a escória de alto-forno é resfriada naturalmente ao ar, os óxidos componentes se cristalizam aos poucos e, assim, perdem seu poder de aglomerante hidráulico, sendo a

⁷ a escória de alto-forno é básica quando é gerada nos altos-fornos a coque e possui relação CaO/SiO₂ >1 (JOHN, 1995; LITTLE & SETEPLA, 1999).

⁸ a escória de alto-forno é ácida quando é gerada nos altos-fornos a carvão vegetal e possui relação CaO/SiO₂ < 1 (JOHN, 1995; LITTLE & SETEPLA, 1999).

escória, então, considerada inerte. Assim, depois de devidamente britada, esta escória pode ser utilizada como agregado para concreto e bases de estradas (ALDASORO, 1985; GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995).

Quando é empregado o resfriamento brusco, na saída do alto-forno, por jatos d'água com pressão de 0,6 MPa, obtém-se um produto granular e vítreo. A escória de alto-forno se solidifica tão rapidamente que o tempo de solidificação é insuficiente para permitir a formação de núcleos cristalinos, mantendo, deste modo, sua característica de hidraulicidade. São usadas 8 t de água para resfriar 1 t de escória, reduzindo a temperatura da escória de 1500° C para menos de 100° C, instantaneamente. Esta água, posteriormente, passa por filtros e é encaminhada para torres de circulação para resfriamento e para nova utilização (MEUSEL & ROSE, 1983; ALDASORO, 1985; JOHN *et al.*, 1998; CST, 2001).

A Figura 2.1 mostra um esquema com diferentes tratamentos da escória na saída do alto-forno.

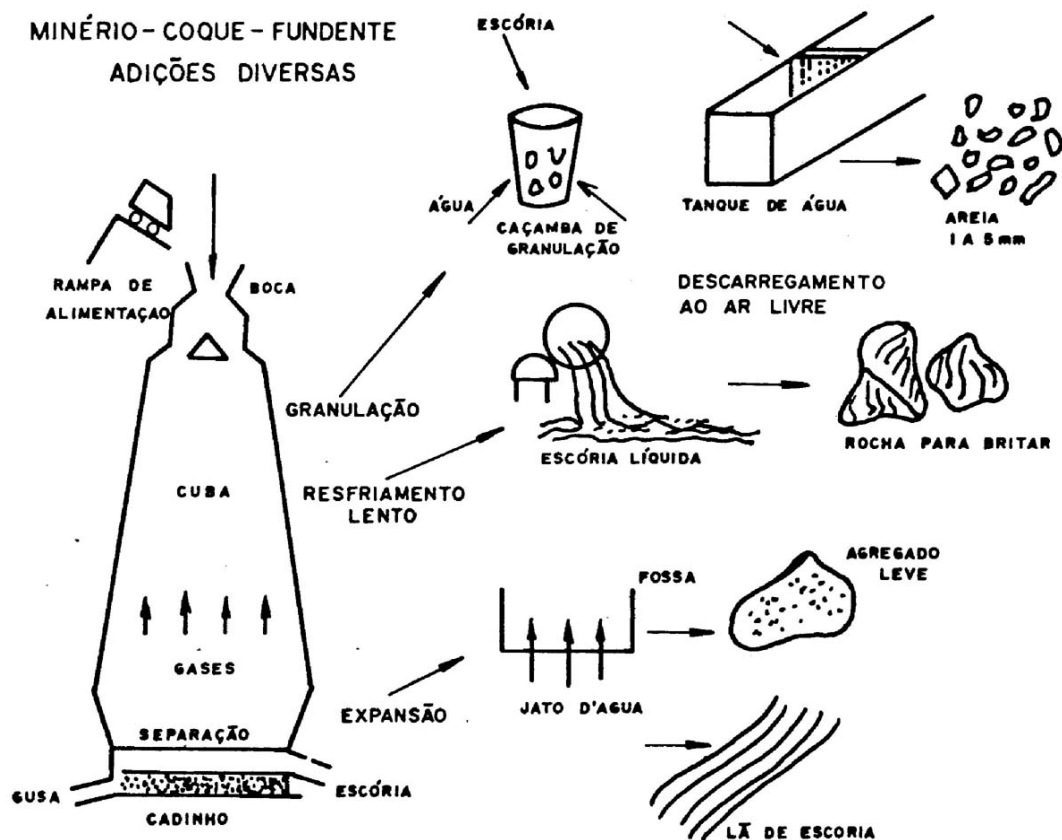


Figura 2.1 – Esquema de diferentes tratamentos da escória na saída do alto-forno (ALEXANDRE & SIBILEAU, 1988)

A Figura 2.2 mostra o resfriamento brusco, por jato de água, para granulação da escória de alto-forno.



Figura 2.2 – Resfriamento brusco da escória de alto-forno, por jatos d’água, na Companhia Siderúrgica de Tubarão.

A Figura 2.3 mostra a escória granulada nos pátios da Companhia Siderúrgica de Tubarão.



Figura 2.3 – Escória granulada de alto-forno nos pátios da Companhia Siderúrgica de Tubarão.

A escória granulada de alto-forno, submetida ao resfriamento brusco, tem excelentes propriedades hidráulicas⁹ e sua aplicação principal é como adição ao cimento (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1992; LITTLE & SETEPLA, 1999).

O processo GALEX permite obter a escória expandida ou peletizada, com propriedades físico-químicas particulares. É um processo puramente físico e combina expansão e formação de poros na escória de alto-forno quando a escória, ainda líquida, cai sobre um cilindro dentado giratório, refrigerado por jatos de água fria (1 ton de água/1 ton de escória), que arremessa a escória em grãos para o ar (SMOLCZYK, 1980; ALDASORO, 1985)

Por efeito de tensão superficial, as partículas tomam uma forma mais ou menos esférica, e como se deslocam em um meio que contém gotas de água, os glóbulos se resfriam rapidamente e adquirem uma estrutura vítrea na superfície. No interior, a velocidade de resfriamento é mais lenta tomando, então, uma forma cristalina. Este processo gera distribuição variada de grãos, sendo que os de maior diâmetro possuem estrutura porosa e são parcialmente cristalinos. A sua granulometria é de agregado graúdo, com dimensão máxima característica variando entre 9,5 e 32,0 mm, sendo empregado em concretos leves e como enchimento de pisos. Os grãos menores são similares à areia, apresentam estrutura vítrea, e podem ser utilizados como aglomerante. Este processo é mostrado esquematicamente na Figura 2.4. Este tipo de escória não é produzido no Brasil (GEYER, DAL MOLIN & VILELA, 1995; LITTLE & SETEPLA, 1999).

Se a escória de alto-forno for resfriada ao ar, sob pressão de jatos d'água em leitos, obtém-se a lã de vidro, que é um material isolante térmico e acústico. No Brasil não há notícias de uso de lã de escória de alto-forno (LITTLE & SETEPLA, 1999).

A grande maioria das usinas brasileiras com altos-fornos tem, por orientação, granular toda a escória de alto-forno gerada. Este processo só não ocorre por parada ou defeito no granulador ou outro problema operacional. Em 1998, quase 95% da escória de alto-forno gerada pelas usinas brasileiras era granulada, com exceção, dentre as 10 produtoras de

⁹materiais com propriedades hidráulicas ou características de hidraulicidade ou potencialmente hidráulicos são aqueles capazes de reagir, desde que existam, no meio, ativadores que completem a sua deficiência ou participem como reagente (JOHN et al, 1998).

gusa¹⁰, das usinas de Divinópolis (Pains) e Barão de Cocais, ambas da Gerdau (LITTLE & SETEPLA, 1999).

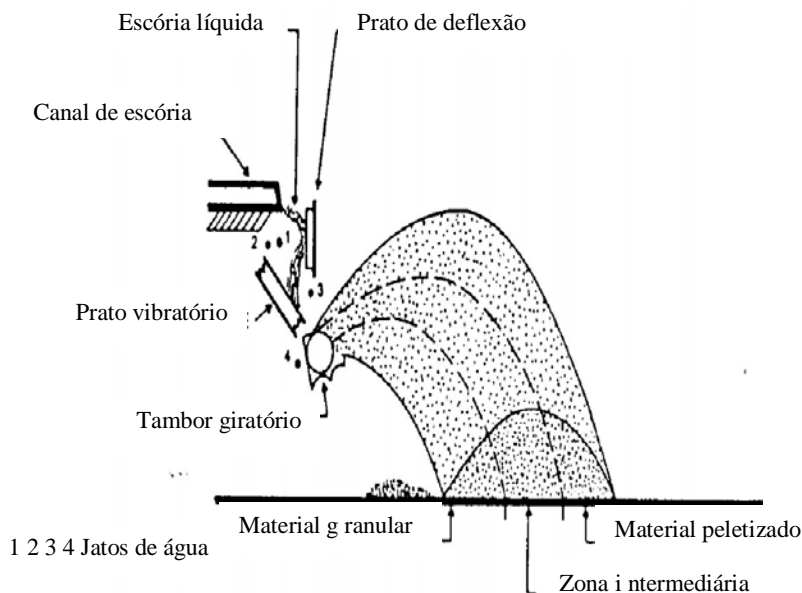


Figura 2.4 – Esquema do resfriamento da escória de alto-forno pelo processo GALEX (HOOTON, 1987)

Em pesquisa realizada entre os principais países¹¹ produtores de escória no mundo, observaram-se diferenças entre o tipo de produção da escória de alto-forno e suas aplicações, comparados com os do Brasil. A Figura 2.5 mostra as aplicações da escória de alto-forno e a Tabela 2.1 mostra os tipos de produção nos principais países produtores de escória no Brasil e no mundo.

Observa-se, pelos dados da Tabela 2-1, que, no Brasil, quase a totalidade da produção de escória de alto-forno é granulada, enquanto que, nos demais países pesquisados parte é granulada e parte é resfriada ao ar e somente em uma fração pequena é realizado o tratamento de expansão ou pelletização.

Tabela 2-1 - Tipos de tratamento das escórias nas saídas dos alto-fornos nos principais países produtores de escória no mundo e no Brasil (adaptado de LITTLE & SETEPLA, 1999).

Tratamento	Principais países produtores (%)	Brasil (%)
Granulação	47	94,6
Resfriamento ao ar	46	5,4
Expansão/pelletização	7	-

¹⁰ CST (Espírito Santo), ACESITA, Belgo-Mineira USIMINAS (Vale do Aço-MG), Açominas, Gerdau-Pain, Gerdau-Cocais Mannesmann (MG), CSN (RJ) e COSIPA (SP).

¹¹ EUA, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coréia.

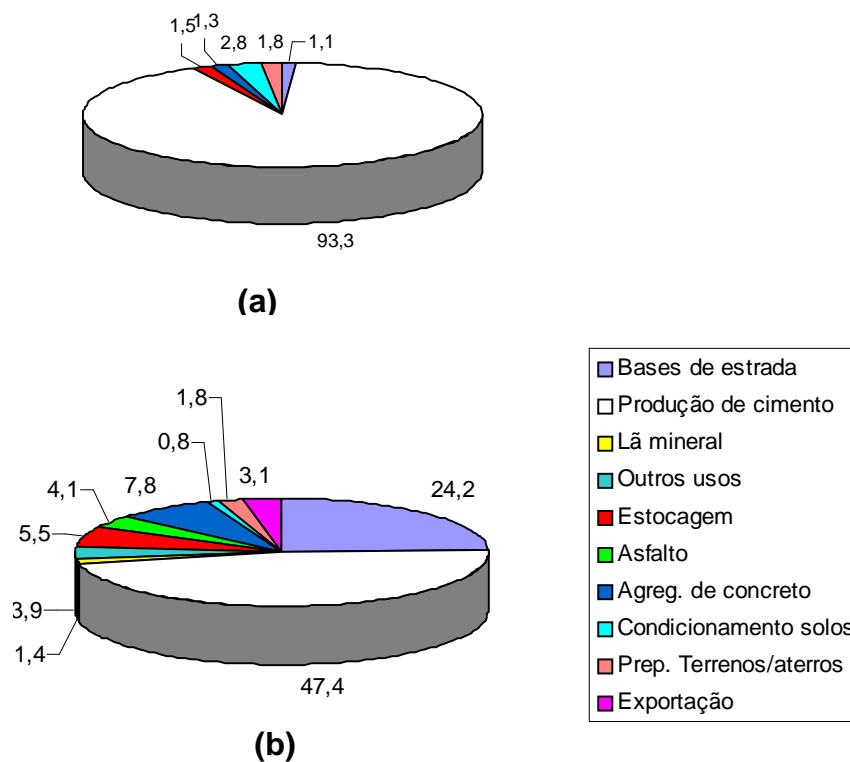


Figura 2.5 – Aplicações da escória de alto-forno (a) no Brasil e (b) nos principais países produtores de escória (LITTLE & SETEPLA, 1999).

O item 2.3 apresenta considerações sobre a reatividade, a ativação e a hidratação da escória de alto-forno moída e a hidratação do cimento de alto-forno.

2.3 A ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO AGLOMERANTE

2.3.1 Histórico

A escória de alto-forno começou a ser granulada em 1853, na Alemanha, para facilitar o seu transporte. Pouco tempo depois, em 1862, descobriu-se sua latente hidraulicidade e, por volta de 1865, era usada na fabricação de blocos de alvenaria. Inicialmente, a sua ativação era feita com cal, dando origem ao cimento de escória e cal. Mais tarde, o cimento Portland foi usado como ativador e, em 1888, já se trabalhava com o cimento contendo escória de alto-forno, sendo a escória granulada e o clínquer moídos em conjunto (BINJEN, 1996).

No começo do século XX, as normas de materiais da Suíça aprovaram o uso de cimento de escória¹² de alto-forno ativada com cal hidratada ou hidráulica. Seu uso era recomendado para obras submersas e em presença de umidade, desde que não necessitasse de resistência elevada. A resistência à compressão mínima exigida aos 28 dias era de 80% da resistência do concreto com cimento Portland comum (JOHN, 1995).

Nos anos seguintes, várias observações foram feitas, quanto ao uso do cimento de escória de alto-forno, tais como o fato de ter uma pega muito lenta, necessidade de cura permanente para evitar fissuras, risco de danos por congelamento e por ataque pela água do mar. A finura era considerada de grande importância, e a resistência chegou a ser equiparada à do cimento Portland. Embora tenha atingido resistências equivalentes à do cimento Portland, seu uso continuou recomendado para obras hidráulicas.

Outros tipos de ativadores foram usados, como carbonato de sódio, cloreto de sódio, sulfato de sódio ou sulfato de cálcio, mas a mistura de escória de alto-forno com clínquer Portland apresentou resultados superiores de resistência química e mecânica, o que contribuiu para enfraquecer o uso do cimento de escória.

Outro fator que contribuiu para a diminuição do uso de cimento de escória de alto-forno ativada com cal, além da sua baixa velocidade de ganho de resistência, era a sua carbonatação durante a armazenagem, fazendo com que a resistência mecânica fosse reduzida ainda mais, pois, para minimizar a carbonatação, era usual adicionar um excesso de cal nos cimentos, com prejuízo da resistência mecânica inicial (JOHN, 1995).

Enquanto o uso do cimento de escória de alto-forno decrescia, o uso de cimentos constituídos por clínquer e escória de alto-forno era crescente. Vários países da Europa adotavam o seu uso sob normalização, como a Alemanha, que, em 1909, produzia o cimento Portland com adição de até 30% de escória de alto-forno, e em 1917, de até 85% de escória de alto-forno.

A norma russa, para cimentos de alto-forno, foi editada em 1911. Em 1952, nos países como Bélgica, Inglaterra, França Holanda e Estados Unidos a normalização permitia a adição de 65% de escória de alto-forno. Na década de 70, mais de 30% de cimento produzido na Polônia, Holanda, Bélgica, Romênia, França e na ex URSS continha teores entre 5 e 95%

¹² nesta dissertação, a denominação de *cimento de escória de alto-forno* é usada para cimento sem clínquer;

de escória de alto-forno (JOHN, 1995).

Foi também na ex URSS onde surgiu a mistura de escória de alto-forno com silicato de sódio, em 1974, conseguindo-se resistências de 100 a 125 MPa. Entretanto, nesta mesma data, nos países do ocidente, o uso de cimento de escória era insignificante (JOHN, 1995).

No Brasil, o cimento Portland de alto-forno vem sendo utilizado desde 1952 e a sua normalização data de 1964. A escória de alto-forno é adicionada nas fábricas e este é o principal uso que se tem dado, no Brasil, a estas escórias. São fabricados dois tipos de cimento com adição de escória de alto-forno que obedecem às normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas): (a) cimento Portland composto, CP II E, com adições de escória de alto-forno que podem variar de 6% a 34%, em massa (NBR 11.578/1991), e o cimento Portland de alto-forno, CP III, com adições de escória que podem variar de 35% a 70%¹³, em massa (NBR 5735/1991).

O cimento Portland de alto-forno consiste em uma mistura íntima de clínquer Portland com escória de alto-forno. Este cimento pode ser produzido moendo conjuntamente o clínquer Portland com a escória granulada de alto-forno seca (juntamente com gipsita) ou misturando-se a seco o clínquer Portland já moído com a escória granulada, também moída.

2.3.2 Reatividade da escória granulada de alto-forno

2.3.2.1 Características que influenciam a reatividade da escória

As principais características que influenciam a reatividade da escória de alto-forno são (SMOLCZYK, 1980; REGOURD, 1980, HOOTON, 1987):

- grau de vitrificação (teor de vidro)
- composição química
- composição mineralógica
- finura

enquanto que *cimento com escória de alto-forno* é usada para cimento Portland com adição de escória.

¹³ de acordo com as normas NBR 11.578/1991 e NBR 5735/1991 é permitido um teor de até 5% de adição de material carbonático, muitas vezes da própria escória de alto forno, chegando os limite a 39 e 75% de escória de alto-forno.

Como visto no item 2.1, a granulação da escória de alto-forno é obtida por resfriamento brusco na saída do alto-forno. O resfriamento brusco impede que os átomos da escória se organizem em estrutura cristalina, não perdendo, assim, energia ao produzir sua própria cristalização (ZACHARIASSEN, 1932; GLASSER, 1989). A Figura 2.6 mostra uma representação esquemática, comparando uma escória com estrutura cristalina com uma escória com estrutura vítrea.

A escória de alto-forno tem hidraulicidade latente e sua energia interna será usada na formação de produtos hidratados, muito semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland, após a devida ativação (SMOLCZYK, 1980).

A reatividade da escória de alto-forno está relacionada com a sua solubilidade em meio alcalino e com a capacidade de precipitação de compostos hidratados insolúveis. Pode ser também uma medida potencial do seu desempenho como aglomerante, isto é, de sua atividade hidráulica.

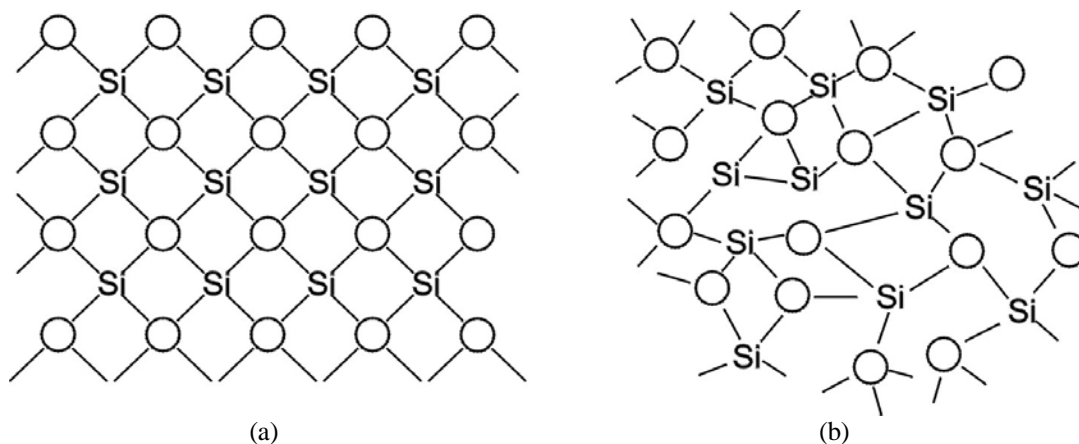


Figura 2.6- Representação esquemática: (a) escória com estrutura cristalina e (b) escória com estrutura vítrea

Como a solubilidade da fração cristalina da escória de alto-forno é baixa, o **teor de vidro** é uma característica que influencia fortemente a sua atividade hidráulica. Esta atividade depende da **composição química** da fase vítrea, que interfere na solubilidade da escória e, juntamente com os ativadores, influencia a composição química do produto hidratado (JOHN, 1995).

Alguns estudos demonstram que, mesmo sabendo-se que um teor de vidro elevado favorece a hidratação da escória de alto-forno, nos casos em que a cristalização se dá como

merwinita¹⁴, pode ocorrer aumento da reatividade da escória de alto-forno, pois a cristalização altera a **composição química** da fração vítrea. Este percentual cristalino pode ser de até 25% e parece também favorecer a moagem (JOHN, 1995).

MARQUES (1994) cita que a temperatura da escória líquida dentro do alto-forno e as condições de resfriamento são fatores que modificam as valências de coordenação e as energias de ligação das escórias e, conseqüentemente, sua reatividade.

HOOTON (1987) relata estudos sobre escórias granuladas de alto-forno de diferentes procedências, em que se constatou a influência da redução da temperatura do alto-forno que pode resultar em alguma cristalização, o que, por sua vez, poderia resultar em diminuição do teor total de vidro da escória.

Ainda segundo HOOTON (1987), a **composição mineralógica** pode ter uma influência mais significativa sobre as propriedades hidráulicas da escória de alto-forno do que a sua composição química. Regourd *apud* HOOTON (1987) chegou a concluir que a presença do composto melinita afeta a reatividade de escórias.

Cimentos de escória de alto-forno com **finuras** mais elevadas se hidratam mais rapidamente e suas estruturas são mais compactas. Resultados de resistências à compressão, de uma mesma escória de alto-forno ativada com soda, mas com finuras diferentes, mostraram-se superiores para escória com finura mais elevada (REGOURD, 1980).

Assim, a reatividade da escória de alto-forno depende, em primeiro lugar, da sua organização atômica pois, se cristalina, não possui propriedades aglomerantes. É importante, portanto, que a fração vítrea exista em grande quantidade, pois somente o vidro apresenta solubilidade suficiente para participar das reações de hidratação.

Por sua vez, a composição química desta fração vítrea é importante para a velocidade de dissolução do vidro e para a resistência mecânica do aglomerante. Por exemplo, um aumento no teor de Al_2O_3 na escória aumenta, de uma maneira geral, a sua solubilidade (JOHN, 1995).

¹⁴ uma das formas em que pode se dar a cristalização da escória de alto-forno, quando resfriada lentamente (C_3MS_2).

O comportamento mecânico, além de depender da composição química dos produtos hidratados, depende também da solubilidade dos produtos hidratados, resultado da interação ativador-escória.

Assim, considerando a grande variação de características que influenciam a reatividade, é sempre recomendável uma avaliação direta da contribuição da escória de alto-forno no desenvolvimento da resistência ou de outras propriedades, para cada aplicação específica (JOHN, 1995).

2.3.2.2 Métodos para avaliação da atividade hidráulica da escória de alto-forno

Alguns métodos foram estudados, para se poder avaliar, de forma mais ou menos rápida e precisa, a atividade hidráulica da escória de alto-forno, podendo ser com base na **composição química**, na **microestrutura** e na **própria hidratação** da escória por método acelerado com soda (MARQUES, 1994).

O método com base na **composição química** das escórias de alto-forno correlaciona, através de módulos químicos, a composição química das escórias com a resistência mecânica dos cimentos contendo teores variados de escória de alto-forno.

Algumas fórmulas foram desenvolvidas para índice de basicidade, como mostra o Quadro 2-2.

Quadro 2-2 – Algumas fórmulas para índice de basicidade

Índice de basicidade	Referências
CaO/SiO_2	SMOLCZYK, 1980; REGOURD, 1980; BIJEN, 1996
$(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	SMOLCZYK, 1980; BIJEN, 1996
$(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{AlO}_3)$	SMOLCZYK, 1980; BIJEN, 1996

Estas fórmulas foram pontos de partida para a maioria dos fatores ou módulos hidráulicos, mostrados no Quadro 2.3.

Porém, uma correlação entre hidraulicidade e composição química, com validade geral, não foi estabelecida. Mesmo assim, com base em várias experiências, algumas características relevantes na composição química das escórias de alto-forno foram observadas (BIJEN, 1996):

- um teor maior de SiO_2 parece ter um efeito negativo, enquanto que, com o aumento do CaO o efeito afeta positivamente a reatividade da escória;

- um aumento de MgO, limitado a 18%, parece ser favorável à reatividade, não havendo risco de expansão pela hidratação de MgO livre, como ocorre no caso do cimento Portland;
- uma alta porcentagem de Al₂O₃ parece estimular o desenvolvimento de resistências iniciais.

Há de se levar em conta que a hidratação do cimento de alto-forno, por envolver um sistema multi-material complexo, não permite a predeterminação dos resultados de resistências por simples módulos hidráulicos. Em vários países, estes módulos são simples referências para uma primeira classificação de escórias em diferentes grupos e não são aplicáveis a escórias de diferentes procedências (SMOLCZYK, 1980; BIJEN, 1996).

Quadro 2-3 – Algumas fórmulas para fatores hidráulicos

Fatores hidráulicos	Referências
$(CaO+MgO+AlO_3)/SiO_2$	SMOLCZYK, 1980; BIJEN, 1996; LEA,
100-SiO ₂	SMOLCZYK, 1980
$(100-SiO_2)/ SiO_2$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+MgO+AlO_3-10)/(SiO_2+10)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+1,4MgO+0,6AlO_3)/ SiO_2$	SMOLCZYK, 1980
$CaO+0,5MgO+AlO_3-2SiO_2$	SMOLCZYK, 1980; GLASSER, 1989
$(6CaO+3 AlO_3)/(7SiO_2+4MgO)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+0,5MgO+ AlO_3+CaSiO_2)/(SiO_2+MnO)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+0,5MgO+AlO_3)/(SiO_2+FeO+(MnO)^2)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+MgO+AlO_3+BaO)/(SiO_2+MnO)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+MgO+0,3AlO_3)/(SiO_2+0,7AlO_3)$	SMOLCZYK, 1980
$(CaO+MgO)/(SiO_2+0,5AlO_3)$	SMOLCZYK, 1980

A correlação mais simples entre a composição química da escória granulada de alto-forno com a sua reatividade é a relação entre os dois compostos mais importantes da escória: o CaO (C) e o SiO₂ (S). As escórias granuladas de alto-forno que apresentam relação C/S > 1 são chamadas de escórias básicas e são mais reativas e para relação C/S < 1 são chamadas de escórias ácidas. Alguns autores não consideram este critério suficiente para avaliar a hidraulicidade das escórias granuladas de alto-forno, pois mesmo escórias ácidas podem ser utilizadas como aglomerantes, embora sejam menos reativas (ALEXANDRE & SIBILEAU, 1988; JOHN, 1995).

O método de avaliação da hidraulicidade da escória, que se baseia na **microestrutura**, **considera** o grau de vitrificação por difração de raios-X ou microscopia ótica.

A difração de raio-X é um método utilizado na investigação da estrutura cristalina e na identificação dos **componentes mineralógicos** da escória granulada de alto-forno. Com esta técnica, os raios-X são difratados pelos cristais, quando estes apresentam as distâncias interplanares do retículo cristalino, com a mesma ordem de grandeza dos comprimentos de ondas de raios-X (Lei de Bragg). Pela caracterização das distâncias interplanares, o estado cristalino da amostra é também caracterizado, permitindo a identificação dos seus componentes mineralógicos.

Como as escórias de alto-forno possuem estrutura vítrea, no difratograma de Raios X são observadas bandas, que as caracterizam como amorfas. A presença de algumas raiais podem aparecer por falhas do processo de granulação, que resultam em algumas fases cristalinas. A Figura 2.7 (a) mostra uma escória totalmente vitrificada, enquanto que a Figura 2.7(b) mostra uma escória parcialmente cristalizada (ALEXANDRE & SIBILEAU,1988; MARQUES, 1994).

Pela microscopia ótica, pode-se observar o grau de vitrificação, o índice de refração, a morfologia, a coloração e a reatividade com o sulfato de alumínio. O grau de vitrificação da escória granulada de alto-forno é determinado através do microscópio ótico de luz polarizada, pela observação da fase vítrea, que corresponde a um estado amorfo, estruturalmente desordenado e termodinamicamente instável (MARQUES,1994).

A avaliação da reatividade da escória de alto-forno pode ser feita, também, pela solução aquosa diluída de sulfato de alumínio, resultando na formação de cristais de gipsita que, quanto mais rapidamente se cristalizam, sob microscópio, sugere que mais reativa será a escória granulada de alto-forno (MARQUES,1994).

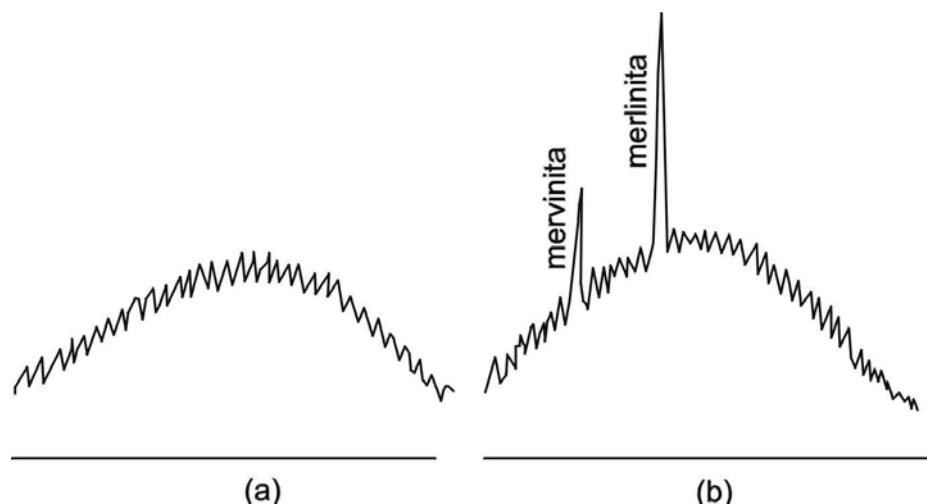


Figura 2.7 - (a) Difratograma de raios X de uma escória totalmente vitrificada; (b) Difratograma de raios X de uma escória com fases cristalinas (ALEXANDRE & SIBILEAU,1988).

O ensaio com soda, conhecido como método de Féret, é baseado no comportamento hidráulico das escórias de alto-forno. Este ensaio consiste na medida de resistências mecânicas de prismas de argamassa, com traço em massa de 1 : 3 (escória moída : areia) sendo que parte da água é substituída por uma solução aquosa de soda, na concentração de 200g/l. A desmoldagem ocorre após 6 horas de cura, sendo medida a resistência à compressão a 6, 24 e 48 horas. (ALEXANDRE & SIBILEAU,1988; MARQUES,1994).

2.3.3 Ativação da escória de alto-forno

A escória de alto-forno tem uma hidraulicidade latente, mas as suas reações de hidratação são muito lentas, levando até 57 horas para iniciar a pega, sem a presença de nenhum ativador (JOHN et al, 1994). Esta reação lenta se deve ao fato de que as escórias de alto-forno são muito mais ácidas do que o cimento Portland, isto é, a relação C/S das escórias de alto-forno é menor do que a do cimento, que fica em torno de 2 (JOHN et al, 1994; MARQUES, 1994).

Como a velocidade de dissolução de seus compostos anidros depende da basicidade do material, para acelerar esta reação, torna-se necessária a ativação, que pode se dar por processos físicos ou mecânicos, químicos e térmicos (JOHN, 1995; SILVA 1998).

A ativação física está relacionada com o aumento da finura. O aumento da finura resulta em aumento da superfície específica da escória de alto-forno e, assim, a dissolução se desenvolve mais rapidamente, devido à maior área de contato da escória com a solução.

A influência do aumento da temperatura na velocidade de hidratação das escórias granuladas de alto-forno foi comprovada por vários estudos experimentais, que comprovam o aumento da solubilidade dos vidros de sílica, com o aumento de temperatura (JOHN, 1995; CAMARINI, 1995; SILVA 1998). Sabe-se, também, que a temperatura tem grande influência na cinética de qualquer reação química.

Separadamente, a ativação relacionada ao aumento da finura ou da temperatura não apresenta resultados muito bons mas, quando usadas em combinação com a ativação química, o efeito é bem diferente.

Na prática, a ativação química é a que apresenta melhores resultados. A aceleração da hidratação da escória acontece pela combinação de dois fatores (JOHN, 1995; SILVA 1998).:

- elevação da velocidade de dissolução pela elevação do pH do meio aquoso;

- antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados, pelo aumento da concentração de íons na solução, já no início da dissolução, ou pela alteração da solubilidade da fase vítrea da escória .

Os ativadores reagem com os íons da escória de alto-forno em solução e modificam a composição química e mineralógica dos produtos hidratados. Assim, cada mistura escória-ativador produz um cimento com características diferentes (JOHN, 1995).

Entre os principais ativadores químicos estão o **hidróxido de cálcio** (Ca(OH)_2); os **hidróxidos de metais alcalinos, como o de sódio** (NaOH) e o de **potássio** (KOH); os **silicatos alcalinos de sódio ou potássio** ($\text{R}_2\text{O}_n\text{SiO}_2$); o **cimento Portland** ou uma mistura destes compostos. Os **sulfatos** (SO_4^{2-}) serão considerados em separado por não serem ativadores propriamente ditos (JOHN, 1995).

O **hidróxido de cálcio** [Ca(OH)_2] eleva o pH da solução a um valor máximo de 12,5, que permite a dissolução dos íons alumínio, silício e cálcio da escória e evita a formação do gel pouco permeável sobre as partículas anidras da escória granulada de alto-forno. O Ca(OH)_2 é consumido durante a reação, ficando presente no silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e no aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13}), contribuindo, assim, para o início da precipitação dos produtos hidratados (JOHN, 1995; CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

Os **hidróxidos de metais alcalinos, como o de sódio** (NaOH) e o de **potássio** (KOH) formam soluções de elevado pH, que aceleram a dissolução da escória de alto-forno e diminuem a solubilidade do CaO , facilitando a precipitação dos produtos de hidratação (JOHN, 1995).

No caso particular da ativação da escória com hidróxido de sódio ou soda, nota-se uma elevada concentração de íons OH^- , que pode promover a ruptura de ligações iônicas e covalentes existentes na estrutura vítrea da escória de alto-forno, ocorrendo, então, a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C_4AH_{13}) e gehlenita hidratada, (C_2ASH_8) (SHI & DAY, 1995). Observa-se, também, a formação de brucita¹⁵ (CAMARINI, 1995).

Os **silicatos alcalinos de sódio ou potássio** ($\text{K}_2\text{O.nSiO}_2$) produzem soluções de elevado pH e ricas em SiO_2 , que aceleram a precipitação dos produtos da hidratação (JOHN et al, 1994). O **silicato de sódio** ($\text{Na}_2\text{O.xSiO}_2$) apresenta elevada solubilidade em água, até uma

¹⁵ Brucita - Mg(OH)_2

razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (denominado módulo de sílica) de 3,75. Embora seja possível produzir silicatos com módulo de sílica superior a 4, eles, na prática, apresentam solubilidade muito baixa (JOHN, 1995).

Com silicatos alcalinos, é possível ativar uma grande variedade de escórias. Além das escórias de alto-forno básicas ou ácidas é, também, possível utilizar outras escórias, como as que se originam da produção eletrotérmica do fósforo. A capacidade dos silicatos ativarem escórias, que não são ativadas por outros compostos, parece estar relacionada a fatores como: (a) pH mais elevado da solução, que garante a dissolução da fase vítrea, (b) presença de Na_2O na solução, que afeta a solubilidade do CaO e (c) presença de SiO_2 na água, sendo que, estes dois últimos fatores aceleram a precipitação dos hidratados (JOHN, 1995).

A adição de **sulfato de cálcio**, como a gipsita ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e o fosfogesso, não altera significativamente o pH da solução e, por isso, não são considerados ativadores (CAMARINI, 1995; JOHN, 1995). Propiciam, isso sim, a formação da etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), pois o alumínio dissolvido é retirado da solução por combinação com o íon SO_4^{2-} , tendo um efeito lento sobre a pega. A diminuição do Al_2O_3 , no gel que cobre os grãos anidros, pode aumentar a sua permeabilidade, aumentando também a velocidade de hidratação da escória de alto-forno (JOHN et al, 1994; JOHN, 1995; CAMARINI, 1995).

A ativação pelo **cimento Portland** é a mais utilizada. O clínquer Portland, presente no cimento de alto-forno, é o primeiro a se hidratar com a formação de C-S-H, que cobre os grãos de clínquer e de escória de alto-forno, e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O hidróxido de cálcio atua como ativador e os sulfatos presentes no cimento Portland agem, auxiliando nas reações para a hidratação da escória, como no caso de adição de sulfato de cálcio descrita anteriormente (REGOURD, 1980).

Ocorre, como nos outros sistemas escória-ativador, a formação do C-S-H, sendo este de grande importância, pois modifica a microestrutura, preenchendo os espaços, aglutinando outras fases cristalinas hidratadas e aderindo bem à escoria de alto-forno e ao agregado (REGOURD, 1980; CAMARINI, 1995).

Com base em bons resultados com a ativação química da escória de alto-forno, foram realizadas pesquisas, com misturas de clínquer e escória de alto-forno, utilizando estes

ativadores químicos para melhorar as resistências mecânicas destas misturas, principalmente nas primeiras idades.

Porém, resultados de estudos de alguns autores como COLLINS & SANJAYAN (1998), que realizaram pesquisa em pastas e argamassas com 50% de escória de alto-forno e clínquer, relação água/materiais cimentícios igual a 0,5, utilizando como ativadores NaOH e Na₂CO₃¹⁶, mostraram um pequeno aumento de resistência à compressão na idade de 24 horas e resistências similares ou mais baixas à 7 e 28 dias, quando comparadas às de pastas de cimento comum.

Outros estudos, com 70% de escória de alto-forno e 30% clínquer, utilizando como ativador silicato de sódio com módulo de sílica variando de 0,75 a 1,5%, com diferentes teores de Na₂O (4%, 6% e 8%), realizados por BAKHAREV *et. al.*, (1999) em pastas e argamassas, apresentaram baixas resistências à compressão, que desencorajaram a continuação dos estudos.

HWANG & LIN (1986), utilizando NaOH como ativador, quando buscavam incremento de resistências nas primeiras idades, encontraram resistências menores do que as encontradas sem a utilização de qualquer ativador e, na tentativa de melhorar o desempenho do ativador, ao aumentarem o teor de ativador obtiveram pega muito rápida.

2.3.4 Hidratação da escória de alto-forno

A hidratação da escória se dá pelo mecanismo de dissolução-precipitação. O grão de escória, ao entrar em contato com a água, começa a se dissolver, liberando íons Ca²⁺ e formando uma membrana de hidróxido de alumínio, na superfície do grão de escória com baixa permeabilidade. Com a concentração de íons Ca²⁺ atingindo um valor elevado, o pH da solução sobe, a membrana se dissolve e a reação prossegue, com a precipitação dos compostos hidratados. A ação dos ativadores é que permite manter o pH da solução elevado, dando condições para que as reações de hidratação continuem (CAMARINI, 1995; JOHN, 1995; LEA, 1998; SILVA, 1998).

Os compostos, formados por precipitação no meio aquoso, ao redor do grão, são denominados produtos hidratados externos (*outer shell products*). Enquanto houver suficiente solução na região intersticial, o processo dissolução-precipitação continua, e a

¹⁶ NaOH e Na₂CO₃ – hidróxido de sódio e carbonato de sódio, respectivamente.

reação prossegue, através da camada que cobre os grãos anidros, sendo formados os produtos hidratados internos (*inner shell products*). A dissolução da escória tende a um equilíbrio, dependente da solubilidade da escória e função da concentração de íons dissolvidos no equilíbrio (JOHN, 1995).

Como o perfil das curvas calorimétricas da hidratação da escória é muito parecido com o das curvas calorimétricas da hidratação do cimento Portland. A mesma divisão dos vários estágios de hidratação do cimento Portland, também, é aceita e aplicada nos estudos de hidratação do cimento de escória: *período inicial (estágio I da Figura 2.8)*, *indução (estágio II da Figura 2.8)*, *aceleração (estágio III da Figura 2.8)*, *desaceleração (estágio IV da Figura 2.8)* e *difusão (estágio VI da Figura 2.8)* e está mostrada, esquematicamente, na Figura 2.8 (SILVA, 1998).

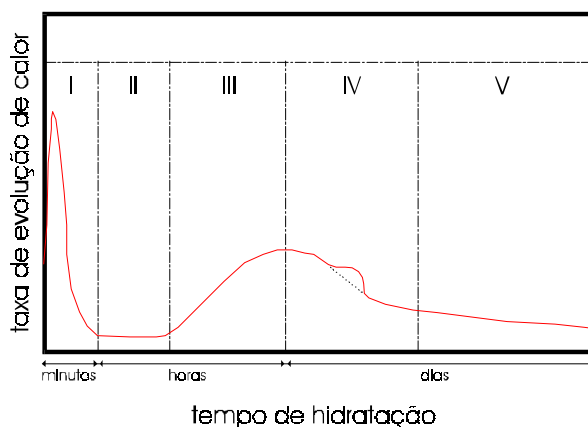


Figura 2.8 – Representação esquemática dos vários estágios de hidratação do cimento Portland.

Uma visualização da hidratação da escória pode ser feita através de curvas de evolução de calor, para diferentes tipos de ativadores, adotando a mesma classificação dos vários estágios da hidratação do cimento Portland. Três modelos genéricos são mostrados na Figura 2.9, para diferentes tipos de ativadores (SILVA, 1998).

A Figura 2.9a mostra o primeiro modelo de hidratação com a curva de evolução de calor, apresentando um único pico pouco expressivo nos primeiros minutos de hidratação, que exemplifica a hidratação da escória em presença da água. Este pico aparece com a umidificação dos grãos de escória e com a adsorção de alguns íons em sua superfície. A velocidade de dissolução da escória de alto-forno em presença de água é baixa devido à sua baixa solubilidade neste meio, influenciando, assim, negativamente a velocidade de seu endurecimento (JOHN, 1995; SHI & DAY, 1995; SILVA, 1998).

A Figura 2.9b mostra o segundo modelo de hidratação da escória ativada com NaOH. Ocorre um único pico antes e um pico depois do período de indução. A tendência da evolução de calor de hidratação da escória ativada com NaOH é similar à do cimento Portland. No entanto, o pico inicial é menor do que o pico de aceleração e o período de indução pouco significativo, especialmente quando se compara as curvas à temperatura de 50° C e 25° C (SHI & DAY, 1995; SILVA, 1998).

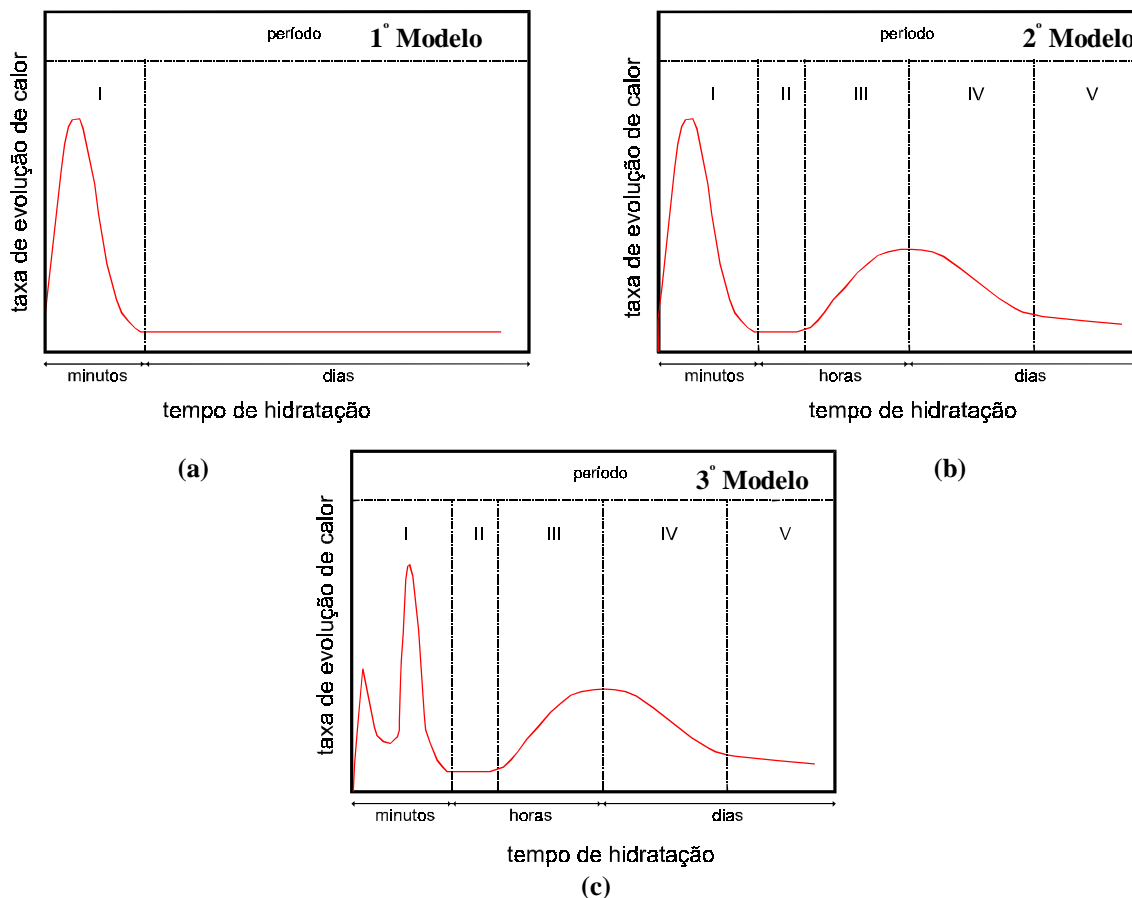


Figura 2.9 – Modelos de hidratação da escória: (a) taxa de evolução de calor da hidratação da escória em presença da água; (b) taxa de evolução de calor da hidratação da escória ativada com NaOH e (c) taxa de evolução de calor da hidratação da escória ativada com silicato de sódio (SHI & DAY, 1995).

O terceiro modelo, Figura 2.9c, que representa a ativação com silicato de sódio, aparecem dois picos antes do período de indução a 25° C. O primeiro pico é pequeno e aparece logo após a adição do ativador, seguido, imediatamente, por um pico maior no início do período de indução. O primeiro pico é chamado de pico inicial, como nos modelos anteriores, e o segundo pico é chamado de pico inicial adicional. Para temperatura de 50° C estes dois picos se fundem em um único pico e o período de indução fica mais curto (SHI & DAY, 1995; SILVA, 1998).

A hidratação da escória de alto-forno é bem diferente da do cimento Portland comum. Já a hidratação do cimento de alto-forno, tratada a seguir, é semelhante à do cimento Portland comum, embora um pouco mais complexa.

2.3.5 Hidratação do cimento de alto-forno

O cimento de alto-forno é resultado da mistura de clínquer, gipsita e escória, moídos conjuntamente ou não. A quantidade de escória de alto-forno a ser misturada depende do tipo de cimento a ser produzido.

Quando a escória de alto-forno é hidratada, forma-se, ao redor do grão de escória, uma camada envoltória muito pouco permeável, que impede o prosseguimento das reações. A dissolução de tal camada e a alteração da estrutura da cadeia de SiO_4^{4-} e AlO_4^{5-} é feita pelo ataque de íons OH^- , que perturbam o equilíbrio eletrostático do sistema e, então, provocam a dissolução da escória (DRON, 1982). Para que não se interrompa a hidratação da escória de alto-forno é necessário que haja mais íons OH^- , pois a quantidade liberada pela escória não é suficiente (MARQUES, 1994).

Como a escória se hidrata muito lentamente, torna-se necessário o uso de um ativador, sendo o mais comum o cimento Portland. A hidratação do cimento de alto-forno é mais complexa do que a do cimento Portland, pois os dois constituintes reagem com a água e os ativadores da escória estão presentes no clínquer Portland (CAMARINI, 1995; LEA, 1998).

O clínquer é o primeiro a se hidratar, em cimentos com escória de alto-forno. É necessário, portanto, considerar a hidratação da escória influenciada pelo hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento Portland. O silicato hidratado de cálcio, devido à dissolução do silicato tricálcico, cobre tanto os grãos de clínquer como os de escória. A portlandita¹⁷ está presente em placas hexagonais e a etringita está espalhada no C-S-H em agulhas pouco densas, mas localizadas, principalmente, em volta dos grãos de clínquer.

Estudos com base em difração de raios X mostram que, em pastas de cimento contendo de 20 a 50% de escória, houve diminuição de Ca(OH)_2 , e até mesmo ausência, em cimentos com 80% de escória. Análises por espectrometria a energia dispersiva mostram diferenças

¹⁷ portlandita: Ca(OH)_2

entre os grãos de clínquer e os de escória, sendo os produtos hidratados da escória mais ricos em MgO e Al_2O_3 do que os produtos hidratados do clínquer (REGOURD, 1980).

Ao mesmo tempo que ocorre a hidratação com $Ca(OH)_2$, ocorrem, também, reações com sulfatos e formação de etringita. A morfologia das agulhas de etringita depende do teor de escória, sendo mais curtas em cimentos ricos em escória de alto-forno. Em idades mais avançadas, quando o sulfato está completamente combinado, a etringita se transforma em aluminato tricálcico C_4AH_{13} e, também, em monosulfoaluminato de cálcio (REGOURD, 1980).

No cimento de alto-forno o desenvolvimento de resistência mecânica inicial é fortemente influenciado pela hidratação do clínquer Portland, ficando a contribuição da escória de alto-forno para idades mais avançadas (GLASSER, 1989).

A cinética da hidratação do cimento de alto-forno pode ser representada pelas curvas calorimétricas, que permitem acompanhar a influência da escória na hidratação, como apresentado na Figura 2.10.

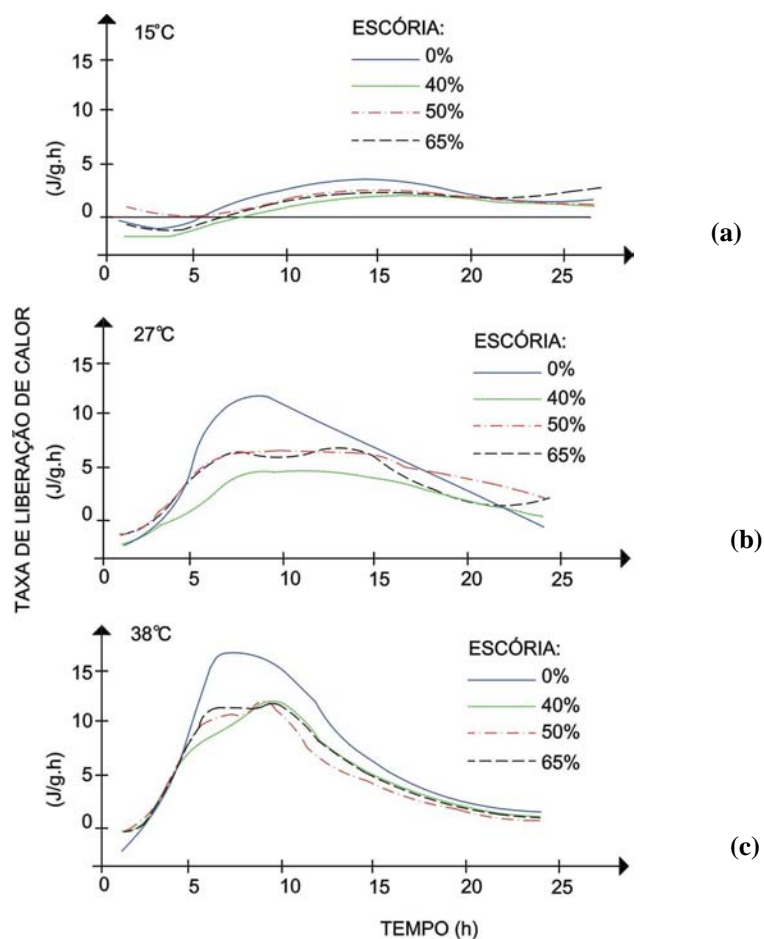


Figura 2.10 – Curvas calorimétricas de cimento de alto forno hidratado a várias temperaturas (a) 15° C, (b) 27° C e (c) 38° C (CAMARINI, 1995).

Nessas curvas, nota-se um único pico para o cimento Portland puro, sendo que para o cimento de alto-forno há dois picos pouco acentuados, particularmente quando hidratados a 27 e 38° C. O primeiro pico se deve à hidratação dos compostos do cimento e corresponde ao período de aceleração. O segundo pico corresponde, principalmente, à hidratação dos compostos da escória de alto-forno (CAMARINI, 1995).

Observa-se que, para uma mesma temperatura, quando o teor de escória aumenta, a taxa de liberação de calor diminui. Com o aumento de temperatura, porém, a taxa de liberação de calor da escória também é aumentada.

2.4 A ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO COMO AGREGADO MIÚDO

2.4.1 Características

A característica granular da escória granulada de alto-forno é obtida através da fragmentação da escória quando esta é resfriada bruscamente por jatos de água assim que sai do alto-forno em estado fundido. Sua composição granulométrica se apresenta dentro da faixa das areias naturais de rio, com massa unitária em torno de 1000 kg/m³. Apresenta estrutura porosa e textura áspera, podendo ser encontrada nas cores esbranquiçadas, amarelas, cinzentas e acastanhadas. Estas características são consideradas importantes na avaliação da possibilidade do seu aproveitamento como agregado miúdo para argamassas e concretos (SILVA & ALMEIDA, 1986; RIBEIRO *et al.*, 1990).

Uma das vantagens da utilização de escória granulada de alto-forno como agregado miúdo está no fato de que existem estoques desta escória acumulados em usinas e fábricas de cimento. Porém, sua reutilização poderá exigir novo processamento para melhor adequá-la a esta aplicação. O Quadro 2.4 mostra os estoques de escória de alto-forno em algumas usinas nacionais.

Outras vantagens estão relacionadas com a qualidade ambiental. A utilização de escória de alto-forno, como agregado miúdo, poderá reduzir a exploração de jazidas de areia e a retirada de areia de leitos de rios e, conseqüentemente, favorecer a diminuição da degradação da camada vegetal. Há de se considerar, também, que, em grandes centros, já há falta de disponibilidade de agregados, aumentando, assim, o seu custo, graças ao transporte por longas distâncias.

Quadro 2-4 – Estoques estimados de escória de alto-forno para 1998 (em 1000t) (LITTLE & SETEPLA, 1999).

Empresas	Usina	Cimenteiras
CST	0	2000
USIMINAS	1500 ⁽²⁾	2000
AÇOMINAS	0	2000
CSN	0	4700
COSIPA	0	1000
MANNESMANN	450	-
BARRA MANSA ⁽¹⁾	150	-
TOTAL	2100	11700

(1) estoque de escória dos altos-fornos que não operam mais

(2) lançado em área de descarte

A escória granulada de alto-forno apresenta algumas características técnicas que colocam o seu uso em desvantagem, com relação à areia natural, podendo-se citar o teor insuficiente de finos, as formas angulosas dos grãos, a friabilidade e a densidade e granulometria variáveis, sendo estes fatores desfavoráveis à trabalhabilidade e à homogeneidade do concreto. É recomendado, para melhorar a qualidade da escória granulada utilizada como agregado, que ela seja moída a uma granulometria de até 2 mm, contendo cerca de 10% de finos ($< 80 \mu$) (HOFFMANN, 1978).

Para corrigir o teor insuficiente de finos SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990), de acordo com estudos realizados na Austrália e no Japão, recomendam alterações na dosagem, na correção da curva granulométrica com mistura de areia fina ou, de acordo com HOFFMANN (1978), pela própria escória de alto-forno moída.

2.5 INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO NAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DE PASTAS, ARGAMASSAS E CONCRETOS

2.5.1 Considerações iniciais

O rápido crescimento da produção de cimentos compostos em vários países veio como resultado da economia potencial de energia, mas, também, pelo fato de algumas propriedades dos concretos serem melhoradas pelo emprego desses cimentos.

Os benefícios incluem aumento da resistência à fissuração térmica, pela liberação mais lenta de calor de hidratação, aumento das resistências finais e redução da permeabilidade, por refinamento dos poros e, como resultado da redução da alcalinidade, uma maior

durabilidade a ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e reação álcali-sílica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Dentre os materiais que são usados como substitutos do clínquer do cimento Portland, a escória de alto-forno moída se encontra entre os que mais trazem economia de energia. No entanto, cada escória tem suas características próprias, quanto à composição química, à fração vítrea e à finura, sendo, então, necessário realizar ensaios de laboratório com cimento, agregados e aditivos usados para se poder determinar as porcentagens corretas de escória moída adicionadas ao concreto (MALHOTRA, 1987).

No caso da utilização de escória de alto-forno granulada como agregado miúdo, as propriedades de argamassas e concretos são influenciadas pela sua granulometria, sua aspereza e a absorção dos grãos interferindo e modificando, principalmente, as propriedades de argamassas e concretos no estado fresco.

Algumas das propriedades de pastas, argamassas e concretos são discutidas a seguir, sendo também discutidas no Capítulo 3, quando será abordado o tema do alto desempenho.

2.5.2 Consistência e pega

A escória granulada, usada como agregado miúdo influencia as propriedades do concreto fresco, devido à sua granulometria aberta (teor insuficiente de finos), às formas angulosas dos grãos, à friabilidade e à densidade variável, sendo estes fatores desfavoráveis à consistência e à homogeneidade do concreto (HOFFMANN, 1978).

A inclusão de escória de alto-forno moída no concreto, para um mesmo teor total de material cimentício, geralmente reduz a demanda de água e melhora a trabalhabilidade. A melhoria pode não ser mensurável pelo abatimento, mas, depois de iniciada a vibração, o concreto pode ser facilmente adensável (MEUSEL & ROSE, 1983; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Outra justificativa para a diminuição da quantidade de água, neste caso, é o fato da água de amassamento não ser facilmente adsorvida pelas partículas da escória, em decorrência de reações mais lentas do que as do cimento (NAGATAKI, 1994).

A escória de alto-forno reduz a exsudação do concreto para finuras maiores do que 4000 cm^2/g , considerando que a exsudação do concreto é governada pela relação entre a superfície específica dos sólidos e o volume de água, (MALHOTRA, 1987; NAGATAKI, 1994).

Outra influência da escória de alto-forno moída é o retardamento de início de pega a temperaturas normais, de 30 minutos a uma hora, e de fim de pega, de até várias horas, dependendo da temperatura ambiente, da temperatura do concreto e da proporção da mistura. Em temperaturas abaixo de 23°C há um considerável retardo de tempo de pega, comparado com concretos normais; para temperaturas maiores que 30°C, há pouca ou nenhuma mudança no tempo de pega (MALHOTRA, 1987).

2.5.3 Calor de hidratação

O uso de escória de alto-forno no concreto provoca uma diminuição na velocidade de liberação de calor de hidratação, com picos de temperatura mais baixo, pois as reações de hidratação da escória são mais lentas.

Observa-se, na Figura 2.11, que, além do teor de escória, a temperatura influencia a hidratação dos cimentos com escória. Os dois picos que aparecem a 38° C correspondem à hidratação dos compostos do cimento Portland e à hidratação da escória, respectivamente. A 60° C, o único pico que aparece mostra como a hidratação da escória foi acelerada pelo aumento de temperatura (CAMARINI, 1995).

A quantidade de calor total liberado pelos cimentos Portland comum e de alto-forno varia de acordo com a temperatura, sendo maior para o cimento Portland comum a 27° C. Para 60° C, porém, o calor total liberado é maior para o cimento com 50% de escória de alto-forno, como mostrado na Figura 2.12. Se a quantidade de calor desenvolvido é indicativo das reações de hidratação, este fato ilustra os benefícios da cura térmica para cimentos de alto-forno.

A uma mesma temperatura, no entanto, a quantidade de calor total liberado diminui com a diminuição do teor de escória de alto-forno. Este fato se deve à hidratação mais lenta da escória de alto-forno, quando comparada à hidratação do cimento Portland.

O calor de hidratação também é influenciado pela finura da escória de alto-forno (SAKAI *et al.*, 1992; NAGATAKI, 1994), pelo teor de gipsita, pela relação C/S e pela fração vítrea da escória de alto-forno. Geralmente, quando estes valores são baixos, o calor de hidratação diminui (NAGATAKI, 1994).

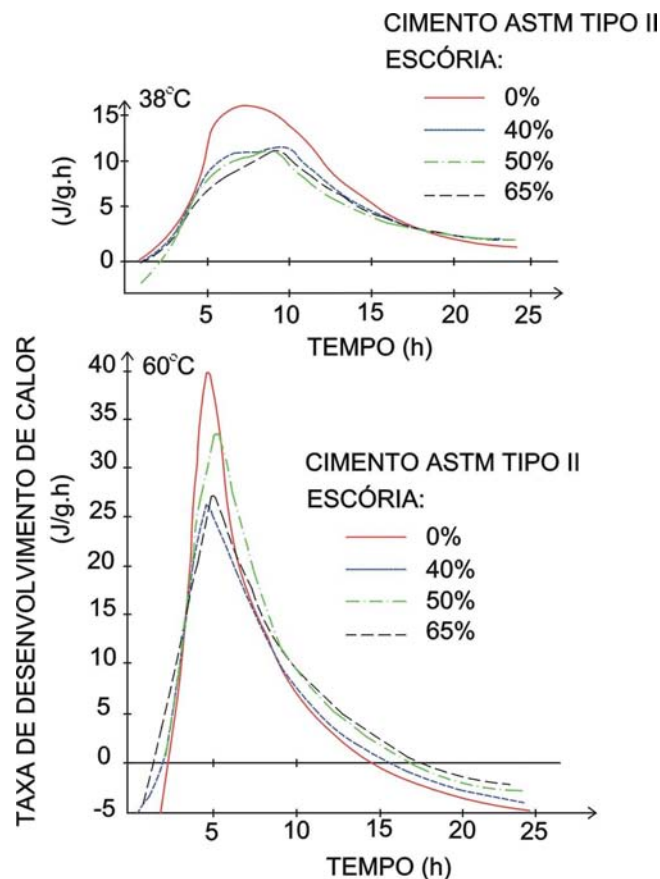


Figura 2.11 - Os gráficos ilustram picos de temperatura para cimentos hidratados com diferentes teores de escória moída a temperaturas de 38 °C e 60 °C (CAMARINI, 1995).

DIAS *et al.* (1990) comprovaram a redução de tensões térmicas, devido à menor velocidade de liberação de calor de hidratação, quando utilizado cimento de alto-forno com 80% de escória.

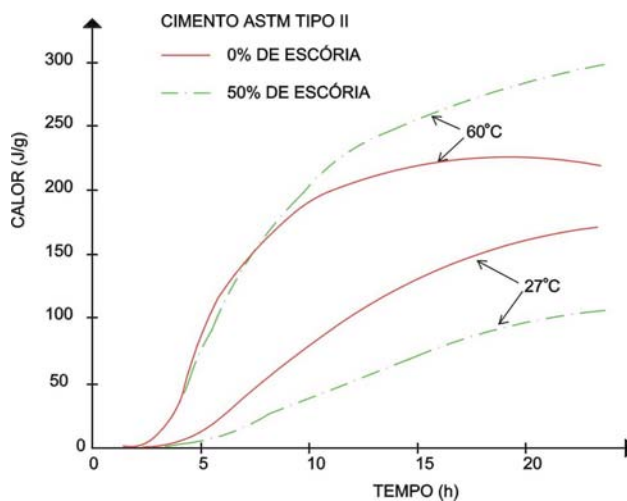


Figura 2.12 – Calor liberado acumulado para o cimento Portland comum e o cimento com 50% de escória, a 27 °C e 60 °C, respectivamente (CAMARINI, 1995).

2.5.4 Resistências mecânicas

2.5.4.1 Resistência à compressão

O desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com escória de alto-forno depende, primeiramente, **da finura, da reatividade** e da **proporção de escória usada**. Outros fatores e características que afetam as propriedades mecânicas do concreto com escória são a **relação água/materiais cimentícios**, o **tipo de cimento** usado e a **temperatura de cura**, entre outros (MALHOTRA, 1987).

Em geral, a evolução da resistência à compressão de concretos com escória de alto-forno, em comparação a um concreto de referência, é mais lenta entre um e cinco dias de idade. Entre 7 e 28 dias, a resistência se aproxima à do concreto de referência e, após esta idade, a resistência do concreto com escória de alto-forno, geralmente, é superior à do concreto de referência, como mostra a Figura 2.13 (SMOLCZYK, 1980; MALHOTRA, 1987).

A evolução mais lenta da resistência à compressão de concretos com escória é devido ao fato das suas reações de hidratação se desenvolverem mais lentamente, pois dependem da decomposição da fase vítrea, pelos íons de hidroxila liberados durante a hidratação do clínquer do cimento (BROOKS, WAINWRIGHT & BOUKENDAKJI, 1992).

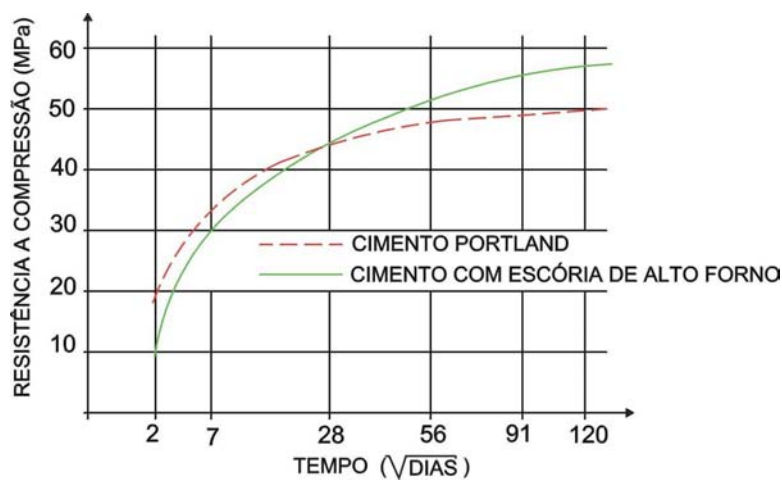


Figura 2.13 – Desenvolvimento médio de resistência à compressão do cimento Portland e do cimento de alto-forno (SMOLCZYK, 1980)

Em geral, a resistência a longo prazo é melhorada com escória de alto-forno, em consequência da obtenção de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento, resultado da maior formação de C-S-H, na hidratação do cimento com adição de escória de alto-forno (REGOURD, 1980).

A **finura** da escória de alto-forno influencia a resistência mecânica, sendo que, quanto mais fina, mais rápida é a hidratação e os ganhos de resistência nas primeiras idades. A estrutura das pastas, também, é mais densa e uniforme (REGOURD, 1980; NUMATA *et al.*, 1986; SAKAI & WATANABE, 1994).

Para avaliar a influência do grau de vitrificação e, conseqüentemente, da **reatividade** da escória de alto-forno na resistência à compressão de cimentos com escória de alto-forno, foi realizado um estudo com variação do teor de vidro, através da re-calcinação da escória para produzir uma escória cristalina. Seis misturas foram preparadas com diferentes teores de vidro ficando demonstrado que, com a utilização de maiores teores de escória calcinada, isto é, escórias com estrutura cristalina, as resistências à compressão, a várias idades, foram significativamente reduzidas (ERNSTROY, 1992).

Quanto à influência do **teor de escória** na resistência à compressão, ESPER (1993), em ensaios em argamassas com teores de 0 a 75% de escória de alto-forno, observou uma diminuição na resistência, com o aumento do teor de escória aos 3 dias de idade. Já aos 7 dias, houve um ligeiro aumento de resistência com 55% de escória em relação ao cimento sem escória. Esta tendência ficou mais pronunciada, a partir de 14 dias, quando o cimento com 55% de escória apresentou ápice de resistências. Nesse estudo, teores acima de 55% de escória de alto-forno resultaram em diminuição de resistência à compressão, apesar de, em muitos casos, a resistência ter se mostrado superior à da argamassa de referência.

A resistência à compressão depende, em grande parte, da compatibilidade clínquer-escória e, para esse caso, o teor ótimo de adição de escória, com relação ao desenvolvimento das resistências mecânicas à compressão a idades superiores a 7 dias, foi de 55% (ESPER, 1993).

SWAMY *et al.* (1994) encontraram, em concretos com 70% de escória de alto-forno, a mesma resistência à compressão encontrada em concretos com cimento Portland comum, para a idade de 91 dias, e LIM & WEE (2000) encontraram, em concretos com 30%, 50%, 65% e 80% de escória de alto-forno ($a/mc=0,30$, $mc\cong 500\text{kg/m}^3$), resistências à compressão maiores do que para concretos com cimento Portland comum, para a mesma idade.

MEUSEL & ROSE (1983); OLORUNSOGO & WAINWRIGHT (1998) reportam que, como em concretos com cimento Portland sem adições, a resistência à compressão de concretos com escória de alto-forno é função da **relação água/materiais cimentícios**.

Quanto à influência da **temperatura** na resistência à compressão de cimentos com escória de alto-forno, sabe-se que o aumento da temperatura influencia a velocidade de hidratação das escórias granuladas de alto-forno, pois a solubilidade dos vidros de sílica cresce com o aumento de temperatura. Para elevados teores de escória (entre 40% e 80%) a cura térmica acelera, consideravelmente, a hidratação e o endurecimento desses cimentos, assegurando boas características mecânicas (CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

2.5.4.2 Resistência à flexão

Em geral, a resistência à flexão de concretos com escória moída é comparável ou maior do que a do concreto de referência. Segundo MALHOTRA, (1987), este incremento se deve à maior aderência entre a pasta de cimento, a escória de alto-forno e os agregados, por causa da forma e da textura da superfície das partículas da escória. Este fato também pode ser atribuído à melhora da microestrutura na interface pasta-agregado (BIJEN, 1996).

Foi observada, ao microscópio eletrônico de varredura, a formação de uma camada de C-S-H na interface pasta-escória granulada semi-moída, utilizada como agregado miúdo, sugerindo ser esta uma das causas para o aumento da resistência à flexão com o emprego de escória como agregado (NUMATA *et al.*, 1986). Estudos realizados por SCANDIUZI & BATTAGIN (1990), também, confirmam este fato.

2.5.5 Porosidade e permeabilidade

Na hidratação das pastas de escória de alto-forno como adição ao cimento Portland, ocorre uma deposição dos produtos hidratados nos poros e canais existentes na pasta, contribuindo para a densificação da matriz. Acontece, então, a formação de uma estrutura de poros, fina e descontínua, resultante deste refinamento e com uma média de tamanho de poros menor do que para pastas com cimento Portland (raio 300 Å). A porosidade total é pouco modificada e a baixa permeabilidade é consequência da redistribuição dos poros. Este refinamento de poros torna o concreto menos permeável, aumentando sua durabilidade e melhorando seu desempenho com relação ao ingresso de agentes agressivos (SMOLCZYK, 1980; GLASSER, 1989; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Com substituição de cimento Portland por 76% de escória de alto-forno, SMOLCZYK (1980) observou uma diminuição na porosidade de 30,5% para 22,5%, para cura em água, e de 37% para 25%, para cura seca, com uma redução de poros capilares de 25 a 30%, em

comparação a pastas de cimento sem escória. Com o aumento do teor de escória de alto-forno os poros maiores que 300 Å diminuíram continuamente.

Estudos sobre efeitos da adição de escórias de alto-forno no comportamento das pastas e argamassas de cimento Portland, mostram que a porosidade total, a área total de poros e o diâmetro médio dos poros das misturas de cimento Portland comum e escória granulada de alto-forno variam de acordo com a porcentagem de escória adicionada e com a superfície específica Blaine: quanto maior a finura e a porcentagem de adição de escória, maior a área total dos poros e menor o diâmetro médio dos poros (GASTALDINI & TEZUKA, 1991).

ALDEA *et al.* (2000) estudaram concretos com teores de escória de alto-forno iguais a 0%, 25%, 50% e 75% sob diferentes condições de cura. Os resultados obtidos indicaram que o uso de teores maiores de escória proporciona um maior refinamento dos poros.

2.5.6 Retração

A retração do concreto é o fenômeno da diminuição do seu volume aparente, ao longo do tempo, sem a ação de nenhuma carga externa. Pode ocorrer por perda de água ou devido a reações químicas no sistema cimento-água, podendo levar à fissuração e à redução da aderência entre a pasta e o agregado, com a conseqüente redução da resistência mecânica e da durabilidade do concreto. As principais formas de manifestação da retração são a retração plástica, a retração hidráulica (ou por secagem), a retração autógena (ou retração química), a retração térmica e a retração por carbonatação (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000).

A **retração plástica** ocorre, por evaporação, na superfície de um concreto fresco sujeito à secagem, ainda no estado plástico. A intensidade da retração plástica é influenciada pela temperatura, pela umidade relativa do ambiente e pela velocidade do vento. Outras causas para a retração plástica podem ser a absorção de água pelas formas, por alguma superfície em contato com a peça concretada ou pela absorção de água pelos agregados. Pode haver fissuração, se a quantidade de água perdida, por unidade de área, for maior do que a água que sobe à superfície por efeito de exsudação. Se, depois do lançamento do concreto, a evaporação for impedida, pode-se evitar a fissuração (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000).

ALMUSSALAM *et al.* (1999) encontraram resultados que indicam que a umidade relativa influencia, significativamente, a retração plástica, dependendo do tipo de cimento. A taxa de evaporação e a área de fissuras foi maior, para cimento com escória de alto-forno a altas

temperaturas (45° C) e baixa umidade (25%), em comparação com concretos de cimento com alta resistência a sulfatos, sem de escória de alto-forno. Este fato pode ser atribuído à baixa resistência à tração, nas primeiras idades, de cimentos com escória de alto-forno, comparada a outros cimentos. Assim, a cura deve ser cuidadosa, para evitar o aparecimento dessas fissuras.

A **retração hidráulica (ou por secagem)** ocorre pela perda de água em um concreto endurecido, devido à evaporação de parte da água contida na rede de capilares do concreto, seguida por um desequilíbrio entre a umidade relativa do ar ambiente e dos capilares.

A água que em primeiro lugar deixa o concreto está em poros muito abertos e nos capilares próximos à sua superfície, mas, à medida em que a água deixa o concreto, meniscos se desenvolvem, em capilares cada vez mais finos, e, conseqüentemente, as forças capilares desenvolvidas dentro do concreto ficam cada vez mais fortes. Quanto mais fortes se tornam estas forças capilares, mais fortemente a água é retida dentro do concreto, sendo mais difícil sua evaporação (AITCIN, 2000).

MALHOTRA (1987) considera que a retração por secagem pode ser maior em concretos com escória, devido ao aumento do volume de pasta em concretos com substituição da mesma massa de cimento por escória e à menor massa específica da escória.

A **retração autógena (ou retração química)** se desenvolve como resultado do consumo de água durante a hidratação do cimento, a temperatura constante, e sem que haja troca de umidade entre o concreto e o meio ambiente.

Na retração autógena, aparecem forças de tensão superficial dentro dos capilares do poro, que são semelhantes às que acontecem na retração hidráulica, com a diferença que, no caso de retração hidráulica, a perda de umidade, que resulta em forças de tensão superficial dentro dos capilares, é devido à evaporação, enquanto na retração autógena é resultado da reação de hidratação dos materiais cimentícios.

HIROSHI *et al.* (1997) realizaram estudos com pastas de cimento Portland e de cimento de alto-forno e seus resultados relativos à retração autógena foram que, para relação água/materiais cimentícios de 0,25, a retração autógena foi claramente identificada no período de 8 horas a 4 dias, com um acréscimo muito pequeno, depois desta idade, sendo duas vezes maior para pastas com cimento de alto forno.

A baixa relação água/materiais cimentícios e o refinamento dos poros em um concreto com cimento com escória de alto-forno podem aumentar a retração autógena, pois esta se dá

pela saída da água de poros com diâmetro inferior a 20nm (MEHTA & MONTEIRO, 1994; TAZAWA & MIYAZAWA, 1997; LIM & WEE, 2000).

A **retração térmica** resulta da diminuição da temperatura do concreto. Quando o concreto está ganhando resistência, a sua temperatura sobe. Depois que a temperatura máxima é atingida, as perdas térmicas são maiores do que a quantidade de calor liberado pela hidratação e, assim, o concreto começa a resfriar (AITCIN, 2000).

A **retração por carbonatação** é explicada por diferentes teorias. A primeira teoria baseia-se no fato da água não evaporável ser liberada durante a reação de carbonatação. Outra teoria considera que essa retração pode ser causada pela decomposição do hidróxido de cálcio, que se encontra sob tensão, seguida da deposição do carbonato de cálcio em espaços não sujeitos a tensão. A compressibilidade da pasta de cimento hidratada é, temporariamente, aumentada (RICHARDSON, 1988; NEVILLE, 1997).

Os principais mecanismos que causam a retração do concreto ocorrem logo após sua concretagem. Para minimizar estes problemas, a cura do concreto deve começar tão logo se iniciem as reações de hidratação do cimento e pelo maior tempo possível.

Para se determinar quando parar a cura, curvas que mostram o aumento de temperatura do concreto, sob condições adiabáticas, podem ser usadas de forma que a retração autógena permaneça dentro de limites aceitáveis, pois, quando a cura do concreto é suspensa a retração autógena continua a se desenvolver. Após a suspensão da cura é recomendável cobrir o concreto com uma película impermeável, de forma a impedir a perda de água (AITCIN, 2000).

Quanto à utilização de cimento com substituição parcial de escória de alto-forno, em geral, a retração aumenta, porém, quando o concreto com escória de alto-forno tem uma relação água/aglomerante baixa, a retração é similar ou pode ser até menor, comparado à concreto de referência (BROOKS, WAINWRIGHT & BOUKENDAKJI, 1992).

2.5.7 Durabilidade

2.5.7.1 Carbonatação

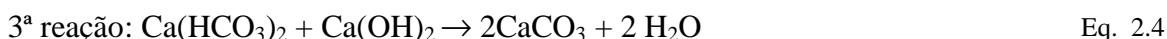
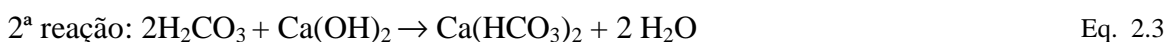
2.5.7.1.1 Mecanismo da carbonatação

Um dos produtos formados na hidratação do cimento Portland, particularmente na hidratação de C_3S e C_2S , é o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$. Este composto, dissolvido na água dos poros, confere elevada alcalinidade, elevando o pH do meio a valores da ordem de 12,5 a 13,5. Nesta condição, há a formação de um filme de óxidos na superfície da barra de aço, que impede ou inibe o desenvolvimento da corrosão das armaduras no concreto armado. É a situação denominada passivação¹⁸ da armadura (HELENE *et al*, 1995).

A carbonatação é a reação entre os produtos da hidratação do cimento, principalmente o $Ca(OH)_2$, e o CO_2 presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água, segundo a reação mostrada na Eq. 2.1:

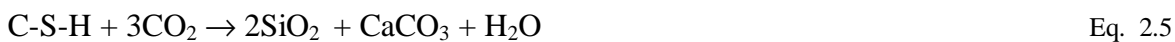


Na realidade, as reações são mais complexas, ocorrendo em três etapas, conforme Eq. 2.2, Eq. 2.3 e Eq. 2.4 (HELENE *et al.*, 1995; KAZMIERCZAK & LINDENMEYER, 1996):

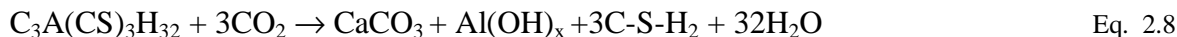
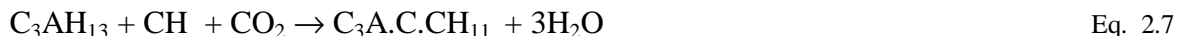
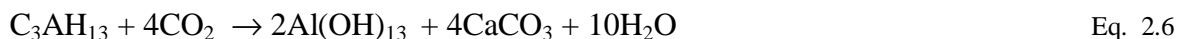


A 1ª reação explica a formação do ácido carbônico, só ocorrendo em presença de água; a 2ª reação tem como produto uma fase instável representada pelo carbonato de cálcio e a 3ª reação apresenta a formação estável do carbonato de cálcio, com liberação de água.

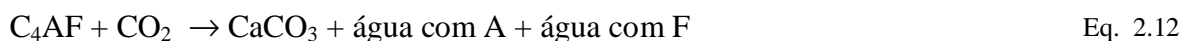
As reações de carbonatação podem ocorrer, também, com os compostos hidratados e anidros do cimento. As reações de carbonatação, nos compostos hidratados da pasta do cimento ocorrem como nas Eq. 2.5, Eq. 2.6, Eq. 2.7 e Eq. 2.8 propostas por Calleja, apud NUNES (1998):



¹⁸ A reação típica é $2Fe(OH)_3 + Ca(OH)_2 \Rightarrow Ca(FeO_2)_2 + 4H_2O$. O produto dessa reação pode ser entendido como um óxido duplo de cálcio e ferro. A camada deste produto que reveste a armadura é também chamada de capa passivadora ou passivada (HELENE, 1993).



As reações com os compostos anidros do cimentos podem ocorrer, pelo menos parcialmente, quando expostos a altas pressões de dióxido de carbono, segundo as Eq. 2.9, Eq. 2.10, Eq. 2.11 e Eq. 2.12 (RICHARDSON, 1988):



No entanto, a principal reação de carbonatação é com o hidróxido de cálcio e, em menor escala, com o silicato de cálcio hidratado pois, em pastas de cimento totalmente hidratadas o volume das fases CH e C-S-H é de aproximadamente 70 a 75% do total das fases hidratadas (MATALA, 1997; WEE et al., 1999).

Do ponto de vista físico, ocorre a deposição do carbonato nos poros, obturando-os e colmatando-os, ao longo do tempo. Com isso, a distribuição dos poros fica mais densa e a continuidade dos poros decresce. Assim, a própria carbonatação consiste em barreira eficaz contra si mesma e a colmatação dos poros colabora com o aumento da dureza superficial do concreto, fato benéfico a concretos sujeitos a abrasão, além de, também, aumentar a proteção contra a ação de sulfatos (HELENE *et al*, 1995; NEVILLE, 1997; MATALA, 1997; NGALA & PAGE, 1997).

Cabe lembrar que, mesmo a carbonatação podendo ser maior em concretos com escória de alto-forno, a sua microestrutura mais densa e com poros de tamanhos menores do que em concretos de cimento Portland comum, serve de barreira contra a penetração do CO₂ (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 2001)

2.5.7.1.2 Evolução da carbonatação

A carbonatação depende, dentre outros fatores, do concreto e do meio ambiente. Algumas das variáveis do concreto que interferem na carbonatação são o tipo de cimento, a relação

água/cimento, o consumo de cimento e o regime de cura que, juntos, definem a qualidade da microestrutura do concreto (TAYLOR, 1990; WEE, 1999).

Concretos com escória de alto-forno são mais suscetíveis à carbonatação, pois a quantidade de hidróxido de cálcio livre é menor do que em concretos com cimento Portland comum. No entanto, concretos com escória de alto-forno têm baixa permeabilidade, o que pode diminuir a difusividade do CO_2 , tornando a carbonatação mais lenta (BAUER & HELENE, 1993; GEISELER *et al.*, 1995).

Outros fatores que podem intervir indiretamente no mecanismo de carbonatação são o grau de adensamento e o nível de hidratação do cimento, pois sua atuação direta influi na permeabilidade do concreto (HELENE *et al.*, 1995). Cuidados como cura bem feita, preparo e confecção adequados do concreto também contribuem para que o efeito da carbonatação seja minimizado, especialmente quando se trata de concretos com escória de alto-forno que, por terem reações mais lentas, exigem maiores cuidados (OSBORNE, 1999).

A relação/água cimento é uma importante variável, que pode ser usada para limitar a velocidade de carbonatação, pois com a redução da relação água/cimento há uma redução da porosidade e da permeabilidade da superfície do concreto, restringindo a entrada de dióxido de carbono, podendo contribuir para a redução da profundidade de carbonatação (TAYLOR, 1990; MONTEIRO e NEPOMUCENO, 1996).

Quanto ao ambiente, as condições básicas para a reação são a presença de dióxido de carbono no ar e de umidade (HELENE *et al.*, 1995).

As concentrações de CO_2 na atmosfera podem variar na ordem de 0,03% em ambientes rurais até 1,2% em ambientes urbanos (BAUER & HELENE, 1993). A velocidade de carbonatação do concreto aumenta com o aumento da concentração de CO_2 , ocorrendo, progressivamente, do exterior para o interior do concreto exposto a uma velocidade cada vez mais decrescente, porque o CO_2 tem que se difundir através de um sistema de poros, incluindo a região já carbonatada da superfície do concreto (NEVILLE, 1997).

O nível de umidade no poro é fator determinante do grau de carbonatação em um concreto pois, embora o CO_2 penetre mais rapidamente na forma de gás, a reação de carbonatação necessita de água. Assim, em um concreto completamente seco o CO_2 não pode reagir pois não há água nos poros e, em um concreto totalmente saturado, o CO_2 deve, primeiramente,

ser dissolvido na solução do poro para depois se difundir pelos poros, até alcançar os compostos alcalinos (ROSENBERG *et al.*, 1989; WEE *et al.*, 1999).

Conseqüentemente, quando os poros tiverem alguma umidade em suas paredes, sem estar completamente saturados (50 a 65% de umidade relativa), o CO₂ pode rapidamente atingir as paredes dos poros com água suficiente para a reação, como mostra a Figura 2.14. Com a umidade relativa do meio ambiente maior do que 80%, a taxa de carbonatação cai drasticamente, devido ao começo da saturação do poro (ROSENBERG *et al.*, 1989; WEE *et al.*, 1999).

Embora seja influenciada por muitas variáveis e, mesmo não sendo válida para todos os casos, a profundidade de carbonatação pode ser expressa por uma lei parabólica, conforme equação Eq. 2.13 (ROSENBERG *et al.*, 1989):

$$x = k\sqrt{t} \quad \text{Eq. 2.13}$$

onde profundidade de carbonatação (x) é proporcional à raiz quadrada do tempo de exposição (t) e k uma constante.

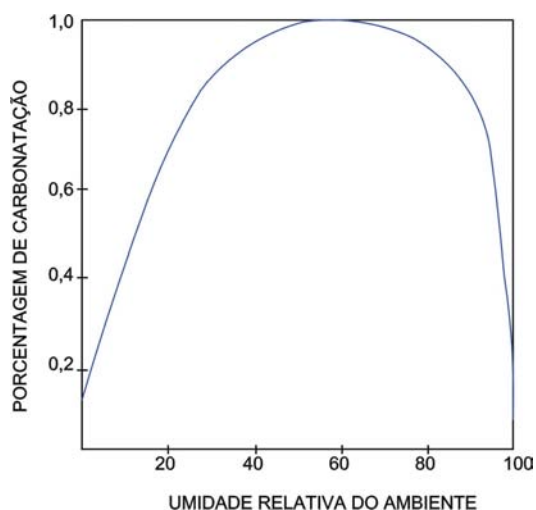


Figura 2.14 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa (ROSEMBERG *et al.*, 1989)

A grande importância deste modelo matemático está na previsão da vida útil de projeto, considerada como o período até a despassivação da armadura, também denominado de período de iniciação e que corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a armadura, período este controlado pela termodinâmica do sistema concreto-armadura-meio ambiente (ROSENBERG *et al.*, 1989; HELENE *et al.*, 1995; ZHANG *et al.*, 1997).

2.5.7.1.3 Carbonatação e a indução de corrosão

Quando a frente de carbonatação alcança a armadura, ocorre uma redução da alcalinidade nesta região, com o pH da água do poro de cimento chegando a valores inferiores a 10 ou 9. Estes valores são insuficientes para manter a camada de passivação estabilizada e a corrosão pode se iniciar (HELENE *et al.*, 1995; WEE *et al.*, 1999).

A corrosão, nestes casos, é generalizada e homogênea, resultando, após algum tempo, em redução da área da seção transversal do aço e liberação de uma quantidade significativa de óxidos, que podem romper a cobertura de concreto (ROSENBERG *et al.*, 1989; AL-KADHMI *et al.*, 1996).

No entanto, mesmo que a armadura não esteja bem protegida nesse ambiente menos alcalino, um concreto mais impermeável pode oferecer a proteção necessária para que o mecanismo de corrosão não se inicie (EHRlich & ROSENBERG, 1989; TAYLOR, 1990).

O ambiente mais agressivo relacionado com a neutralização do concreto é aquele com ciclos de alternância entre semi-seco e úmido. Durante o período semi-seco, a frente de carbonatação avança e, durante o período úmido, o aço corrói (ROSENBERG *et al.*, 1989).

Dois fatores podem, também, levar à diminuição da vida útil esperada: o recobrimento muito reduzido e a existência de fissuras no concreto. Recobrimentos com menos de 20mm, de acordo com várias normas internacionais, levam a riscos de despassivação por carbonatação prematura (ROSENBERG *et al.*, 1989).

Para situações onde há fissuras na superfície de concreto carbonatado, a despassivação da armadura ocorre na vizinhança da fissura, sendo que, para fissuras de até 0,4mm, é aceito por várias normas, que não há relação entre a fissura e a corrosão (o risco é maior em função da *qualidade do recobrimento* e da relação recobrimento/diâmetro da armadura) (ROSENBERG *et al.*, 1989).

2.5.7.1.4 Indicadores de carbonatação

Na prática, a profundidade de carbonatação pode ser determinada por meio de indicadores de pH, sendo o mais usual a fenolftaleína (HELENE *et al.*, 1995, NEVILLE, 1997).

Além das técnicas de aspersão de indicadores químicos de pH, a determinação da profundidade da frente de carbonatação pode ser feita através da determinação do

acrécimo de massa, em exemplares de pequenas dimensões, pela observação de lâminas delgadas em microscópio petrográfico e pela análise térmica diferencial (KAZMIECZAK & LINDENMEYER, 1996).

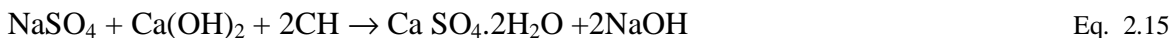
2.5.7.2 Resistência a sulfatos

Os sulfatos são potencialmente agressivos ao concreto e às estruturas. Quando a pasta de cimento entra em contato com íons sulfato, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o aluminato de cálcio produzidos pela hidratação do cimento reagem com o monossulfato hidratado, produzindo etringita (Eq. 2.14) (DOUGLAS, 1987; BINJEN, 1996).

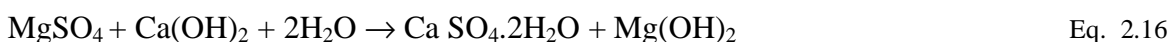


A pressão causada pelo acréscimo dos cristais da etringita e a expansão devido à adsorção de água em meio alcalino, pela etringita pouco cristalina, podem ser as causas dessa expansão (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A expansão por ataque de sulfato depende também do tipo de cátion presente na solução de sulfato (Na^+ ou Mg^{2+}). O hidróxido de cálcio da pasta de cimento Portland pode ser convertido em gipsita, como mostra a Eq. 2.15:



No caso de ataque por MgSO_4 , a reação ocorre segundo a Eq. 2.16:



O sulfato de sódio produz NaOH , que é responsável pela alta alcalinidade do sistema e é essencial para a estabilidade do C-S-H. Para o caso de um ataque por MgSO_4 , as reações produzem $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pouco alcalino, que altera a estabilidade do C-S-H no sistema e que causa, em retorno, futuro ataque do C-S-H pela solução de MgSO_4 (DOUGLAS, 1987).

Cimento com escória de alto-forno é conhecido por sua alta resistência a sulfatos. Com 65%, ou mais de escória de alto-forno, a resistência é excelente. Esta resistência a sulfatos é devido ao baixo teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e, talvez, mais importante, em função da microestrutura mais densa, a taxa de penetração de sulfato em concretos com escória de alto-forno é muito baixa, em comparação com concreto com cimento Portland comum (FREARSON, 1986; DOUGLAS, 1987; BINJEN, 1996).

Outra causa pode ser a menor espessura da zona de interface agregado-pasta de cimento com escória de alto-forno, o que reduz o espaço para a cristalização de etringita (BINJEN, 1996).

Concretos com escória de alto-forno são usados, com bons resultados, em construções em contato com água do mar que, além de cloretos, têm, também, sulfatos (GEISELER *et al.* 1995; BINJEN, 1996).

2.5.7.3 Reação álcali-sílica

Alguns agregados compostos de sílica e minerais silicosos não permanecem estáveis sob exposição prolongada em água fortemente alcalina, como é o caso da água dos poros em concretos normais.

Vários estudos mostram que cimentos Portland, contendo mais de 0,6% de Na₂O, quando usados em combinação com um agregado reativo, causam grande expansão devido às reações álcali-sílica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Normalmente, existem compostos de sódio e de potássio presentes em cimentos Portland e a presença de ambos pode contribuir para a expansão. A forma de ataque no concreto envolve a despolimerização ou quebra da estrutura de sílica do agregado, por íons hidroxila, seguida pela adsorção de íons metálico-alcalinos na superfície recém criada dos produtos da reação (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Em casos de cimentos com escória de alto-forno, os álcalis são incorporados aos produtos da reação da escória de alto-forno, conforme reação mostrada na Eq. 2.17 (DOUGLAS, 1987):



Ensaio realizados por DIAS *et al.* (1990) comprovaram que a adição de escória é uma ótima solução para se prevenir as expansões oriundas da reação álcali-sílica

Outros fatores que contribuem para melhor desempenho de cimentos com escória de alto-forno, com relação à reação álcali-sílica, são a menor alcalinidade da água do poro, a menor mobilidade dos íons, devido ao refinamento dos poros, a existência de menos hidróxido de cálcio livre, que é essencial para alguns autores para a expansão álcali-sílica, e a existência de uma zona de interface entre agregado-pasta de cimento com menor

espessura e com menor presença de hidróxido de cálcio livre (REGOURD, 1980; SMOLCZYK, 1980; BIJEN, 1996; OSBORNE, 1999).

2.5.7.4 Resistência a cloretos

As armaduras das estruturas de concreto, geralmente, se encontram bem protegidas contra a corrosão, devido à camada de passivação. Entretanto, muitos fatores podem levar ao início da despassivação do aço no concreto, como o ingresso de íons cloreto que, excedendo a certos níveis, rompe a camada de passivação do aço, resultando em problemas sérios de corrosão, mesmo nos casos de elevada alcalinidade da água do poro (MONTEIRO E NEPOMUCENO, 1996).

A corrosão eletroquímica é o mecanismo responsável pela corrosão do aço no concreto e se dá através da dissolução do aço em meio aquoso. É necessário que haja oxigênio para que ocorra a corrosão, cujo produto, denominado ferrugem, pode ser representado pela reação apresentada na equação Eq. 2.18 (HELENE, 1993):



A diferença de potencial do meio aquoso, nas regiões circunvizinhas à barra de aço é gerada pelas diversas heterogeneidades do concreto, que são suficientes para dar origem ao aparecimento de corrente elétrica. As heterogeneidades do concreto são ocasionadas pela presença de diferenças de umidade, de aeração, de concentração salina, de tensão no aço ou no concreto, ou de eventuais correntes de fuga (HELENE, 1993).

Porém, pode ou não haver corrosão, dependendo da magnitude da corrente elétrica e do acesso de oxigênio, não havendo corrosão em concreto seco, por insuficiência de eletrólito, nem em concretos totalmente saturados, por não haver suficiente oxigênio (HELENE, 1993).

A difusão de íons no interior do concreto é fortemente influenciada pela adição de escória de alto-forno, através da modificação da estrutura dos poros e da composição da água desses poros, da relação C/S do C-S-H e na capacidade de fixação de íons cloreto, reduzindo o teor de cloreto livre, que é responsável pelo dano às estruturas de concreto (GASTALDINI & CECHELLA, 2000).

A relação água/materiais cimentícios também influencia a penetração de íons cloreto no concreto. A explicação para que a penetração de íons cloreto seja mais lenta em pastas com baixa relação água/materiais cimentícios está ligada ao refinamento de poros. Os íons são

obrigados a se difundir através de uma rede de poros que é mais tortuosa e desconectada, dificultando a sua petração (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Em estudos realizados com misturas de escória, cinza de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa observou-se que as misturas com adições minerais apresentaram valores que as classificam, de acordo com a norma ASTM C 1202, como de baixa a muito baixa permeabilidade a cloretos, em comparação com o concreto de referência, que se apresentou como de moderada permeabilidade. Os valores para relação a/c estudados foram de 0,4, 0,5 e 0,6, constatando-se um aumento da corrente passante, à medida que se aumentava a relação a/c (GASTALDINI & CECHELLA, 2000).

LUO *et al.* (2002) confirmaram a grande capacidade que 70% de escória de alto-forno tem de melhorar a estrutura dos poros e de diminuir o coeficiente de difusão de cloretos em um concreto.

A questão do desenvolvimento da corrosão no caso de cimentos com adições, é complexa. Se, por um lado, nota-se um comportamento positivo frente à ação de cloretos, de outro, há o aspecto negativo, quanto à velocidade e profundidade da frente de carbonatação. A baixa permeabilidade dos concretos com cimentos com adição, no entanto, pode resultar em uma barreira à propagação da frente de carbonatação e, conseqüentemente, ao desenvolvimento da corrosão (MONTEIRO E NEPOMUCENO, 1996).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para alcançar níveis de desempenho com altas resistências mecânicas e elevada durabilidade, além da baixa relação água/materiais, a substituição de cimento por materiais cimentícios é muito importante para resultados positivos nas propriedades dos concretos.

Os benefícios incluem, também, aumento da resistência à fissuração térmica pela liberação mais lenta de calor de hidratação, aumento das resistências finais e redução da permeabilidade por refinamento dos poros e, como resultado da redução da alcalinidade, uma maior durabilidade a ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e reação álcali-sílica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

As boas características de concretos e argamassas confeccionados com escória de alto-forno (granulada e moída) e o excedente formado nas siderúrgicas e cimenteiras vêm incentivando pesquisas de novas aplicações para este material.

O capítulo 3, a seguir, trata do alto desempenho dos concretos, de suas características e do uso cada vez menor de clínquer Portland e cada vez maior de materiais cimentícios, o que constitui uma das tendências na tecnologia do concreto.

3 O ALTO DESEMPENHO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

3.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a tecnologia do concreto alcançou grande desenvolvimento devido ao surgimento de novos tipos de estruturas que exigiam novas soluções. Um dos motivos que contribuiu para isto foi a necessidade de reparos, muito antes do tempo planejado, mostrando que a durabilidade era a grande barreira do concreto tradicional (FLAGA, 2000; MARCHAND, 2000; KMITA, 2000).

Pesquisas com aditivos químicos e adições minerais, e novos e mais complexos métodos de dosagem, contribuíram para o surgimento de concretos com propriedades, que venceram as deficiências do concreto tradicional, dando origem aos concretos de alto desempenho (KMITA, 2000).

As melhorias nas propriedades dos concretos de alto desempenho, como alta trabalhabilidade, baixa permeabilidade, alta estabilidade dimensional, alta resistência à abrasão e, conseqüentemente, alta durabilidade (AITCIN, 1995; 2000b), foram obtidas através de uma microestrutura mais densa e homogênea, com a quase ausência da zona de transição, conseguida, primeiramente, com a redução substancial da quantidade de água na mistura e com o uso de superplastificantes e de adições minerais. Entretanto, como para qualquer concreto, a cura pode influenciar as propriedades do concreto de alto desempenho (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; AITCIN, 1995; 2000a).

O concreto de alta resistência foi o precursor do concreto de alto desempenho e começou a ser desenvolvido no início dos anos 60, apesar do contexto da época ser governado por cimentos muito mais grossos do que os de hoje. Além disso, os redutores de água usados eram na maioria à base de lignosulfatos, que variavam consideravelmente em composição e pureza, e a qualidade da cinza volante, ainda, não estar devidamente controlada (CASSA *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a).

Devagar e progressivamente, durante um período de 10 anos, a resistência usual, que ficava em torno de 15 a 20 MPa, foi multiplicada por três passando para 45 e 60 MPa. Mas, a barreira técnica que dificultou o crescimento das resistências à compressão nos inícios dos anos 70, era a pequena disponibilidade de alternativas de redutores de água, que não eram capazes de uma considerável redução da relação água/materiais cimentícios, pois

estes, quando usados em dosagens maiores do que as usualmente recomendadas, retardavam excessivamente a pega, o que não era vantajoso para o andamento da obra. A cinza volante era usada em substituição parcial ao cimento, para minimizar o problema da perda de abatimento decorrente da baixa relação água/materiais cimentícios utilizada (AITCIN, 2000a).

Somente no final dos anos 60, os superplastificantes à base de policondensados de naftaleno sulfonado, no Japão, e de condensados de melamina sulfonada, na Alemanha, foram utilizados, pela primeira vez, mais como fluidificantes do que como redutores de água. Com o aumento das dosagens dos superplastificantes, percebeu-se que estes poderiam ser usados como redutores de água, sendo, inclusive, muito mais eficientes do que aqueles à base de lignosulfatos, podendo ser usados em dosagens mais altas, sem o efeito de retardamento de pega (CASSA *et al.*, 1999; AITCIN, 2000b).

Com o auxílio dos superplastificantes, descobriu-se, então, que concretos com relação água/materiais cimentícios muito baixa também tinham outras características melhoradas, além da resistência à compressão, como fluidez mais elevada, módulo de deformação mais alto, resistência à flexão maior, menor permeabilidade, resistência à abrasão melhorada e, sobretudo, maior durabilidade (AITCIN, 2000a; 2000b).

Atualmente, o concreto de alto desempenho é utilizado em todo o mundo e, a maior parte de sua aplicação em campo tem como propósito uma maior durabilidade e não apenas superior resistência mecânica (MEHTA, 1996).

Embora tenha sido comum a confecção de concretos de alta resistência com sílica ativa como adição mineral, descobriu-se que o seu uso não é essencial para a durabilidade. Considerações econômicas e ambientais ajudaram a difundir o uso de escória de alto-forno e de cinza volante como materiais cimentícios, devido à sua grande disponibilidade em vários países, e às suas características permitirem o emprego em concretos de alto desempenho com bons resultados (MEHTA, 1996).

Inúmeros trabalhos demonstram o grande potencial que a cinza volante, a escória de alto-forno, e, também, a cinza de casca de arroz, utilizadas como adição mineral em misturas binárias e ternárias, apresentam, quando substituem igual massa de cimento. Estes materiais, adicionados ao cimento, vão atuar na matriz do concreto, reduzindo vazios e tornando o concreto mais resistente e menos permeável.

No caso de cinza volante e escória de alto-forno, além das vantagens técnicas já relatadas, é um modo seguro e barato de utilização de subprodutos industriais que, em princípio, seriam poluidores do solo, contribuindo, também, para a conservação de energia e de recursos minerais (ISAIA, 1999; BHARATKUMAR *et al*, 2001).

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações sobre a relação resistência-durabilidade no contexto do concreto de alto desempenho, abrangendo a influência dos materiais, as suas principais características e propriedades.

O papel da escória de alto-forno no alto desempenho dos concretos será abordado e as tendências futuras que se observam na tecnologia do concreto de alto desempenho apresentadas.

3.2 A RELAÇÃO RESISTÊNCIA-DURABILIDADE NO CONTEXTO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A resistência foi, até bem pouco tempo, a única propriedade especificada para a dosagem e o controle de qualidade do concreto porque a sua medida é relativamente fácil e se assumiu que outras propriedades do concreto, como módulo de deformação, permeabilidade e durabilidade, estariam diretamente relacionadas com ela. No entanto, com base em experiências de campo, já se sabe que isto é incorreto, especialmente com relação à permeabilidade e durabilidade das estruturas (MEHTA, 1996).

A preocupação com a segurança de estruturas e com custos de manutenção, reforços e recuperação de obras existentes fizeram com que aspectos referentes à durabilidade fossem incorporados à qualidade do concreto (LOPES, NEPOMUCENO & SILVA, 2000).

Exemplos destes problemas de durabilidade são a deterioração de garagens, a carbonatação e a corrosão das armaduras de concretos de edifícios e monumentos, que contribuíram para demonstrar a importância da durabilidade sobre outras propriedades do concreto. Assim, o concreto de alto desempenho surgiu como alternativa para a solução ou minimização destes problemas (AITCIN, 2000b).

Aplicações de concreto de alto desempenho onde não somente a resistência, mas também a durabilidade é essencial, são plataformas em alto mar e pontes em ambientes agressivos ou em climas severos de gelo-degelo. Porém, não só em grandes obras se utiliza o concreto de alto desempenho. Problemas do dia a dia, dependendo das necessidades da obra, podem ser

resolvidos, justificando o emprego do concreto de alto desempenho (AITCIN, 1995; ISAIA, 1999).

Algumas considerações, sobre o fato de que a especificação de um nível de resistência à compressão, por si só, não assegura a durabilidade de uma estrutura de concreto, podem ser extraídas do estudo realizado por GASTALDINI & CECHELLA (2000). A partir de diferentes composições de misturas cimentícias binárias e ternárias, observou-se que, mesmo para níveis semelhantes de resistência à compressão, para distintas relações água/materiais cimentícios, os resultados de permeabilidade a cloretos foram diferentes, sendo influenciada, também, pelas características físico-químicas e mineralógicas de cada adição mineral.

Em outros estudos, com concretos submetidos à corrosão das barras de aço, a ciclos de gelo e degelo, a reações álcali-sílica e ataque de sulfatos, constatou-se que, apesar destes concretos terem alta resistência, com o tempo, devido à ação de cargas e efeitos como ciclos de aquecimento e resfriamento e molhagem e secagem, as fissuras se tornaram contínuas e permitiram a penetração de agentes de deterioração como água, ar, CO₂, íons cloreto e sulfatos que, interagindo quimicamente com os compostos do cimento, aumentam a permeabilidade do concreto (MEHTA, 1996; LOPES, NEPOMUCENO & SILVA, 2000).

Deformações do concreto, como fluência e retração, também podem causar fissuras, dependendo de características do concreto como dimensões do elemento estrutural, tipo de material e dosagem. Isto comprova, mais uma vez, que vazios e microfissuras, ou qualquer fator que cause a propagação de fissuras, são cruciais para a sua durabilidade e seu alto desempenho (MEHTA, 1996).

Assim, fica claro que a resistência à compressão não é a única propriedade do concreto de alto desempenho e que sua grande importância está relacionada com a melhoria de sua microestrutura, que influencia propriedades como permeabilidade, porosidade e, sobretudo, durabilidade do concreto (AITCIN, 2000b).

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Considerações iniciais

Os materiais utilizados para a confecção do concreto de alto desempenho são, basicamente, os mesmos empregados em concretos tradicionais. No entanto, é necessário conhecer as propriedades destes materiais e suas interações, considerando que a resistência e a permeabilidade da pasta de cimento, as características dos agregados e a zona de transição, entre a pasta e os agregados, influenciam as propriedades finais do concreto (PICCOLI *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a).

3.3.2 Agregados

Os agregados utilizados na produção de concretos de alto desempenho devem ter resistência suficiente para que não se tornem pontos fracos dentro do concreto, sobretudo no caso do agregado graúdo, pois, em concretos de alto desempenho, as pastas de cimento hidratadas e a zona de transição podem alcançar resistências tais que a resistência do concreto passa a ser limitada pela resistência do agregado (MEHTA, 1996; AITCIN, 2000a).

O agregado deve, então, ser avaliado através de exames de mineralogia e de petrografia, para assegurar que as partículas sejam resistentes o suficiente para evitar ruptura precoce no concreto (AITCIN, 2000a).

O agregado miúdo deve ser arredondado e ter granulometria uniforme sendo recomendado módulo de finura entre 2,8 e 3,2 (NEVILLE, 1997; PICCOLI *et al.*, 1999) e 2,7 a 3,0 (AITCIN, 2000a), pois os agregados com estas faixas de módulo de finura exigem quantidades reduzidas de água de molhagem.

O agregado graúdo deve ter dimensão máxima característica reduzida, para evitar a incompatibilidade entre o módulo de deformação, o coeficiente de Poisson, a retração, a fluência e as propriedades térmicas, que geram concentrações de tensão e descolamento entre agregado e argamassa. São indicados para concretos de alto desempenho, agregados graúdos com dimensão máxima característica, preferencialmente, inferior a 19 mm, podendo haver necessidade de se reduzir para 12,5 mm ou até valores menores, quando elevadas resistências à tração são almejadas (NEVILLE, 1997; PICCOLI *et al.*, 1999; AITCIN, 2000b).

3.3.3 Adições minerais

O concreto de alto desempenho pode ser produzido usando apenas o cimento Portland como material cimentício. No entanto, a substituição de parte do cimento por um ou uma combinação de dois ou três materiais cimentícios pode trazer vantagens econômicas e ecológicas, além de melhorar a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (NAGATAKI, 1994; AITCIN, 2000a).

A parcela de hidróxido de cálcio, produzido na hidratação do cimento Portland, além de não contribuir para a resistência da pasta de cimento hidratada, pode ser responsável por problemas de durabilidade uma vez que pode ser lixiviada pela água, tornando a matriz da pasta de cimento porosa.

As adições minerais, em misturas binárias e ternárias, agem como materiais pozolânicos¹⁹ e como fílers, tornando a microestrutura da matriz do concreto endurecido mais densa e mais resistente, maximizando o seu desempenho (CASSA *et al.*, 1999; PHELAN, 2000; BHARATKUMAR *et al.*, 2001).

A cinza volante, a menos reativa de todas as adições, apesar de sua maior variabilidade que exige critérios de seleção e classificação, pode ser usada em concretos que requerem baixa permeabilidade, em concreto massa e em concretos com alta resistência (PHELAN, 2000; BHARATKUMAR *et al.*, 2001). Com o uso de aditivo superplastificante, relação água/materiais cimentícios igual a 0,29 e teor de 80% em adição ao cimento, foi possível obter um incremento de 160% na resistência à compressão, em comparação com cimento Portland de referência, sem adição de cinza volante, com consumo de cimento igual a 250 kg/m³ (RIVERA *et al.* 1999).

A sílica ativa é usada em concretos que requerem alta resistência à corrosão, como construções de tabuleiros de pontes e estruturas de estacionamento com resistências à compressão superiores a 70 MPa.

O metacaolim foi introduzido no mercado mais recentemente e sua contribuição às propriedades do concreto é comparada à da sílica ativa (BROOKS *et al.*, 2000).

A cinza da casca de arroz é, além das anteriormente mencionadas, outra adição disponível para concretos de alto desempenho (MEHTA, 1996; MORAES *et al.*, 2001). Porém, deve

¹⁹ materiais que têm em sua composição sílica amorfa e reagem com o hidróxido de cálcio formado pelas reações dos compostos de hidratação do cimento (MORAES *et al.*, 2001).

ser incinerada de maneira controlada, a temperaturas variando de 450 a 500° C, para alcançar uma reatividade adequada e, assim, poder ser usada como material cimentício em substituição ao cimento Portland (SENZALE & DAL MOLIN, 1999).

A escória de alto-forno é, também, usada regularmente, como nos casos anteriormente mencionados (PHELAN, 2000) por sua grande disponibilidade e pelos bons resultados de diversas propriedades do concreto, sobretudo relacionadas com a durabilidade (NAGATAKI, 1994; AITCIN, 2000a).

No entanto, cada uma das adições minerais atua de maneira distinta, nas propriedades do concreto, ao produzirem efeitos químicos e/ou físicos²⁰ que proporcionam melhor refinamento dos poros, reduzem a permeabilidade do concreto e aumentam a sua durabilidade (MORAES *et al.*, 2001).

3.3.4 Aditivos superplastificantes

A maior diferença entre concreto convencional e concreto de alto desempenho está, essencialmente, no uso de aditivos e adições minerais. O uso de aditivos superplastificantes reduz o consumo de água no concreto, reduzindo, assim, a porosidade da pasta (BHARATKUMAR *et al.*, 2001).

O efeito do superplastificante está em melhorar a dispersão dos grãos de cimento na água. Com isso, a tendência à floculação é diminuída e a água, que estaria imobilizada dentro dos flocos, fica liberada para ajudar no movimento das partículas, contribuindo para uma melhor trabalhabilidade do concreto (TAYLOR, 1990; CASSA *et al.*, 1999).

O aditivo superplastificante atua através de um ou mais mecanismos que podem ser (CASSA *et al.*, 1999):

- redução da tensão superficial da água;
- repulsão eletrostática entre partículas do cimento;
- introdução de filme redutor de atrito entre as partículas do cimento;
- dispersão dos grãos de cimento, liberando a água presa nos flocos;
- inibição inicial das reações de hidratação, dispondo a água na mistura por mais tempo;

- mudança da morfologia dos produtos de hidratação, pois as moléculas do superplastificante passam a ficar aprisionadas nos produtos de hidratação do cimento.

Existem quatro famílias principais de superplastificantes: (AITCIN, 2000a)

- sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído;
- sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído;
- lignosulfonatos com teores muito baixos de açúcar e de surfactantes;
- poliacrilatos

MALHOTRA (1989) cita a mesma classificação, porém, o quarto grupo é classificado como *outros superplastificantes*, abrangendo diferentes produtos.

Com a utilização de relação água/materiais cimentícios cada vez mais baixa no concreto de alto desempenho, começou-se a perceber um comportamento inesperado na trabalhabilidade dos concretos frescos, como perda de trabalhabilidade e baixa fluidez, podendo comprometer o seu bombeamento, adensamento e acabamento.

Este fenômeno, conhecido como incompatibilidade cimento-aditivo superplastificante, é devido a fatores como a variedade de superplastificantes com diferentes composições químicas do aditivo, aos diversos tipos de cimentos que, em conjunto com as adições minerais, contribuem para que haja grande diversidade na composição química do material cimentício final (CASSA *et al.*, 1999).

Assim, a eficiência dos superplastificantes é controlada por parâmetros físico-químicos de difíceis medidas e de difícil avaliação da sua capacidade em dispersar um determinado tipo de cimento. Portanto, a melhor maneira de avaliar a compatibilidade entre uma determinada marca de superplastificante e uma determinada marca de cimento é estudar diretamente as características reológicas da pasta, argamassa ou concreto (SHUNSUKE *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a).

²⁰ os efeitos químicos são responsáveis pelas alterações na microestrutura provocadas pelas reações pozolânicas, e o efeito físico é definido pela presença física das pequenas partículas das adições, seja pela colmatação dos poros ou pelo refinamento de poros e de grãos. (MORAES *et al.*, 2001).

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DOSAGEM DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O concreto de alto desempenho deve ser dosado, para que suas propriedades sejam otimizadas, observando-se as características dos materiais, a finalidade de uso e as condições de exposição, a relação custo-benefício e a vida útil exigida (BHARATKUMAR *et al*, 2001).

No entanto, devido ao grande número de constituintes dos traços de concreto de alto desempenho e devido aos vários requisitos do concreto, que podem contradizer-se uns aos outros, é muito difícil usar um método de dosagem que chegue a proporções muito próximas daquela do traço final (AITCIN, 2000a; BHARATKUMAR *et al*, 2001).

Assim, os métodos de dosagem requerem um grande número de tentativas para selecionar a combinação desejada de materiais, sendo o melhor método aquele que minimize este número de tentativas e alcance uma mistura econômica com as propriedades desejadas (BHARATKUMAR *et al*, 2001).

Alguns procedimentos e considerações vêm sendo adotados como pontos de partida para a dosagem do concreto de alto desempenho, podendo-se citar: (AITCIN, 2000a)

- o abatimento do concreto de alto desempenho depende essencialmente da quantidade de superplastificante usada e não da quantidade de água da mistura;
- não é necessário utilizar um agregado com grandes dimensões, para reduzir a quantidade de água da mistura para um certo abatimento, e sim usar um agregado graúdo pequeno para diminuir os efeitos da zona de transição. Além disso, em muitos tipos de rochas, as partículas menores do agregado graúdo são geralmente mais resistentes do que as partículas grandes;
- com a utilização de materiais cimentícios suplementares, a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a relação água/materiais cimentícios, usualmente conhecida, não é mais inteiramente válida;
- o teor de agregado graúdo não é mais influenciado pelo módulo de finura da areia, pois por ser o traço mais rico em cimento, é melhor usar uma areia grossa.

3.5 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

3.5.1 Considerações iniciais

O concreto de alto desempenho é um concreto que tem, geralmente, alta trabalhabilidade, baixa permeabilidade, alta estabilidade dimensional, alta durabilidade e resistência adequada para a estrutura.

É um concreto mais sensível às variações do traço, pois os materiais são selecionados e dosados, considerando o máximo de seus potenciais. Assim, qualquer desvio das características otimizadas dos materiais, ou das suas misturas, pode modificar fortemente as propriedades, tanto no concreto fresco como no concreto endurecido (AITCIN, 2000a).

Nos próximos itens, serão abordadas as principais características e propriedades do concreto de alto desempenho.

3.5.2 Massa unitária

A massa unitária do concreto de alto desempenho é um pouco mais alta do que a do concreto tradicional, pois contém mais cimento e menos água (AITCIN, 2000a).

3.5.3 Consistência

No concreto tradicional, com relação água/materiais cimentícios alta, as partículas dos materiais cimentícios estão longe umas das outras e suas interações, durante a hidratação inicial, não afetam o abatimento do concreto.

A diminuição da relação água/materiais cimentícios implica em uma interação física entre as partículas dos materiais cimentícios, sendo esta interação afetada pela forma, pela granulometria e pela reatividade química das partículas. A presença de aditivo superplastificante ajuda na defloculação das partículas dos materiais cimentícios e na sua melhor umidificação/hidratação, influenciando o abatimento do concreto de alto desempenho (AITCIN, 2000a).

O concreto de alto desempenho se apresenta, usualmente, mais viscoso e coeso do que concretos tradicionais, o que pode reduzir o seu espalhamento e o seu abatimento. O uso de superplastificante pode reduzir a relação água/materiais cimentícios e, ao mesmo tempo,

aumentar a fluidez e plasticidade do concreto, melhorando, com isto, sua consistência (ZAIN *et al.*, 1999).

Porém, problemas de incompatibilidades entre o tipo de cimento e o aditivo superplastificante podem surgir, como perda rápida de abatimento ou rigidez por falsa pega, podendo ser evitados substituindo-se o tipo de aditivo e controlando, através de ensaios específicos de compatibilidade cimento-aditivo (SHUNSUKE *et al.*, 1999).

Outra maneira prática de resolver o problema da perda de abatimento consiste em usar materiais cimentícios em substituição à parte do cimento e/ou à utilização de um aditivo retardador de pega (ZAIN *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a).

3.5.4 Teor de ar

É normal que haja uma incorporação de ar de 1 a 3% em concretos de alto desempenho porque as misturas são mais viscosas do que as do concreto tradicional (AITCIN, 2000a). Este teor de ar, naturalmente incorporado, pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade e, se ampliado com a introdução de aditivos incorporadores de ar, pode melhorar a durabilidade ao gelo-degelo (TAYLOR, 1996; ZAIN *et al.*, 1999).

No entanto, é possível, com algumas combinações cimento-superplastificante, obter concretos com 1 a 1,5% de ar incorporado, para relação água/materiais cimentícios igual a 0,30, desde que a fluidez da mistura seja cuidadosamente ajustada (AITCIN, 2000a). ZAIN *et al.*, (1999) relata estudos com médias de ar incorporado entre 1,5 e 2,3%.

3.5.5 Calor de hidratação

Como os concretos de alto desempenho possuem elevado consumo de cimento, é de se esperar que tenham problemas com a liberação de calor de hidratação. Entretanto, a temperatura máxima atingida em concreto de alto desempenho não depende da quantidade de cimento e sim da quantidade de cimento que é hidratada (NAKAMOTO & TOGAWA, 1995; GEISELER *et al.*, 1995; OSBORNE, 1999). Depende, também, do tipo de cimento, da quantidade de água disponível para reagir com o cimento, do efeito de aditivos, da temperatura inicial do concreto, da temperatura ambiente, das dimensões do elemento estrutural e do material das formas.

Portanto, medidas podem ser tomadas para reduzir a elevação de temperatura e o aparecimento de gradientes térmicos, tais como a utilização de cimento com baixo calor de

hidratação, de adições minerais, de formas isolantes ou de aditivos retardadores, que reduzem o pico de calor de hidratação (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000a).

3.5.6 Permeabilidade e porosidade

Em concretos de alto desempenho, a microestrutura da pasta é modificada pelas adições minerais, que favorecem o refinamento de poros e de grãos, e pela baixa relação água/cimento, que dificulta a intercomunicação entre os poros durante a hidratação dos materiais cimentícios (PICCOLI *et al*, 1999; ISAIA, 1999; BHARATKUMAR *et al*, 2001).

Em uma pasta de cimento com relação água/cimento alta, os produtos iniciais da hidratação são formados, gerando um considerável volume de vazios. Estes produtos iniciais, constituídos por grandes flocos de cristais formados fora dos limites originais da partícula de cimento em hidratação, são chamados de produtos externos (*outer shell products*).

Os produtos internos de hidratação (*inner shell products*), formados dentro dos limites originais da partícula de cimento em hidratação são mais compactos e menos cristalinos, e formados em maior quantidade, quando a relação água/materiais cimentícios é reduzida.

A Figura 3.1 mostra um esquema de duas pastas frescas de cimento, contendo relação água/cimento de 0,65 e 0,25. Quando a relação água/cimento é baixa, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras na pasta de cimento fresca, resultando em menor porosidade (AITCIN, 2000a).

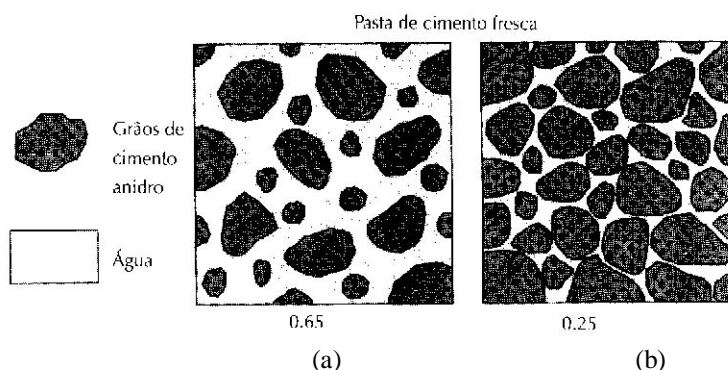


Figura 3.1 – Representação esquemática de duas pastas frescas de cimento com a relação água/cimento igual a (a) 0,65 e (b) 0,25 (AITCIN, 2000a).

Embora a zona de transição pasta de cimento-agregado graúdo seja constituída pelos mesmos elementos daquela da matriz, sua estrutura e suas propriedades diferem consideravelmente. Os agregados graúdos impedem uma distribuição homogênea da água

ao seu redor, o que pode levar a uma relação água/materiais cimentícios mais elevada nas proximidades do agregado graúdo.

Esse fato é agravado, quando a relação água/materiais cimentícios é elevada. Os produtos cristalinos, que se formam perto do agregado, são constituídos por cristais relativamente grandes e com uma estrutura mais porosa. Os cristais em placas de hidróxido de cálcio tendem a se formar em camadas, com orientação perpendicular à superfície do agregado, que resulta em maior porosidade (MEHTA & MONTEIRO, 1994; MEHTA, 1994; NEVILLE, 1997; DETWILER; KRISHNAN; AITCIN, 2000a).

A zona de transição, em concretos de alto desempenho, mostra-se mais compacta e resistente do que nos concretos tradicionais, devido à baixa relação água/materiais cimentícios e devido às reações de adições minerais com o hidróxido de cálcio com formação de C-S-H (FLAGA, 2000).

3.5.7 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto de alto desempenho é, normalmente, mais alta do que a do concreto tradicional, porém esta não é a característica essencial do concreto de alto desempenho, e sim sua durabilidade (AITCIN, 2000b).

No entanto, a elevada resistência mecânica pode não ser alcançada, quando a resistência do agregado não for igual ou superior à resistência da pasta. Assim, algumas vezes, a resistência mecânica do concreto é limitada pela resistência do agregado (AITCIN, 2000a).

Como já se sabe, a resistência e a permeabilidade das pastas dos concretos estão relacionadas aos poros capilares, que são, por sua vez, influenciados pela relação água/materiais cimentícios e pelo grau de hidratação.

Assim, a resistência das pastas de cimento pode ser melhorada, quando propriedades como a porosidade são também melhoradas e, embora a resistência à compressão aumente, à medida em que a relação água/materiais cimentícios diminui, os efeitos da variação da relação água/materiais cimentícios são sentidos de forma diferenciada nas propriedades do concreto. Por exemplo, a resistência mecânica é menos sensível que a permeabilidade e a vida útil; a permeabilidade diminui dezenas de vezes mais que a resistência mecânica e a vida útil aumenta duas a três vezes, em comparação com concretos tradicionais (PICCOLI *et al*, 1999; AITCIN, 1995; 2000a; 2000b).

A resistência à compressão inicial do concreto de alto desempenho pode sofrer influência da temperatura do concreto, da temperatura ambiente e dos aditivos empregados. Temperaturas baixas e grandes quantidades de aditivos podem retardar o endurecimento do concreto e, conseqüentemente, diminuir a sua resistência à compressão inicial.

A influência do teor de ar incorporado na resistência do concreto de alto desempenho é similar ao que ocorre no concreto tradicional. A diferença de 1%, na faixa entre 4 e 6% de ar incorporado, pode ter como resultado uma redução de 4 a 5 % na resistência à compressão do concreto de alto desempenho (AITCIN, 2000a). No entanto, existem vantagens com relação à melhor trabalhabilidade a à resistência ao gelo-degelo.

A resistência da zona de transição pode aumentar com o tempo, como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios, resultantes de reações químicas lentas entre constituintes da pasta de cimento e o agregado ou em conseqüência de uma reação secundária do Ca(OH)_2 com materiais pozolânicos ou com escória de alto-forno, formando mais produtos hidratados, que tendem a reduzir o tamanho e o volume total de vazios no concreto, particularmente, nesta região (DETWILER, KRISHNAN & MEHTA, 1987; NEVILLE, 1997).

O efeito das adições minerais, na resistência do concreto varia com as características e teores empregados de adições (ISAIA, 1999; BHARATKUMAR *et al*, 2001). Resultados de estudos realizados por MALHOTRA *et al*. (2000) em concretos com diferentes tipos e teores de materiais cimentícios, mostram resistências variando de 86,4 a 110,3 MPa, para um mesmo consumo de materiais cimentícios e mesma relação água/materiais cimentícios.

3.5.8 Módulo de deformação

É sabido que em concretos de alto desempenho, o agregado graúdo pode ser o limitador da resistência do concreto. Porém, quando ele é mais resistente do que a pasta ou argamassa, a transferência de tensões na interface pasta-agregado é muito melhor.

Vários modelos teóricos e empíricos foram propostos, por vários autores relacionando o módulo de deformação com a resistência à compressão. No entanto, AITCIN (2000a) sugere determiná-los diretamente em corpos-de-prova moldados nas condições reais dos canteiros.

A diferença entre os módulos de deformação da pasta de cimento de alta resistência e do agregado é pequena, o que faz com que o comportamento do concreto de alto desempenho

seja quase monolítico e a resistência da interface agregado-matriz seja maior. Assim, a fissuração na interface é menor e a parte linear da curva tensão-deformação pode ocorrer em tensões superiores a 85% da tensão de ruptura (NEVILLE, 1997).

Para o caso de concretos feitos com sílica ativa, escória de alto-forno ou com a combinação dos dois materiais, não foram encontradas diferenças significativas no módulo de deformação, quando comparados aos 2 e 4 anos de idade. Aos 10 anos, o módulo de deformação para todos os concretos estudados, apresentou valores similares ou maiores do que os valores aos 4 anos (MALHOTRA *et al.*, 2000).

3.5.9 Retração

Em princípio, é esperado que o concreto de alto desempenho, por ter um teor de materiais cimentícios superior aos concretos tradicionais, apresente maior retração. No entanto, a retração do concreto de alto desempenho está mais ligada à cura, ou à sua falta, do que ao teor de materiais cimentícios propriamente dito.

A explicação para este fato é que, como os concretos de alto desempenho têm baixa relação água/materiais cimentícios, a retração autógena se desenvolve instantaneamente na ausência de qualquer cura, pois a água, rapidamente drenada de capilares muito finos, resulta em tensões de tração e, por conseqüência, no desenvolvimento de retração autógena. No caso de concretos usuais, a retração autógena não é significativa, se comparada à retração hidráulica ou por secagem (HIROSHI *et al.*, 1997; TAZAWA & MIYAZAWA, 1997; LIM & WEE, 2000).

É importante ressaltar que a retração autógena é mais comum em corpos-de-prova do que em estruturas de concreto de alto desempenho, pois neles o efeito da secagem da sua região superficial é maior, devido ao reduzido tamanho dos corpos-de-prova (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000a).

Já a retração por secagem se desenvolve mais devagar, em concreto de alto desempenho, porque os poros têm dimensões menores e pelo fato da água já ter sido drenada pelo mecanismo de auto-secagem (AITCIN, 2000a).

Deve-se, portanto, proceder uma cura inicial bem feita, no concreto de alto desempenho, para evitar qualquer retração por secagem ou autógena para que nenhum gradiente de tração seja criado na superfície do concreto, o que pode influenciar a resistência final (OSBORNE, 1999).

3.5.10 Durabilidade como requisito de desempenho

3.5.10.1. Considerações iniciais

O concreto de alto desempenho tem baixa permeabilidade, devido à microestrutura muito densa da pasta de cimento hidratada e ao fato de seu sistema de poros ser descontínuo. O que mais interfere nas mudanças da microestrutura, comparativamente aos concretos comuns, são as adições minerais por seus efeitos filler e pozolânico, que resultam em diminuição da permeabilidade e da porosidade da zona de transição, entre os agregados e a pasta de cimento, e da quantidade de cristais de portlandita (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000a).

São abordadas, a seguir, algumas características que influenciam a durabilidade do concreto de alto desempenho.

3.5.10.2. Carbonatação

Em geral, o concreto de alto desempenho é confeccionado com adições minerais o que faz com que a quantidade de hidróxido de cálcio livre seja menor do que em concretos sem essas adições. Assim, a reserva, para manutenção da alcalinidade da água do poro necessária à passivação da armadura, é mais baixa.

No entanto, a microestrutura do concreto de alto desempenho, sendo densa e com baixa permeabilidade, devido ao uso de adições minerais e da baixa relação água/materiais cimentícios, pode ser uma barreira eficiente à penetração de CO₂, dificultando as suas reações químicas com o hidróxido de cálcio livre (ROSEMBERG *et al.*, 1989).

3.5.10.3. Resistência a sulfatos

O ataque de íons sulfato, ao cimento, pode causar expansão, devido à formação de cristais prismáticos de etringita ou gesso, com conseqüente danos ao concreto. Com a substituição parcial de cimento por adições minerais, é possível melhorar a resistência a sulfatos, pois estas adições, ao consumirem o Ca(OH)₂ livre nas pastas de cimento, tornam inativas as fases que contém aluminas, contribuindo, assim, para evitar os efeitos deletérios do ataque de sulfatos, já que a transformação do hidróxido de cálcio em gesso fica reduzida (BRETANHA & DAL MOLIN, 2000).

Como concretos com altos teores de escória de alto-forno têm microestrutura mais densa e pequena quantidade de Ca(OH)_2 livre, possuem excelente resistência a sulfatos (BIJEN, 1996).

3.5.10.4. Reação álcali-sílica

O concreto de alto desempenho é menos propenso à reação álcali-sílica, devido à baixa permeabilidade, consequência de baixas relações água/materiais cimentícios e do uso de adições minerais, que limita a mobilidade dos íons, dificultando a ocorrência da reação álcali-sílica (NEVILLE, 1997; OSBORNE, 1999).

3.5.10.5. Resistência a cloretos

O ingresso e o deslocamento de agentes agressivos ao concreto, como os íons cloreto, depende, principalmente, da estrutura dos poros e da existência de microfissuras na pasta. Os agentes agressivos penetram no concreto, geralmente, por absorção capilar e por difusão.

Assim, a diminuição da porosidade total e a intercomunicabilidade dos poros, obtidos através da utilização de adições minerais e de reduzida relação água/materiais cimentícios, faz com que o concreto de alto desempenho tenha alta resistência a ataques por agentes externos (LOPES, NEPOMUCENO & SILVA, 2000).

Vários trabalhos apresentam resultados de ensaios, mostrando que os íons cloreto penetram com mais dificuldade em concretos de alto desempenho do que em concretos tradicionais (ISAIA, 1999; MALHOTRA *et al*, 2000; P. GAO *et al*, 2001).

3.6 O PAPEL DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO NO ALTO DESEMPENHO DOS CONCRETOS

Como já descrito, o uso de materiais cimentícios suplementares é comum, em concretos de alto desempenho os quais têm microestrutura mais densa e baixa permeabilidade. Estas características, dentre outras, contribuem para que concretos com estes materiais tenham várias de suas propriedades melhoradas.

A porosidade é fortemente influenciada, sendo constatado, em pastas de cimentos com escória moída, maior quantidade de poros de tamanhos menores, com redução da porosidade capilar em 25 a 30%, em comparação com pastas de cimento Portland comum,

que apresentaram quantidade maior de poros capilares com raio $>300\text{\AA}$ (SMOLCZYK, 1980).

Quanto à resistência mecânica, como a escória de alto-forno moída não é tão reativa quanto o cimento, a resistência à compressão do concreto de alto desempenho confeccionado com substituição parcial de escória moída é quase sempre mais baixa, após 24 horas, do que quando somente o cimento Portland é usado. No entanto, a idades mais avançadas, o concreto com escória de alto-forno pode alcançar resistências compatíveis e até superiores aos concretos de cimento Portland.

Porém, uma maneira de melhorar a resistência a 24 horas é reduzir a relação água/cimento com a incorporação de aditivos superplastificantes (AITCIN, 2000a) e aumentar a finura da escória (REGOURD, 1980; NUMATA *et al.*, 1986; NAKAMOTO & TOGAWA, 1995).

Quando é necessário reduzir o desprendimento inicial do calor de hidratação, altos teores de escória de alto-forno devem ser utilizados, pois a quantidade de cimento que é normalmente hidratado no início das reações é menor (GEISELER *et al.*, 1995; OSBORNE, 1999; AITCIN, 2000a).

Em estudos sobre carbonatação de concretos com escória de alto-forno, observou-se que a taxa de carbonatação é dependente do volume total de poros com raios maiores que 450\AA . Assim, quanto maior o volume de poros acima do raio crítico, mais rápida é a taxa de carbonatação (WEE *et al.*, 1999). A cura até os 7 dias de idade pode minimizar este fato, o que é confirmado por OSBORNE (1999) em estudos experimentais com concretos com mais de 50% de escória granulada de alto-forno.

MALHOTRA *et al.* (2000) encontraram profundidades de carbonatação insignificantes em concretos com diferentes materiais cimentícios, após 10 anos de exposição ao ar, para um mesmo consumo de materiais cimentícios por m^3 de concreto. Os materiais cimentícios usados foram sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, em teores que variaram de 8% a 57%.

Em estudo mais amplo, com altos teores de escória de alto-forno (até 75% do total do material cimentício), encontraram-se bons resultados para resistências à compressão, e à retração, para liberação de calor e para resistência à penetração de íons cloreto, embora o consumo de superplastificante (naftaleno sulfonado) tenha sido maior em comparação com

o concreto de referência e a trabalhabilidade tenha diminuído para relação água/materiais cimentícios abaixo de 0,30 (SIVASUNDARAM & MALHOTRA, 1992).

Quanto à reação álcali-sílica, constatou-se baixa reatividade entre cimentos de alto-forno, com agregados alcali reativos, devido à baixa alcalinidade da pasta com este tipo de cimento (REGOURD, 1980; SMOLCZYK, 1980).

No caso da resistência ao ingresso de cloretos, esta é maior com o aumento do teor de escória de alto-forno, devido à baixa permeabilidade de sua pasta (SMOLCZYK, 1980; OSBORNE, 1999; LUO *et al.*, 2002).

Cimentos com altos teores de escória de alto-forno são considerados, também, altamente resistentes a sulfatos (GEISELER *et al.*, 1995), dependendo de fatores como o regime de cura e do baixo conteúdo de alumina da escória de alto-forno. Se o conteúdo de alumina da escória de alto-forno exceder a 14%, o teor de C₃A do cimento Portland não deve passar de 10% (OSBORNE (1999).

Com relação à escória granulada de alto-forno usada como agregado miúdo, em substituição à areia, a sua composição granulométrica se apresenta dentro da faixa das areias naturais de rio, entre a zona 3 (granulometria média) e a zona 4 (granulometria grossa) da NBR 7211, mas sua estrutura porosa e textura áspera tornam o concreto menos trabalhável.

No entanto, correções na granulometria podem ser feitas, com a adição ou substituição parcial de materiais mais finos como escória moída, areia ou cinza volante como sugerido por ALEXANDRE & SEBILEAU (1988), que chegaram a uma composição mais favorável de areia reconstituída, em volume, de 70% a 80% de escória para 20% a 30% de cinzas volantes.

Estudos com argamassas, com 30% a 40% (em massa) de escória granulada, parcialmente moída, com aproximadamente 12% de finos, conseguiram bom desempenho mecânico, embora com pega relativamente lenta e com a necessidade de curas cuidadosas. Para este caso, foi alcançada uma economia de cimento da ordem de 15% a 20%.

A recomendação de alguns autores de se utilizar agregado miúdo com granulometria no lado mais graúdo do limite da recomendada pelo ACI²¹ coloca a escória granulada de alto-

²¹ American Concrete Institute.

forno dentro deste limite, sendo, portanto, adequada à utilização como agregado (NEVILLE, 1997; PICCOLI *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a).

A justificativa está no fato de que os traços de concretos com altas resistências são bastante ricos em partículas finas, devido ao alto teor de cimento e de materiais cimentícios, não sendo, então, necessário utilizar agregado miúdo fino, para melhorar a trabalhabilidade e reduzir a possibilidade de segregação. Além disso, o uso de agregado miúdo mais grosso pode levar a um pequeno decréscimo na quantidade da água necessária para uma dada trabalhabilidade, sendo, assim, vantajoso tanto do ponto de vista da resistência como do ponto de vista econômico.

Porém, para concretos com escória granulada como agregado miúdo, SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990) observaram que o consumo de água é um pouco superior ao do concreto com areia natural, fato este que não modificou a qualidade do concreto. A explicação pode estar na maior aderência pasta-agregado, devido à umidificação superficial da escória.

Os resultados de estudos realizados com a escória de alto-forno moída, como adição mineral, e de escória granulada, como agregado miúdo, oferecem respaldo para aplicação destes materiais em concretos, que podem fornecer propriedades de alto desempenho e, ao mesmo tempo, contribuir para a ecoeficiência.

3.7 TENDÊNCIAS NA TECNOLOGIA DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Com base em observações, MEHTA & MONTEIRO (1994) e AITCIN (2000a) prevêm, para os concretos de alto desempenho, a utilização de relações água/materiais cimentícios cada vez mais baixas. Relações água/materiais cimentícios de 0,25 e 0,22 já têm sido usadas, para a construção de estruturas como a ponte Confederação no Canadá e o edifício Two Union Square, em Seattle, respectivamente.

Da mesma forma, o concreto de alto desempenho de amanhã conterà, cada vez menos, clínquer Portland e, cada vez mais, materiais cimentícios suplementares ou mesmo fílers, justificado não somente por seus atrativos técnicos e econômicos, mas, também por implicações ambientais e de conservação de energia. Misturas binárias de adições minerais deverão contribuir para baixos consumos de cimentos e obtenção de propriedades comparáveis a concretos com cimento Portland (MEHTA, 1994; 1996; ISAIA, 1999).

A fabricação e o controle de qualidade do cimento Portland deverão ser mais rigorosos, para que se torne possível a obtenção de um concreto de alto desempenho com propriedades reológicas, resistências previsíveis e constantes e para temperaturas ambientes variáveis (AITCIN, 2000a).

A composição do cimento deverá conter mais C_2S e menos C_3S e, provavelmente, mais C_4AF do que C_3A . O aumento de C_3S observado nos cimentos atuais pode diminuir o tempo de desforma e possibilitar o emprego de maiores relações água/materiais cimentícios, para uma dada resistência, com reflexos negativos para a durabilidade (AITCIN, 2000a; 2000b).

Os superplastificantes serão mais puros, mais específicos e mais precisos na sua ação. Novos tipos de superplastificantes serão desenvolvidos, para atender a diferentes composições químicas do cimento, sem incompatibilidades, e usados em relação água/materiais cimentícios cada vez mais reduzidas. O aumento de eficiência dos superplastificantes resultará na redução de teores necessários para se obter a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade requeridas e trará benefícios econômicos ao custo unitário do concreto, melhorando a relação custo/benefício (AITCIN, 2000a; 2000b).

Com a melhor qualidade dos componentes do concreto, este se tornará um material com propriedades constantes, e menos sujeito a variações de qualidade do cimento e do superplastificante ou da temperatura. Haverá melhor controle da tendência à exsudação do concreto fresco, através de agregados com granulometria adequada e o desenvolvimento de calor, retração e fluência serão reduzidos (MEHTA & MONTEIRO, 1994; AITCIN, 2000a).

Como são muito poucas as aplicações em que seja absolutamente necessário o uso de concreto com altas resistências, sua maior aplicação no futuro próximo será com vistas ao atendimento do requisito de durabilidade, pois esta é a solução para que sua vida útil seja garantida, em ambientes cada vez mais agressivos.

Os concretos deverão ter características diferentes para cada aplicação, isto é, mais tecnologia com mais economia. Com relação ao seu custo, o importante deverá ser o preço de sua vida útil e não o preço de 1 m^3 . A conscientização deste fato pela indústria de concreto, pelos construtores, compradores e clientes será um grande passo em direção à maior durabilidade das estruturas, pois muitas estruturas estão mostrando sérias

deteriorações cada vez mais precocemente, contribuindo para que o custo de manutenção seja mais uma preocupação (AITCIN, 2000b).

Com o aumento do uso do concreto de alto desempenho, será impulsionada a introdução de novos conceitos e tecnologias construtivas avançadas e, com a ajuda de monitoração inteligente, será possível refinar os métodos de projetos e de previsão da vida útil das estruturas.

Novas técnicas de lançamento serão desenvolvidas, algumas já em uso como concretos autonivelantes e compactados a rolo. Protensão e pós-tensão serão cada vez mais empregadas, e com dispositivos de troca de cabos em situação de serviço. O atual estado da pesquisa tecnológica na área de novas gerações de concreto ainda não está terminada (MEHTA & MONTEIRO, 1994; AITCIN, 2000a; 2000b; KMITA, 2000).

Como, para alguns casos de concretos de altas resistências, a parte fraca é o agregado, já é possível, com concretos sem agregado graúdo ou com argamassas preparadas sob condições que associam compressão da massa ao uso de superplastificante, elevados teores de sílica ativa e cura térmica, se chegar a altos resultados de resistência. Entre estes concretos com resistências elevadas, destacam-se os concretos de pós-reativos que, hoje, já são os concretos de maior resistência e melhor desempenho no mercado e, mesmo ainda sendo muito mais caro, já existem situações em que é mais vantajoso o seu uso, como em pilares de edifícios, elementos pré-tensionados, pisos industriais, lajes esbeltas, vigas e tabuleiros de pontes, juntas sísmicas, elementos sujeitos a impacto, portas de segurança, tanques de estocagem, ancoragem para pré-tensionados, formas, entre outros (PICCOLI *et al.*, 1999; AITCIN, 2000a; 2000b; KMITA, 2000).

Cabe ressaltar que a distância que hoje separa o concreto de alto desempenho do concreto de pós reativos, devido ao estágio inicial de desenvolvimento deste último, dentro de pouco tempo já não existirá, como aconteceu entre o concreto tradicional e o concreto de alto desempenho (AITCIN, 2000a; 2000b).

Um grande progresso seguiu-se a um melhor conhecimento da microestrutura do concreto, e o desafio, agora, está no conhecimento da nanoestrutura do concreto. Mesmo sendo o concreto um material complexo, muitas descobertas e desenvolvimento ocorrerão em consequência de pesquisas ligando ciência e tecnologia (AITCIN, 2000b).

Assim, o conceito de desenvolvimento sustentável é uma política real e de interesse de todos. A indústria do cimento e de concreto deve, sem dúvida, partir para esta direção e

passarão a fazer parte das *Indústria verdes*. Com isso, o concreto de amanhã deverá ser, além de mais durável, desenvolvido para satisfazer às necessidades com o mais baixo impacto ambiental e o seu custo deverá levar em conta todo o ciclo de vida dos edifícios (AITCIN, 2000b).

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal característica do concreto de alto desempenho é sua durabilidade. Anteriormente, alta durabilidade estava relacionada com alta resistência, porém, através de observações em campo, já se sabe que a resistência não é um parâmetro seguro, para garantir baixa permeabilidade e durabilidade de concretos.

A escolha e a dosagem adequada dos materiais são fatores importantes, para se alcançar o alto desempenho e para a obtenção das propriedades desejadas do concreto (MEHTA, 1996).

A utilização, em grande escala, de adições minerais faz parte, dentre outros fatores, das tendências para o futuro do concreto, devido a razões ligadas à economia de energia e ao meio ambiente.

A escória de alto-forno, dentre outras adições minerais, é largamente utilizada com bons resultados de resistência mecânica, baixo calor de hidratação, baixa permeabilidade, alta resistência a sulfatos e à penetração de íons cloreto e bom desempenho com agregados álcali-reativos. Recomendações são feitas com relação à cura que deve ser conduzida com atenção especial, principalmente no que diz respeito à retração e à carbonatação.

Além de apresentar bons resultados nas propriedades do concreto, o fato que ajudou a difundir o uso de escória de alto-forno, como material cimentício foi a sua grande disponibilidade em vários países, sendo, também, uma solução para utilização de um subproduto industrial que, em princípio, poderia poluir o solo, mas que está contribuindo para a conservação de energia e de recursos minerais, cuja exploração gera alguma forma de agressão ao ecossistema (ISAIA, 1999).

Todos estes aspectos relativos à escória de alto-forno incentivam novas pesquisa, como a desenvolvida nesta dissertação. No capítulo 4 é apresentada a metodologia aplicada ao programa experimental e a caracterização dos materiais utilizados.

4 MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

O objetivo principal deste programa experimental é produzir um concreto, com utilização de altos teores de escória moída, em substituição ao cimento, e com utilização de escória granulada, em substituição ao agregado miúdo, avaliando as suas resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral, o teor de ar incorporado, a massa específica, a absorção, o índice de vazios, a retração e a profundidade de carbonatação.

Os materiais utilizados e suas características são apresentados no item 4.2 e os métodos de ensaios são descritos no item 4.3. O planejamento e o projeto experimental estatístico, apresentados no item 4.4, consta de 5 etapas, sendo utilizadas, em cada etapa, informações encontradas nas etapas anteriores.

Assim, na Etapa 1 foi feita a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada, através do estudo de resistência à compressão em argamassa.

A Etapa 2 teve como objetivo a seleção do tipo e do teor de aditivo superplastificante, através do estudo de consistência pelo método do *Mini-slump*, do tempo de início de pega em pasta e argamassa e da resistência à compressão em argamassa.

Na Etapa 3 foi feita a seleção do teor de Na_2O do silicato de sódio, através do método do *Mini-slump* e da resistência à compressão em argamassa.

O objetivo da Etapa 4 foi a dosagem dos concretos e confecção dos corpos de prova para seis traços.

A avaliação da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral, teor de ar incorporado, da massa específica, da absorção, do índice de vazios, da retração e da profundidade de carbonatação dos concretos foram realizados na Etapa 5.

É apresentado, no Quadro 4.1, um resumo dos ensaios realizados nas diversas etapas acima descritas, com os números de corpos-de-prova ou determinações relacionados com cada um desses ensaios.

Quadro 4.1 – Ensaios realizados e os respectivos números de corpos-de-prova ou determinações de cada um.

Ensaio	Número de corpos-de-prova					No. determ.
	50x100	100x200	150x300	75x75x300	150x150	
Resist. compr. axial	147	-	24	-	-	171
<i>Mini-slump</i>	-	-	-	-	-	151
Resist. tração comp. diam.	-	24	-	-	-	24
Tempo de pega em argamassa (penetrômetro)	-	-	-	-	12	144
Massa específica, índice de vazios e absorção	-	24	-	-	-	24
Consist. mesa queda	-	-	-	-	-	52
Retração	-	-	-	30	-	210
Carbonatação	-	60	-	-	-	1440
Dosagem concreto	-	-	-	-	-	17

4.2 Materiais utilizados

4.2.1 Aglomerantes

4.2.1.1. Cimento Portland de alto-forno (CP III-32)

O cimento Portland de alto-forno (CP III-32 RS) está de acordo com a NBR 5735/1991. Este cimento contém escória de alto-forno, originária da Companhia Siderúrgica de Tubarão, com teor de 72% de escória, determinado por dissolução seletiva, pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABNT), através do método EDTA. A análise química do cimento Portland CPIII, determinada por espectrometria de raios X, é apresentada no Quadro 4.2.

As características físicas e mecânicas, determinadas de acordo com as NBR 6474/1984, NBR 7215/1991, NBR 11579/1991, NBR 11580/1991, NBR 11581/1991 e NBR 11582/1991 da ABNT, estão mostradas no Quadro 4.3. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Quadro 4.2 - Análise Química do Cimento Portland de alto-forno CP III - RS 32, determinada por espectrometria de raios X.

Composição química		% em massa
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,07
Óxido de potássio	K ₂ O	0,30
Óxido de magnésio	MgO	5,39
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	10,19
Dióxido de silício	SiO ₂	30,00
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	tr
Trióxido de de enxofre	SO ₃	3,27
Óxido de cálcio	CaO	48,26
Óxido de titâneo	TiO ₂	0,29
Óxido de manganês	MnO	0,28
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	1,35
Óxido de estrôncio	SrO	-
Perda ao fogo	PF	0,21

Quadro 4.3 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alto-forno CP III – 32 RS

Ensaio		Resultados
Finura (NBR-11579) - Resíduo na peneira de 0,075 mm (%)		0,6
Pega (NBR-11581)	Início (h:min.)	2:55
	Fim (h:min.)	4:20
Quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal (NBR11580(g))		155
Expansibilidade (NBR-11582)	Quente (mm)	0
Massa específica (NBR-6474) (kg/m ³)		2,938
Superfície específica Blaine (NBR NM 76) (cm ² /g)		3910
Resistência à compressão axial (NBR-7215) (MPa)	3 dias	16,1
	7 dias	25,8
	28 dias	40,7

Estes dados estão de acordo com os limites estabelecidos pelas Especificações Brasileiras de da ABNT.

4.2.1.2. Cimento Portland de alto-forno (CP II E-32)

O cimento Portland de alto-forno (CP II E-32) está de acordo com a NBR 5735/1991. Este cimento contém escória de alto-forno moída, originária da Companhia Siderúrgica de Tubarão, com teor de 39%, determinado por dissolução seletiva, pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABNT), através do método EDTA. A análise química do cimento Portland – CPII, determinada por espectrometria de raios X, é apresentada no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Análise Química do Cimento Portland de alto-forno CP II E – 32, determinada por espectrometria de raios X.

Composição química		% em massa
Óxido de sódio	Na ₂ O	-
Óxido de potássio	K ₂ O	0,47
Óxido de magnésio	MgO	2,33
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	7,36
Dióxido de silício	SiO ₂	23,59
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	0,19
Trióxido de de enxofre	SO ₃	1,62
Óxido de cálcio	CaO	55,90
Óxido de titâneo	TiO ₂	0,18
Óxido de manganês	MnO	0,23
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,47
Óxido de estrôncio	SrO	tr
Perda ao fogo	PF	4,66

As características físicas e mecânicas, determinadas de acordo com as NBR 6474/1984, NBR 7215/1991, NBR 11579/1991, NBR 11580/1991, NBR 11581/1991 e NBR 11582/1991 da ABNT, estão mostradas no Quadro 4.5. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Quadro 4.5 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alto-forno CP II E-32

Ensaio		Resultados
Finura (NBR-11579) - Resíduo na peneira de 0,075 mm (%)		3,3
Pega (NBR-11581)	Início (h:min.)	2:45
	Fim (h:min.)	4:05
Quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal (NBR11580)(g)		144
Expansibilidade (NBR-11582)	Quente (mm)	1
Massa específica (NBR-6474) (kg/m ³)		3,015
Superfície específica Blaine (NBR NM 76) (cm ² /g)		3330
Resistência à compressão axial (NBR-7215) (MPa)	3 dias	19,41
	7 dias	25,39
	28 dias	35,28

Estes dados estão de acordo com os limites estabelecidos pelas Especificações Brasileiras de da ABNT.

4.2.1.3. Escória de alto-forno moída

A escória granulada de alto-forno moída empregada é proveniente da CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão), obtida por resfriamento brusco e moída em moinho vertical de rolos.

A composição química da escória granulada de alto-forno foi fornecida pela CST, a partir de valores médios por um período de 1 mês do ano de 2000 está apresentada no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Composição química da escória granulada de alto-forno da Companhia Siderúrgica de Tubarão.

Composição Química	% Escória (média)
CaO	41,004
SiO ₂	34,199
Al ₂ O ₃	12,264
MgO	8,562
S	1,216
TiO	0,543
FeO	0,395

A relação CaO/SiO₂ é igual a 1,20, o que classifica a escória como básica, segundo as referências consultadas (SMOLCZYK, 1980; REGOURD, 1980; SILVA, FLORINDO & ALMEIDA, 1991; BIJEN, 1996).

Os teores dos compostos químicos da escória de alto forno usada neste estudo estão dentro da faixa de variação dos teores indicados na literatura (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1990; CINCOTTO, BATTAGIN & AGOPYAN, 1992; ESPER, 1993).

As características físicas da escória de alto-forno, grau de vitrificação e índice de basicidade apresentadas no Quadro 4.7 foram fornecidas pela CST, em junho de 2000, e a determinação da superfície específica Blaine foi realizada pela ABCP.

Quadro 4.7 - Características físicas da escória granulada de alto-forno

Grau de vitrificação (%)	97
Índice de basicidade	1,64
Superfície específica Blaine (NBR NM 76) (cm ² /g)	5180

O grau de vitrificação de 97% classifica a escória em estudo como de boa qualidade, em termos do teor de vidro, com base em resultados de vários pesquisadores (SILVA, FLORINDO & ALMEIDA, 1991).

A Figura 4.1 apresenta o difratograma de raios X da escória estudada. A difração de raio X (Cu α) não revelou a presença de produtos cristalinos, apenas o halo vítreo característico das escórias de alto-forno.

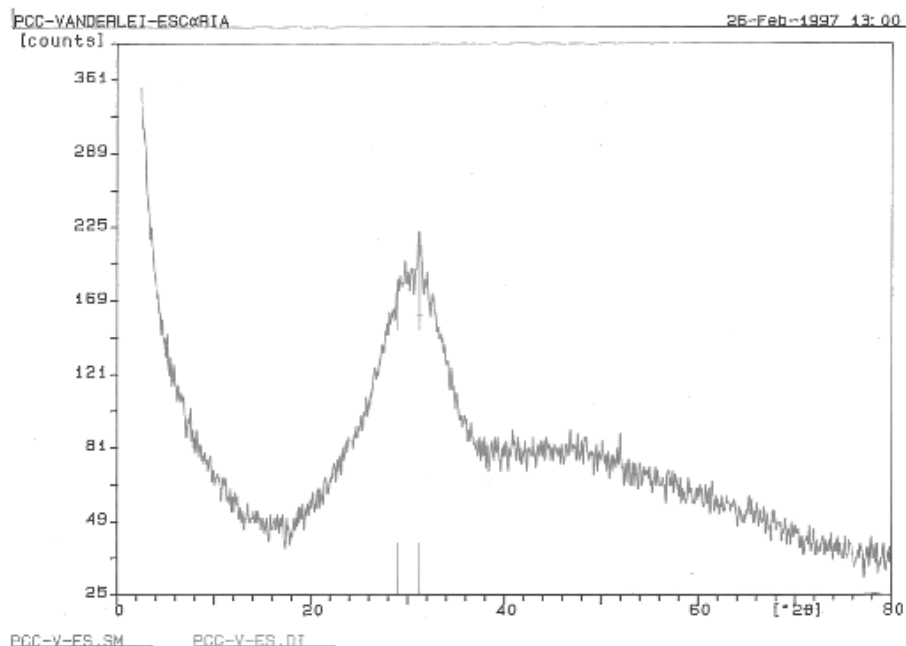


Figura 4.1 – Difratoograma de raios X da escória de alto-forno.

A Figura 4.2 apresenta micrografias da escória de alto-forno moída, obtida com a microscopia ótica por luz refletida. Estas micrografias foram realizadas na ABCP, Associação Brasileira de cimento Portland, que não observou diferenças morfológicas entre esta amostra e outras já realizadas anteriormente.

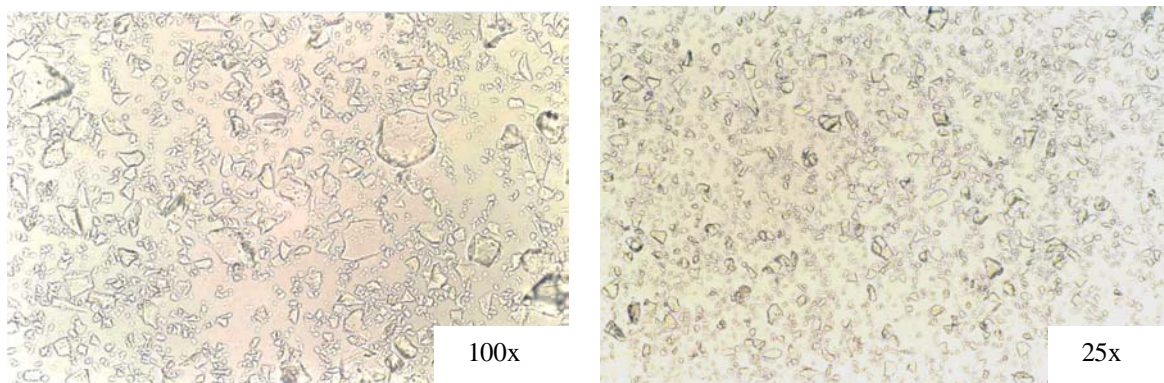


Figura 4.2 - Micrografias da escória de alto-forno moída (microscopia ótica por luz refletida).

4.2.2 Agregado miúdo

Os materiais utilizados como agregados miúdos foram dois tipos de escória granulada de alto-forno e uma areia encontrada na região da Grande Vitória, sendo, suas características, apresentados nos itens 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3.

4.2.2.1. Escória de alto-forno granulada A

A escória granulada de alto-forno é originária da CST e não sofreu nenhum tratamento após a sua granulação. Suas características físicas foram determinadas, de acordo com as normas para agregado miúdo NBR 7217/1987, NBR 7218/1987, NBR 7219/1987, NBR 7251/1982, NBR 9776/1987, NBR 9777/1987 e NM49/2001 da ABNT e são apresentadas no Quadro 4.8.

O módulo de finura de 2,71 poderia ser considerado como alto, porém, segundo vários autores (NEVILLE, 1997; PICCOLI *et al*, 1999; AITCIN, 2000), para concretos de alto desempenho, o agregado miúdo a ser utilizado deve apresentar um módulo de finura de 2,7 a 3,0, o que coloca a escória granulada de alto-forno utilizada neste trabalho como agregado miúdo adequado à produção de concreto de alto-desempenho.

Quadro 4.8 - Granulometria da Escória Granulada de Alto-Forno A

Composição granulométrica (NBR-7217)		
Peneiras	Médias	
Abertura de Malha (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,8	-	-
2,4	1	1
1,2	16	17
0,6	46	63
0,3	29	92
0,15	6	98
Fundo	2	-
Total	100	-

Módulo de Finura (NBR-7217): 2,71
 Dimensão máxima característica (NBR-7217): 2,4mm
 Massa específica (Frasco de Chapman - NBR-9776): 2,66kg/dm³
 Massa unitária no estado solto (NBR-7251): 1,302kg/dm³
 Teor de materiais pulverulentos (NBR-7219): 0,78%
 Impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo (NM49/2001): cor clara
 Teor de argila em torrões e partículas friáveis (NBR-7218): 0,31%

A Figura 4.3 apresenta a curva granulométrica da escória granulada A e as curvas com os limites granulométricos da zona 3, prescritas na NBR 7211/1983. Observa-se que a granulometria da escória A se encontra dentro dos limites da zona 3 sendo, portanto, classificada segundo a NBR 7211/1983, como agregado miúdo médio.

A massa específica da escória A está bastante próxima de valores de agregados miúdos encontrados usualmente. A massa unitária no estado solto é um pouco menor do que valores usuais de areias, devido à forma angulosa dos grãos da escória.

Os índices do teor de argila em torrões e partículas friáveis, de materiais pulverulentos e a avaliação de impurezas orgânicas húmicas atendem às prescrições da NBR 7211/1983.

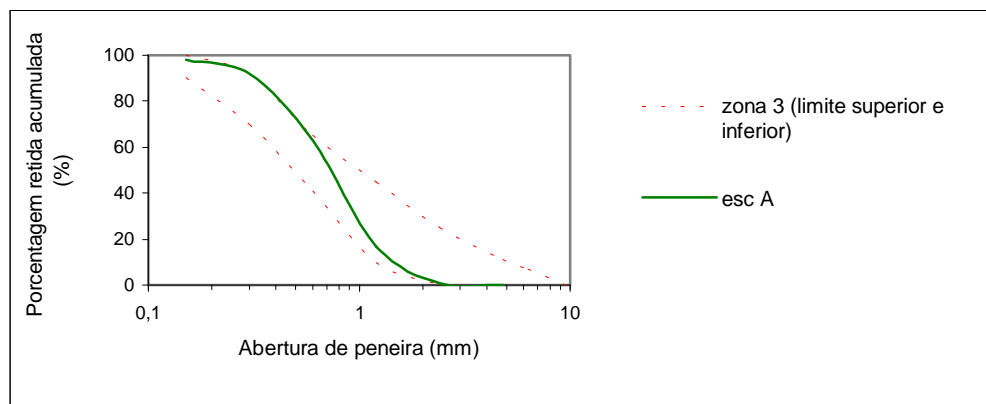


Figura 4.3 – Curva granulométrica da escória A e as curvas dos limites granulométricos da zona 3 da NBR 7211.

4.2.2.2. Escória de alto-forno granulada B

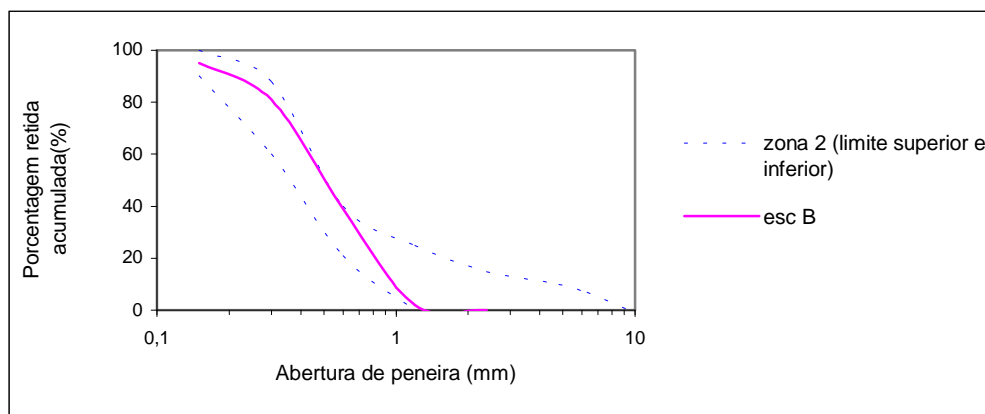
A escória granulada de alto-forno B também é originária da CST, porém sofreu um processo de secagem em forno rotativo e, portanto, apresenta variação na forma dos grãos e em sua granulometria, em relação ao estado original. Suas características físicas foram determinadas de acordo com as normas para agregado miúdo NBR 7217/1987, 7218/1987, 7219/1987, 7251/1982, 9776/1987, 9777/1987 e NM49/2001 da ABNT e são apresentadas no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Ensaio de caracterização da escória granulada de alto-forno B

Composição granulométrica (NBR-7217)		
Peneiras	Médias	
Abertura de Malha (mm)	% Retida	% R. Acumulada
4,8	-	-
2,4	0	0
1,2	2	2
0,6	37	39
0,3	42	81
0,15	14	95
Fundo	5	-
Total	100	-

Módulo de Finura (NBR-7217): 2,17
 Dimensão máxima característica (NBR-7217): 1,2mm
 Massa específica (Frasco de Chapman - NBR-9776): 2,73kg/dm³
 Massa unitária no estado solto (NBR-7251): 1,413kg/dm³
 Teor de materiais pulverulentos (NBR-7219): 1,72%
 Impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo (NM49/2001): cor clara
 Teor de argila em torrões e partículas friáveis (NBR-7218): 0,1%

A Figura 4.4 apresenta a curva granulométrica da escória granulada B e as curvas com os limites granulométricos da zona 2 prescrito na NBR 7211/1983. Observa-se que a granulometria da escória B se encontra dentro dos limites da zona 2 sendo, portanto classificada, segundo a NBR 7211/1983, como agregado miúdo fino.

**Figura 4.4** – Curvas granulométricas das escórias B e as curvas dos limites granulométricos da zona 2 da NBR 7211.

Os índices do teor de argila em torrões e partículas friáveis, de materiais pulverulentos e a avaliação de impurezas orgânicas húmicas atendem às prescrições da NBR 7211/1983.

A massa específica da escória B está bastante próxima de valores de agregados miúdos encontrados usualmente. A massa unitária no estado solto é um pouco menor do que valores usuais de areias, pela forma angulosa dos grãos da escória, mas é um pouco maior do que a massa unitária da escória granulada A, pois o processo de secagem sofrido pela escória granulada B diminuiu esta angulosidade.

A Figura 4.5 mostra as micrografias das escórias granuladas A e B feitas na ABCP. As micrografias à esquerda, Figura 4.5a, se referem à escória granulada A e as da direita, Figura 4.5b, à escória granulada B. Os grãos da escória A têm forma mais angulosa e, na Figura 4.5a, aparecem alguns grãos em forma de agulhas. Pode-se observar que os grãos da escória B são mais arredondados, devido à secagem em forno rotativo que favorece a quebra das arestas.

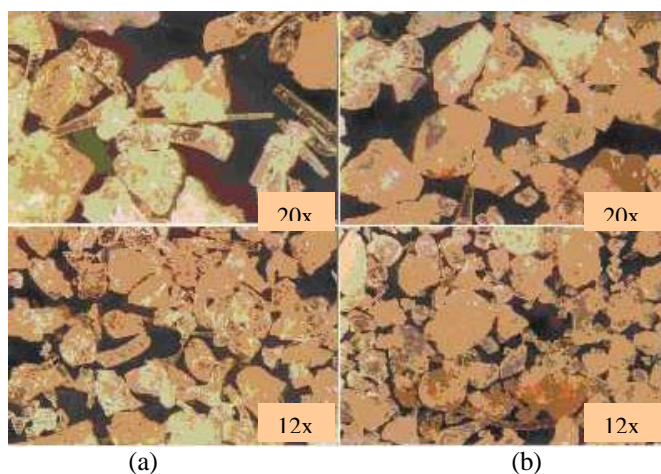


Figura 4.5 – Micrografias da escória de alto-forno granulada: (a) escória granulada A e (b) escória granulada B.

4.2.2.3. Areia

A areia empregada é de natureza quartzosa, de depósitos naturais da região da grande Vitória. Suas características físicas foram determinadas de acordo com as normas para agregado miúdo NBR 7217/1987, NBR 7218/1987, NBR 7219/1987, NBR 7251/1982, NBR 9776/1987, NBR 9777/1987 e NM49/2001 da ABNT, e são apresentadas no Quadro 4.10.

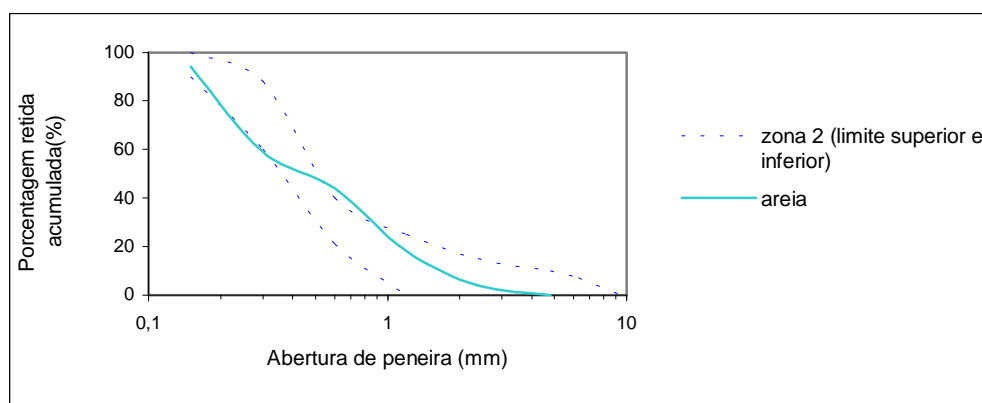
Os índices do teor de argila em torrões e partículas friáveis, de materiais pulverulentos e a avaliação de impurezas orgânicas húmicas atendem às prescrições da NBR 7211/1983.

Quadro 4.10 – Ensaio de caracterização da areia

Composição granulométrica (NBR-7217)		
Peneiras	Médias	
Abertura de Malha (mm)	% Retida	% R. Acumulada
4,8	0	0
2,4	4	4
1,2	14	18
0,6	26	44
0,3	15	59
0,15	35	94
Fundo	6	-
Total	100	-

Módulo de Finura (NBR-7217): 2,19
 Dimensão máxima característica (NBR-7217): 2,4mm
 Massa específica (Frasco de Chapman - NBR-9776): 2,642 kg/dm³
 Massa unitária no estado solto (NBR-7251): 1,616kg/dm³
 Teor de materiais pulverulentos (NBR-7219): 0,485%
 Impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo (NM49/2001): cor clara
 Teor de argila em torrões e partículas friáveis (NBR-7218): 0,01%

A Figura 4.6 apresenta a curva granulométrica da areia e as curvas com os limites granulométricos da zona 2, prescritos na NBR 7211/1983. Observa-se que a granulometria da areia se encontra quase que totalmente dentro dos limites da zona 2 sendo, portanto classificada, segundo a NBR 7211/1983, como agregado miúdo fino.

**Figura 4.6** – Curva granulométrica da areia e as curvas dos limites granulométricos da zonas 2 da NBR 7211.

4.2.3 Agregado Graúdo

4.2.3.1. Pedra Britada nº 0

A brita 0 empregada é da região da Grande Vitória e de natureza gnáissica. Suas características físicas foram determinadas, de acordo com as normas da NBR 7217/1987, 7218/1987, 7219/1987, 7251/1982, 9937/1987 e NBR NM51/2001 da ABNT, e são apresentadas no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 - Granulometria da Pedra Britada nº 0 (NBR-7217)

Peneiras	Médias	
	% Retida	% R. Acumulada
19	-	-
12,5	1	1
9,5	26	27
6,3	35	62
4,8	21	83
2,4	11	94
1,2	2	96
0,6	1	97
0,3	1	98
0,15	1	99
< 0,15	1	100
Totais	100	-

Dimensão máxima característica (NBR-7217): 12,50mm
Módulo de Finura (NBR-7217): 5,94
Massa específica (NBR-9937): 2,60kg/ dm³
Massa unitária no estado solto (NBR-7251): 1,362kg/ dm³
Teor de materiais pulverulentos (NBR-7219): 1,42%
Teor de argila e partículas friáveis (NBR-7218): 0,31%
Abrasão Los Angeles (NBR NM51/2001): 49,2%

As características físicas da brita 0 atendem às especificações das normas brasileiras.

A Figura 4.7 apresenta a curva granulométrica da brita 0.

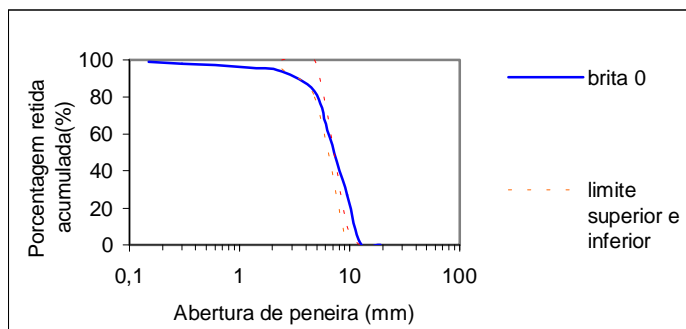


Figura 4.7 – Curva granulométrica da brita 0 e as curvas dos limites granulométricos segundo a NBR 7211.

4.2.3.2. Pedra Britada nº 1

A brita 1 empregada é da região da Grande Vitória e de natureza gnáissica. Suas características físicas foram determinadas, de acordo com as normas da NBR 7217/1987, NBR 7218/1987, NBR 7219/1987, NBR 7251/1982, NBR 9937/1987 e NBR NM51/2001 da ABNT, e são apresentadas no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Granulometria da Pedra Britada nº 1 (NBR-7217):

Peneiras	Médias	
	Abertura de Malha (mm)	% Retida
19	11	11
12,5	73	84
9,5	14	98
6,3	2	100
4,8	-	100
2,4	-	100
1,2	-	100
0,6	-	100
0,3	-	100
0,15	-	100
< 0,15	-	-
Totais	100	-
Dimensão máxima característica (NBR-7217): 25,00mm		
Módulo de Finura (NBR-7217): 7,09		
Massa específica (NBR-9937): 2,61 kg/ dm ³		
Massa unitária no estado solto (NBR-7251): 1,43kg/ dm ³		
Teor de materiais pulverulentos (NBR-7219): 0,37%		
Teor de argila e partículas friáveis (NBR-7218): 0,18%		
Abrasão Los Angeles (NBR NM51/2001): 49,3%		

As características físicas da brita 1 atendem às especificações das normas brasileiras.

A Figura 4.8 apresenta a curva granulométrica da brita 1.

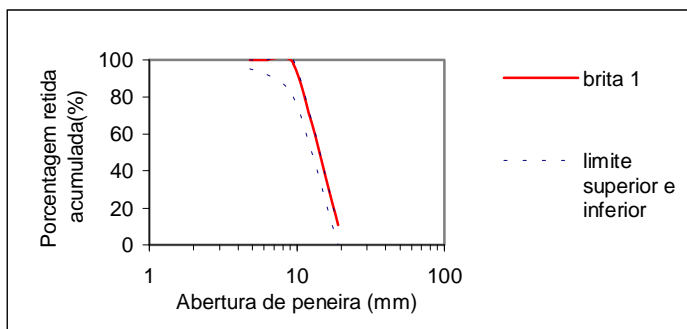


Figura 4.8 – Curva granulométrica da brita 1 e as curvas dos limites granulométricos segundo a NBR 7211.

4.2.4 Aditivo superplastificante

Como o objetivo desta dissertação foi produzir um concreto de alto desempenho, foi necessário empregar uma relação água/materiais cimentícios muito baixa. Assim, um dos meios de garantir a consistência necessária foi a utilização de aditivos superplastificantes.

Para este estudo, foram selecionados 4 (quatro) aditivos superplastificantes, de mesma marca e com princípios ativos diferentes. Estes aditivos se apresentam sob a forma líquida.

Para se definir o aditivo a ser utilizado no concreto foram realizados ensaios de compatibilidade cimento x aditivo. As principais características dos aditivos superplastificantes são mostradas no Quadro 4.13, a partir de dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 4.13 - Principais características dos aditivos superplastificantes

Designação	Designação genérica		Massa específica (g/m ³)	Teor de sólidos (%)	pH	Densidade (g/cm ³)	Preço R\$/kg de sólido
	Principais compostos	Cor					
ADT 1	Naftaleno sulfonado	Castanho	1,195	38,72	9,81	1,195	10,05
ADT 2	Lignossulfato, Naftaleno sulfonado e Melamina sulfonada	Castanho	1,213	36,8	8,58	1,213	17,74
ADT 3	Policarboxilato	Âmbar	1,09	40,1	7,36	1,09	53,54
ADT 4	Melamina sulfonada	Âmbar	1,261	31,0	9,94	1,261	21,03

4.2.5 Ativadores químicos

4.2.5.1. Silicato de sódio

O ativador utilizado neste trabalho foi o silicato de sódio alcalino. Tem aspecto de um líquido viscoso, inodoro, incolor ou levemente opalescente e suas propriedades físicas e químicas são apresentadas no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 – Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio.

Item analisado	Parâmetros encontrados
% Na ₂ O	18,196
% SiO ₂	29,584
Sólidos totais	47,780
Umidade	52,220
Módulo de sílica (SiO ₂ / Na ₂ O)	1,62
Densidade a 25° C (g/l)	1,605
Viscosidade a 25 ° C (cP)	830
Graus ° Be	54,5

4.2.5.2. Cal hidratada

A cal hidratada utilizada neste estudo é do tipo CHI e suas características físicas estão no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 – Características físicas da cal hidratada

Determinação	Resultado (g)	Método de ensaio
Material retido na peneira no. 30	0,01	NBR 9289
Material retido na peneira no. 200	5,26	NBR 9289

4.3 Métodos de ensaios

4.3.1 Ensaios em pasta

4.3.1.1. Método do mini-*slump*

O método do mini-*slump* foi utilizado neste estudo, por permitir fazer uma primeira escolha do tipo e teor de aditivo de maior ação fluidificante. Este método se baseia no estudo reológico de pastas fluidas, fornecendo dados para a escolha do aditivo mais adequado ao tipo de material cimentício estudado.

É um ensaio relativamente rápido, pois utiliza quantidades pequenas de materiais, menos tempo e energia do que ensaios em concreto, além de ser mais fácil de ser realizado e repetido (SPONHOLZ; PRUDÊNCIO & STEIN, 1998; AITCIN, 2000; PINTO JR., PAULON & BIZ, 2000; GAVA *et al.*, 2001).

Este método foi usado nos estudos em pasta quando da seleção do tipo e do teor do aditivo superplastificante (Etapa 2) e para a seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3).

No quadro 4.16 são apresentadas informações sobre os traço utilizados nos ensaios de *mini-slump*. O cimento utilizado foi CP III-32 RS.

Quadro 4.16 – Informações sobre os traços utilizados nos ensaios de *mini-slump*.

	Traço(cimento : escória moída)	Relação água/materiais cimentícios	Teor de cal hidratada (%)	Tipo de aditivo superplastificante
Seleção do tipo e do teor do aditivo superplastificante	1 : 1	0,30	-	ADT 1, ADT 2, ADT 3 e ADT 4
Seleção do teor de Na ₂ O do silicato de sódio	1 : 1	0,30	5	ADT 4

Os ensaios em pasta através do método do *mini-slump* para a seleção tipo e do teor de superplastificante (Etapa 2) foram realizados com os aditivos superplastificante, variando os teores de sólidos, buscando uma manutenção de consistência de 180 minutos.

Para a seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3), os ensaios em pasta, realizados através do método do *mini-slump*, utilizaram diferentes teores de Na₂O do silicato de sódio em adição à escória moída. O teor de aditivo superplastificante foi, também variado, para cada teor de silicato estudado. A água do silicato de sódio e do aditivo superplastificante foram descontadas da água da mistura.

Os equipamentos necessários para realização do ensaio são:

- molde tronco-cônico em acrílico transparente, aberto nas duas extremidades, tendo a extremidade inferior o diâmetro de 40mm, a superior com diâmetro de 20mm e altura de 60mm, mostrado na Figura 4.9.
- misturador mecânico de acordo com a NBR 7215/1996.
- placa de vidro com dimensões mínimas de 500 x 700mm, com 5mm de espessura, e, sob ela, uma folha de papel milimetrado, conforme Figura 4.9. A placa de vidro deve ter superfície plana, lisa e nivelada.

A temperatura do ambiente para a realização do ensaio foi de 24 ± 2 °C e a umidade relativa em torno de 60%.

O procedimento de mistura do ensaio, pelo método do *mini-slump*, foi baseado na norma NBR 11580/1991 (Determinação da água da pasta de consistência normal), sendo separados, aproximadamente, 10% de água, para ser adicionada junto com o superplastificante, ao final da mistura.

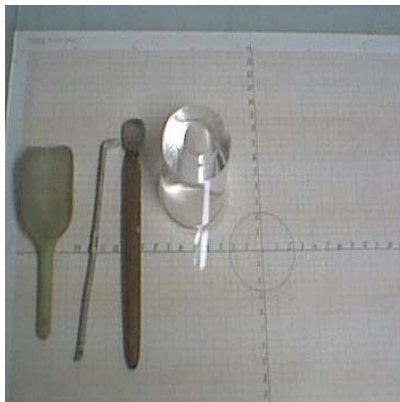


Figura 4.9 – Placa de vidro sobre papel milimetrado, cone tronco-cônico em acrílico transparente e equipamentos auxiliares.

A colocação do aditivo superplastificante, ao final da mistura, foi recomendada por autores que tiveram maior efeito, quando o aditivo era adicionado pelo menos 2 minutos após o início da mistura (GAVA *et al.*, 2001), sendo acrescentada uma mistura por mais 60 segundos, antes da primeira medida de fluidez.

O molde e a placa de vidro eram limpos com álcool, sendo o molde tronco-cônico posicionado sobre o vidro no centro dos eixos ortogonais marcados no papel milimetrado, preenchido com o material e adensadas com auxílio de bastão metálico, quando necessário.

A pasta excedente no topo do molde era removida com espátula e, em seguida, o tronco de cone era levantado com movimento suave, na vertical, enquanto a pasta escoava sobre a placa de vidro.

Trinta segundos após a retirada do tronco de cone eram medidos dois diâmetros nas direções ortogonais demarcadas no papel milimetrado para, então, efetuar o cálculo da área de espalhamento da pasta. A pasta era recolhida com a espátula e recolocada na cuba de aço inoxidável, coberta por pano úmido para evitar evaporação, e deixada em descanso até a próxima determinação.

A Figura 4.10 mostra algumas determinações de espalhamento sobre a placa de vidro.

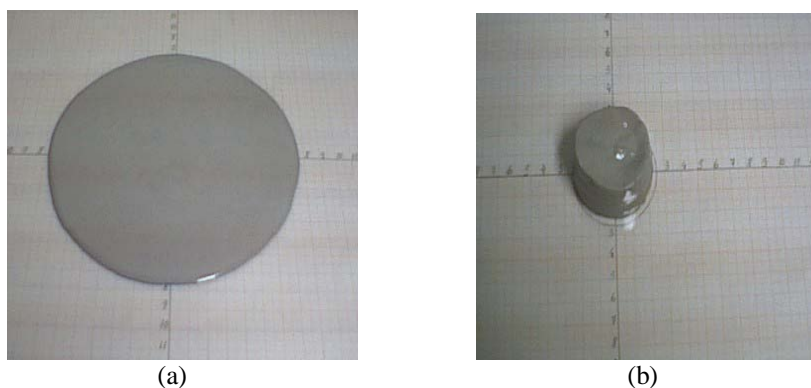


Figura 4.10 – (a) Medida de espalhamento sobre a placa de vidro e (b) uma medida sem espalhamento.

Novas medidas eram feitas a cada 15 ou 30 minutos (dependendo do aspecto ainda muito fluido ou não da pasta), sendo a pasta remisturada por 60 segundos antes de cada medida.

Este procedimento era repetido até que a mistura não apresentasse espalhamento ou até o prazo previsto para avaliação da fluidez que, neste caso, foi estipulado em 180 minutos.

A fluidez de pastas avaliadas pelo Método do Mini-*Slump* é calculada como a área do círculo, utilizando a média entre as duas medidas ortogonais dos diâmetros medidos no ensaio, expressa em cm², com aproximação de 0,1cm².

4.3.1.2. Tempo de início de pega de pasta

O ensaio para determinação de pega em pasta é recomendado por vários autores, pois muitos aditivos, que proporcionam boa fluidificação dos concretos, podem retardar significativamente sua pega e endurecimento (SPONHOZ, PRUDÊNCIO & STEIN, 1998). Estes ensaios foram realizados segundo a NBR 11581/1991 (Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega).

Assim, foi medido o tempo de início de pega nos estudos em pasta quando da seleção do tipo e do teor do aditivo superplastificante (Etapa 2). No quadro 4.17 são apresentados as informações sobre o traço utilizado nestes ensaios. O cimento utilizado foi CP III-32 RS.

Quadro 4.17 - Informações utilizados nos ensaios para medir o tempo de início de pega em pasta.

	Traço(cimento : escória moída)	Relação água/materiais cimentícios	Tipo de aditivo superplastificante
Seleção do tipo e do teor do aditivo superplastificante	1 : 1	0,30	ADT 1, ADT 2, ADT 3 e ADT 4

4.3.2 Ensaios em argamassa

4.3.2.1. Consistência na mesa de queda

Os ensaios de consistência na mesa de queda foram realizados de acordo com a metodologia descrita no Anexo B da NBR 7215/1996.

Para a seleção do tipo e do teor de escória moída em substituição à escória granulada (Etapa 1) as argamassas foram confeccionadas com o traço 1:3 (cimento : escória granulada), em massa, materiais secos, e a relação água/cimento igual a 0,55.

O traço 1:3 foi adotado por ser o traço usado na determinação de resistência à compressão, NBR 7215/1996²² e a relação água/cimento igual a 0,55 foi adotada por ser um pouco mais alta do que a relação 0,48 utilizada na mesma norma, considerada baixa em decorrência do aumento da quantidade de finos quando da utilização de escória moída em substituição à escória granulada e pelo fato da granulometria e da forma dos grãos das escórias granuladas serem muito diferentes da areia normal brasileira, que resulta em maior demanda de água.

Foram confeccionados três traços de Argamassa como referência, (1, 2 e 3) e mais cinco traços de Argamassa, com diferentes teores de escória moída em substituição à escória granulada (5, 6, 7, 8 e 9) para cada tipo de escória EA e EB. Os traços das Argamassas são mostrados no quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Informações sobre os traços de argamassa utilizado tanto para a escória granulada EA, quanto para a escória EB; relação água/cimento=0,55.

Argamassa	cimento	agregado miúdo				OBS.
		esc. moída	escória granulada	areia	teor esc. moída*(%)	
1	1	-	-	3	0	Areia normal (NBR 7215)
2	1	-	3,0	-	0	Esc. granulada com granulometria natural
3	1	-	3,0	-	0	Esc. granulada com granulometria da areia normal
5	1	0,3	2,7	-	10	Esc. granulada com granulometria natural
6	1	0,5	2,5	-	17	Esc. granulada com granulometria natural
7	1	0,7	2,3	-	23	Esc. granulada com granulometria natural
8	1	1,0	2,0	-	33	Esc. granulada com granulometria natural
9	1	1,67	1,33	-	56	Esc. granulada com granulometria natural

* teor de escória moída em relação ao total de agregado miúdo

Para a seleção do tipo e do teor de superplastificante (Etapa 2) os ensaios de consistência na mesa de queda foram realizados com as Argamassas A, B e C, cujos traços são apresentados no Quadro 4.19. A relação água/materiais cimentícios igual a 0,28 utilizada, resultou do fato de se considerar o teor de escória moída selecionada na Etapa 1 também, como material cimentício.

Foram utilizados 4 tipos de aditivos superplastificantes, ADT 1, ADT 2, ADT 3 e ADT 4 com teores que proporcionaram uma consistência na mesa de queda de 200±10mm. Este

²² a norma NBR-7215/1996 referente a ensaios de determinação de resistência à compressão de cimento Portland utiliza como padrão a areia do Rio Tietê com granulometria compreendida em 4 faixas, sendo que cada faixa contém 25% de material, conforme especificação da NBR7214.

valor de consistência, encontrado em ensaios preliminares, foi adequado para moldagem dos corpos-de-prova.

Quadro 4.19 – Traços de argamassa utilizados nos ensaios de consistência na mesa de queda, para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2).

Traço	Traço (cimento : esc. moída : escória gran.)
A	1 : 1 : 2
B	1 : 1 : 2,7
C	1 : 1 : 2,4

4.3.2.2. Resistência à compressão axial

O método de ensaio e as condições de cura para os corpos-de-prova de argamassas seguiram a NBR 7215/1996, isto é, foram conservados em câmara úmida até a desmoldagem (entre 20 e 24 h), e, até a data de rompimento, foram conservados em tanque de água saturada de cal em câmara úmida.

Os corpos-de-prova de argamassa foram confeccionados com 50mm de diâmetro e 100mm de altura e ensaiados nas idades de 7 e 28 dias. Para cada uma das idades foram moldados 3 (três) corpos-de-prova de cada mistura, tendo sido este número definido pela análise estatística.

Os ensaios de resistência à compressão em argamassa para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1) foram realizados com o traço 1:3 (cimento : escória granulada), em massa, materiais secos, e a relação água/cimento igual a 0,55. Os ensaios foram realizados para os traços apresentados no Quadro 4.20, para cada tipo de escória A e B.

Quadro 4.20 – Traços de argamassas utilizados nos ensaios de resistência à compressão para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1), tanto para a escória granulada EA, quanto para a escória EB.

traço	cimento	agregado miúdo			
		escória moída	escória granulada	areia	teor esc. moída* (%)
1	1	-	-	3	0
2	1	-	3,0	-	0
3	1	-	3,0	-	0
5	1	0,3	2,7	-	10
6	1	0,5	2,5	-	17
7	1	0,7	2,3	-	23
8	1	1,0	2,0	-	33
9	1	1,67	1,33	-	56

Os ensaios de resistência à compressão em argamassa para a seleção do tipo e do teor de superplastificante (Etapa 2) foram realizados, para o traço denominado Argamassa A, determinado no estudo de seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1) e para outros dois traços, Argamassa B e C, que variaram somente o teor de agregado miúdo. A relação água/materiais cimentícios utilizada foi igual a 0,28.

Em função desses teores de agregado miúdo, variaram-se os teores adotados de escória moída em substituição à escória granulada, sobre o total de agregado miúdo. Os ensaios foram realizados utilizando os aditivos superplastificantes ADT 1, ADT 2, ADT 3 e ADT 4 com teores de aditivo superplastificante que proporcionou uma consistência na mesa de queda de 200 ± 10 mm. A água do aditivo superplastificante foi descontada da água de amassamento.

Estes traços são apresentados no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Traços de Argamassa A, B e C (em massa, materiais secos) e teores adotados de escória moída em substituição à escória granulada, sobre total de agregado miúdo.

Argamassa	cimento : esc. moída : escória granulada (em massa, materiais secos)	teores de esc. moída em substituição à esc. granulada* sobre total de agregado (%)
A	1 : 1 : 2	33
B	1 : 1 : 2,7 ou 1 : (0,7 : 0,3) : 2,7	10
C	1 : 1 : 2,4 ou 1 : (0,4 : 0,6) : 2,4	20

* Do total de escória moída, uma parcela é considerada como agregado miúdo, e o restante é considerada somente como adição ao cimento

Os ensaios de resistência à compressão em argamassa para a seleção de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3) foram realizados utilizando o traço B com relação água/materiais cimentícios igual a 0,30, pois com o valor de 0,28 adotado, inicialmente a pasta se apresentou muito seca, devido ao uso do silicato de sódio, mesmo com a utilização de teores elevados de superplastificantes.

Os ensaios foram realizados com a Argamassa B, definida no estudo de seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2). O agregado miúdo utilizado nesta etapa foi constituído de 72% de escória moída e 28% de areia, composição esta encontrada nos estudos de dosagem do concreto realizados em paralelo. O Quadro 4.22 apresenta o traço da Argamassa B utilizada neste estudo.

Quadro 4.22 – Traço da Argamassa B utilizada nos ensaios de resistência à compressão para os estudos de seleção de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3).

Traço(cimento : escória moída : agregado miúdo)	Relação água/materiais cimentícios	Teor de cal hidratada (%)	Tipo de aditivo superplastificante
1 : 1 : 2,7	0,30	5	ADT 4

O teor de silicato de sódio variou de 2 a 4% e o teor de sólidos do aditivo superplastificante ADT4 variou de 0,18 a 5%. A água do silicato de sódio e do aditivo superplastificante foram descontadas da água da mistura.

Nos procedimentos de mistura foram feitas algumas adaptações quanto à ordem de colocação dos materiais, devido ao uso de aditivos superplastificantes e de silicato de sódio.

No estudo para definição do tipo e teor de superplastificante (Etapa2), aproximadamente, 10% da água foi acrescentada ao final da mistura com o aditivo superplastificante, com o misturador em movimento rápido por mais 60 segundos.

No estudo para definição do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa3), o aditivo foi acrescentado à água no início da mistura e o silicato de sódio ao final, com aproximadamente 10% da água, sendo procedida uma mistura em movimento rápido por mais 60 segundos.

O adensamento dos corpos-de-prova do programa experimental em argamassa foi manual para as misturas para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada (Etapa 1) e para as misturas na seleção do tipo e teor de superplastificante (Etapa 2) e em mesa vibratória, para a definição do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3). A definição por adensamento manual ou mecânico foi justificada pelas consistências e velocidade de pega e endurecimento das diferentes misturas.

4.3.2.3. Tempo de pega de argamassa

O método de ensaio adotado para o ensaio de tempo de pega em argamassa foi a NBR 9832/1992 (Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração), utilizando-se um penetrômetro.

Segundo este método, o tempo de início de pega é medido pelo tempo decorrido, após o contato inicial do cimento com a água de amassamento, para uma argamassa atingir resistência à penetração igual a 3,4 MPa.

A preparação das argamassas foi feita segundo a NBR 7215/1996. A argamassa foi colocada em recipiente indeformável, confeccionado com material não absorvente e quimicamente inerte, nas dimensões prescritas na norma NBR 9832/1992.

O aparelho para aplicação da força é constituído por dispositivo de reação com capacidade para 500 N, tendo subdivisões para deformação equivalente a 10 N, agulha de seção circular de 3,2 mm de diâmetro, dotado de referência em baixo relevo lateral, que indica a penetração correspondente a 25 mm, tendo sido previamente calibrado.

Os ensaios de início de pega de argamassa foram realizados com a Argamassa B, definida nos resultados de resistência à compressão na seqüência dos estudos para a seleção do tipo e do teor de aditivo superplastificante (Etapa 2), com os ADT2, ADT3 e ADT 4. Os dados da Argamassa B estão apresentados no Quadro 4.23.

Quadro 4.23 – Traços de argamassa utilizados nos ensaios de início de pega em argamassa através do penetrômetro e dados complementares.

Traço(cimento : escória moída : agregado miúdo)	Relação água/materiais cimentícios	Tipo de aditivo superplastificante
1 : 1 : 2,7	0,28	ADT2, ADT3 e ADT 4

A Figura 4.11 mostra duas amostras de Argamassa B para cada aditivo ADT 2, ADT 3 e ADT 4, para o ensaio de resistência à penetração.



Figura 4.11 – Amostras de argamassas com ADT2, ADT3 e ADT4 para o ensaio de início de pega, através da resistência à penetração com utilização de penetrômetro.

4.3.3 Dosagem do concreto

4.3.3.1. Concreto com escória

A dosagem do concreto baseou-se no método experimental, com adequação da consistência do concreto fresco, para o nível de resistência pretendido. Para isto, foram adotados procedimentos recomendados por AITCIN (2000), para o proporcionamento de concreto de elevado desempenho.

O cimento utilizado foi o cimento CP III-32 RS, que tem 72% de escória moída, e adição de 100% de escória moída em adição ao cimento, perfazendo um total de 86% de escória moída sobre o total de material cimentício.

O aditivo superplastificante ADT 4, à base de melamina sulfonada, utilizado na dosagem do concreto, foi definido nos estudos em pasta e argamassa (itens 4.3.1 e 4.3.2). Em alguns testes foi utilizado o ADT 3, à base de policarboxilato para uma comparação da influência na consistência e na retenção de consistência do concreto.

Vários concretos experimentais foram produzidos, em decorrência dos ajustes necessários no traço inicial, para se obter um concreto com resistência e consistências próximas do especificado e com os teores mais elevados possíveis de escória granulada como agregado miúdo, até se chegar ao traço final, com resistência em torno de 40MPa, aos 28 dias, consistência de 100 ± 20 mm aos 40 minutos, coeso e sem exsudação.

Estas várias misturas experimentais são justificadas pela utilização dos elevados teores de escória granulada como adição e como agregado miúdo, o que dificultou a obtenção das propriedades especificadas para o concreto no estado fresco.

Nas misturas posteriores, houve ajustes do teor de argamassa, pois os traços se mostravam sem coesão, chegando à necessidade de se fazer uma correção no teor de agregado miúdo com a utilização de uma parte de areia, em substituição à escória granulada. Esta metodologia é comentada por ALEXANDRE & SIBILEAU (1988); SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990) para servir de correção da granulometria, da aspereza e da angulosidade da escória granulada.

O teor ideal encontrado, para substituição da escória granulada por areia, foi de 28%, através de ajustes na fração de agregados, chegando-se ao traço 1: 1,344:0,849:0,849:0,35 (materiais cimentícios : (72% escória granulada + 28% de areia) : brita 0 : brita 1 : relação

água/materiais cimentícios), que mostrou-se coeso, sem segregação e com o abatimento necessário.

Foi realizada a repetição deste traço, com 100% de escória granulada como agregado miúdo, porém, ele apresentou grande exsudação, confirmando a necessidade da areia.

Outra tentativa foi feita para redução do teor de areia para 25%, mas houve, também, um pouco de exsudação e segregação, confirmando, assim, o teor de 28% de areia.

Com o intuito de chegar a valores mais altos de resistência à compressão, atendendo à proposta inicial de resistência à compressão de 40MPa aos 28 dias, a relação água/materiais cimentícios igual a 0,35, utilizada até este momento, foi reduzida para 0,33 e o teor de aditivo aumentado para suprir a demanda de água.

Com este traço base 1:1,344:0,849:0,849:0,33 (materiais cimentícios : (72% escória granulada + 28% de areia) : brita 0 : brita 1 : relação água/materiais cimentícios), que passou a ser denominado concreto C1, foram elaborados dois outros traços, denominados C2 e C3, com relação água/materiais cimentícios diferentes, com o objetivo de obter uma família de concretos com mesma consistência, para melhor comparação com um concreto de referência. Estes traços são apresentados no Quadro 4.24.

Quadro 4.24 – Informações sobre os traços 1, 2 e 3 de concreto.

	Traço do concreto (material cimentício : agregado miúdo : brita 0 : brita 1	Relação água / material cimentício	Teor de sólidos do aditivo superplastificante (%)
C1	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,33	0,37
C2	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,40	0,16
C3	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,44	0

Obs.: O material cimentício utilizado foi o cimento CP III-32 RS, que tem 72% de escória moída, e adição de 100% de escória moída em adição ao cimento e o agregado miúdo foi constituído de 72% escória granulada + 28% de areia.

A consistência desejada foi obtida através da variação da quantidade de aditivo superplastificante.

A betoneira utilizada foi de eixo inclinado e tambor giratório basculante com capacidade de mistura de 320 litros, como mostra a Figura 4.12.

Na produção experimental destes concretos foram feitas alterações na seqüência de colocação dos materiais na betoneira de modo a observar o efeito do aditivo quanto à obtenção e manutenção de consistência e coesão.



Figura 4.12 - Betoneira de eixo inclinado e tambor giratório basculante com capacidade de mistura de 320 litros.

Assim, a seqüência final adotada obedeceu à seguinte ordem:

1. parte da água (aproximadamente um terço) sem superplastificante + agregados graúdos: mistura de aproximadamente 1 minuto
2. cimento + escória moída + areia + escória granulada (nesta ordem): mistura de aproximadamente 3 minutos. Concomitantemente à mistura, lançou-se o restante da água + superplastificante, posicionando-se a cuba da betoneira na maior energia de mistura, quase na horizontal.
3. Em seguida, a betoneira era paralisada para rápida remoção de concreto com excesso de pasta e coesão, aderido na superfície interna da cuba, para garantir melhor homogeneização do conjunto. Finalmente, efetuou-se mistura por aproximadamente 2 minutos. O tempo total de mistura foi de 6 minutos.

Estudos realizados por ARAÚJO *et al.*, (2001) indicam que a adição posterior do superplastificante, comparada à adição simultânea, melhora, tanto a fluidez inicial, quanto a perda de fluidez com o tempo.

4.3.3.2. Concreto de referência

Para se fazer uma comparação entre as propriedades do concreto com elevado teor de escória moída, foram adotados, para o concreto de referência, o mesmo traço do concreto com escória moída, com uma pequena variação na relação água/materiais cimentícios e com a utilização do cimento CP II E 32, cujo teor de escória moída é igual a 39%. Complementou-se, assim mais três traços de concreto C4, C5 e C6.

O cimento CP II E-32 é do mesmo fabricante do cimento CP III-32.

O Quadro 4.25 apresenta os dados dos concretos C4, C5 e C6.

Quadro 4.25 – Traços C4, C5 e C6 de concreto com cimento CP II E-32.

	Traço do concreto (material cimentício : agregado miúdo : brita 0 : brita 1)	Relação água / material cimentício	Teor de sólidos do aditivo superplastificante (%)
C4	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,33	0,37
C5	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,38	0,16
C6	1 : 1,344 : 0,849 : 0,849	0,44	0

O consumo dos materiais utilizados nos ensaios de concreto são apresentados no Quadro 4.26.

Quadro 4.26 - Consumo de materiais para os traços de concreto 1: 1,344:0,849:0,849 (materiais cimentícios : (72% escória granulada + 28% de areia) : brita 0 : brita 1) e relação a/mc.

		Material cimentício (g)		Agregado miúdo(g)		Agregado graúdo (g)		Água (g)	Aditivo superpl. (g)	Relação a/mc
		Cimento	Esc. moída	Esc. gran.	Areia	Brita 0	Brita 1			
C1	CP III	33000	33000	63900	24800	56000	56000	21250	792	0,33
C2		33000	33000	63900	24800	56000	56000	26150	330	0,40
C3		33000	33000	63900	24800	56000	56000	29000	-	0,44
C4	CP II	33000	33000	-	88700	56000	56000	21250	792	0,33
C5		33000	33000	-	88700	56000	56000	25100	330	0,38
C6		33000	33000	-	88700	56000	56000	29000	-	0,44

4.3.4 Ensaios em concreto

4.3.4.1. Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Os ensaios para realização dos ensaios para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foram realizados segundo a NBR 7223/1982 buscando uma consistência de 100 ± 20 mm aos 40 minutos.

4.3.4.2. Teor de ar incorporado

Os ensaios para realização dos ensaios para determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco foram realizados segundo a NBR NM 47/1998.

4.3.4.3. Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram preparados e moldados segundo os procedimentos da NBR 5738/1994, em corpos-de-prova cilíndricos de concreto confeccionados com 150mm de diâmetro e 300mm de altura, e ensaiados nas idades de 7, 28 e 91 dias, segundo a NBR 5739/1994.

Para cada uma das idades foram moldados 4 (quatro) corpos-de-prova de cada mistura, que permaneceram em cura úmida até a data de ensaio, sendo previamente capeados e, então, procedida a ruptura.

A Figura 4.13 mostra um corpo-de-prova sendo ensaiado para obtenção de resistência à compressão axial.



Figura 4.13 – Corpo-de-prova sendo ensaiado para obtenção de resistência à compressão axial.

4.3.4.4. Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à resistência à tração por compressão diametral foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de concreto com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Foram preparados e moldados segundo os procedimentos da NBR 5738/1994 e ensaiados à idade de 28 dias, segundo a NBR 7222/1994.

Foram utilizados 4 corpos-de-prova, para cada traço de concreto, e o adensamento foi manual, conforme NBR 5738/1994, para abatimento do concreto de 100mm.

4.3.4.5. Retração

O método de ensaio adotado para os ensaios de retração é baseado na NBR 8490/1984, com algumas modificações. Os corpos-de-prova consistiram de 5 prismas com dimensões de (75 x 75 x 300)mm, adequadas à dimensão do agregado graúdo utilizado, já que não foi realizado peneiramento do concreto. Buscou-se, com isto, um resultado mais real para o ensaio. Os corpos-de-prova foram preparados e moldados segundo as recomendações da NBR 5738/1994, nas dimensões de 75 x 75 x 300mm, porém, em concreto.

Os prismas foram curados em câmara úmida por 23 horas, desformados e deixados submersos por cerca de $\frac{1}{4}$ de hora. A primeira leitura foi feita após a retirada do banho imediatamente após o período inicial de 24 horas.

Depois da primeira medida de comprimento, os corpos-de-prova foram curados em água saturada de cal, até a idade de 28 dias. Neste período, foi realizada uma segunda determinação à idade de 7 dias e uma terceira ao final dos 28 dias. A Figura 4.14 mostra os corpos-de-prova para medidas de retração nas formas.



Figura 4.14 – Corpos-de-prova para medidas de retração nas formas.

Os corpos-de-prova foram, então, armazenados em câmara seca e as leituras foram feitas nas seguintes idades: 32, 35, 42, 56 e 84 dias. Os corpos-de-prova foram retirados da câmara seca e mantidos, por meia hora, em ambiente de laboratório (temperatura de $27 \pm 2^\circ \text{C}^{23}$) antes de cada leitura. A temperatura na câmara seca variou entre 34 e 38°C e a umidade relativa foi de $30 \pm 2\%$. A Figura 4.15 a e b mostram os corpos de prova dispostos na câmara seca.



(a)



(b)

Figura 4.15 – Corpos-de-prova para medidas de retração dispostos na câmara seca.

Para a medida de retração utilizou-se micrômetro graduado para leitura, com unidade de $0,001\text{mm}$, conforme mostrado na Figura 4.16.

²³ Os ensaios foram realizados durante o mês de janeiro, por isto as temperaturas ambientes elrvadas.



Figura 4.16 – Corpos-de-prova para medidas de retração, utilizando micrômetro.

4.3.4.6. Carbonatação

Os ensaios de carbonatação tomaram como base as pesquisas realizadas por AL-KADHIMI *et al.* (1996) e ISAIA (2001), com respeito aos tempos de cura, ambiente de espera e tempo para colocação na câmara de carbonatação.

Para os ensaios de carbonatação, foram utilizados corpos-de-prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, preparados de acordo com a NBR 5738/1996 (NUNES, 1998).

Os corpos-de-prova foram desmoldados com 24 horas, permanecendo em câmara úmida até a idade de 14 dias, para simular as condições de cura recomendadas para o cimento CP III. A partir desta data foram conservados em ambiente de laboratório, até a idade de 60 dias, conforme metodologia utilizada por AL-KADHIMI *et al.* (1996), quando procedeu-se o primeiro rompimento. A Figura 4.17 mostra os corpos de prova no laboratório.



Figura 4.17 – Corpos-de-prova em ambiente de laboratório, para posterior colocação na câmara de carbonatação.

Logo após, os corpos-de-prova foram colocados em câmara de carbonatação acelerada, com 100% de CO₂, à temperatura $26 \pm 2^\circ$ C e umidade relativa do ar entre 60% e 70%, por quatro semanas (AL-KADHIMI *et al.*, 1996).

Os ensaios foram realizados às idades de 63, 77 e 91 dias, a partir da data de moldagem.

Os corpos-de-prova, em número de 8, foram seccionados transversalmente, em cada idade, por flexão, de modo a obter segmentos cilíndricos de, aproximadamente, 5cm de altura. A Figura 4.18 mostra um corpo-de-prova estando, marcadas as posições, onde estes foram seccionados (em azul). As marcações longitudinais (em vermelho e verde) foram feitas para localizar a posição das leituras de carbonatação, em cada face rompida.

Esta marcação prévia foi a forma encontrada para não haver interferência, por parte do observador, na escolha dos pontos analisados e, para manter constantes as linhas para cada uma das 8 determinações, em cada idade.



Figura 4.18 - Corpo-de-prova, marcados as posições a serem seccionadas transversalmente para posterior medida de profundidade de carbonatação.

Este tipo de corte foi baseado nos estudos de NUNES (1998), que constatou não haver variação da profundidade de carbonatação ao longo da altura do corpo-de-prova.

A espessura da camada carbonatada foi determinada com aspersão de solução de 1% de fenolftaleína na face de ruptura das amostras. Para este tipo de determinação, a região carbonatada, com pH inferior a 9, permanece com a cor natural do concreto, enquanto a região ainda não carbonatada aparece em vermelho carmim.

A Figura 4.19 mostra um corpo de prova seccionado, podendo ser observado o interior do corpo-de-prova em vermelho carmim e uma faixa externa carbonatada. Em cada amostra foram feitas 8 medidas e os resultados são as médias de determinações em 8 corpos-de-prova, com aproximação de 0,5mm.



Figura 4.19 – Corpo-de-prova seccionado mostrando o interior do corpo-de-prova em vermelho carmim e uma faixa externa carbonatada.

O equipamento utilizado para os ensaios de carbonatação acelerada é uma câmara que possui controlador de temperatura, de umidade e de concentração de CO_2 à pressão atmosférica.

A Figura 4.20 mostra os corpos de prova cilíndricos dispostos na câmara de carbonatação que funciona em circuito fechado. Assim, após a colocação dos corpos-de-prova, o controlador de temperatura é acionado para que tenha início a sua estabilização. A seguir, aciona-se o controle de umidade, e, finalmente, após o equilíbrio, o CO_2 é injetado.

O período para o ensaio de carbonatação foi baseado em estudos de AL-KADHIMI *et al.* (1995), que afirma que a meta de todo método de carbonatação acelerada é produzir uma amostra de concreto totalmente carbonatada, em um curto espaço de tempo. Portanto, é necessário escolher condições apropriadas para uma rápida carbonatação e estar ciente dos fatores que controlam o processo. Estes fatores são divididos em fatores de natureza física, que controlam a difusão do dióxido de carbono, como a microestrutura e o conteúdo de água e sua distribuição no concreto, e os fatores de natureza química, como a quantidade dos constituintes reativos da pasta de cimento e de outras adições.

Assim, é necessário que o concreto esteja parcialmente seco para que o dióxido de carbono possa penetrar. Isto significa que parte do tempo que o concreto está exposto à atmosfera, de fato, é gasto para alcançar esta condição ótima



Figura 4.20 – Câmara de carbonatação com os corpos-de-prova cilíndricos.

Monitorando a umidade dentro das amostras, durante o período que antecedeu à exposição ao dióxido de carbono, AL-KADHIMI *et al.* (1995) chegaram a um tempo de 6 a 8 semanas de exposição ao ar em laboratório, com umidade relativa de 40% e temperatura de 25° C, para que fosse alcançada uma umidade de 60%, que se considerou indicada após estes estudos. A utilização de pressão de dióxido de carbono recomendada não foi abordada neste estudo, porém o período de duas semanas, inicialmente previsto, foi estendido para 4 semanas.

No entanto, é difícil comparar resultados de diferentes pesquisas porque existem diferenças entre os trabalhos que influenciam fortemente os resultados finais, como, por exemplo, o tempo de cura prévia, antes da colocação na câmara de carbonatação acelerada e o tempo de permanência dentro dela. Em concretos com adições minerais, o tempo de cura apresenta grande relevância, porque a hidratação e a distribuição dos poros são dependentes da idade. A umidade de equilíbrio é, também, de vital importância, porque a concentração de umidade dos poros é um dos fatores que mais influenciam a velocidade de difusão do CO₂.

Pelos mesmos motivos deve-se, também, tomar grande cuidado para se traçar um paralelo entre a carbonatação acelerada e em condições ambientais normais, devido ao grande número de fatores que interferem no resultado final (ISAIA, VAGHETTI & GASTALDINI, 2001).

4.3.4.7. Massa específica, índice de vazios e absorção

Os ensaios foram realizados aos 28 dias, segundo as NBR 9778/1987. Os corpos-de-prova foram moldados, segundo a NBR 5738, nas dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, permanecendo em cura úmida até a data de ensaio. Foram utilizadas 4 amostras para cada traço de concreto.

4.4 Planejamento e projeto experimental estatístico

4.4.1 Estudos em pasta

O projeto de experimentos para os estudos em pasta, foi realizado com o objetivo de comparar as consistências, obtidas através do ensaio de Kantro ou Mini-*Slump*. Foi analisada estatisticamente a repetição de três ensaios, com o objetivo de comparar os valores encontrados em cada ensaio.

4.4.2 Estudos em argamassa

O projeto de experimentos, para os estudos em argamassa, foi realizado com o objetivo de comparar as médias das resistências à compressão, segundo as seguintes variáveis: teor de escória de alto-forno e tipo de escória granulada. Foram analisadas estatisticamente três corpos-de-prova para cada situação.

4.4.3 Estudos em concreto

O projeto de experimentos, para os estudos em concreto, foi realizado com o objetivo de comparar as médias das seguintes variáveis: resistências à compressão axial, e à tração por compressão diametral, medidas de absorção, índice de vazios e massa específica, com 4 corpos-de-prova para cada traço de concreto, medidas de profundidade de carbonatação com 10 corpos-de-prova, e medidas de retração com 5 corpos-de-prova.

4.4.4 Análise dos resultados

A análise estatística utilizou técnicas de estatística descritiva (cálculo de média, desvio padrão, gráficos *box-plot* e gráficos de média), para caracterizar as variáveis resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, ar incorporado, absorção, índice de vazios e massa específica, retração e carbonatação, segundo os fatores estudados.

Para determinar diferenças estatisticamente significantes (o nível de significância adotado neste trabalho foi de 5%) entre as médias de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios e massa específica, retração e carbonatação foram utilizados testes de hipóteses paramétricas (ANOVA e Duncan) (MONTGOMERY, 1991).

4.4.5 Fatores e variáveis considerados

4.4.5.1. Seleção do teor de escória moída, em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1)

O objetivo principal deste estudo foi selecionar o teor adequado de escória moída, em substituição à escória granulada, e o tipo de escória granulada (Etapa 1) para confecção de um concreto com teor elevado de escória de alto-forno e resistência à compressão axial em torno de 40 MPa aos 28 dias.

A Figura 4.21 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e os objetivos para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1).

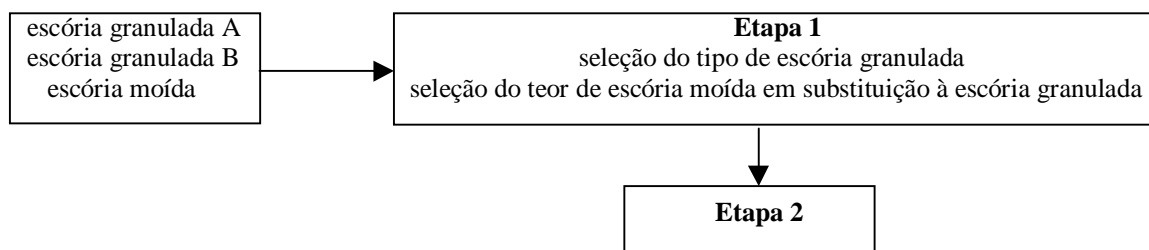


Figura 4.21 – Fluxograma do estudo para seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1).

A resistência à compressão igual a 40 MPa está de acordo com considerações feitas por MEHTA (1996), que afirma não serem necessárias resistências muito altas, para se conseguir estruturas de concreto com alta trabalhabilidade, alta estabilidade dimensional, baixa permeabilidade e moderada resistência mecânica, devendo-se dar importância à durabilidade em ambientes de moderada agressividade, como exposição a águas do mar em climas amenos. Estes conceitos vêm se consolidando como base da tecnologia de concreto de alto desempenho.

Para se empregar a escória granulada de alto-forno como agregado miúdo, estudos realizados por HOFFMAN (1978) e por ALEXANDRE & SIBILEAU (1988) recomendam

a incorporação de finos, para correção de sua granulometria e de sua forma angulosa de grãos. Assim, a utilização de escória granulada moída pode suprir esta falta de finos e, ao mesmo tempo, traz ampliação de mercado para um sub-produto da indústria siderúrgica, conservação do meio ambiente e economia da energia que seria gasta na fabricação do clínquer do cimento Portland.

Para a seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e consistência em mesa de queda, em argamassa, com dois tipos de escórias granuladas, denominadas EA e EB, disponíveis.

Os fatores e variáveis adotados no estudo estão no Quadro 4.27.

Quadro 4.27 – Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada.

Fatores	Variáveis de controle
Escória granulada de alto-forno: EA e EB	Consistência na mesa de queda (NBR 13276)
Teor de escória moída em substituição à escória granulada: 0, 10, 17, 23, 33 e 56%.	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (NBR 7215)

* o cimento CP III - 32 utilizado neste trabalho contém um teor de escória de alto-forno de 72%.

A partir dos resultados dos ensaios realizados em argamassa nesta etapa, a Argamassa com o tipo de escória granulada e o teor de escória moída que apresentou melhor resistência à compressão, passou a ser utilizado na etapa seguinte.

A faixa de teores de escória moída, utilizada em substituição à escória granulada, foi selecionada com base em resultados de pesquisas de HOFFMAN (1978), que recomenda a moagem da escória granulada, de modo a obter um material com dimensão de até 2 mm, contendo cerca de 10% de finos ($< 80 \mu\text{m}$). Os resultados encontrados por ALEXANDRE & SIBILEAU (1988), também recomendam uma substituição de parte da escória granulada por materiais finos, por exemplo 20 a 30% de cinzas volantes, em substituição à escória granulada ou uma moagem parcial da escória até obtenção de 10 a 15% de finos.

Os traços utilizados, com relação água/cimento=0,55, são mostrados no quadro 4.28.

Quadro 4.28 – Dados dos traços de argamassa utilizados tanto para a escória granulada EA quanto para a escória EB; relação água/cimento=0,55.

Traço	cimento	agregado miúdo			
		esc. moída	escória granulada	Areia	teor esc. moída* (%)
1	1	-	-	3	0
2	1	-	3,0	-	0
3	1	-	3,0	-	0
5	1	0,3	2,7	-	10
6	1	0,5	2,5	-	17
7	1	0,7	2,3	-	23
8	1	1,0	2,0	-	33
9	1	1,67	1,33	-	56

* teor de escória moída em relação ao total de agregado miúdo

O quadro 4.29 apresenta a quantidade de materiais utilizados nestes estudos.

Quadro 4.29 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa; relação água/cimento=0,55.

Cimento CP III-32 (g)	Escória granulada	Água
624	1872	343,2

4.4.5.2. Seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)

O objetivo principal deste estudo foi selecionar o tipo e o teor adequado de aditivo superplastificante (Etapa 2), visando melhorar a consistência, a pega e as resistências mecânicas.

A Figura 4.22 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e os objetivos do estudo para a seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2).

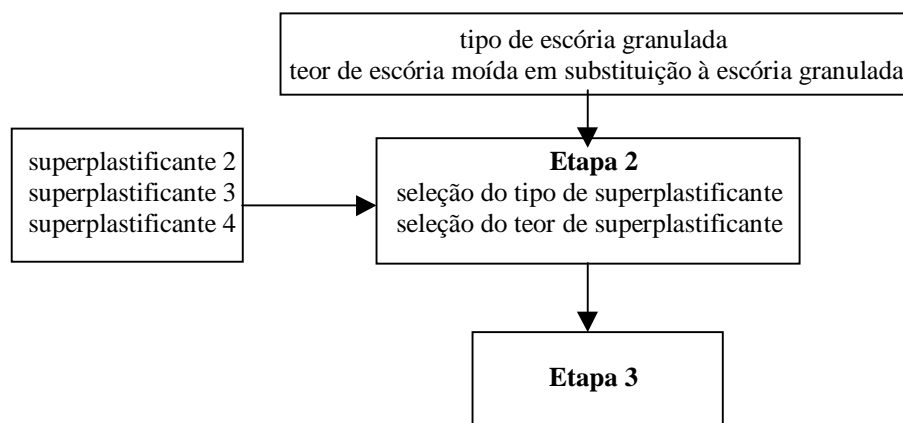


Figura 4.22 - Fluxograma da seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2).

Nesse estudo foi utilizado o teor de 100% de adição de escória moída ao cimento, em massa. Este teor corresponde à parcela de finos da Argamassa que apresentou melhor

resultado no estudo de seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1).

Foi avaliada, em primeiro lugar, a consistência de pastas através do método do *mini-slump* e medido o tempo de início de pega em pasta variando o tipo e teor de aditivo superplastificante.

Em seguida foram avaliadas as resistências à compressão, utilizando a argamassa (denominada Argamassa A), que apresentou o melhor resultado do estudo da seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada (Etapa 1) e mais dois traços, Argamassa B e C, com diferentes teores de escória granulada utilizada como agregado miúdo. Variou-se o tipo e teor de aditivo superplastificante.

Posteriormente, foi medido o tempo de início de pega em argamassa, no traço de argamassa que apresentou melhor resultado de resistência à compressão.

A Argamassa cujo aditivo superplastificante apresentou melhores resultados nos ensaios realizados, foi utilizado na etapa seguinte.

4.4.5.2.1. Estudo em pasta

Para a seleção do tipo e definição do teor ideal de aditivo superplastificante a ser empregado no concreto utilizou-se o método do *mini-slump*, por meio do qual foram analisadas a consistência e a manutenção de consistência na pasta, a fim de avaliar a compatibilidade entre o aditivo superplastificante e o material cimentício utilizado.

Os fatores e variáveis adotados para o estudo em pasta estão no Quadro 4.30.

Quadro 4.30 - Fatores e variáveis adotados na seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante nos estudos em pasta.

Fatores	Variáveis de controle
Composição do aditivo superplastificante	Consistência e manutenção de consistência através do <i>mini-slump</i> Tempo de início de pega (NBR 11581)
Teor do aditivo superplastificante (% de sólido do aditivo em relação à massa de materiais cimentícios)	

O método do *mini-slump* foi utilizado pois, através dele é possível a realização de estudos para observar as interações entre o cimento e o aditivo a ser utilizado no concreto, pois, embora não haja dúvidas sobre as vantagens do uso de superplastificantes em concretos de

alto desempenho, existem vários relatos de incompatibilidades entre cimento e aditivo, com diferentes efeitos na reologia do concreto, como aumento no tempo de pega, grandes perdas de abatimento e variação no abatimento inicial do concreto, que podem ser detectados com este método. (HANEHARA & YAMADA, 1999; AGARWAL; MASOOD & MALHOTRA, 2000).

Neste estudo, foram utilizados 4 (quatro) aditivos superplastificantes de uma mesma marca, mas com princípios ativos diferentes, escolhidos dentre os mais citados em trabalhos de vários autores (MALHOTRA, 1987; SWAMY *et al.*, 1994; HANEHARA & YAMADA, 1999).

Para cada um dos quatro aditivos superplastificantes estudados, foram realizados ensaios, através do método do mini-*slump*, utilizando diferentes teores de aditivo superplastificante, sendo considerado o teor ideal de aditivo aquele que proporcionasse manutenção de consistência por aproximadamente 180 minutos, tempo considerado suficiente em um primeiro estudo, pois sabe-se que em argamassas e concretos, os tempos de manutenção de consistência tendem a diminuir.

Os aditivos que não apresentassem manutenção de consistência por este tempo seriam considerados não compatíveis com o material cimentício utilizado e os estudos com estes aditivos seriam suspensos.

Foram realizados, também, ensaios de início de pega da pasta de materiais cimentícios para cada teor ideal de aditivo, com o objetivo de conhecer o efeito que os aditivos têm sobre esta propriedade, já que muitos aditivos, que proporcionam boa fluidificação, podem retardar a pega e endurecimento (SPONHOLZ, PRUDÊNCIO & STEIN, 1998; CASSA *et al.*, 1999).

O quadro 4.31 apresenta a quantidade de materiais utilizados nos estudos em pasta com relação água/materiais cimentícios=0,30.

Quadro 4.31 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em pasta; relação água/materiais cimentícios=0,30.

Material cimentício (g)	
Cimento CP III-32 (g)	Escória moída (g)
250	250

4.4.5.2.2. Estudos em argamassa

Foram realizados ensaios de consistência na mesa de queda, de resistência à compressão axial e de tempo de início de pega, através da determinação dos tempos de pega, por meio da resistência à penetração, utilizando um penetrômetro, com o objetivo de avaliar o comportamento dos diferentes aditivos superplastificantes em relação a estas propriedades.

Os fatores e variáveis adotados para o estudo em argamassa estão no Quadro 4.32.

Quadro 4.32 - Fatores e variáveis adotados na seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante nos estudos em argamassa.

Fatores	Variáveis de controle
Composição do aditivo superplastificante	Consistência na mesa de queda (NBR 13276)
Teor do aditivo superplastificante (% de sólido do aditivo em relação à massa de materiais cimentícios)	Tempo de início de pega em argamassa com penetrômetro (NBR 9832)
	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (NBR 7215)

As quantidades de materiais utilizados nas argamassas estão no Quadro 4.33.

Quadro 4.33 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa para ensaios de resistência à compressão axial para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante, relação água/materiais cimentícios=0,28.

Traço	Traço (cimento : esc. moída : escória gran.)	Material cimentício (g)		Agregado miúdo(g)
		Cimento CP III-32	Escória moída	Escória granulada
A	1 : 1 : 2	624	624	1248,0
B	1 : 1 : 2,7	624	624	1684,8
C	1 : 1 : 2,4	624	624	1497,6

4.4.5.3. Seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3)

O objetivo principal deste estudo é selecionar o teor adequado de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3). O silicato de sódio foi utilizado como ativador da escória, visando melhorar a resistência à compressão do concreto. Foi avaliada, também, a possibilidade de incompatibilidades entre os materiais cimentícios e os aditivos superplastificantes utilizados.

A Figura 4.23 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e os objetivos do estudo para a seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3).

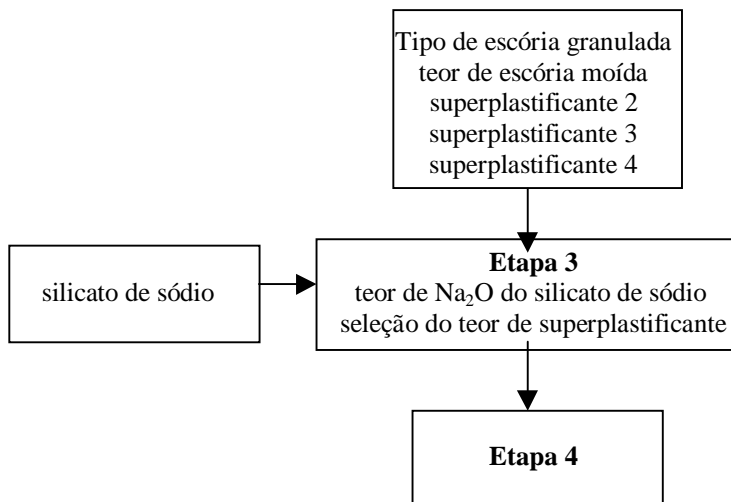


Figura 4.23 - Fluxograma da seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3).

Foi avaliada, em primeiro lugar, a consistência de pastas através do método do *mini-slump* variando o teor de aditivo superplastificante e o teor de Na₂O do silicato de sódio. Em seguida foram avaliadas as resistências à compressão da argamassas B variando, também, o teor de aditivo superplastificante e o teor de Na₂O do silicato de sódio.

4.4.5.3.1. Estudos em pasta

Foram realizados ensaios de consistência e manutenção de consistência, através do *mini-slump*, com o objetivo de avaliar a compatibilidade entre o aditivo superplastificante, o silicato de sódio e o material cimentício utilizado.

Os fatores e variáveis adotados estão no Quadro 4.34.

Quadro 4.34 - Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de silicato de sódio, nos estudos em pasta

Fatores	Variáveis de controle
Teor de Na ₂ O do silicato de sódio (2 a 5%)	Consistência e manutenção de consistência através do <i>mini-slump</i>
Teor do aditivo superplastificante	

O silicato de sódio empregado na ativação da escória com módulo de sílica igual a 1,6 foi selecionado, com base em resultados experimentais de estudos de propriedades mecânicas de concretos de cimentos de escória de alto-forno²⁴, realizados por vários pesquisadores (JOHN, 1995; SILVA, 1998; BAKHAREV, 1999; 2000).

²⁴ concretos com escória de alto-forno moída como aglomerante, sem clínquer.

O módulo de sílica igual a 1,6 e o teor de Na_2O entre 2% e 5%, do silicato de sódio estão de acordo com as recomendações da literatura, em termos de resistência mecânica, consistência e tempo de pega de concretos com cimentos de escória (WANG *et al.*, 1995; ANDERSON & GRAM, 1988; JOHN, 1995; SILVA, 1998; BAKHAREV *et al.*, 1999; BAKHAREV *et al.*, 2000).

O teor de cal hidratada igual a 5%, sobre o teor de adição de escória moída, foi usado como regulador de pega por que o silicato de sódio proporciona tempos de pega geralmente menores que os do cimento Portland (JOHN *et al.*, 1994).

4.4.5.3.2. Estudos em argamassa

Foram realizados ensaios de consistência na mesa de queda, de resistência à compressão axial, com o objetivo de avaliar o comportamento do aditivo superplastificante e do silicato de sódio em relação a esta propriedade.

Os fatores e variáveis adotados nos estudos em argamassa estão no Quadro 4.35.

Quadro 4.35 - Fatores e variáveis adotados na seleção do teor de silicato de sódio nos estudos em argamassa.

Fatores	Variáveis de controle
Teor de Na_2O do silicato de sódio (2 a 5%)	Consistência na mesa de queda (NBR 13276)
Teor do aditivo superplastificante	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (NBR 7215)

As quantidades de materiais utilizados estão no Quadro 4.36.

Quadro 4.36 - Quantidades de materiais utilizados nos estudos em argamassa para seleção do teor de Na_2O do silicato de sódio. Argamassa B 1 : 1 : 2,7 (cimento : escória moída : agregado miúdo) relação água/materiais cimentícios=0,3.

Material cimentício (g)			Agregado miúdo(g)	
Cimento CP III-32	Escória moída	Cal	Escória granulada (72%)	Areia (28%)
624	592,2	31,2	1213,1	471,7

4.4.5.4. Dosagem do concreto (Etapa 4)

O objetivo principal deste estudo foi realizar a dosagem dos concretos. O Concreto 1 foi dosado buscando uma resistência à compressão axial em torno de 40 MPa, aos 28 dias de idade, utilizando cimento CP III-32 RS (contendo 72% de escória moída) e adição mineral de 100% de escória moída, sobre o total de cimento, e um teor máximo de escória granulada como agregado miúdo, sem prejuízo da consistência e com abatimento de 100 ± 20 mm aos 40 minutos.

A figura 4.24 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo de dosagem do concreto (Etapa 4).

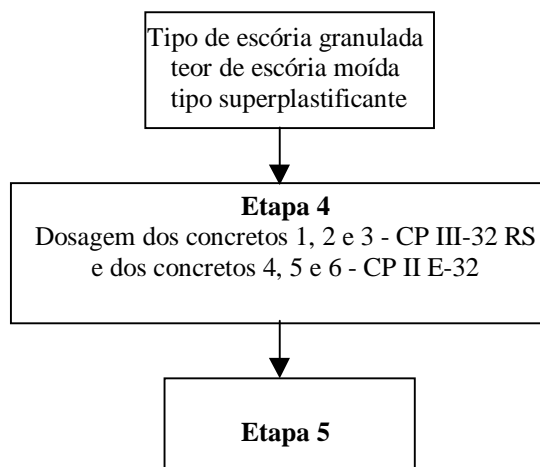


Figura 4.24 - Fluxograma da dosagem do concreto (Etapa 4).

Este estudo foi realizado utilizando a escória granulada A, o teor de escória moída em substituição à escória granulada definidos na Etapa 1 e o tipo de aditivo superplastificante definido nas Etapas 2 e 3. Foi dosado o concreto C1 e, em seguida, variando a relação água/materiais cimentícios e o teor de aditivo superplastificante, foram dosados os concretos C2 e C3. A dosagem dos concretos C4, C5 e C6 tomaram como base o mesmo consumo de materiais do concreto C1, variando a relação água/materiais cimentícios e o teor de aditivo superplastificante.

Os fatores e variáveis adotados estão no Quadro 4.37.

Quadro 4.37 - Fatores e variáveis adotados na determinação da dosagem do concreto.

Fatores	Variáveis de controle
Relação água/materiais cimentícios	Consistência pelo abatimento do tronco de cone (100 ± 20 mm aos 40 minutos) NBR 7223. Resistência a 7, 28 e 91 dias (NBR 5739)
Teor de aditivo	
Teor de areia do agregado miúdo	
Traço do concreto	
Tipo de cimento: CP II E-32 CP III-32 RS	

O abatimento de 100 ± 20 mm aos 40 minutos foi adotado, pois o concreto com este abatimento poderia ser bombeado e o tempo de 40 minutos seria adequado para as etapas de transporte, lançamento e adensamento do concreto.

Com base nos estudos em argamassa dos itens 4.4.5.1, 4.4.5.2 e conforme recomendações de vários autores que citam a necessidade, primeiramente, de uma redução substancial da

quantidade de água na mistura, para obtenção de concreto de alto desempenho, buscou-se trabalhar com relação água/materiais cimentícios na faixa entre 0,30 e 0,35, que é compatível com a resistência à compressão axial requerida (MEHTA, 1994; NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000).

O cimento CP III – 32 foi adotado por já possuir um alto teor de escória moída, que, após a adição de 100% de escória de alto-forno moída, proporciona um teor total de 86% de escória de alto-forno moída sobre o total de materiais cimentícios e o cimento CP II-32RS, por possuir um teor menor, para se poder, assim, efetuar uma comparação entre as propriedades de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno.

O Quadro 4.38 apresenta o consumo de materiais cimentícios utilizados, por metro cúbico de concreto, para os concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6, a relação água/materiais cimentícios, o teor água/materiais secos, o teor de sólidos do aditivo e a consistência dos concretos estudados. A água do aditivo superplastificante foi descontada da água da mistura.

Quadro 4.38 - Consumo de materiais cimentícios (kg por m³ de concreto), relação água/materiais cimentícios, teor água/materiais secos, teor de sólidos do aditivo e consistência os concretos estudados.

Concreto	Consumo materiais cimentícios (kg/m ³)			Relação água/mat. cim.	Teor água/materiais secos (%)	Teor de sólidos do aditivo (%)	Teor de argamassa (%)	Consistência (mm)
	CP II	CP III	Esc. moída					
C1	-	276	276	0,33	8,16	0,37	58	230
C2	-	276	276	0,40	9,90	0,16	58	70
C3	-	276	276	0,44	10,89	0	58	70
C4	552	-	-	0,33	8,16	0,37	58	230
C5	552	-	-	0,40	9,90	0,16	58	200
C6	552	-	-	0,44	10,89	0	58	170

O Quadro 4.39 apresenta o consumo de materiais utilizados para os ensaios com os concretos C1, C2, C3, C4, C5, e C6.

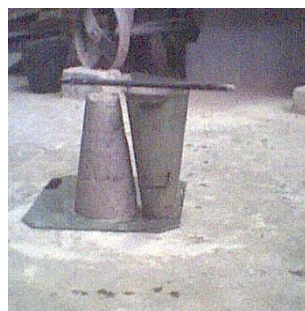
Quadro 4.39 - Consumo de materiais para os concretos C1, C2, C3, C4, C5, e C6.

		Material cimentício (g)		Agregado miúdo(g)		Agregado graúdo (g)		Água (g)	Aditivo superpl. (g)	Relação a/mc
		Cimento	Esc. moída	Esc. gran.	Areia	Brita 0	Brita 1			
C1	CP III	33000	33000	63900	24800	56000	56000	21250	792	0,33
C2		33000	33000	63900	24800	56000	56000	26150	330	0,40
C3		33000	33000	63900	24800	56000	56000	29000	-	0,44
C4	CP II	33000	33000	-	88700	56000	56000	21250	792	0,33
C5		33000	33000	-	88700	56000	56000	25100	330	0,38
C6		33000	33000	-	88700	56000	56000	29000	-	0,44

A Figura 4.25 a mostra o abatimento de tronco de cone do concreto C1 aos 10 minutos e a Figura 4.25 b, aos 65 minutos.



(a)



(b)

Figura 4.25 - Abatimento de tronco de cone do concreto base (a) aos 10 minutos e (b) aos 65 minutos.

A confecção destes concretos permite fazer uma análise do efeito dos diferentes teores de escória moída (39% e 86%) nas propriedades dos concretos, principalmente no que diz respeito a questões em estudo da NBR 6118/2000 como a carbonatação e retração de concretos com altos teores de escória de alto-forno finamente moída.

A Figura 4.26 mostra corpos de prova de concreto, nos moldes, para ensaios de resistência à compressão axial (150x300)mm e para ensaios de resistência à tração na flexão e de carbonatação (100x200)mm.



Figura 4.26 – Corpos de prova de concreto em moldes para ensaios de resistência à compressão axial (150x300)mm e para ensaios de resistência à tração na flexão e carbonatação (100x200)mm.

Para cada um desses traços foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, retração, carbonatação, massa específica, índice de vazios e absorção, utilizando concreto preparado em uma única betonada.

4.4.5.5. Avaliação de propriedades (Etapa 5)

O objetivo deste estudo é avaliar a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias de idade, a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, o teor de ar incorporado, a massa específica, a absorção e o índice de vazios, a retração e a profundidade de carbonatação do concreto (Etapa 5), com adição de 100% de escória moída e substituição de parte da areia por escória granulada, como agregado miúdo, e compará-las ao concreto de referência com cimento CP II E-32 RS e areia como agregado miúdo.

A figura 4.27 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo da avaliação das propriedades (Etapa 5).

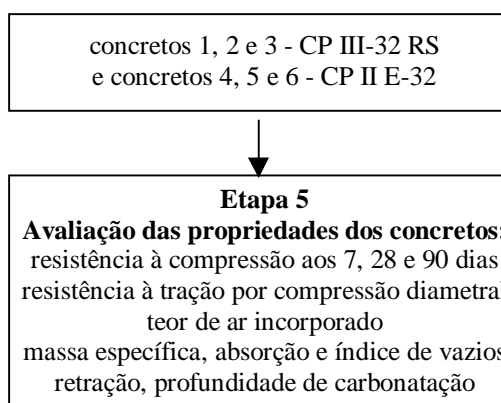


Figura 4.27 – Fluxograma do estudo da avaliação das propriedades do concreto (Etapa 5).

Os fatores e variáveis adotados estão no Quadro 4.40.

Quadro 4.40 - Fatores e variáveis adotados na determinação da dosagem do concreto.

Fatores	Variáveis de controle
Tipo de cimento	Resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade (NBR 5739)
Relação água/materiais cimentícios	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (NBR 7222)
Teor de aditivo	Teor de ar incorporado (NBR NM 47)
	Massa específica, absorção e índice de vazios (NBR 9778)
	Retração (NBR 8490)
	Profundidade de carbonatação

A confecção de um concreto de alto desempenho é justificável, pois é um concreto que apresenta, além de resistências mecânicas adequadas ao seu uso, baixa permeabilidade e, assim, mesmo que ocorra carbonatação e que a armadura não esteja suficientemente protegida, pode oferecer a proteção física necessária devido a apresentar um refinamento maior dos poros (EHRLICH & ROSEMBERG, 1989; GLASSER, 1989).

A importância da determinação da profundidade de carbonatação em concreto com elevado teor de escória moída e escória granulada como agregado miúdo pode ser justificada pela discussão na revisão da NB 1 sobre a necessidade de aumento do cobrimento de armaduras em concretos com cimentos com adição de escória de alto-forno.

Quanto ao estudo da retração, a sua justificativa está no fato de que concretos de cimento com adição de escória de alto-forno, ao influenciarem os tempos e reações químicas entre os compostos químicos da pasta de cimento, podem interferir na retração final.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

O objetivo principal deste capítulo é apresentar e discutir os resultados dos ensaios com vistas a avaliar a influência da adição de 100% de escória moída, em relação à massa de cimento, ao concreto, com cimento CP III-32 RS, e de 72% de escória granulada em substituição à areia, utilizada como agregado miúdo, na resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral, no teor de ar incorporado, na massa específica, na absorção, no índice de vazios, na retração, na profundidade de carbonatação dos concretos com diferentes relações água/materiais cimentícios, comparando os resultados com concretos confeccionados com cimento CP II E-32 RS com 39% de escória moída e areia como agregado miúdo.

Pretende-se, com estes resultados do estudo experimental, avaliar a possibilidade de utilização de elevados teores de escória, como adição mineral e como agregado miúdo, em concretos sem que haja grande influência na carbonatação, desde que a sua dosagem seja adequada, a cura eficiente e a resistência para comparação seja 40 MPa.

5.2 Seleção do tipo de escória granulada e seleção do teor de escória moída, em substituição à escória granulada (Etapa 1)

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e consistência em mesa de queda, em argamassa, com os dois tipos de escórias granuladas, EA e EB, utilizando diferentes teores de escória moída em substituição à escória granulada. A Figura 5.1 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados nos ensaios e o objetivo da seleção do tipo de escória granulada e do teor de escória moída, em substituição à escória granulada (Etapa 1).

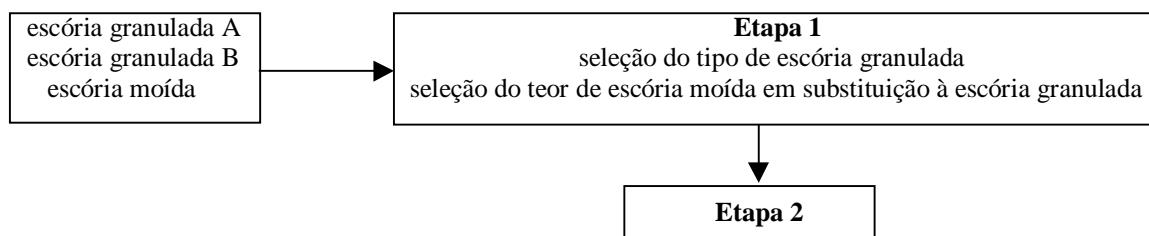


Figura 5.1 – Fluxograma mostrando os materiais utilizados nos ensaios e o objetivo da seleção do tipo de escória granulada e do teor de escória moída em substituição à escória granulada (Etapa 1).

A partir dos resultados desta etapa, o tipo de escória granulada e o teor de escória moída em substituição à escória granulada do traço de argamassa que apresentou melhor resistência à compressão, passaram a ser utilizados na etapa de seleção do aditivo superplastificante

O traço utilizado para as argamassas foi 1:3 (cimento : escória granulada) e a relação água/cimento mantida constante em 0,55, para os três traços de referência (Argamassa 1, 2 e 3) e cinco traços (Argamassa 5, 6, 7, 8 e 9), com diferentes teores de escória moída, em substituição à escória granulada, para cada uma das duas escórias EA e EB, passando os traços a serem denominados AA, para argamassa com escória granulada, A e AB, para argamassa com escória granulada B.

A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam os traços, as medidas de consistência, os resultados encontrados para resistência à compressão aos 7 e 28 dias e a massa unitária compactada das Argamassas 1 a 9, confeccionadas com as escórias EA e EB.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de consistência e resistência à compressão, em argamassa, utilizando escória granulada EA, relação água/cimento=0,55.

Traço em massa					Teor de escória moída sobre o total de agregado (%)	Consistência média (mm)	Resistência à Compressão (MPa)	
Argamassa	Cimento	Escória Moída	Escória Gran.	Areia			7 dias	28 dias
1*	1	-	-	3	0	216	24,2 (0,6)	37,6 (0,4)
2	1	-	3,0	-	0	140	18,5 (1,1)	32,2 (0,9)
3**	1	-	3,0	-	0	134	18,2 (0,9)	32,0 (0,3)
5	1	0,3	2,7	-	10	135	31,1 (1,2)	48,6 (0,4)
6	1	0,5	2,5	-	17	141	38,1 (1,0)	54,4 (2,0)
7	1	0,7	2,3	-	23	139	41,6 (0,3)	53,6 (1,8)
8	1	1,0	2,0	-	33	130	44,6 (0,7)	55,9 (0,6)
9	1	1,67	1,33		56	120	-	-

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

* Areia com granulometria da NBR 7215.

** escória granulada com granulometria da NBR 7215.

Os demais traços utilizaram escória granulada com granulometria natural.

O traço 9 apresentou-se muito seco e não foi moldado.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de consistência e resistência à compressão, em argamassa, utilizando escória granulada EB, relação água/cimento=0,55.

Traço em massa					Teor de escória moída sobre o total de agregado (%)	Consistência média (mm)	Resistência à Compressão (MPa)	
Argamassa	Cimento	Escória moída	Escória gran.	Areia			7 dias	28 dias
1*	1	-	-	3	0	216	24,2 (0,6)	37,6 (0,4)
2	1	-	3	-	0	172	25,6 (1,1)	40,4 (2,7)
3**	1	-	3	-	0	171	25,3 (0,6)	40,7 (1,7)
5	1	0,3	2,7	-	10	154	36,6 (0,6)	53,2 (0,9)
6	1	0,5	2,5	-	17	178	41,2 (0,4)	53,8 (2,1)
7	1	0,7	2,3	-	23	156	41,3 (0,7)	53,2 (1,3)
8	1	1	2	-	33	129	42,7 (0,4)	50,5 (3,0)
9	1	1,67	1,33	-	56	125	37,7 (0,7)	42,0 (0,5)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

* Areia com granulometria da NBR 7215.

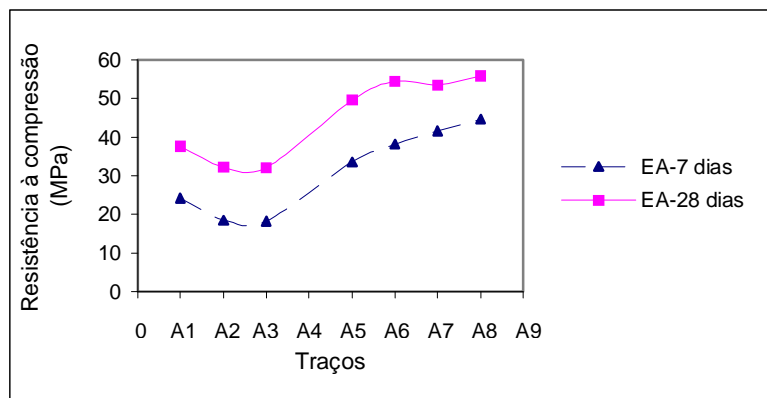
** escória granulada com granulometria da NBR 7215.

Os demais traços utilizaram escória granulada com granulometria natural.

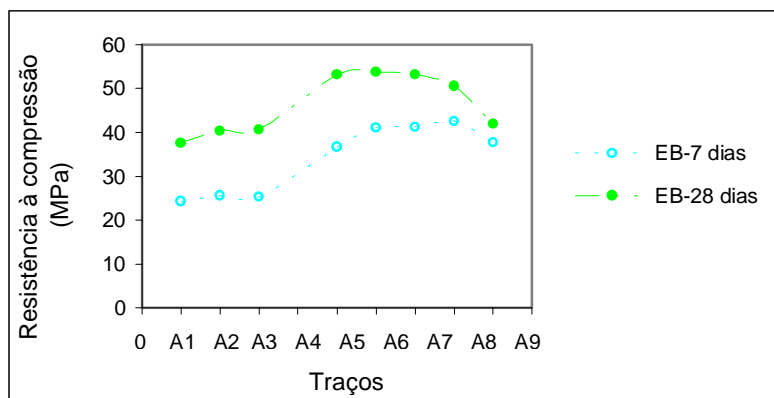
A Figura 5.2(a) mostra as curvas de resistências das escória EA para os traços das Argamassas 1 a 8 e a Figura 5.2(b), da escória EB para os traços das Argamassas 1 a 9, aos 7 e 28 dias, a/c=0,55 e a Figura 5.3 mostra as mesmas curvas, sobrepostas.

Com os resultados encontrados de resistência à compressão dos 8 traços, para as diferentes escórias granuladas EA e EB, apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA).

Primeiramente, foi avaliado, para cada conjunto de 3 corpos-de-prova, se os valores das resistências à compressão apresentavam diferenças significativas entre si. Os resultados desta análise mostraram não haver diferença significativa, tanto para os resultados de resistência à compressão axial aos 7 dias ($F=0,308$; $p=0,294$), quanto aos 28 dias ($F=1,283$; $p=0,294$), para as escórias EA e EB, comprovando a confiabilidade dos resultados.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Curvas das resistências à compressão dos vários traços de argamassa para: (a) a escória EA e (b) escória EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

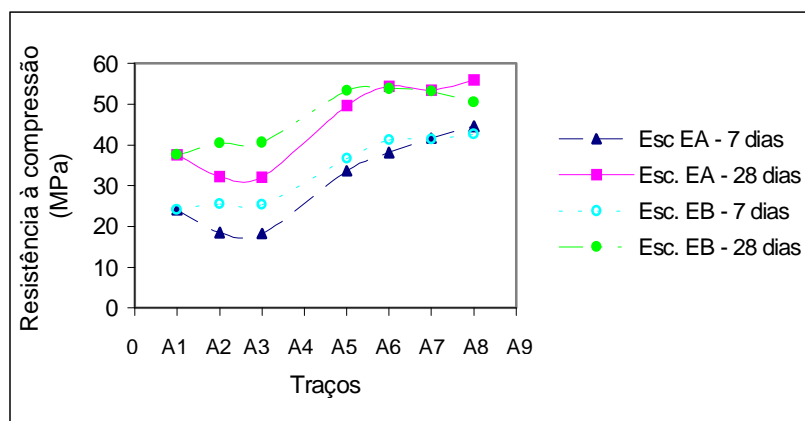


Figura 5.3 - Curvas das resistências à compressão, sobrepostas, dos vários traços de argamassa para as escória EA e EB nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

Observando a Figura 5.3, que mostra as curvas das resistências à compressão aos 7 e 28 dias, dos traços das Argamassas 1, 2, 3, 5, 6, 7 e 8, para as escória EA e EB, nota-se que o comportamento para os dois tipos de escória granulada, A e B, são bastante similares, a partir do traço da Argamassa 5, primeiro traço a usar escória moída em substituição à escória granulada.

Comparando as resistências à compressão das escória EA e EB, aos 7 e 28 dias, para cada traço individualmente, através das Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, fica claro que somente para os traços das Argamassas 2 e 3 houve diferenças entre as escórias e para o demais traços não houve diferenças significativas entre as escórias.

Através da Análise de Variância observou-se, nos traços das Argamassas 2 e 3, que as resistências à compressão das argamassas confeccionadas com a escória granulada B apresentaram melhores resultados do que as argamassas com escória granulada A, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Para os demais traços, não houve diferença significativa entre as duas escórias granuladas, para as duas idades.

Para os traços das Argamassas 2 e 3, que não utilizaram escória moída em substituição à escória granulada, as resistências maiores encontradas para a escória B, podem ser devido à melhor distribuição granulométrica da escória granulada B e à forma mais arredondada dos seus grãos, que proporcionam maior compacidade do concreto, contribuindo, assim, para aumentar a resistência das argamassas, nos traços sem substituição de escória granulada por escória moída.

Os demais traços tiveram comportamentos similares de resistências, para as escórias A e B devido, provavelmente, à contribuição dos finos da escória moída, usada em substituição à escória granulada.

Como os traços das Argamassas 6, 7 e 8 apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão, para aos dois tipos de escória, e sem diferenças significativas entre eles, optou-se pela utilização da escória A para continuação dos estudos, pois ela tem a forma natural obtida no processo de granulação, sem nenhum tratamento ou beneficiamento posterior.

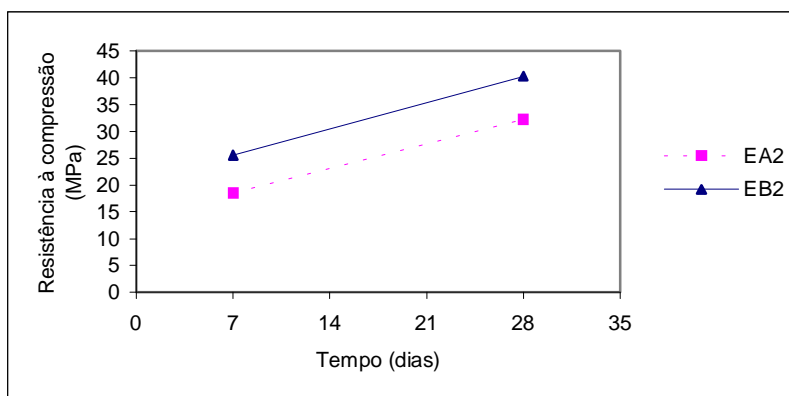


Figura 5.4 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 2, sem escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

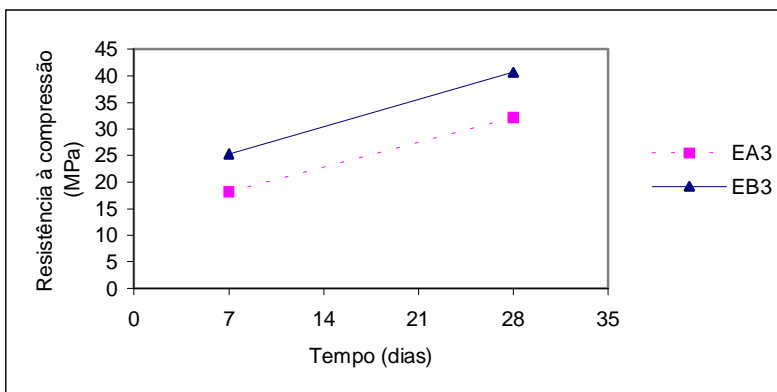


Figura 5.5 – Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 3, com escória granulada com granulometria da areia normal, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

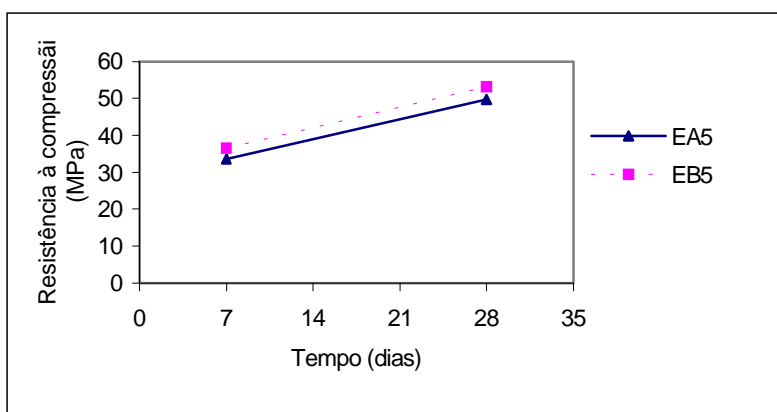


Figura 5.6 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 5, com 10% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

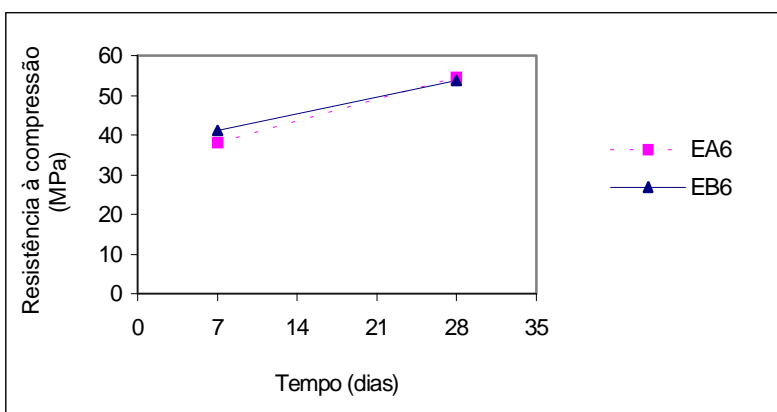


Figura 5.7 – Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 6, com 17% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

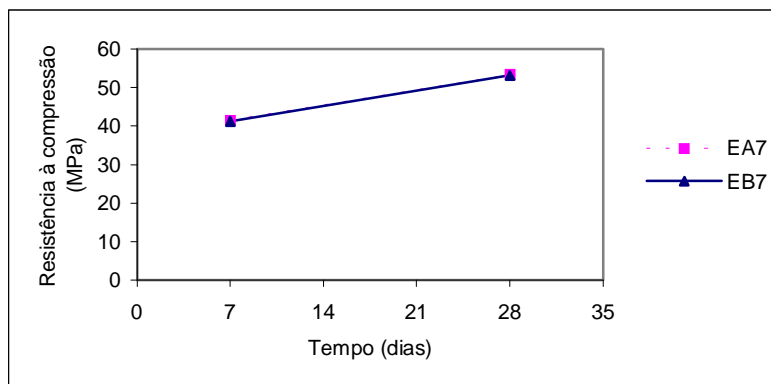


Figura 5.8 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 7, com 23% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

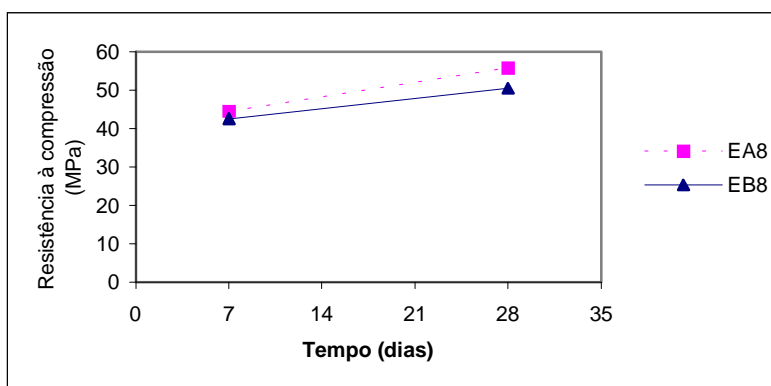


Figura 5.9 - Curva comparativa da resistência à compressão do traço da Argamassa 8, com 33% de escória moída em substituição à escória granulada, para as escórias EA e EB, nas idades de 7 e 28 dias, $a/c=0,55$.

Pela Análise de Variância dos resultados de resistência à compressão com a escória A, constataram diferenças estatisticamente significativas entre os traços, tanto aos 7 ($F=387,264$; $p=0,000$) quanto aos 28 dias ($F=233,687$; $p=0,000$).

O teste, a posteriori, de Duncan indicou que a maior resistência à compressão aos 7 dias foi para o traço da Argamassa 8, enquanto que aos 28 dias os traços das Argamassas 6 e 7 são estatisticamente iguais, assim como os traços das Argamassas 6 e 8, apesar do traço da Argamassa 7 ser diferente estatisticamente do traço da Argamassa 8.

Observou-se, então, uma tendência de aumento da resistência à compressão, com o aumento do teor de escória moída, em substituição à escória granulada, podendo ser devido à hidratação da escória moída, que se juntou aos finos do cimento, atuando como aglomerante, como sugerido por ALEXANDRE & SIBILEAU (1988) e SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990), ou atuando como filler.

No entanto, a partir do traço 6 houve uma diminuição do crescimento da resistência, provavelmente, devido à quantidade de hidróxido de cálcio produzida pela hidratação do clínquer ser insuficiente para hidratar toda a escória moída, passando, parte desta, a atuar como fíler. Estes resultados estão de acordo com estudos realizados por LIM & WEE (2000).

As Figura 5.10a, 5.10b e 5.10c mostram as consistências nos traços das Argamassas 7, 8 e 9, com, respectivamente, 23, 33 e 56% de escória moída em substituição à escória granulada, utilizando escória granulada EA.

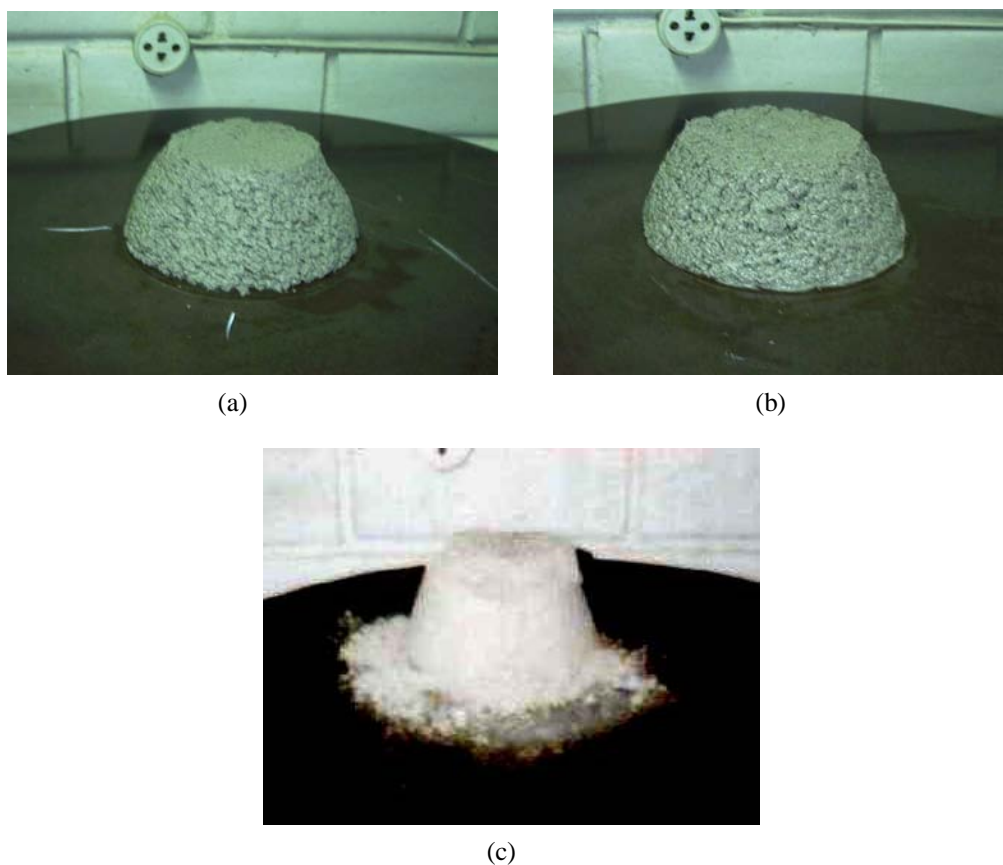


Figura 5.10 – Consistências das argamassas com escória granulada EA, $a/c=0,55$: (a) traço da Argamassa 7, (b) traço da Argamassa 8 e (c) traço da Argamassa 9.

As Figuras 11a, 5.11b e 5.11c, mostram as consistências nos traços das Argamassas 7, 8 e 9, com, respectivamente, 23, 33 e 56% de escória moída em substituição à escória granulada, utilizando escória granulada EB. As consistências para estes traços se apresentaram similares para as duas escórias EA e EB.

No entanto, para os traços das Argamassas 2, 3, 5 e 6, com, respectivamente, 0, 0, 10 e 17% de escória moída em substituição à escória granulada, as consistências para as argamassas utilizando escória EB foram maiores, o que pode ser atribuído à forma menos

angulosa de seus grãos, que as tornam menos trabalháveis, aumentando o espalhamento na mesa de consistência.

As medidas de consistências diminuíram, para os dois tipos de escória, à medida em que aumentou o teor de finos da mistura, pois, com maior quantidade de finos há necessidade de mais água, para obtenção de uma mesma consistência (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

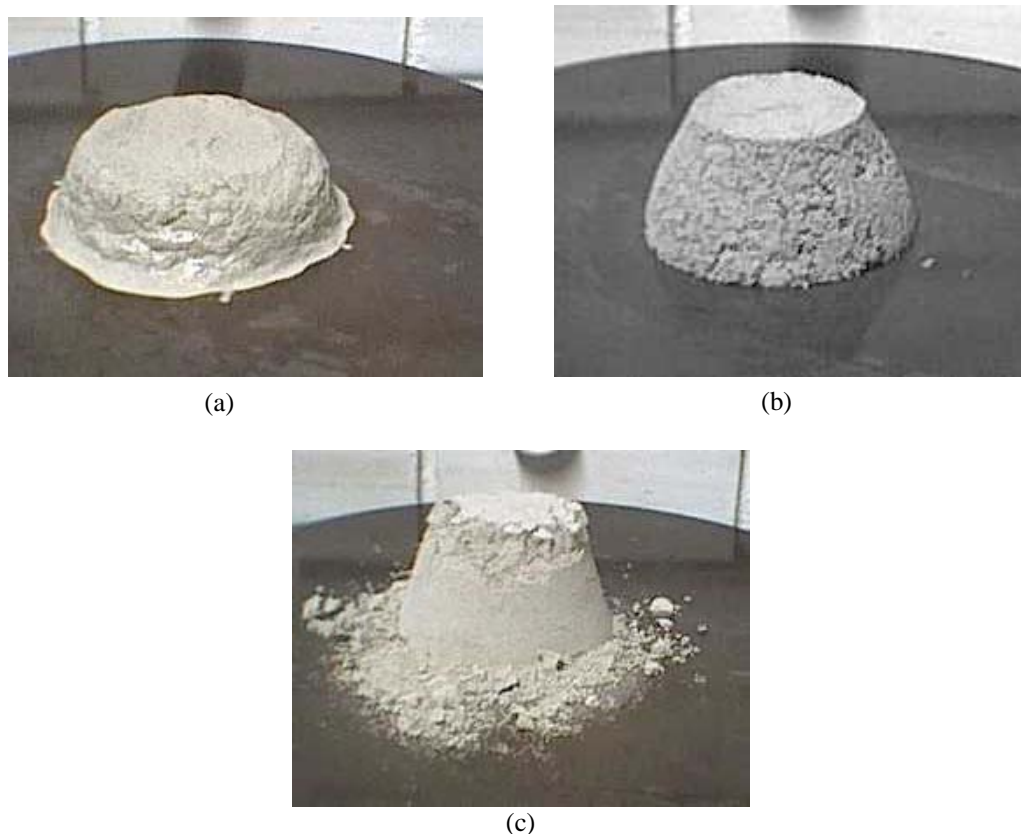


Figura 5.11 - Consistências das argamassas com escória granulada EB, $a/c=0,55$: (a) traço da Argamassa 7, (b) traço da Argamassa 8 e (c) traço da Argamassa 9.

Considerando, então, que os traços das Argamassas 6, 7 e 8, com, respectivamente, 17, 23 e 33% de escória moída em substituição à escória granulada, apresentaram resultados de resistência à compressão similares, optou-se pela continuação dos estudos na Etapa 2 com a utilização do traço 8, que tem maior teor de escória moída em substituição à escória granulada (33%), devido à possibilidade de ativação da escória moída com algum ativador químico.

5.3 Seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2)

Este estudo foi realizado utilizando o tipo de escória granulada e o teor de escória moída em substituição à escória granulada selecionados na Etapa 1. Foi avaliada a consistência de

pastas através do método do *mini-slump* e medido o tempo de início de pega em pasta variando o tipo e teor de aditivo superplastificante.

Em seguida foi medido o tempo de início de pega em argamassa e foram avaliadas as resistências à compressão de argamassas, utilizando a Argamassa 8, que passou a ser denominada Argamassa A, cujo traço é 1 : 1: 2 (cimento : escória moída : escória granulada), com 33% de escória moída em substituição à escória granulada e que apresentou melhor resultado do estudo da Etapa 1 (Seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada e seleção do tipo de escória granulada). O tipo e teor de aditivo superplastificante variou nos ensaios da Etapa 2.

A Figura 5.12 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2).

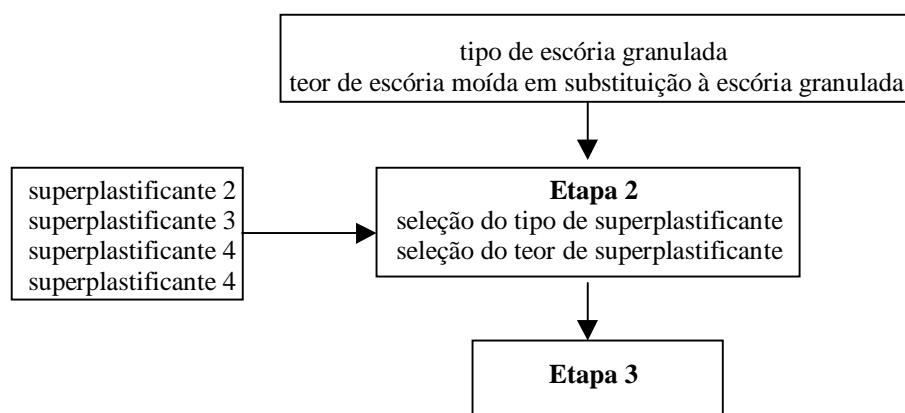


Figura 5.12 - Fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2).

O traço de argamassa com o tipo e teor de aditivo superplastificante, que apresentou melhores resultados nos ensaios realizados, foi utilizado na Etapa 3.

Os ensaios do estudo do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2) são mostrados a seguir.

5.3.1 Estudos em pasta

5.3.1.1 Espalhamento através do Método do *Mini-Slump*

Neste estudo, foram utilizados 4 (quatro) aditivos superplastificantes de uma mesma marca, à base de naftaleno sulfonado (ADT 1); de uma mistura de lignossulfato, naftaleno sulfonato e melamina sulfonada (ADT 2); policarboxilato (ADT 3) e melamina sulfonada (ADT 4).

Para cada um dos aditivos superplastificantes estudados, foram realizados ensaios em pasta, através do método do *mini-slump*, utilizando diferentes teores de aditivo superplastificante, sendo considerado o teor ideal de aditivo aquele que proporcionasse manutenção de consistência por um tempo adequado, (AITCIN, 2000) sendo, neste caso, tomado como ideal, um tempo de aproximadamente 180 minutos.

A mistura de materiais cimentícios utilizada foi de 100% de adição de escória moída ao cimento CP III-32, traço 1:1 (cimento : escória moída) e a relação água/material cimentício da pasta foi mantida constante em 0,30. Este traço foi usado considerando que, no estudo de seleção do tipo de escória granulada e seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada, item 5.2, o traço em argamassa definido para continuação dos estudos, continha esta composição de materiais cimentícios.

As quantidades de materiais utilizados nas argamassas estão no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Quantidade de materiais utilizados nos estudos em argamassa para ensaios de resistência à compressão axial para seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante, relação água/materiais cimentícios=0,28.

Argamassa	Traço (cimento : esc. moída : escória gran.)	Material cimentício (g)		Agregado miúdo(g)
		Cimento CP III-32	Escória moída	Escória granulada
A	1 : 1 : 2	624	624	1248,0
B	1 : (0,7 : 0,3) : 2,7	624	624	1684,8
C	1 : (0,4 : 0,6) : 2,4	624	624	1497,6

A água do aditivo superplastificante foi descontada da água de amassamento.

Foram realizadas repetições de alguns ensaios que utilizaram o método do *mini-slump*, com o objetivo de observar sua confiabilidade, que ficou comprovada após análise estatística. As repetições foram feitas para os aditivos 2, 3 e 4 e as curvas estão apresentadas nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, nos teores 0,47%, 0,16% e 0,38% de sólidos, respectivamente.

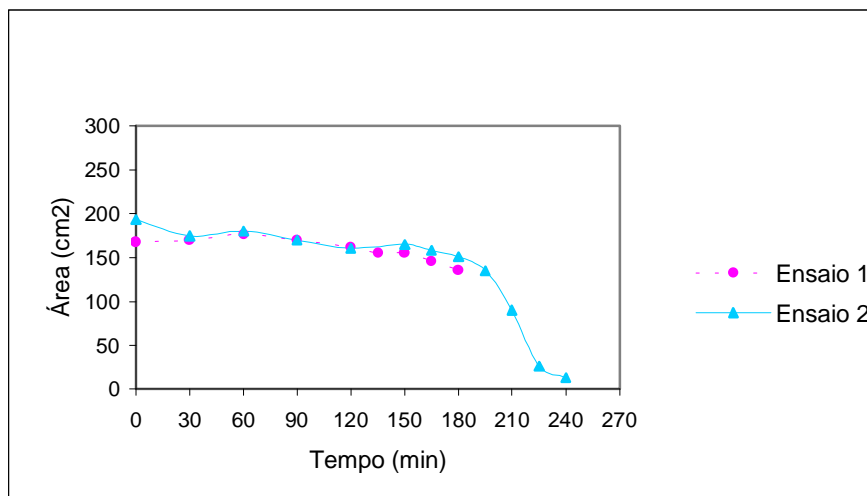


Figura 5.13 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini-slump, para o ADT 2 no teor de 0,47% de sólidos.

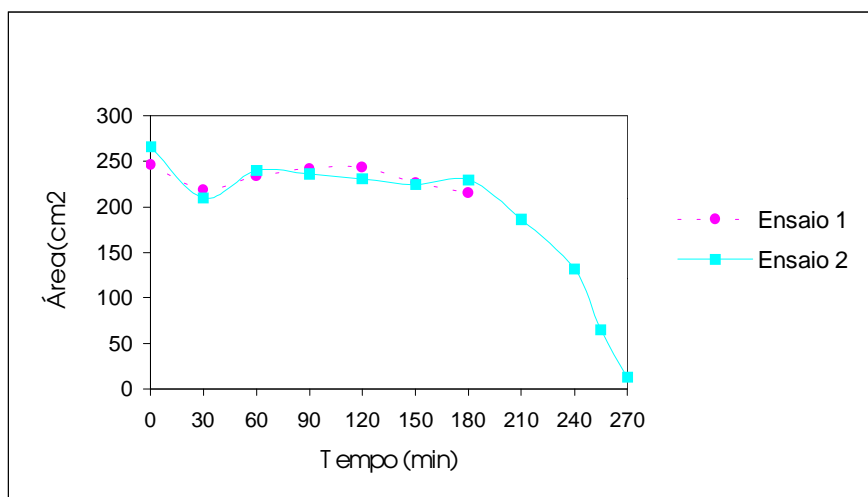


Figura 5.14 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini-slump, para o ADT 3, no teor de 0,16% de sólidos.

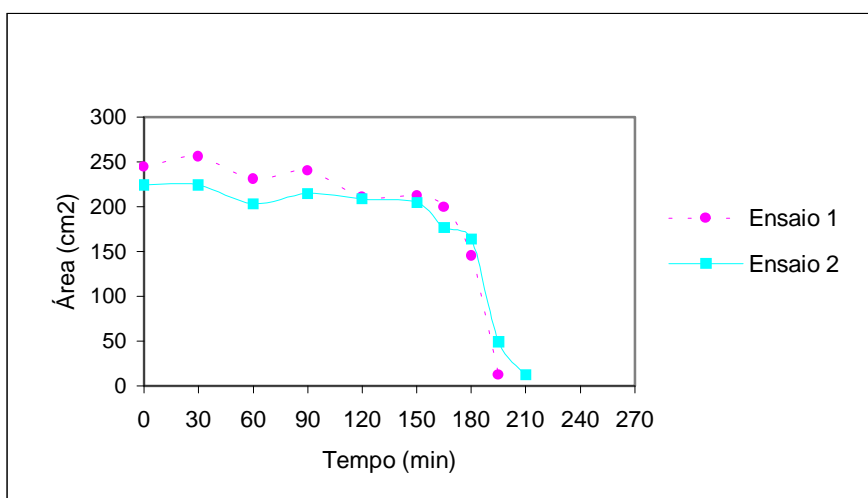


Figura 5.15 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, em repetição do ensaio utilizando o método do mini-slump, para o ADT 4, no teor de 0,38% de sólidos.

As Figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 apresentam as áreas de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para os quatro aditivos estudados, obtidas através do método do mini-slump.

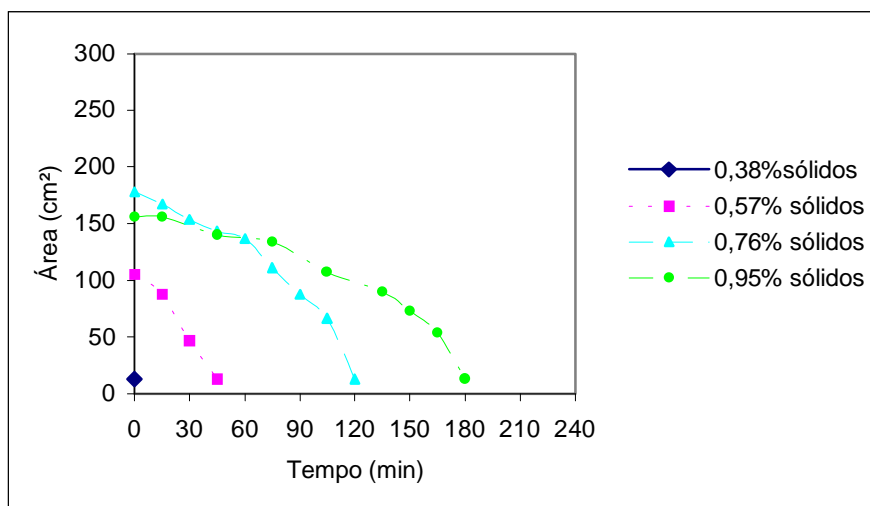


Figura 5.16 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 1, para diferentes teores de sólidos.

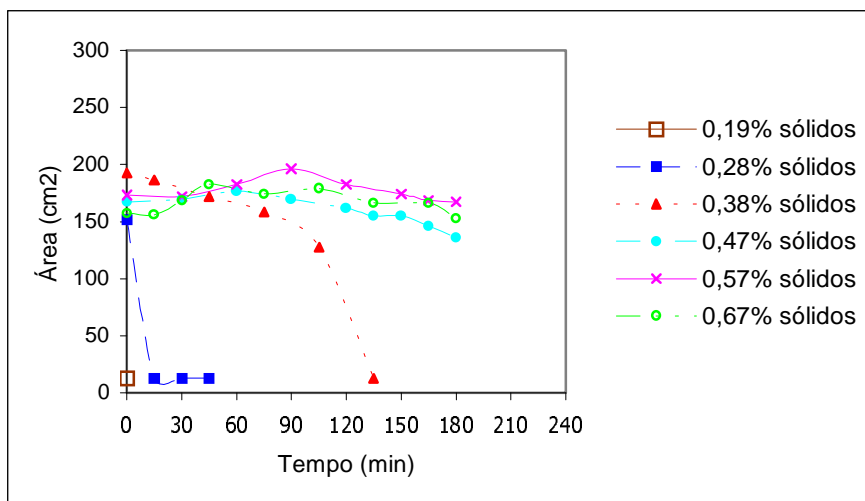


Figura 5.17 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 2, para diferentes teores de sólidos.

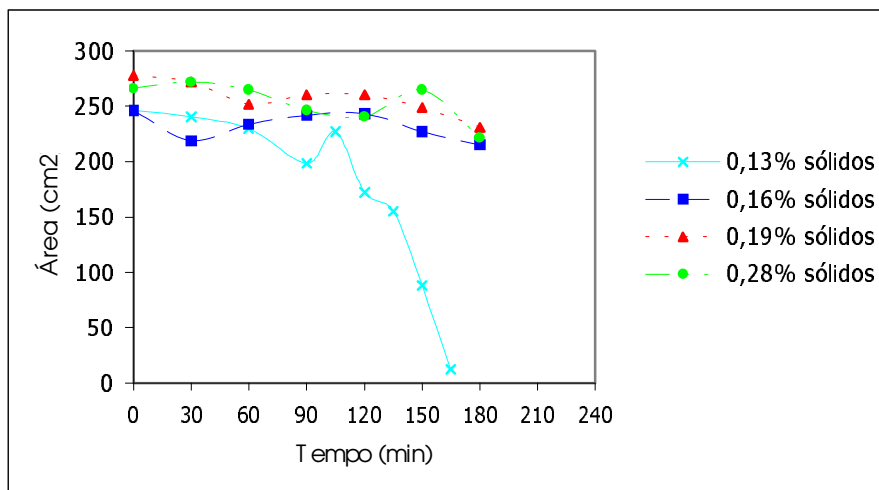


Figura 5.18– Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 3, para diferentes teores de sólidos.

Observando as curvas da Figura 5.19 nota-se, para o teor de 0,95% de sólidos do ADT 1, uma manutenção de consistência inicial de 80 minutos, ocorrendo, logo em seguida, queda constante de consistência. Os teores de 0,76 e 0,57% apresentaram queda constante de consistência e o teor de 0,38% não apresentou a fluidificação.

Dentre os teores de sólidos estudados com o ADT 2, observados nas curvas da Figura 5.17, os teores de 0,47, 0,57 e 0,67% apresentaram manutenção de consistência por tempo mínimo de 180 minutos, o que não ocorreu para os teores de 0,19, 0,28 e 0,38%.

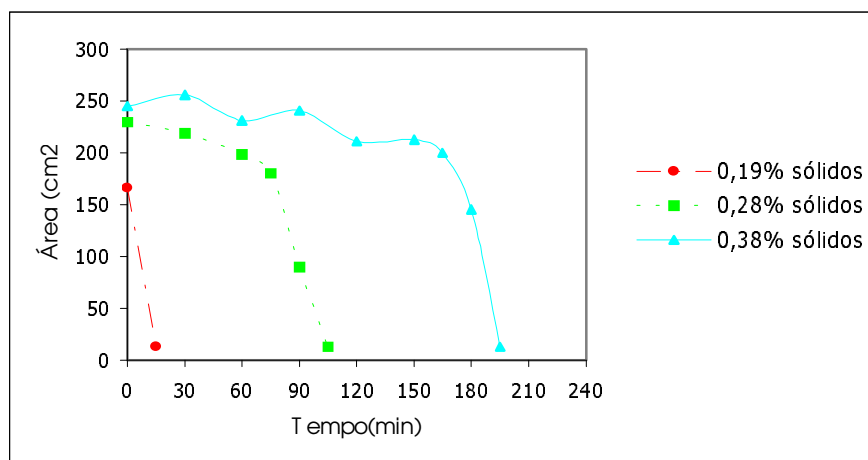


Figura 5.19 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para o ADT 4, para diferentes teores de sólidos.

As curvas da Figura 5.18 mostram que a manutenção de consistência, no caso do ADT 3, pelo tempo de 180 minutos, foi alcançada para os teores de sólidos do aditivo iguais a 0,16, 0,19 e 0,28%. Somente para o teor de 0,13% a manutenção de consistência não foi adequada.

Para o ADT 4, as curvas da Figura 5.19 mostram manutenção de consistência por tempo maior que 180 minutos, para o teor de 0,38%, o que não ocorreu para os teores de 0,19 e 0,28%.

Na Figura 5.20 estão sobrepostos os melhores resultados de manutenção de consistência ao longo do tempo para os aditivos 1, 2, 3 e 4. Observa-se que os aditivos 3 e 4 apresentaram as maiores áreas de espalhamento e tempo de manutenção de consistência iguais ou superiores a 180 minutos.

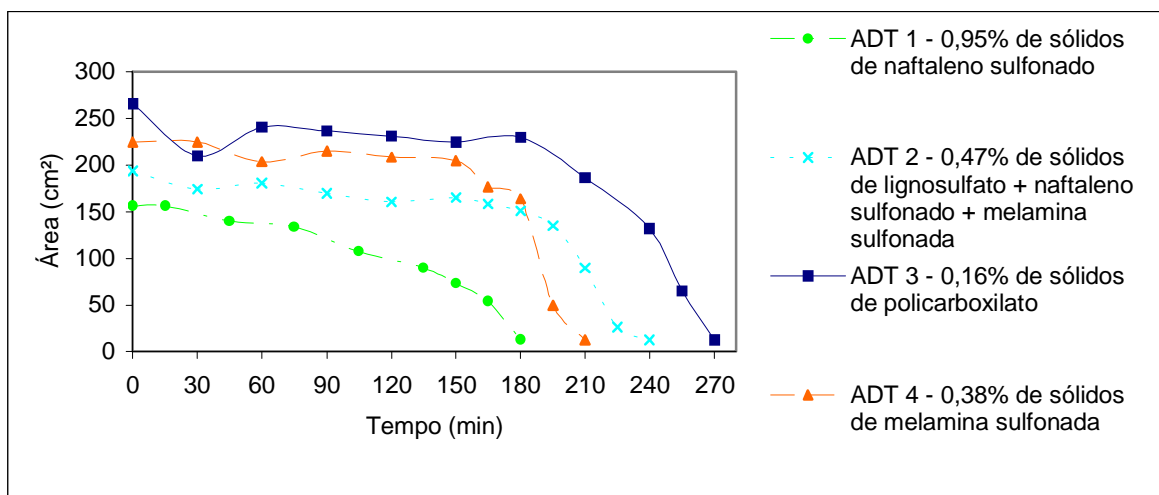


Figura 5.20 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para os melhores teores de sólidos dos ADT 1, 2, 3 e 4, para diferentes teores de sólidos.

As Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 mostram a área de espalhamento das pastas ao longo do tempo, para os teores de 0,19%, 0,28%, 0,38% e 0,57%, para cada um dos diferentes tipos de aditivos.

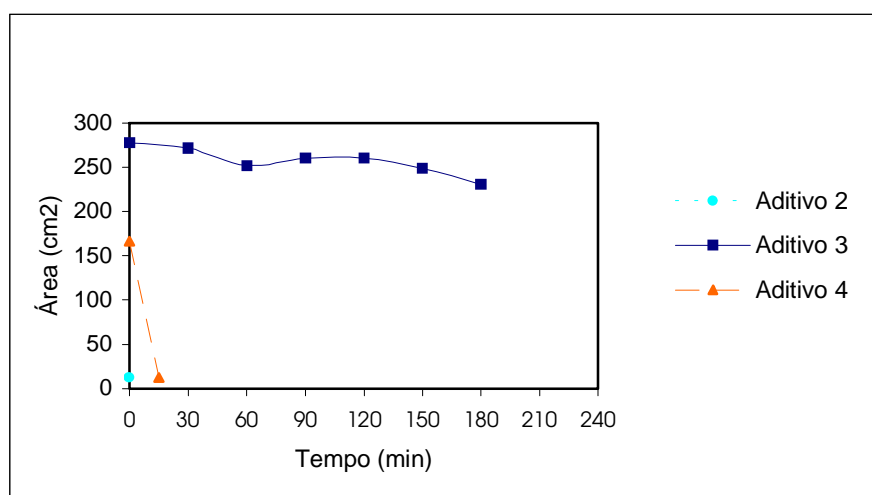


Figura 5.21 - Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para teor de aditivo de 0,19%.

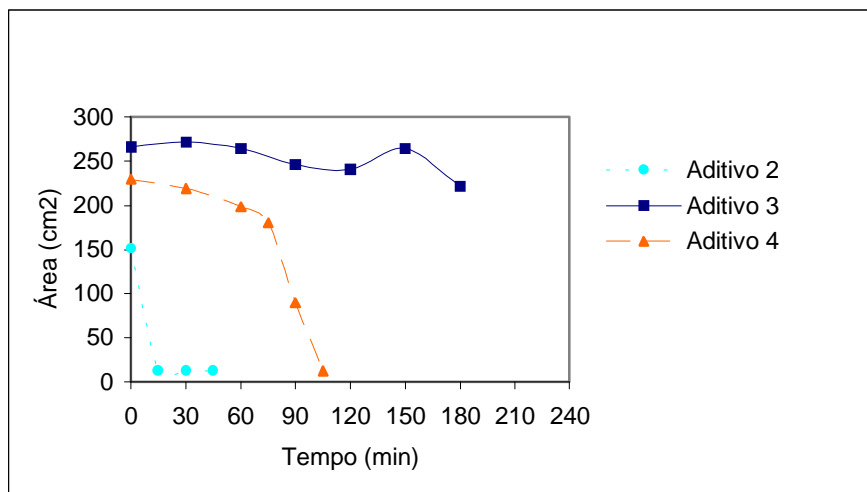


Figura 5.22 – Área de espalhamento da pasta ao longo do tempo para teor de aditivo de 0,28%.

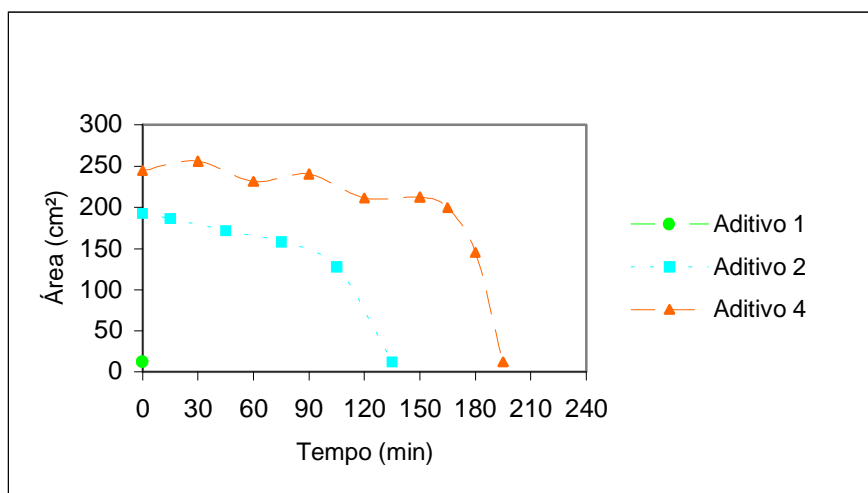


Figura 5.23 – Área de espalhamento da pasta, ao longo do tempo, para teor de aditivo de 0,38%.

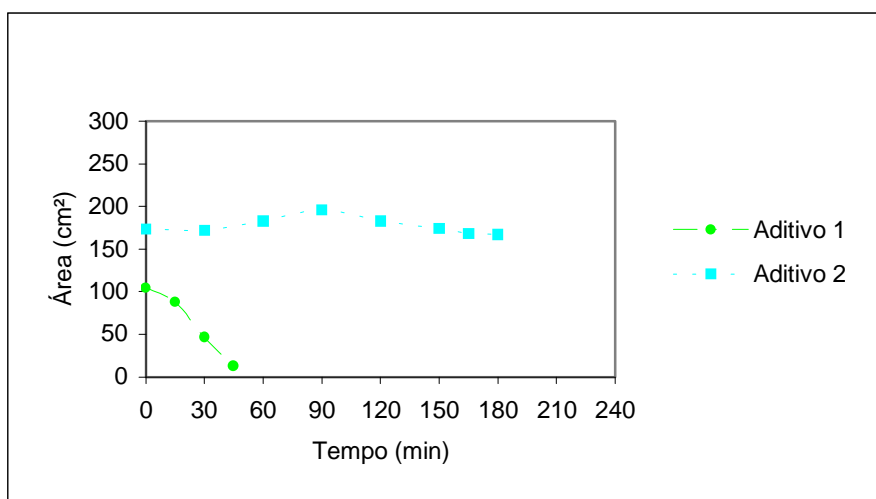


Figura 5.24 – Área de espalhamento da pasta ao longo do tempo para teor de aditivo de 0,57%.

Cada aditivo apresentou comportamento diferente quanto à manutenção de consistência, o que já era esperado, pois cada aditivo tem teores de sólidos e princípios ativos diferentes.

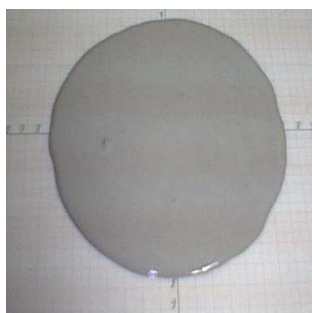
CASSA *et al.* (1999) ressalta que a composição química do aditivo e a composição química e as características do material cimentício podem causar perda de consistência, caracterizando a incompatibilidade entre o dado aditivo superplastificante e o material cimentício.

A Figura 5.25 apresenta o espalhamento que, no caso, foi igual ao diâmetro do molde, para a mistura de referência, sem aditivo, com o mesmo traço 1:1 (cimento : escória moída) dos ensaios com aditivo.



Figura 5.25 - Ensaio de referência, utilizando o método do mini-*slump*, para pasta, no traço 1:1 (cimento : escória moída), sem aditivo, para o tempo de 0 minutos

As Figuras 5.26 a e 5.26 b exemplificam o ensaio de espalhamento em pasta, mostrando a área de espalhamento utilizando o ADT 1, para o teor de 0,95% de sólidos, nos tempos 0 (zero) e 180 minutos, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.26 – Exemplos de ensaios em pasta mostrando a área de espalhamento com o ADT 1, para o teor de 0,76%, (a) 0 minutos e (b) 180 minutos.

Através da análise das curvas das Figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19, constatou-se que pode haver compatibilidade entre os aditivos 2, 3 e 4 e o material cimentício usado, pois as pastas apresentaram manutenção de consistência por um tempo mínimo de 180 minutos, considerado tempo suficiente, para que, posteriormente, o concreto tenha uma manutenção de consistência adequada para que seja trabalhado.

Adotou-se como teor adequado o menor teor de sólidos que proporcionou o tempo de manutenção de consistência desejado, pois teores maiores seriam anti-econômicos ou poderiam retardar o início de pega. O Quadro 5.2 apresenta o teor de sólido para cada aditivo que atendeu ao requisito de manutenção de consistência, pelo tempo mínimo de 180 minutos.

Quadro 5.2 – Tipo de aditivo e menor teor de sólido, do aditivo que apresentou tempo mínimo de manutenção de consistência de 180 minutos.

Tipo de aditivo	Teor de sólido de aditivo (%)
ADT 2	0,47
ADT 3	0,16
ADT 4	0,38

O ADT 1 apresentou uma rápida perda de consistência, sugerindo a não compatibilidade com o material cimentício estudado. Assim, os estudos com este aditivo foram interrompidos.

5.3.1.2 Tempo de início de pega em pasta

Foram realizados ensaios de tempo de início de pega da pasta de cimento, através do aparelho de Vicat, para os melhores teores de aditivo, obtidos nos ensaios pelo método do *mini-slump*, item 5.3.1. Os tempos de início de pega são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios de início de pega com os diferentes aditivos.

Tipo de aditivo	Teor de sólido do aditivo (%)	Início de pega (hora:minuto)
ADT 1	0,95	Superior a 8 horas
ADT 2	0,47	Superior a 8 horas
ADT 3	0,16	4:35
ADT 4*	0,38	Superior a 8 horas

* com 8:15 horas apresentou 0,5cm

Pelos resultados do ensaio de tempo de início de pega em pasta, para os diferentes aditivos, constatou-se que houve um tempo muito longo de início de pega, para os aditivos ADT1, ADT 2 e ADT 4.

Como o ADT 1 já havia apresentado incompatibilidade com o cimento nos estudos através do método do *mini-slump*, decidiu-se, então, continuar os estudos com os ADT 2, ADT3 e ADT4.

5.3.2 Estudos em argamassa

5.3.2.1 Início de pega através do penetrômetro

A Tabela 5.4 apresenta os tempos de início de pega, medidos através do penetrômetro, para cada aditivo. Os tempos de início de pega, encontrados para as argamassas confeccionadas com os ADT 3 e 4, de 3:10 e 4:30 horas, respectivamente, mostraram-se adequados às etapas de produção do concreto.

Embora o aditivo ADT 2 tenha apresentado melhor resistência à compressão axial aos 28 dias, o tempo de início de pega pelo método do penetrômetro mostrou-se muito longo (28:20 horas), o que dificultaria a sua aplicação em obra. Optou-se, então, pela não utilização deste aditivo nos estudos posteriores.

Os tempos de pega encontrados com os ADT 3 e 4 estão de acordo com valores encontrados na literatura (BROOKS *et al.*, 2000), em ensaios realizados em concretos, cujos valores de início de pega situaram-se entre 8 e 12 horas para teores entre 20 e 60% de escória, em substituição ao cimento, utilizando elevadas dosagens de aditivo superplastificante.

Tabela 5.4 – Tempo de início de pega, para os ADT 2, 3 e 4 para o traço 1:1:2,7.

Aditivo	Teor de aditivo (%)	Tempo de início de pega (h:min)
ADT 2	0,47	28:20
ADT 3	0,108	3:10
ADT 4	0,315	4:30

As Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam as curvas com os resultados dos ensaios de resistência à penetração em argamassa, para os ADT 2, 3 e 4, traço B (1:1:2,7), (cimento: esc. moída: esc. granulada). O trecho em linha horizontal da Figura 5.27 foi durante a noite.

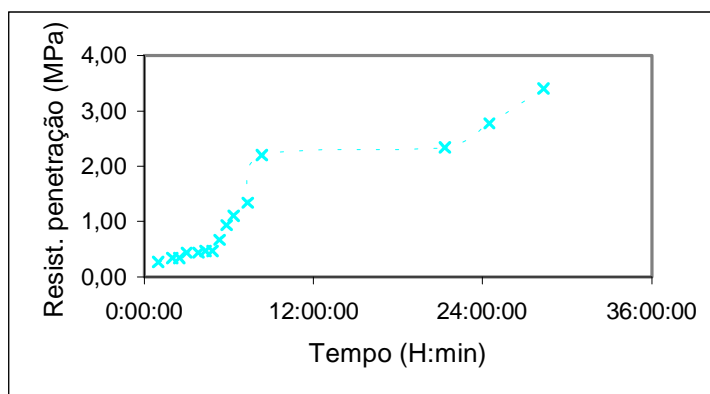


Figura 5.27 – Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 2, (à base de lignosulfato+naftaleno sulfonado+melamina sulfonada). OBS.

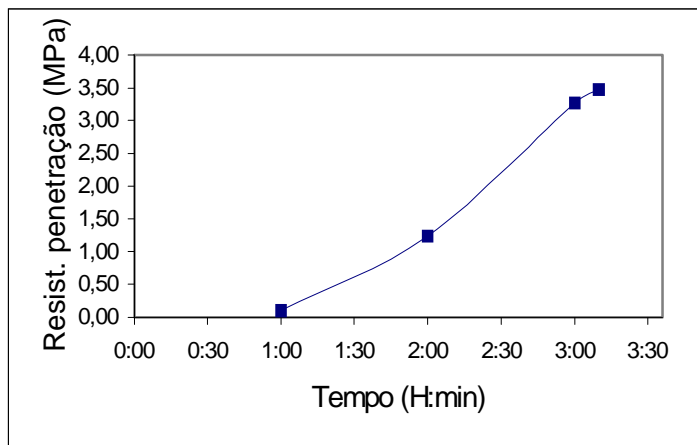


Figura 5.28 – Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 3 (à base de carboxilato).

Comparando-se as curvas dos tempos de pega das argamassas, utilizando os ADT 2, 3 e 4 através da Figura 5.30, observa-se a grande diferença encontrada na argamassa com ADT 2 e com os demais aditivos superplastificantes.

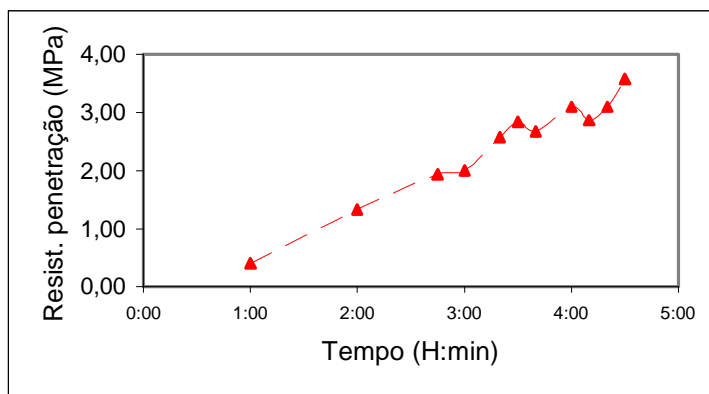


Figura 5.29 - Resistência à penetração, ao longo do tempo, para o ADT 4 (à base de melamina sulfonada).

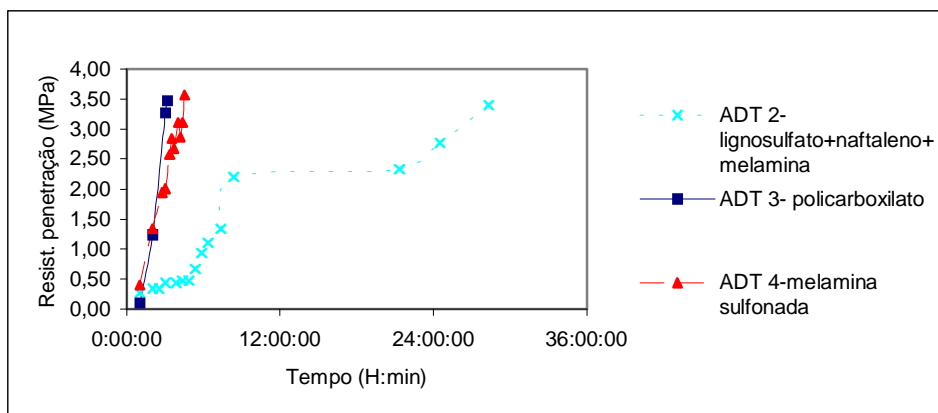


Figura 5.30 – Comparação entre as resistências à penetração, ao longo do tempo, para os ADT 2, 3 e 4.

Com relação ao fator custo, o ADT 3 apresentou um custo muito mais elevado do que o ADT 4 por litro, porém, é necessário um teor muito mais baixo (de sólidos) do que este último e seus custos, por teor de sólidos, se equivalem.

5.3.2.2 Resistência à compressão em argamassas

Os resultados de resistências à compressão, medidas de consistências e teor de ar incorporado das argamassas, para os traços A, B e C, com os teores de sólidos dos aditivos ADT 2, ADT 3 e ADT 4, que conferiram consistência de 200 ± 10 mm, são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados de resistências à compressão, medidas de consistências e teor de ar incorporado das argamassas para os traços A, B e C para os aditivos 2, 3 e 4.

Traço (cimento: esc. moída: esc. granulada)	Tipo de aditivo	Teor de aditivo (%)	Consistência* (mm)	Teor de ar incorporado * (%)	Resistência à compressão* (MPa)	
					7 dias	28 dias
A = (1:1:2)	ADT 2	0.28	194	5,1	50,4 (11,4)	64,9 (2,0)
	ADT 3	0.08	192	5,9	48,8 (0,5)	59,3 (2,1)
	ADT 4	0.26	192	4,5	51,0 (0,7)	59,4 (1,8)
B = (1:1:2,7)	ADT 2	0.47	208	7,3	51,5 (0,8)	67,9 (1,4)
	ADT 3	0.108	197	7,0	54,7 (2,2)	58,9 (1,3)
	ADT 4	0.315	205	5,5	53,9 (3,5)	58,6 (2,9)
C = (1:1:2,4)	ADT 2	0.38	205	5,9	48,8 (4,2)	70,1 (1,7)
	ADT 3	0.08	204	7,0	49,9 (2,2)	60,8 (2,7)
	ADT 4	0.28	209	5,4	51,1 (2,3)	61,0 (5,2)

Os valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão.

* Valores médios

O traço A (1 : 1 : 2) foi utilizado considerando que, no estudo de seleção do tipo de escória granulada e seleção do teor de escória moída em substituição à escória granulada, item 5.2, o traço em argamassa definido para continuação dos estudos, continha esta composição. Os traços B (1:1:2,7) e C (1:1:2,4) são variações do teor de escória granulada.

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para os traços A(1:1:2), B(1:1:2,7) e C(1:1:2,4), com os ADT 2 (à base de lignosulfato+naftaleno sulfonado+ melamina sulfonada), ADT 3 (à base de policarboxilato), e ADT 4 (à base de melamina sulfonada).

Pela Análise de Variância (ANOVA), para a idade de 7 dias, os resultados de resistências à compressão indicaram não existir diferenças significativas entre os traços A, B e C ($F=6,890$; $p=0,007$). Pelo teste a posteriori de Duncan, o traço C apresentou menor resistência à compressão do que os traços A e B.

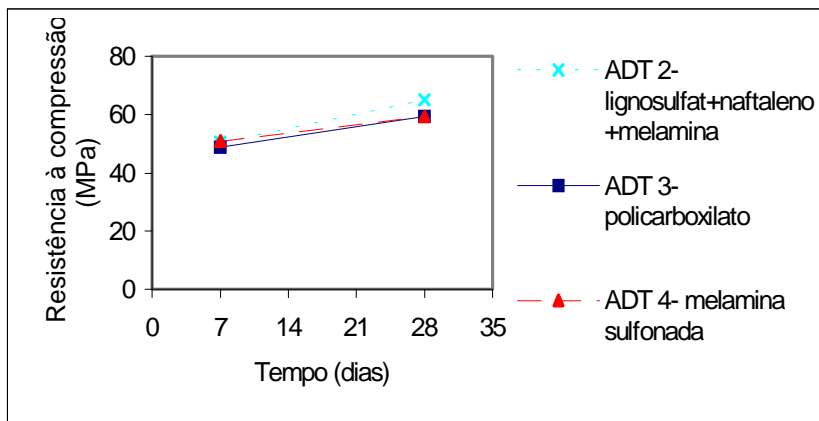


Figura 5.31 – Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, traço A (1:1:2), para os ADT 2, ADT 3 e ADR 4.

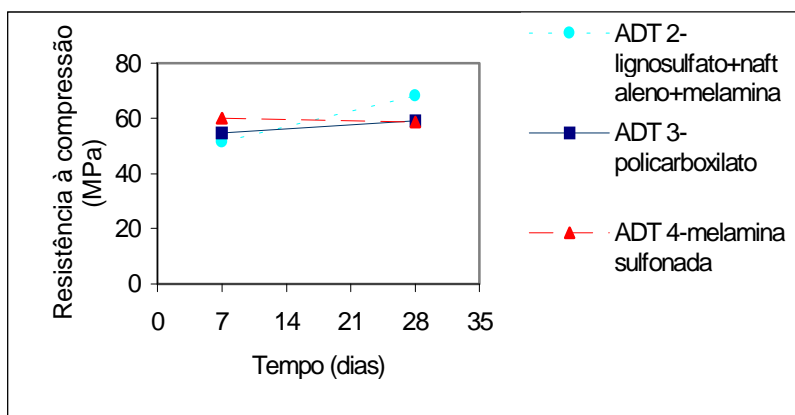


Figura 5.32 – Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, do traço B (1:1:2,7), para os ADT 2, ADT 3 e ADT 4.

Para a idade de 28 dias, os resultados de resistências à compressão indicaram não existir diferenças significativas entre os traços A, B e C. Porém, quando analisadas as médias dos traços em conjunto, houve diferenças significativas entre os aditivos, mostrando, no teste a posteriori de Duncan, que o aditivo que contribuiu para maior resistência foi o ADT 2.

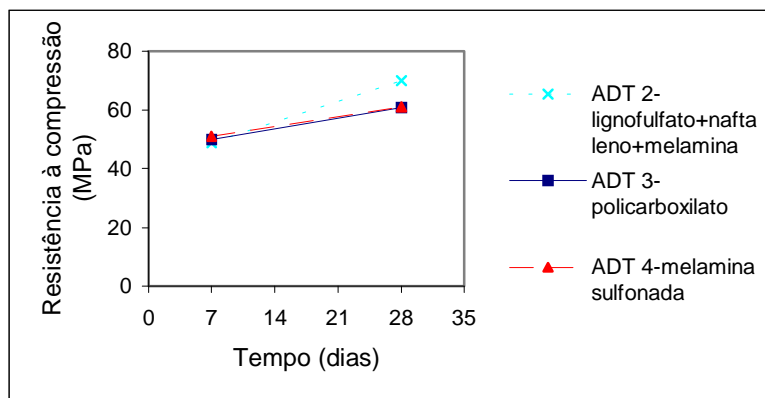


Figura 5.33 – Resistências à compressão aos 7 e 28 dias, do traço C (1:1:2,4), para os ADT 2, ADT 3 e ADT 4.

Como não foram observadas diferenças para as resistências à compressão, entre os traços A, B e C aos 28 dias, optou-se pelo traço B (1:1:2,7), (cimento: esc. moída: esc.

granulada), que é mais rico em escória granulada. Esta opção é justificada pelo objetivo do estudo de se utilizar elevados teores de escória, tanto moída quanto granulada.

Para a escolha final do aditivo superplastificante, considerou-se que, apesar dos ADT 3 e ADT 4 não apresentarem diferenças estatisticamente significativas com relação ao resultado de resistência à compressão axial e apresentarem custos equivalentes e tempo de início de pega compatíveis para a sua aplicação em obra, optou-se pelo aditivo ADT 4, considerando ser este um aditivo usado há mais tempo por vários pesquisadores com relato de bons resultados (MALHOTRA, 1983; MAILVAGANAM *et al.*, 1983; ENGSTRAND, 1998; PICCOLI *et al.* 1999). Além disso, é importante ressaltar que uma pequena variação na dosagem do ADT 3 poderia ocasionar grandes variações nas propriedades dos concretos, exigindo maiores cuidados na sua utilização.

5.4 Seleção do teor de Na₂O do silicato de sódio (Etapa 3)

O objetivo principal da Etapa 3 foi selecionar o teor adequado de Na₂O do silicato de sódio (Módulo de sílica = 1,6), utilizado como ativador da escória, visando melhorar a resistência à compressão do concreto e avaliar a possibilidade de incompatibilidades entre os materiais cimentícios e os aditivos superplastificantes utilizados.

O silicato de sódio foi utilizado em adição à escória de alto-forno.

Este estudo foi realizado utilizando o traço de Argamassa B, 1 : 1 : 2,7 (cimento : escória moída : escória granulada) e o tipo e teor de aditivo superplastificante que apresentou melhores resultados na Etapa 2, quando do estudo de compatibilidade entre material cimentício e aditivo superplastificante.

Foi avaliada, em primeiro lugar, a consistência de pastas através do método do *mini-slump* variando o tipo e teor de aditivo superplastificante e o teor de Na₂O do silicato de sódio. Em seguida foram avaliadas as resistências à compressão da Argamassas B variando, também, o tipo e teor de aditivo superplastificante e o teor de Na₂O do silicato de sódio.

A figura 5.34 apresenta o fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo de compatibilidade entre material cimentício-aditivo-silicato de sódio (Etapa 3).

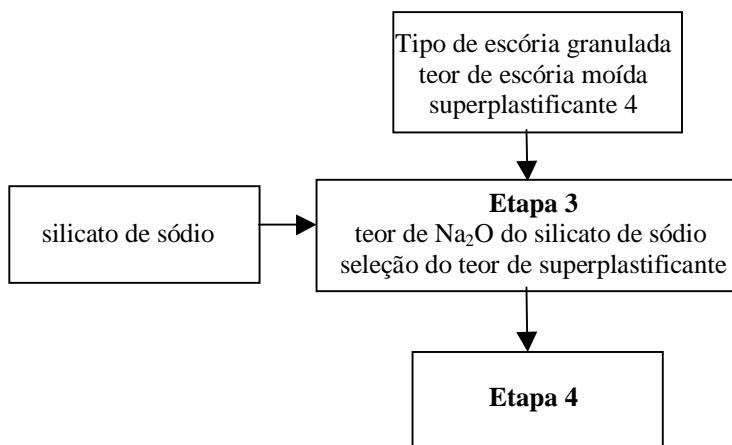


Figura 5.34 - Fluxograma mostrando os materiais utilizados e o objetivo do estudo de compatibilidade entre material cimentício-aditivo-silicato de sódio (Etapa 3).

5.4.1 Estudos em pasta

5.4.1.1 Espalhamento através do método do Mini-Slump

A mistura de materiais cimentícios utilizada foi de 100% de adição de escória moída ao cimento CP III 32-RS, traço 1:1 (cimento : escória moída) e a relação água/material cimentício da pasta mantida constante em 0,30.

O tipo de superplastificante utilizado foi ADT 4, o módulo de sílica do silicato igual a 1,6, e o teor de cal hidratada igual a 5%, em adição ao teor de escória adicionada, foram, também, mantidos constantes.

O teor de superplastificante variou para cada teor de Na₂O do silicato estudado, buscando-se, através do ensaio do mini-*slump*, um tempo mínimo de manutenção de consistência de 60 minutos, tempo este menor do que o estudado nas outras etapas, já prevendo uma aceleração do tempo de início de pega, com a utilização de silicato de sódio como ativador da escória.

O Quadro 5.3 apresenta os tempos da manutenção de consistência obtidos, através do método do mini-*slump*, para diferentes teores de Na₂O do silicato de sódio e diferentes teores de sólidos do ADT 4.

Este ensaio foi iniciado com 1% de Na₂O do silicato de sódio e os teores de sólidos do aditivo superplastificante utilizado estavam dentro da faixa dos teores recomendados pelo fabricante.

Quadro 5.3 - Tempos da manutenção de consistência obtidos para diferentes teores de Na₂O do silicato e teores de sólidos do aditivo superplastificante.

Teor de Na ₂ O do silicato de sódio (%)	Teor de sólidos do aditivo (%)	Tempo da retenção de consistência (min)
0,5	0,76	90
	0,5	60
	0,38	0
0,75	0,76	0
1	1	0
	0,75	0
	0,38	0

Com o teor de 1% de Na₂O do silicato de sódio, a pasta não apresentou espalhamento para teores de 0,38%, 0,76% e 1% de sólidos de aditivo, o mesmo ocorrendo para o teor de 0,75% de Na₂O do silicato de sódio e 0,76% de sólidos do aditivo superplastificante estudado (ADT 4).

Para o teor de 0,5% de Na₂O do silicato de sódio com um teor de aditivo de 0,76% a pasta apresentou espalhamento por 90 min e, com 0,5% de aditivo, o espalhamento foi mantido por 60 min, porém com queda acentuada.

Os estudos utilizando silicato de sódio foram, então, interrompidos, devido ao fato de não se ter alcançado sucesso na ativação da escória moída, nos sistemas clínquer-escória e, conseqüentemente, não se ter conseguido aumentar a resistência à compressão, sendo, portanto, um tema que merece ser continuado pesquisado.

5.4.2 Estudos em argamassa

5.4.2.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial, em argamassa, foram realizados com o traço B - 1:1:2,7 (cimento : escória moída : escória granulada), considerando que, no estudo de compatibilidade entre material cimentício e aditivo superplastificante, item 5.3.3, o traço em argamassa definido para continuação dos estudos, continha esta composição. O teor de aditivo ADT 4 foi ajustado, para se obter uma consistência de 200±10mm. O agregado miúdo utilizado nesta etapa foi constituído de 72% de escória moída e 28% de areia, composição esta encontrada nos estudos realizados, paralelamente, para a dosagem do concreto (WANG *et al.*, 1995; ANDERSON & GRAM, 1988; JOHN, 1995; SILVA, 1998; BAKHAREV *et al.*, 1999; BAKHAREV *et al.*, 2000). Assim, o traço passou a ser:

1:1:0,756:1,944 (cimento : escória moída : areia : escória granulada), em massa, materiais secos.

A Tabela 5.6 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e a medida de consistência das argamassas, com relação $a/mc = 0,28$.

Tabela 5.6 - Resultados de resistência à compressão e consistência em mesa de queda, para relação $a/mc = 0,28$ para, diferentes teores de Na_2O do silicato de sódio ($MS=1,6$), traço 1 : 1 : 2,7 (cimento:escória moída:escória granulada).

Teor de Na_2O do silicato de sódio (%)	Teor de sólidos do aditivo (%)	Consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
0 (Referência)	0,315	-	53,9 (3,5)	58,6 (2,9)
0,5	0,5	339	-	-
	0,55	339	-	-
0,6	0,5	249	-	-
0,65	0,5	190	51,3 (3,3)	51,1 (4,6)
1	1	120	-	-
	1,25	120	-	-
	1,5	120	-	-
	2,0	120	-	-
	2,5	132	49,4 (1,6)	57,6 (3,9)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Pelos resultados de resistências mostrados na Tabela 5.6 pode-se observar que o silicato de sódio não trouxe ganhos de resistência à compressão nas argamassas e nem permitiu a obtenção da consistência desejada, para teores de Na_2O do silicato de sódio $> 0,6$.

Para melhorar a consistência e poder utilizar um teor de Na_2O do silicato de sódio em torno de 2%, teor mínimo citado na literatura, passou-se a utilizar a relação $a/mc = 0,30$, considerando, também, ser esta a relação que se pretende usar no concreto.

A Tabela 5.7 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e a medida de consistência das argamassas, com relação $a/mc=0,30$, buscando alcançar teores maiores de Na_2O do silicato de sódio ($MS=1,6$).

Os resultados de resistência à compressão da Tabela 5.7, para as idades de 7 e 28 dias, não apresentaram diferenças significativas, para os diferentes teores de silicato de sódio utilizados ($F=1,674$; $p=0,236$).

Tabela 5.7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e a medida de consistência das argamassas, com relação a/mc = 0,30, para diferentes teores de Na₂O do silicato de sódio (MS=1,6), traço 1 : 1 : 2,7 (cimento:escória moída:escória granulada).

Teor de Na ₂ O do silicato de sódio (%)	Teor de sólidos do aditivo (%)	Consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
0 (referência)	0,18	172	45,3 (1,7)	48,9 (8,5)
2	1	120	-	-
	2	120	-	-
	3	146	43,2 (1,8)	42,4 (3,7)
	4	156	39,6 (2,5)	51,7 (3,8)
	5	153	-	-
3	3	153	39,6 (2,5)	48,1 (0,7)
	4	156	36,6 (1,0)	45,1 (6,9)
	5	155	-	-
4	1	147	-	-
	2	165	36,6 (2,1)	44,8 (4,8)
	3	163	37,1 (2,6)	40,8 (5,9)
	4	165	38,4 (3,3)	48,2 (3,4)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Pelo teste a posteriori de Duncan, os resultados obtidos para as resistências à compressão, utilizando silicato de sódio, foram menores ou estatisticamente iguais aos do concreto de referência, o que mostra que o silicato de sódio não ativou a escória moída, estando de acordo com estudos de sistemas escória-ativador realizados por vários pesquisadores (HWANG & LIN, 1986; COLLINS & SANJAYAN, 1998; BAKHAREV *et. al.*, 1999)

Com relação aos teores de aditivo, não houve diferença significativa entre os resultados das resistências à compressão, para cada grupo de aditivos, obtidas com o diferentes teores de Na₂O do silicato de sódio (F=0,001; p=0,980). Apesar do aumento de resistência à compressão esperado não ter sido constatado, os resultados obtidos nos estudos com misturas de escória e clínquer, realizados com diferentes ativadores ou combinações de NaOH e Na₂CO₃²⁵, realizados por HWANG & LIN (1986) e COLLINS & SANJAYAN (1998), que observaram somente um pequeno aumento de resistência à compressão aos 3 dias e resistências mais baixas aos 7 e 28 dias, quando comparadas com as das misturas de referência.

Outros estudos de misturas de escória e clínquer, ativadas com silicato de sódio com módulo de sílica variando de 0,75 a 1,5%, com diferentes teores de Na₂O (4%, 6% e 8%),

²⁵ NaOH e Na₂CO₃ – hidróxido de sódio e carbonato de sódio, respectivamente.

conduzidos por BAKHAREV *et. al.* (1999) apresentaram reduzidas resistências à compressão, e, também, sugeriram a não eficiência de ativação da escória em presença de clínquer. Devido aos resultados obtidos, os estudos de ativação da escória de alto-forno em sistemas clínquer-escória foram interrompidos.

5.5 Estudos em concreto (Etapa 5)

O objetivo da Etapa 5 deste estudo é avaliar a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias de idade, a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, o teor de ar incorporado, a massa específica, a absorção e o índice de vazios, a retração e a profundidade de carbonatação do concreto com adição de 100% de escória moída e 28% de areia e 72% de escória granulada como agregado miúdo e compará-las ao concreto de referência com cimento CP II E-32 RS e areia como agregado miúdo. O aditivo utilizado foi o ADT 4.

A figura 5.35 apresenta o fluxograma mostrando as propriedades a serem avaliadas nos concretos (Etapa 5).

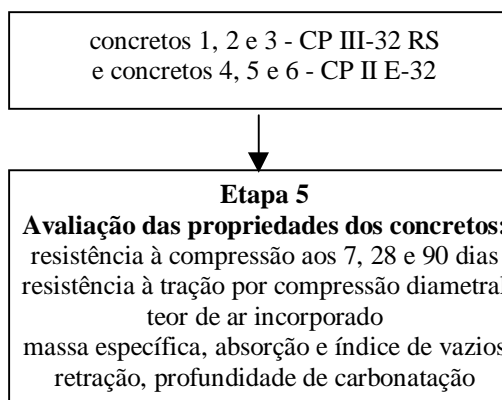


Figura 5.35 – Fluxograma as propriedades a serem avaliadas nos concretos (Etapa 5).

A dosagem do concreto foi apresentada no item 4.5.2.4 e os traços de concretos estudados, em massa, materiais secos, são apresentados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Traços dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6, em massa, materiais secos.

Concret o	cimento CP III-32 + escória moída	cimento CP II E-32	escória granulada	Areia	brita 0	brita 1	relação água/materiais cimentícios
C1	1		0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,33
C2	1		0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,40
C3	1		0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,44
C4		1	0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,33
C5		1	0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,38
C6		1	0,968	0,376	0, 849	0, 849	0,44

O Quadro 5.5 apresenta o consumo de materiais utilizados, o teor água/materiais secos, o teor de sólidos do aditivo e a consistência dos concretos estudados.

Quadro 5.5 - Consumo de materiais cimentícios (kg por m³ de concreto), relação água/materiais cimentícios, teor água/materiais secos, teor de sólidos do aditivo e consistência os concretos estudados.

Concreto	Consumo materiais cimentícios (kg/m ³)			Relação água/mat. cim.	Teor água/materiais secos (%)	Teor de sólidos do aditivo (%)	Teor de argamassa (%)	Consistência (mm)
	CP II	CP III	Esc. moída					
C1	-	276	276	0,33	8,16	0,37	58	230
C2	-	276	276	0,40	9,90	0,16	58	70
C3	-	276	276	0,44	10,89	0	58	70
C4	552	-	-	0,33	8,16	0,37	58	230
C5	552	-	-	0,40	9,90	0,16	58	200
C6	552	-	-	0,44	10,89	0	58	170

5.5.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 5.8 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 91 dias para os concretos C1, C2 e C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32. O traço dos materiais secos para os concretos foi 1 : 1,344 : 0, 849 : 0,849 [materiais cimentícios : (72% escória granulada + 28% de areia) : brita zero : brita 1], com a relação água/materiais cimentícios variando para cada concreto, estando apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral para os concretos C1, C2 e C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Concreto	Relação água/mat. cim.	Resistência à compressão (MPa) (valores médios)			Resistência à tração na compressão diametral (MPa)	
		7 dias	28 dias	91 dias	28 dias	% resist. compr. aos 28 dias
C1	0,33	39,7 (1,5)	44,1 (0,4)	48,1 (0,9)	3,20 (0,66)	8,0
C2	0,40	30,2 (1,0)	35,5 (1,5)	38,5 (1,1)	2,80 (0,10)	9,4
C3	0,44	26,1 (0,7)	31,0 (0,6)	35,5 (1,2)	2,80 (0,17)	10,5
C4	0,33	57,1 (2,1)	66,2 (3,0)	74,8 (1,3)	5,00 (0,07)	8,8
C5	0,38	40,7 (0,7)	48,6 (1,0)	53,6 (1,5)	3,50 (0,31)	8,3
C6	0,44	30,2 (0,4)	38,5 (0,3)	44,9 (1,0)	3,50 (0,23)	11,1

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

A evolução das resistências à compressão, para os concretos confeccionados com o cimento CP III-32 RS com adição de 100% de escória moída e os concretos de referência confeccionados com o cimento CP II E-32 estão apresentadas na Figura 5.36.

Observa-se, na Tabela 5.8 e na Figura 5.36, que, nas idades de 7 e 28 dias, as resistências dos concretos com cimento CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída são menores que as do concreto com cimento CP II E-32.

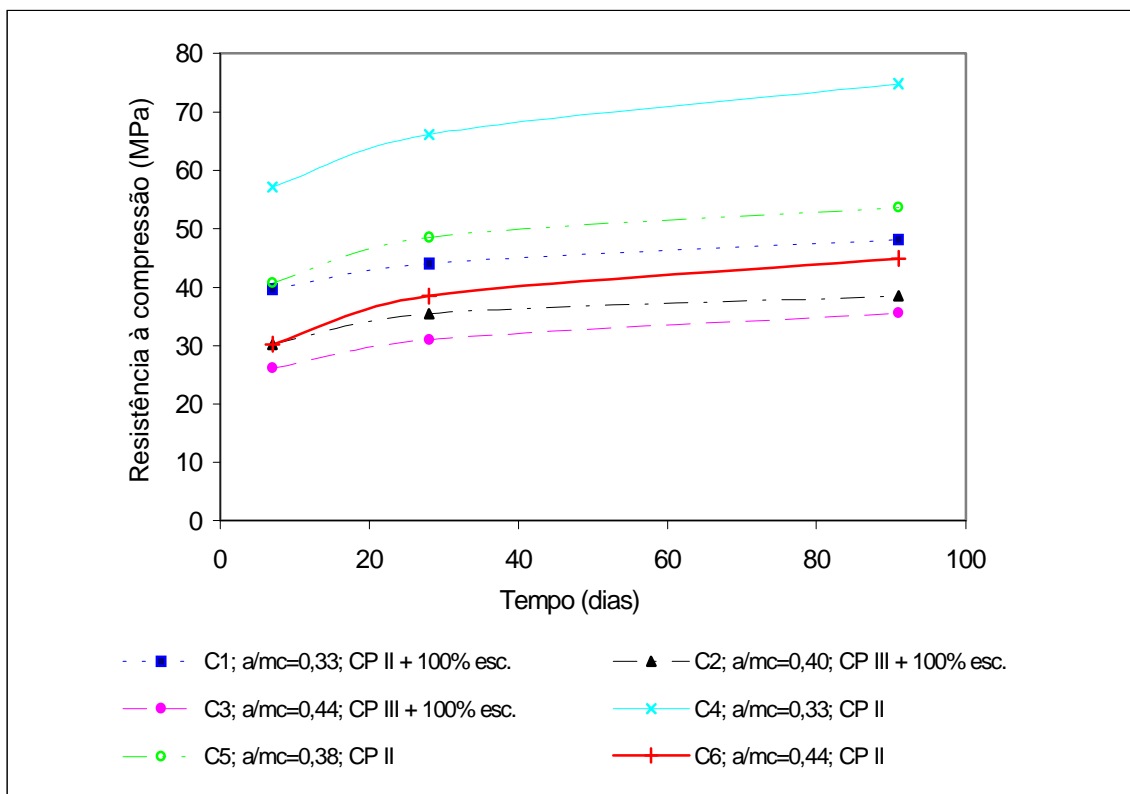


Figura 5.36 – Resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias para os concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Este fato ocorre porque no cimento CP II E-32 há maiores teores de clínquer, lembrando que as resistências à compressão em concretos com maiores teores de escória moída se desenvolvem mais lentamente.

A justificativa para menores resistências à compressão, para os concretos confeccionados com 100% de adição de escória, é devido, provavelmente, à hidratação mais lenta da escória e à quantidade insuficiente de hidróxido de cálcio produzida pela hidratação do clínquer, para hidratar toda a escória moída, ficando parte da escória moída atuando como fíler (LIM & WEE 2000). Estes resultados estão de acordo com estudos realizados por BROOKS *et al.*, (1992), SINVASUNDARAM & MALHOTRA (1992), GEISELER *et al.*, (1995), NAKAMOTO & TOGAWA (1995), ALDEA *et al.*, (2000).

Pelo teste a posteriori de Duncan ($\alpha=0,05$), na idade de 7 dias, o concreto C4 apresenta maior resistência à compressão, os concretos C1 e C5 apresentam resistências similares, o

mesmo ocorrendo para os concreto C2 e C6, e o concreto C3 a menor resistência à compressão.

Na idade de 28 dias, os seis concretos apresentam diferenças significativas de resistências à compressão (Teste de Duncan, $\alpha=0,05$). Observa-se, na Figura 5.36, um decréscimo na resistência à compressão, para um aumento da relação água/materiais cimentícios menos acentuado, para os concretos com altos teores de escória de alto forno moída.

Na idade de 91 dias, o concreto C4 apresenta maior resistência à compressão, os concretos C1 e C5 apresentam resistências similares, enquanto os concreto C6, C2 e C3 apresentam resistências menores, nesta seqüência (Teste de Duncan, $\alpha=0,05$).

A Figura 5.37 mostra as curvas que relacionam a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias com a relação água/materiais cimentícios dos concretos C1, C2, C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

A maior resistência à tração por compressão diametral é obtida para o concreto C4, o que pode ser justificado pela baixa relação água/materiais cimentícios e pela maior evolução da resistência à compressão, devido ao mais baixo teor de escória de alto-forno, pois maiores teores fazem com que a evolução da resistência seja mais lenta.

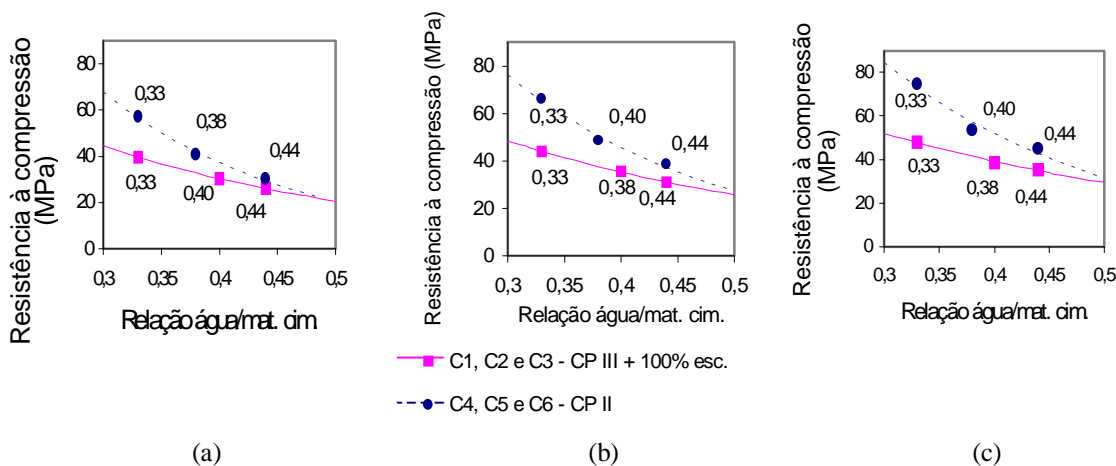


Figura 5.37 – Curvas de resistência à compressão versus relação água/materiais cimentícios, para os concretos C1, C2, C3, C4, C5, e C6: (a) aos 7 dias, (b) aos 28 dia e (c) aos 91 dias.

Como no caso da resistência à compressão, o concreto C1, com adição de 100% de escória de alto-forno moída e $a/mc = 0,33$, apresentou resistência à tração por compressão diametral similar às dos concretos C5 e C6, que foram confeccionados com CP II E-32, e relação $a/mc=0,38$ e $0,44$, respectivamente. Os valores de resistência à tração por compressão diametral estão dentro dos valores propostos na revisão da NB 1.

Há de se considerar, porém, que, embora os resultados de resistências encontrados para o concreto 1, confeccionado com cimento CP III-32 RS com adição de 100% de escória de alto-forno moída e $a/mc = 0,33$, só estejam próximos aos do concreto C5 e C6, (confeccionados com cimento CP II E-32, $a/mc = 0,38$ e $0,44$, respectivamente), o consumo de cimento para o concreto C1 é metade do consumo de cimento dos concretos C5 e C6.

Em outras palavras, quando comparados concretos de mesmas resistências, confeccionados com materiais cimentícios diferentes, mas, com consumos de materiais cimentícios iguais a 552kg/m^3 de concreto, houve, para os concretos com a mistura CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída, uma redução na quantidade de cimento por unidade de resistência, quando comparados com os concretos confeccionados com CP II E-32.

5.5.2 Teor de ar incorporado, massa específica, absorção e índice de vazios

A Tabela 5.9 apresenta os resultados de ar incorporado obtidos pelo método pressométrico para os concretos C1, C2 e C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Tabela 5.9 – Teor de ar incorporado obtido pelo método pressométrico para os concretos C1,C2, C3, confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Concreto	Teor de ar incorporado (%)
C1	1,4
C2	2,5
C3	2,5
C4	0,7
C5	2,0
C6	1,1

Os teores de ar incorporado, encontrados para os seis traços de concretos, estão dentro de valores considerados adequados para concretos de alto desempenho e de acordo com estudos de MAILVAGANAM et al. (1983) e ZAIN et al. (1999), que encontraram valores entre 1,7 e 3,5%, e 1,5 e 2,3%, respectivamente, para concretos com relação água/materiais cimentícios igual a 0,55 e 0,35 e de acordo com AITCIN (2000a), que sugere valores entre 1 e 3%.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados de absorção, índice de vazios, massa específica e saturada dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6.

Tabela 5.10 - Absorção, índice de vazios, massa específica dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Concreto	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/m ³)
C1	3,77 (0,25)	8,67 (0,56)	2,30 (0,01)
C2	5,27 (0,40)	11,79 (0,84)	2,24 (0,01)
C3	5,38 (0,13)	11,90 (0,27)	2,21 (0,01)
C4	3,27 (0,11)	7,68 (0,25)	2,35 (0,01)
C5	4,58 (0,15)	10,44 (0,32)	2,28 (0,01)
C6	5,72 (0,19)	12,79 (0,40)	2,23 (0,01)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Os menores valores encontrados, para a absorção e índice de vazios, foram para os concretos C4 e C1 (Teste de Duncan, $\alpha=0,05$) e, conseqüentemente, maiores massas específicas. Este fato está relacionado com a menor relação água/materiais cimentícios e com a adição de escória moída, que diminuem a porosidade da pasta de cimento. Na Figura 5.38, pode-se observar a variação do índice de vazios dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a relação água/materiais cimentícios utilizada.

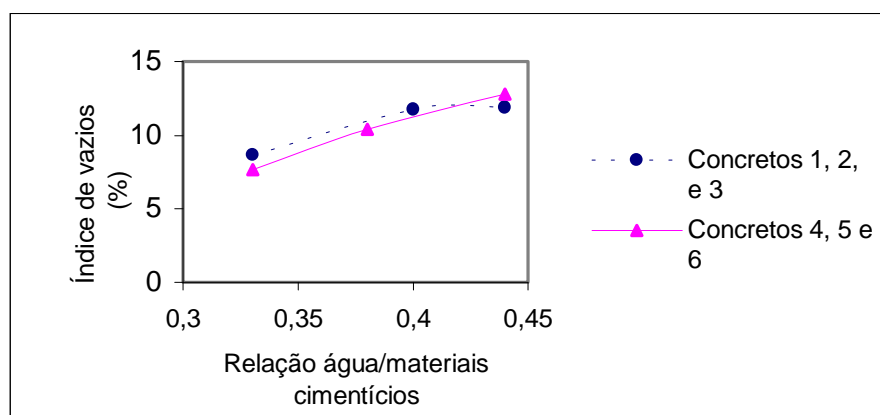


Figura 5.38 – Índice de vazios versus relação água/mat. cimentícios, para os concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

5.5.3 Retração

A Tabela 5.11 apresenta o percentual de retração dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para 1, 7, 28, 35, 42, 56, 77 e 91 dias (média de 5 corpos-de-prova).

Tabela 5.11 – Resultados de retração dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Concreto	Retração (%)							
	1 dia	7 dias	28 dias	32 dias	35 dias	42 dias	56 dias	91 dias
C1	0	0,021	0,026	0,018	0,014	0,011	0,003	-0,007
C2	0	0,036	0,038	0,034	0,030	0,027	0,015	0,003
C3	0	0,009	0,012	0,011	0,004	0,002	-0,017	-0,060
C4	0	0,004	0,005	-0,010	-0,020	-0,023	-0,041	-0,079
C5	0	0,002	0,005	-0,008	-0,012	-0,023	-0,037	-0,043
C6	0	0,004	0,0040	-0,011	-0,016	-0,028	-0,044	-0,052

A Figura 5.39 apresenta as curvas de evolução de retração dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Observou-se, nas curvas da Figura 5.39, que houve expansão mais significativa das amostras dos concretos com adição de escória moída, para os primeiros 28 dias, enquanto as amostras ficaram em cura submersa, seguida de retração a partir dos 28 dias de idade, mais significativa para os concretos com cimento CP II E-32 (Teste de Duncan, $\alpha=0,05$).

Ao final dos 84 dias, observaram, também, menores retrações para os concretos confeccionados com adição de escória moída, quando comparados aos concretos confeccionados com cimento CP II E-32 (Teste de Duncan, $\alpha=0,05$).

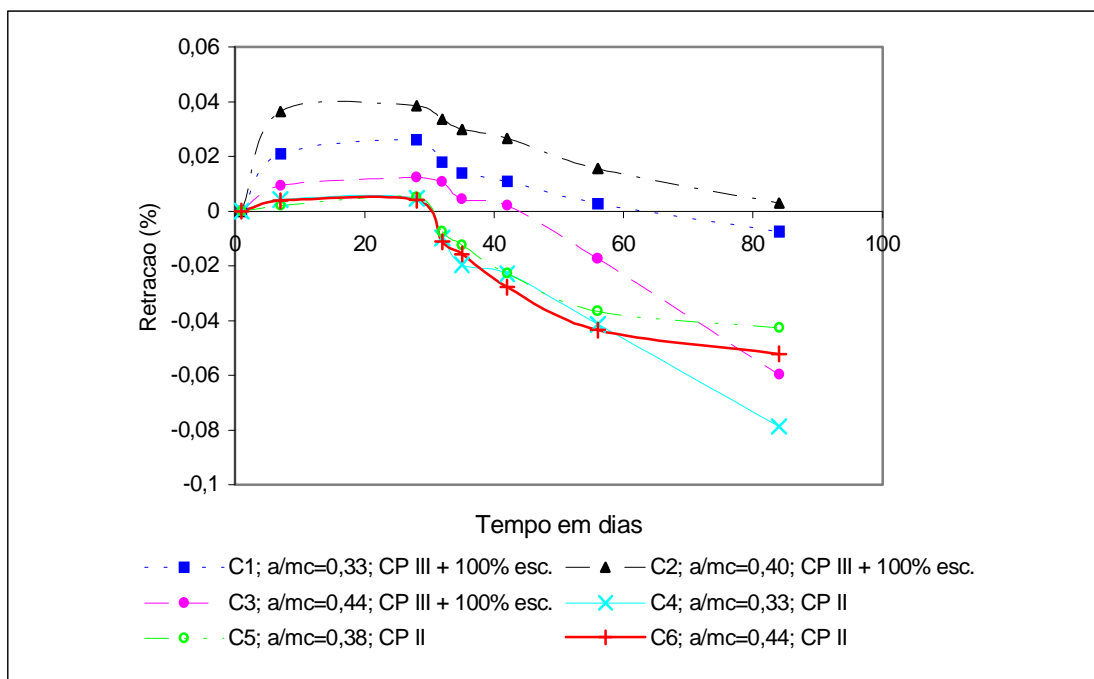


Figura 5.39 – Evolução da retração dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

De acordo com LIM & WEE (2000), a retração é menor em concretos com altos teores de escória moída, devido à hidratação mais lenta da escória presente na matriz do cimento e à pequena quantidade de clínquer Portland.

Outra causa, citada ainda por LIM & WEE (2000), pode ser o fato das partículas da escória terem textura áspera e forma angulosa o que aumenta a água adsorvida em sua superfície, levando a um decréscimo na quantidade de água disponível para a continuação da hidratação.

BENHUR *et al.* (1980), em estudos sobre retração utilizando porosímetro de mercúrio, encontraram resultados indicando que as diferenças de retração podem ser devido às diferenças na estrutura dos poros. Poros com diâmetros superiores a 25Å têm maior influência no aumento da retração. Além disso, quanto maior o volume de poros, maior também é a retração.

Menor retração, para concretos com escória de alto forno moída, foi encontrada, também, por SAKAI *et al.* (1992). A retração do concreto diminuiu com o aumento do teor de escória e com o tempo, pois concretos com escória tem maior densificação da pasta, quando comparados com concretos sem escória.

5.5.4 Carbonatação

A Tabela 5.12 apresenta as medidas de profundidade de carbonatação dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32, a partir da média de 80 medidas de 10 corpos-de-prova, para cada concreto.

Tabela 5.12 – Profundidades de carbonatação dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

Concreto	Prof. carbonatação (mm)		
	63 dias*	77 dias	91 dias
C1	0,7 (0,4)	0,8 (0,4)	0,7 (0,4)
C2	1,9 (0,7)	2,0 (0,6)	2,1 (0,7)
C3	2,4 (0,7)	3,0 (0,8)	3,6 (0,7)
C4	0,1 (0,1)	0,2 (0,6)	0,3 (0,1)
C5	0,3 (0,3)	0,6 (0,4)	0,6 (0,4)
C6	0,9 (0,6)	1,1 (0,6)	1,3 (0,6)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

* As medidas de profundidade de carbonatação para a idade de 63 dias foram feitas antes dos corpos-de-prova serem colocados na câmara de carbonatação.

Na Figura 5.40, pode-se observar que, para as idades de 63, 77 e 91 dias, as profundidades de carbonatação dos concretos com adição de escória se apresentaram superiores às dos concretos com cimento CP II E-32, quando se comparam os concretos com relações água/materiais cimentícios semelhantes. Estes resultados estão de acordo com estudos anteriores realizados por SAKAI *et al.* (1992), HELENE *et al.*, (1995), WEE *et al.* (1999); MARTINS, MONTICELLI & CAMARINI (2001).

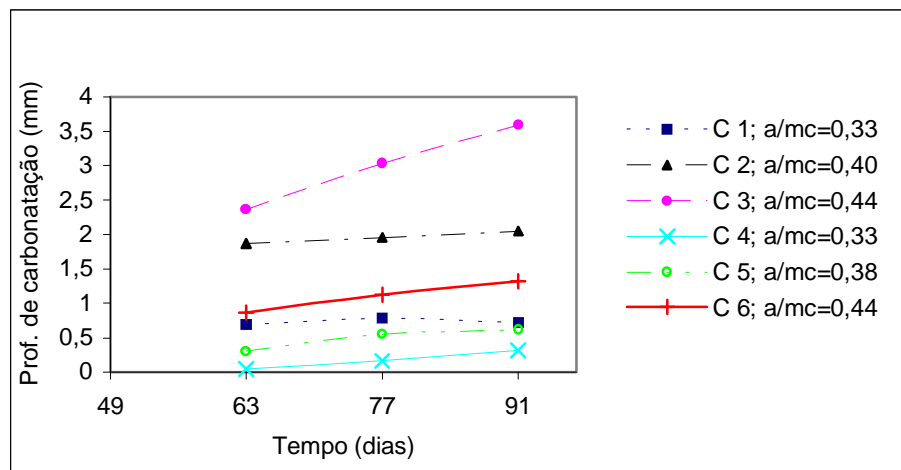


Figura 5.40 – Profundidades de carbonatação dos concretos para as idades de 63, 77 e 91 dias.

A Figura 5.41 mostra 6 corpos-de-prova carbonatados aos 63 dias, podendo-se observar as diferenças de profundidade de carbonatação entre os concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.



Figura 5.41 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 63 dias, após a moldagem, antes de serem colocados na câmara de carbonatação.

Para a idade de 77 dias, houve um aumento maior da profundidade de carbonatação para o concreto C3, em relação à idade de 63 dias. Este aumento, para o concreto C3, pode ser devido à maior relação água/materiais cimentícios, que aumenta a porosidade da pasta de cimento, juntamente com o maior teor de escória de alto-forno moída.

Para a idade de 91 dias o concreto 3, também, apresentou maior profundidade de carbonatação, confirmando o ocorrido aos 77 dias de idade.

As Figuras 5.42 e 5.43 mostram 6 corpos-de-prova carbonatados aos 77 e 91 dias, respectivamente. Pode-se observar as diferenças mais acentuadas entre a profundidade de carbonatação dos concretos C1, C2, C3 confeccionados com CP III-32 RS e adição de 100% de escória moída e para os concretos C4, C5 e C6 confeccionados com CP II E-32.

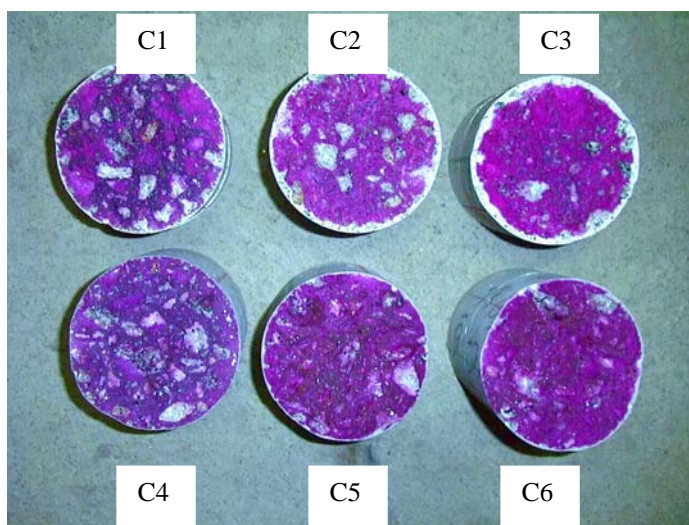


Figura 5.42 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 77 dias.

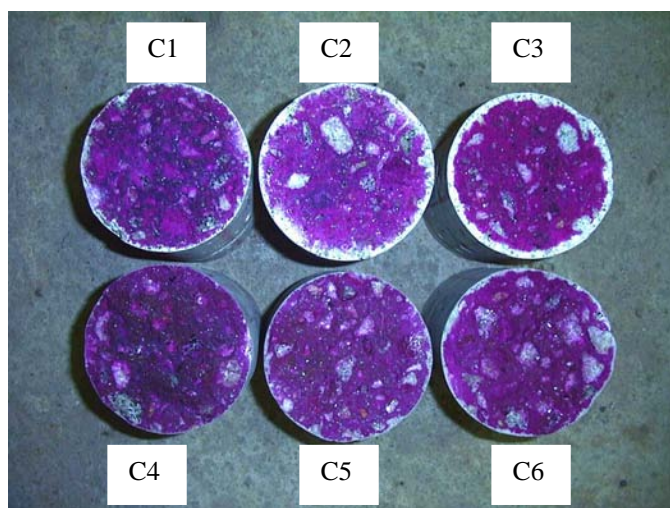


Figura 5.43 - Corpos-de-prova carbonatados dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 para a idade de 91 dias.

Pode-se observar, nas Figuras 5.41, 5.42 e 5.43, as diferenças entre a profundidade de carbonatação, mais acentuadas para os concretos C1, C2 e C3, que apresentam maior teor de escória de alto-forno moída

A Figura 5.44 apresenta a influência da relação água/materiais cimentícios, para os dois tipos de materiais cimentícios utilizados, na profundidade de carbonatação dos concretos aos 75 dias.

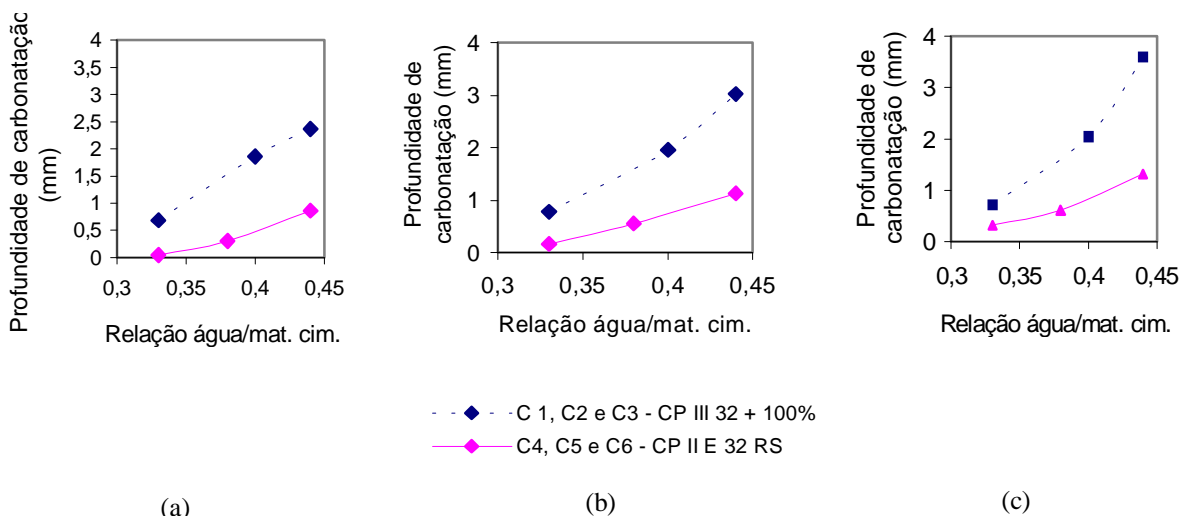


Figura 5.44 – Influência da relação água/materiais cimentícios, na profundidade de carbonatação aos (a) 63, (b) 75 e (c) 91 dias.

Observa-se que, à medida que a relação água/materiais cimentícios aumenta, a carbonatação também aumenta, para os concretos confeccionados com os dois tipos de materiais cimentícios, mostrando que a maior porosidade aumenta a profundidade de carbonatação (HELENE *et al.*, 1995).

De acordo com as curvas de resistência à compressão e profundidade de carbonatação apresentadas na Figura 5.45, pode-se observar que os concretos C4, C5 e C6 apresentaram profundidade de carbonatação bem abaixo dos concretos C1, C2 e C3.

No entanto, nota-se para os concretos C1, e C5, com resistências em torno de 50 MPa aos 91 dias, que as profundidades de carbonatação estão bastante próximas.

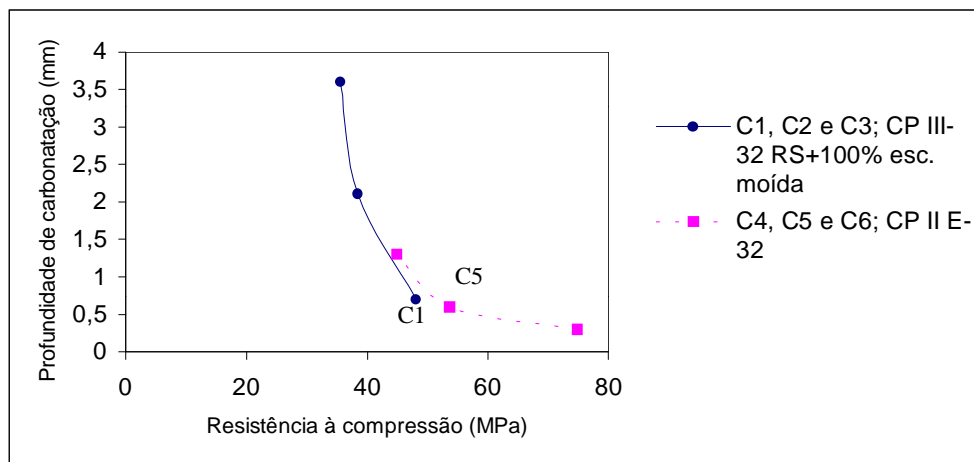


Figura 5.45 – Relação da resistência à compressão dos concretos C1, C2, C3, C4, C5 e C6, aos 91 dias, com a profundidade de carbonatação de cada concreto.

Quando se observam os dois grupos de concretos, nota-se que os concretos confeccionados com CP III-32 com adição de 100% de escória, além de apresentarem uma profundidade de carbonatação maior, apresentam, também, um crescimento maior da profundidade de carbonatação, quando a relação água/materiais cimentícios é aumentada, o que comprova que, para maiores teores de escória de alto-forno, a carbonatação é maior, devido à menor quantidade de hidróxido de cálcio e que, para relação água/materiais cimentícios maiores, a porosidade aumenta, contribuindo para uma maior profundidade de carbonatação.

No entanto, quando se comparam concretos com resistências similares, como os concretos C1 e C5, nota-se que esses concretos apresentam, também, profundidades de carbonatação similares e, assim, considerando que os concretos confeccionados com CP III-32 + 100% de escória são mais econômicos e ecológicos, pode-se considerar a sua utilização mais vantajosa do ponto de vista técnico, ambiental e econômico (ISAIA, 2001).

5.6 Considerações finais

Os teores de utilizados foram obtidos a partir de ensaios preliminares (Etapas 1, 2 e 3), em pasta e argamassa, buscando a utilização de teores máximos de escórias de alto-forno. A partir dos teores de escória de alto forno moída (100% de adição) e granulada (72%, em substituição à areia), foi realizada a dosagem do concreto.

As resistências à compressão e tração, aos 7, 28 e 91 dias, dos concretos de cimento CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída, foram menores do que as do cimento CP II E-32. As menores resistências à compressão para os concretos confeccionados com cimento CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída, é, provavelmente, devido,

nas primeiras idades, à hidratação mais lenta da escória presente na matriz do cimento e, nas idades mais avançadas, à quantidade insuficiente de hidróxido de cálcio produzida pelo clínquer para hidratar toda a escória moída (BROOKS, 1992; SINVASUNDARAM & MALHOTRA, 1992; GEISELER *et al.*, 1995; NAKAMOTO & TOGAWA 1995; ALDEA *et al.*, 2000 e LIM & WEE, 2000).

O teor de ar incorporado, a massa específica, a absorção e o índice de vazios apresentaram-se dentro de valores encontrados na literatura, adequados para concretos usuais e de alto desempenho (MAILVAGANAM *et al.*, 1983; ZAIN *et al.* 1999; AITCIN, 2000a).

Observou-se, de um modo geral, que houve menores retrações para os concretos confeccionados com adição de escória moída, quando comparados aos concretos confeccionados com cimento CP II E-32 (BENHUR *et al.*, 1980, SAKAI *et al.*, 1992; LIM & WEE, 2000).

Para concretos com resistências similares, como os concretos C1 (CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída) e C5 (CP II E-32), notou-se que esses concretos apresentaram, também, profundidades de carbonatação similares.

Diante das propriedades dos concretos observadas e devido ao baixo consumo de clínquer Portland, pode-se considerar, ainda, que concretos confeccionados com altos teores de escória moída em adição ao cimento e com escória granulada, em substituição à parte da areia, podem ser usados para produzir estruturas, não só duráveis como, também, benéficas ao meio ambiente e com menor custo ao longo do ciclo de vida, podendo ser considerados como concretos ecoeficientes.

6 CONCLUSÕES

O concreto está se tornando um material cada vez mais complexo devido a fatores como a diminuição da relação água/cimento e o uso de materiais cimentícios suplementares, que, em alguns casos, substituem uma quantidade significativa de cimento e modificam as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (AITCIN, 2000).

Este mesmo concreto tem alcançado níveis de desempenho com altas resistências mecânicas e, mais importante ainda, com elevada durabilidade, contribuindo para a diminuição de manutenção e aumento do ciclo de vida das estruturas de concreto e, pela importância deste subsistema, das edificações de uma forma geral.

Dentre os materiais cimentícios utilizados, a escória granulada de alto-forno encontra grande aplicação, pois, além de melhorar algumas propriedades do concreto, é um subproduto industrial que tem grande disponibilidade em vários países. O seu uso contribui para a conservação de energia e de recursos minerais, cuja exploração gera impactos ambientais. Assim, ao mesmo tempo que beneficia o meio ambiente, o uso da escória de alto-forno é economicamente interessante para as siderúrgicas e para a sociedade (VAGHETTI & ISAIA, 1999).

A utilização de escória de alto-forno moída acarreta melhoria nas propriedades do concreto, reduzindo vazios e tornando o concreto menos permeável e mais resistente, através da densificação da pasta, o que contribui enormemente para aumentar a durabilidade. Este fato confirma a importância da busca de novas alternativas de aplicação para a escória de alto-forno, considerando que o consumo de escórias não acompanha o constante crescimento da fabricação de aço e, por consequência, de geração de escórias siderúrgicas.

A utilização de altos teores de escória de alto-forno neste trabalho está de acordo, também, com uma das tendências do concreto para o futuro que é o uso cada vez menor de clínquer Portland e cada vez maior de materiais cimentícios, devido a razões técnicas, econômicas e ambientais.

No estudo preliminar (Etapa 1), ítem 5.2, realizou-se a seleção entre dois tipos de escória granulada que, embora de mesma procedência, tinham forma e granulometria diferentes. Embora os resultados de ensaios de resistência à compressão não tenham apresentado

diferenças significativas, optou-se pelo uso da escória EA, apenas granulada e sem nenhum beneficiamento ou tratamento posterior.

Para ajudar a corrigir a sua granulometria e aspereza estes ensaios foram realizados com vários teores de escória moída em substituição à escória granulada, apresentando resultados similares de resistência à compressão para os vários teores estudados. Foi adotado para a continuação dos estudos o maior teor de escória moída em substituição à escória granulada (33%), que, embora tenha apresentado resistências à compressão similares aos traços que utilizaram 23 e 17%, poderia reduzir o consumo de cimento e, ao mesmo tempo, contribuir para uma diminuição da porosidade da pasta.

No estudo que buscou avaliar a compatibilidade entre cimento e aditivo superplastificante e a seleção do tipo e teor de aditivo superplastificante (Etapa 2) utilizando o método do *Mini-Slump*, ítem 5.3.1, constatou-se a possibilidade de compatibilidade entre o material cimentício usado e os aditivos ADT 2 (composto por lignosulfonato, naftaleno sulfonado e melamina sulfonada), ADT 3 (composto por policarboxilato) e o ADT 4 (composto por melamina sulfonada). Os ensaios de tempo de início de pega em pasta, ítem 5.3.2, também não apresentaram bons resultados para o ADT 1 (composto por naftaleno sulfonado) cindicando, assim, a sua incompatibilidade com o material cimentício.

Os resultados de resistências à compressão, em argamassas, ítem 5.3.3, para os traços A=1:1:2, B=1:1:2,7 e C=1:1:2,4 (cimento : escória moída : escória granulada), em massa, materiais secos, não indicaram diferenças significativas entre eles. Porém, quando comparadas às resistências à compressão dos traços utilizando aditivos superplastificantes diferentes, as argamassas utilizando o ADT 2 apresentaram melhores resultados.

O traço B, então, foi definido para a continuação dos estudos por conter mais escória granulada, estando de acordo com o objetivo do estudo de se utilizar altos teores de escória, tanto moída quanto granulada.

Quanto ao tipo de aditivo, embora o aditivo ADT 2 tenha apresentado melhor resistência à compressão, o mesmo não ocorreu para o tempo de início de pega em argamassa, pelo método do penetrômetro, que apresentou um tempo de 28h, considerado muito alto, o que inviabilizaria a sua aplicação em obra. Optou-se, então, pela não utilização deste aditivo nos estudos posteriores.

Os ADT 3 e ADT 4 não apresentarem diferenças significativas de resistência à compressão e, mesmo apresentando custos equivalentes e tempo de início de pega compatíveis para a

sua aplicação em obra, optou-se pelo aditivo ADT 4, considerando ser este um produto usado há mais tempo por vários pesquisadores e com relato de bons resultados (MALHOTRA, 1983; MAILVAGANAM *et al.*, 1983; ENGSTRAND, 1998; PICCOLI *et al.*, 1999). Considerou-se, também, que, pela sua dosagem muito baixa, uma pequena variação no teor do aditivo ADT 3 poderia ocasionar grandes variações nas propriedades dos concretos, exigindo maiores cuidados no manuseio.

Na seqüência dos estudos foi investigado o efeito do silicato de sódio na compatibilidade aditivo superplastificante-material cimentício (Etapa 3). Em estudo conduzido com a utilização do método do *Mini-Slump* para avaliar a compatibilidade entre material cimentício-aditivo-silicato de sódio, ítem 5.4.1, as pastas apresentaram pega muito rápida.

O uso de silicato de sódio como ativador da escória de alto-forno moída, estudo do ítem 5.4.2, não contribuiu para aumentar a resistência à compressão como se esperava inicialmente, o que não motivou a continuidade destes estudos nesta pesquisa e foi confirmado por alguns pesquisadores que, também, estudaram a ativação química da escória em sistemas clínquer-escória (HWANG & LIN, 1986; COLLINS, F. G. & SANJAYAN, J. G, 1998; BAKHAREV *et. al.*, 1999).

Com os resultados obtidos nestas etapas, iniciou-se a dosagem do concreto (Etapa 4) tendo, no entanto, de se utilizar um teor de 28% de areia em substituição à escória granulada, para correção da consistência. Observou-se que é possível a utilização de altos teores de escória de alto-forno moída em adição ao cimento e de escória de alto-forno granulada como agregado miúdo substituindo parte da areia na confecção de concretos.

A avaliação das propriedades dos concretos constitui a Etapa 5 e foi conduzida através de comparações entre 2 famílias de concreto. A primeira utilizando cimento CP III-32 RS com adição de 100% de escória de alto-forno e relações água/materiais cimentícios de 0,33, 0,40 e 0,44 e a segunda utilizando cimento CP II-E 32 e relações água/materiais cimentícios variando de 0,33, 0,38 e 0,44.

As resistências à compressão e tração por compressão diametral encontradas nos concretos com altos teores de escória moída e granulada mostraram-se menores do que para os concretos de referência, nas idades de 7, 28 dias, estando estes resultados de acordo com a literatura (BROOKS, 1992; SINVASUNDARAM & MALHOTRA, 1992; GEISELER *et al.*, 1995; NAKAMOTO & TOGAWA 1995; ALDEA *et al.*, 2000 e LIM & WEE, 2000). Para a idade de 91 dias, as resistências à compressão dos concretos com adição de escória

de alto-forno também se apresentaram abaixo das resistências à compressão encontradas para os concreto confeccionados com CP II-E 32.

Estes resultados se devem, provavelmente, nas primeiras idades, à hidratação mais lenta da escória presente na matriz do cimento e nas idades mais avançadas, à pequena quantidade de clínquer Portland, que limita a produção de hidróxido de cálcio necessário para as reações de hidratação da escória, ficando parte da escória de alto-forno moída sem estar ainda hidratada e atuando como fíler. Este fato demonstra a necessidade de utilização de ativadores para ativar a parcela de escória de alto-forno ainda não hidratada.

Outra causa pode ser o fato das partículas da escória terem textura áspera e forma angulosa, aumentando a água adsorvida em sua superfície, levando a um decréscimo na quantidade de água disponível para a continuação da hidratação (LIM & WEE, 2000).

No entanto, mesmo sendo menor do que as do concreto de referência, a resistência à compressão encontrada para o concreto confeccionado com CP III-32 RS com adição de 100% de escória moída, em torno de 40 MPa aos 28 dias, com relação água/materiais cimentícios igual a 0,33, pode atender, perfeitamente, às necessidades de resistências mecânicas de várias tipos de obras comuns e especiais (AITCIN, 1996).

O teor de ar incorporado, massa específica, absorção e índice de vazios apresentaram-se dentro de valores encontrados na literatura, considerados adequados para concretos usuais e de alto desempenho (MAILVAGANAM et al., 1983; ZAIN et al. 1999; AITCIN, 2000a).

A retração apresentou-se menor do que a encontrada para os concretos de referência e corrobora os resultados de SAKAI *et al.* (1992), LIM & WEE (2000).

Um fator que pode ter contribuído para a menor retração nos concretos confeccionados com cimento CP III-32 RS com adição de escória de alto-forno foi a cura em água por 28 dias que inibe a retração autógena e por secagem, considerando que em concretos com baixas relações água/materiais cimentícios a retração ocorre principalmente nas primeiras idades. Assim, fica ressaltada a importância da cura adequada para a obtenção de baixa retração para concretos com altos teores de adições.

As profundidades de carbonatação dos concretos confeccionados com cimento CP III-32 RS com 100% de adição de escória moída apresentaram-se superiores às dos concretos com cimento CP II E-32 RS, com baixos teores de escória moída, quando comparados concretos com as mesmas, ou bem próximas, relações água/materiais cimentícios, estando de acordo com os resultados de vários estudos (HELENE *et al.*, 1995; WEE *et al.*, 1999).

No entanto, apesar dos concretos com altos teores de escória de alto-forno apresentarem maiores profundidades de carbonatação, alguns pesquisadores ponderam que esta profundidade não é suficiente para despassivar a armadura, quando esta estiver com uma camada de cobertura adequada e, quando o concreto for dosado com baixas relações água/materiais cimentícios, o que confere menor porosidade às pastas e, conseqüentemente, maior dificuldade à entrada de CO₂ (ISAIA, VAGHETTI & GASTALDINI, 2001).

Observou-se um decréscimo na profundidade de carbonatação à medida que a resistência à compressão aumentou, devido, provavelmente, à relação água/materiais cimentícios mais baixa que contribuiu para a diminuição da porosidade do concreto.

Cabe ressaltar que concretos com resistências à compressão similares apresentaram, também, profundidades de carbonatação similares independentemente da presença de teores elevados de escória.

Assim, esta pesquisa trouxe contribuições para dúvidas levantadas sobre a carbonatação e retração de concretos, que são considerados problemas para o uso da escória de alto-forno em cimentos e concretos.

Diante das propriedades dos concretos observadas e devido ao baixo consumo de clínquer Portland pode-se considerar que, concretos confeccionados com altos teores de escória moída em adição ao cimento e com escória granulada em substituição à parte da areia podem ser usados para produzir estruturas não só duráveis como, também, benéficas ao meio ambiente e com menor custo ao longo do ciclo de vida, podendo ser considerados como concretos e estruturas ecoeficientes.

Como perspectivas para a continuidade desta pesquisa podem-se citar:

- estudos de ativação dos sistemas clínquer-escória;
- complementação desta pesquisa, através da inclusão de uma família de curvas de concreto com cimento CP III 32;
- ampliação da faixa de resistência, começando com concretos de 20 MPa até 50 MPa;
- estudos para correlação da resistência, teor de escória, retração e profundidade de carbonatação;
- avaliação da corrosão e da resistência a ataques químicos para complementar e dar subsídios à avaliação da durabilidade de concretos com elevados teores de escória;

- estudos para alteração do método de ensaio para determinação da retração, sobretudo com relação à cura dos corpos-de-prova;
- estudos para a padronização do método de ensaio para a determinação da carbonatação;
- estudos de propriedades do concreto para diferentes condições de cura;
- análise da microestrutura para avaliação do grau de hidratação da pasta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, S. K.; MASOOD, Irshad; MALHOTRA, S. K. Compatibility of superplasticisers with different cements. **Construccions and Buildings Materials**, 2000, v. 14, p. 253-259.

AITCIN, Pierre-Claude. Developments in the aplication of high-performance concretes. **Construction and Buildings Materials**, 1995, v. 9, n. 1, p. 13-17.

AITCIN, Pierre-Claude. (a) **Concreto de alto desempenho**, São Paulo: Pini, 2000.

AITCIN, Pierre-Claude. (b) Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, 2000, v. 30. p. 1349-1359.

ALDASORO, Juan C. Extracción y processamiento de escórias. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, 1985, p. 33-37.

ALDEA, C. M. *et al.* Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. **Cement and Concrete Research**, 2000, v. 30. p. 465-472.

ALEXANDRE, Jacques; SEBILEAU, Jean-Louis. **Le latier de haut fourneau. Elaboration, traitements, propriétés, emplois**. Edite por C. T. P. L. Centre Technique et de Promotion les Laitiers, Paris, France, 1988.

AL-KADHIMI *et al.* An acelerated carbonation procedure for studies on concrete. **Advances in Cement Research**, 1995, v. 8, n. 30, p. 47-59.

ALMUSSALAM *et al.* Plastic shrinkage craking of blended cement concretes in hot enviroments. **Magazine of Concrete Research**, 1999, v. 51, n. 4, Aug.. p. 241-246.

ANDERSON, Ronny; GRAM, Hans-Erik. Alkali-activated slag. In: Swedish Cement and Concrete Research Institute. S-100 44. **Proceedings**. Stockholm, 1988.

ARAÚJO et al. Influência da seqüência de mistura dos materiais na betoneira na resistência do concreto de alto desempenho. In: 43^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto**: NBR 11.578. Rio de Janeiro, 1991.

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

_____ **Agregados - Determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo**: NM49. Rio de Janeiro, 1987/2001.

_____ **Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos**: NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**: NBR 7218. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **Agregado para concreto**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

- _____ **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.
- _____ **Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração:** NBR 9832. Rio de Janeiro, 1992.
- _____ **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.
- _____ **Cimento Portland de alto-forno:** NBR 7235. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Cimento Portland e outros materiais em pó:** NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.
- _____ **Cimento Portland. Determinação da água da pasta de consistência normal:** NBR 11.580. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Cimento Portland. Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200):** NBR 11.579. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Cimento Portland. Determinação dos tempos de pega:** NBR 11.581. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Cimento Portland. Determinação da expansibilidade de Le Chatelier:** NBR 11.582. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine):** NBR NM 76. Rio de Janeiro, 1991.
- _____ **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária:** NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.
- _____ **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman:** NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- _____ **Agregados - Determinação da absorção de água em agregados miúdos:** NBR NM30. Rio de Janeiro, 1987/2001.
- _____ **Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles":** NBR NM51 Rio de Janeiro, 1991/2001.
- _____ **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo:** NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.
- _____ **Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura:** NBR 9289. Rio de Janeiro, 2000.
- _____ **Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração:** NBR 9832. Rio de Janeiro, 1992.
- _____ **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.
- _____ **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- _____ **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

- _____ **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega:** NM 65. Rio de Janeiro, 1996.
- _____ **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural. Retração por secagem:** NBR 8490. Rio de Janeiro, 1984.
- _____ **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica:** NBR 9778. Rio de Janeiro, 1984.
- _____ **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NM67. Rio de Janeiro, 1996.
- _____ **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão:** NBR 13276. Rio de Janeiro, 1995.
- BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Alkali activation of Australian slag cements. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p. 113-120.
- BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, 2000, v. 30, p. 1367-1374.
- BATTAGIN, Arnaldo F.; SCANDIUZZI, Luécio. Considerações sobre durabilidade de argamassas contendo escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. In: 34^o Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Blumenau, 1990, p. 392-399.
- BAUER, Elton; HELENE, Paulo R. do Lago. Influência da adição de escória nos processos e mecanismos de corrosão das armaduras em concreto armado. In: 3^o Congresso Brasileiro do cimento. **Anais**. São Paulo, 1993.
- BAUER, Elton, HELENE, Paulo. Investigação comparativa da influência da escória de alto-forno na corrosão das armaduras. In: International Congress on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concret Structures. **Anais**. Florianópolis, 1996, p. 433-443.
- BENHUR, A. et al. Influence of microstructure on the creep end drying shrinkage of calcium silicat4e pastes. In: International congress on the Chemistry of Cement, 7th. **Proceedings**. Paris, 1980, v. III, p. VI-26-31.
- BHARATKUMAR, B. H. *et al.* Mix proportioning of high performance concrete. **Cement and concrete Composites**, 2001, Nov, p. 71-80.
- BINJEN, Jan. **Blast furnace slag cement**. Den Haag: CIP Royal Library, 1996.
- BLUNK, G. **Utilization of blast furnace slag and steel making slag in Federal Republic of Germany**. In: Utilisation of Steelplant Slags Symposium **Proceedings**. Illawarra Branch, Australia, 1979, p. 35-39.
- BRETANHA, A. & DAL MOLIN, D. Análise da microestrutura de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento e submetidos à ação de sulfatos. In: 42^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Fortaleza, 2000.
- BROOKS, J. J.; WAINWRIGHT, P. J.; & BOUKENDAKJI, M. Influence of type and replacement level on strength, elasticity, shrinkage and creep of concrete. In: Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in concrete. Fourth International Conference. **Proceedings**. Istanbul, Turkey, 1992, v. II, p. 1325-1342.

- BROOKS, J.; JOHARI, M. A. Megat; MAZLOON, M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement and concrete Composites**, 2000, v. 22, p. 293-301.
- CAMARINI, Gladis. **Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- CASSA *et al.* Avaliação da compatibilidade físico-química entre cimento e aditivo superplastificante. In: 41^o Congresso Brasileiro do concreto. **Anais**. Salvador, 1999.
- CINCOTTO, M. A., BATTAGIN, A. F. & AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. Boletim 65, IPT. São Paulo, 1992.
- COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, 1998, v. 20, p. 103-112.
- COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. Early age strength and workability of slags pastes activated by NaOH and Na₂CO₃. **Cement and Concrete Research**, 1998, v. 28, p. 655-664.
- COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p. 455-458.
- DAIMON, M. **Mecanism and kinetics of Slag cement hidration**. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7th. **Proceedings**. Paris, 1980, v.1.
- DETWILER, R.; KRISHNAN, K.; MEHTA, P. Effect of granulated blast furnace slag on the transition zone in concrete. In: Katharine and Bryant Mather International Conference. Concrete Durability John M. Scanlon Editor. American Concrete Institute, Detroit. SP-100, v. 1. **Proceedings**. Atlanta, 1987, p. 63-72.
- DIAS, Eduardo G. et al. Estudo da influência do cimento Portland de alto-forno e cimento Portland comum com adição de escória de alto-forno moída nas propriedades do concreto. In: 32^a REIBRAC. **Anais**. Fortaleza, 1990, p. 525-539.
- DOUGLAS, E. **Blast furnace slag cement mortar and concrete: durability aspects**. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. ed. V. M. Malhotra. **Proceedings**, Ottawa, 1987. p. 291-333.
- DRON, R. Facteurs chimiques et structuraux de la réactivité des laitiers. **Silicates Industriels**, 1982, n. 6, p. 143-147.
- DUSSART, Jacques. Blast Furnace and steel in France. In: Utilisation of Steelplant Slags Symposium **Proceedings**. Illawarra Branch, Australia, 1979, p. 25-34.
- ENGSTRAND, J. Aplicação de superplastificantes em concreto. In: 40^o Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). **Anais**. Rio de Janeiro, 1998.
- EHRlich & ROSEMBERG, Arnold. In: Materials science of concrete. Ed. Skalny, American Ceramic Society. 1989. v. II, p.201-220.
- ERNSTROY, H. C. The effect on compressive strength of the glass content of blastfurnace slag when used as a cementitious constituent. **Zement-Kalk-Gips**, 1992, n. 7, p. 533-535.
- ESPER, MÁRIO WILLIAN. **Contribuição ao estudo de algumas propriedades do cimento de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

- FLAGA, K. Advances in materials applied in civil engineering. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000, v. 106, p. 173-183.
- FREARSON, John P. H. & UREN, J. M. Investigations of a ground Granulated Blast Furnace slag Containing Merwinitic Crystalization. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Madrid, 1986. p 1401-1421.
- GAO *et al.* The influence of superplasticizer and superfine mineral power on the flexibility, strength and durability of HPC. **Cement and Concrete Research**, 2001, v. 31, p. 703-706.
- GASTALDINI, Antonio G.; CECHELLA, I. Efeito de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. In: VIII Encontro Nacional do Ambiente construído. **Anais**. Salvador, 2000.
- GASTALDINI, Antonio G.; TEZUCA, Yasuco. Efeitos da adição de escórias no comportamento das pastas e argamassas de cimento Portland de alto-forno. In: 34^o Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). **Anais**. Curitiba, 1992.
- GAVA, Giovana Patrícia; MENEGHETTI, Leila Cristina; DACANAL, Paola Regina; POSSAN, Edna. Concreto de normal a alta resistência – Definição do teor de aditivo redutor de água e dosagem para materiais da região oeste do Paraná. In: 43^o Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). **Anais**. Foz do Iguaçu, 2001.
- GEISELER *et al.*, Influence of blast-furnace cements on durability of concrete structures. **ACI Materials Journal**, 1995, May-June, p. 252-257.
- GEYER, Rejane M. T.; MOLIN, Denise C. C. dal; VILELA, Antonio C. F. Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil. In: V Encontro Regional Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica. **Anais**. Vitória, 1995. p. ST V-1/1-1/2.
- GLASSER, F. P. Chemical, Mineralogical, and Microstructural Changes Occurring in Hydrated Slag-Cement Blends. In: Materials science of concret. Ed. Skalny, American Ceramic Society. 1989. v. II, p.41-81
- HANEHARA, Shunsuke; YAMADA, Kazuo. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p. 1159-1165.
- HELENE, Paulo R. do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- HELENE, Paulo R. do Lago. Vida útil das estruturas. **Téchne**, 1995, n. 17, p. 28-31.
- HELENE, P. R. L.; MITIDIERI FILHO, C. V. e THOMAZ, E. Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto. 37^a Reunião Anual do IBRACON. **Anais**. São Paulo, 1995. p. 169-182.
- HIROSHI, Uchikawa *et al.* Influence of structural and humidity changes at the inner part of hardened cement paste on autogenous shrinkage. In: Fourth CANMET/SCI International Conference. **Proceedings**. Sydney, 1997. p 949-964.
- HOFFMANN, R *et al.* Le beton tout laitier. In: Colloque International sur les Materiaux Granulaires. **Anais**. Budapest, Hungria, 1978, p. 29-74.

- HOOTON, R. D. Supplementary Cementing Materials for Concrete. In: The reactivity and hydration products of blast-furnace slag. V. M. Malhotra. **Proceedings**. Ottawa, 1987, p. 247-288.
- HWANG, C. L., LIN, C. Y. Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Second International Conference. **Proceedings**. Madrid, 1986. p. 1323-1340.
- ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- ISAIA, Geraldo Cechella. A durabilidade do concreto de alto desempenho e o meio ambiente: um estudo sócio-econômico. In: 41^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Salvador, 1999.
- ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A. GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: 43^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.
- JOHN *et al.* Cimentos de escória de alto-forno sem clínquer. In: Resíduos industriais para redução de custos na construção habitacional. IPT/UFES. **Anais**. Vitória, 1994, p. 52-59.
- JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- JOHN, Vanderley M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para pesquisa. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil. **Anais**. São Paulo, 1996.
- JOHN, Vanderley M.; CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maristela G. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. São Paulo, 1998. (Capítulo de livro a ser publicado).
- KAZMIECZAK, Cláudio de S., LINDENMEYER, Zara 1996. **Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas**. In: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and quality of concrete structures. **Proceedings**. Florianópolis, 1996.
- KMITA, A. A new generation of concrete in civil engineering. **Materials Processing Technology**, 2000, n. 106, p. 80-86.
- LEA, Frederick Measham. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 4th ed. London: Peter C Hewlett, 1998. 1053p.
- LEE, A. R. **Blast furnace and steel slag: Production, properties and uses**. London: Edward Arnold LTD, 1974.
- LEITE, Pedro Paulo N., BUZATO, Almir, COSTA, Luiz Roberto T. **Uma contribuição para pesquisa e desenvolvimento da escória de aciaria da Companhia Siderúrgica de Tubarão**. 1998. 70p. Monografia (Especialização em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 1998.
- LIM, S. N. & WEE, T. H. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete. **ACI Materials Journal**, 2000, Sept-Oct., p. 587-593.
- LITTLE Ltd., Arthur D & SETEPLA, Tecnometal Engenharia Ltda. **Estudo sobre aplicações de escória siderúrgicas no Brasil e em outros oito países**. Sumário Executivo preparado para Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas, 1999.

- LONG *et al.* Very-high-performance concrete with ultrafine powders. **Cement and Concrete Research**, 2001, v. 1, p. 1-5.
- LONGO, Adolfo. Escória granulada de altos hornos. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, 1985, p. 38-45.
- LOPES, A. N. M.; NEPOMUCENO, A. A. ; SILVA, E. F. Penetração de água e íons cloreto em concreto de alto desempenho. In: 42^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Fortaleza., 2000.
- LUO *et al.* A study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, 2002, v. 32, p. 1-7.
- MAILVAGANAM *et al.* Effects of admixtures on Portland cement concretes incorporating blast furnace slag and fly ash. In: First International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Anais**. Montebelo, Canada, 1983.
- MALHOTRA, V. M. Strength durability characteristics of concrete incorporating a pelletized blast furnace slag. In: First International Conference on The use of Fly ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. SP-79. American Concrete Institute. **Proceedings**. Detroit, 1983. p. 891-919.
- MALHOTRA, V. M. et al. Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions. **ACI Materials Journal**, 2000, Sept-Oct., p. 518-525.
- MALHOTRA, V. M. Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated blast-furnace slag. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. **Pocceedings**. Ottawa, 1987. p. 291-333.
- MALHOTRA, V. M. Superplasticizers: a global review with emphasis on durability and innovative concretes. In: Superplasticizers and other Chemical Admixtures in concrete. Proceedings Third International Conference. SP-119. **Proceedings**, Ottawa, Canada, 1989.
- MARCHAND, J. Fall 2000 Materials Research Society Symposium on the Materials Science of High-Performance Concrete. **Cement and concrete Research**, 2001, v. 31, p. 1783.
- MARQUES, João Carlos. Adição de escória ao concreto para economizar cimento. In: Seminário IPT/UFES. Resíduos Industriais para Redução de Custos na Construção Civil. **Anais**. Vitória, 1994.
- MARQUES, João Carlos. **Escória de alto-forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concreto**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- MARTINS, A. R.; MONTICELLI, I.; CAMARINI, G. Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: 43^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.
- MATALA, Seppo. Carbonation mechanism in the granulated blast furnace slag concrete. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 10th. **Proceedings**, Helsinki, 1997.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K. Concrete technology at the Crossroads – Problems and opportunities. In: Concrete Technology. Past, Present and Future. V. Mohan Malhotra Symposium. **Proceedings**, Detroit, 1994, p.1-30.

MEHTA, P. K. High performance concrete technology for the future. In: International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. **Proceedings**. Florianópolis, 1996, p. 1-14.

MÉLO, Aluísio B. de; LIBÓRIO, Jefferson B. L.; SILVA, Isac J. Influência da temperatura de cura no desenvolvimento da resistência à compressão de matrizes de cimento Portland com adições: cálculos aproximados das contribuições parciais e individuais da escória de alto-forno e da sílica ativa. In: 5^o Congresso Brasileiro de Cimento. **Anais**. São Paulo, 1999.

MEUSEL, J. W. ROSE, J. H. Production of granulated blast furnace slag at Sparrows Point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag. In: First International Conference on The use of Fly ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. SP-79. American Concrete Institute. **Proceedings**. Detroit, 1983, p. 867-890

MONTEIRO, E. C. B. e NEPOMUCENO, A. A. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloreto. In: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and quality of concrete structures. **Proceedings**. Florianópolis, 1996.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

MORAES R. C; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; WINCK, M. L. Influência das adições minerais sobre as ações físicas e químicas intervenientes na resistência mecânica do concreto. In: 43^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.

NAGATAKI, S. Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends. In: V Mohan Malhotra Symposium. American Concrete Institute. SP-144. **Proceedings**. Detroit, 1994, p 447-482.

NAKAMOTO, J. & TOGAWA, K. Q. A study of strength development and carbonation of concrete incorporating high volume blast furnace slag. In: Fifth International Conference. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Milwaukee, 1995. p. 1121-1139.

NGALA, V. T. & PAGE, C. L. Effects os carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cements pastes. **Cement and concrete Research**, 1997, v. 27, n. 67, p. 995-1007.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2^a ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUMATA S.; KOID, Y.; SHIMOBAYASHI, S. Properties of ultra-highly pulverized granulated blast furnace slag-Portland cements blends. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Second International Conference. **Proceedings**. Madrid, 1986.

NUNES, Fabíola L. **Influência da dosagem na carbonatação dos concretos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

OLORUNSOGO, F. T.; WAINWRIGHT, P. J. Effect of GGBS particle-size distribution on mortar compressive strength. **Journal of Materials in civil Engineering**. 1998, v. 10, n. 3, , p. 180-187.

OSBORNE, G. J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. **Cement and concrete Composites**, 1999, n. 21, p. 11-21.

- PHELAN, W. S. Admixtures and aggregates: key elements fo athletic concrete. **Concrete International**, 2000, Apr., p. 35-39.
- PICCOLI, Geraldo Moritz *et al.* Influência da dosagem de materiais cimentícios na resistência a compressão de concretos de alto desempenho. In: 41° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Salvador, 1999.
- PINTO Jr., Newton de Oliveira; PAULON, Vladimir Antônio; BIZ, Carlos Eduardo. Concreto pós reativos: eficiência de aditivos e utilização do cone de “Minislump” e cone de Marsh como forma de avaliação da trabalhabilidade. In: 42° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Fortaleza, 2000.
- REGOURD, M. Structure and behavior of slag Portland cement hydrates. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7th. **Proceedings**. Paris, 1980.
- REIS, R. L. G. Indústria cimenteira. Investimentos devem ser concluídos. **Mineral**, 2001, n. 196, p. 20-21.
- RIBEIRO, Carmen C., PERDIGÃO, Tadeu S., PINTO, Joana da Silva. **Estudo do aproveitamento da escória de alto-forno como agregado miúdo na produção de argamassa e concreto**. Projeto de pesquisa. Laboratório de Novos Materiais. Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. 1990.
- RICHARDSON, Mark G. **Carbonation on Reinforced Concrete**, CITIS LTD, Dublin, 1988.
- RIVERA *et al.* High-strength high-performance concrete using fly ash and superplasticizer admixture. In: High-Performance Concrete. Performance and Quality of Concrete Structures. Second CANMET/ACI International Conference. **Proceedings**. Gramado, 1999, p. 341-356.
- ROSEMBERG, Arnold; HANSON, Carolyn M.; ANDRADE, Carmen. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: Materials Science of Concrete. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, 1989. v. I.
- SAKAI, K.; *et al.* Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete. In: Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in concrete. Fourth International Conference. **Proceedings**. Istanbul, 1992, v. II, p.13671383.
- SAKAI, K. & WATANABE, H. High-performance concrete: Low-heat and high strength. In: ACI International Conference. SP 149-14. **Proceedings**, Singapore, 1994, p. 243-269.
- SCANDIUZZI, Luércio. BATTAGIN, Arnaldo F. **A Utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo**. Estudo Técnico nº 95. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1990.
- SENZALE, G. R. de; DAL MOLIN, D, C. C. Study of influence os rice-husk ash on compressive strength of concretes at different ages. In: High-Performance Concrete. Performance and Quality of Concrete Structures. Second CANMET/ACI International Conference. **Proceedings**. Gramado, 1999, p. 213-230
- SHI, Caijun; DAY, Robert L.A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. **Cement and concrete Research**, 1995, v. 25, n. 6, p. 1333-1346.
- SHI, Caijun. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. **Cement and concrete Research**, 1996, v. 26, n. 12, p. 1789-1799.

SHUNSUKE, H. & YAMADA, K. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p. 1159-1165.

SILVA, Ernan; ALMEIDA, Carlos. Escória granulada de alto-forno como agregado miúdo para argamassa e concreto. In: I Simpósio Nacional de Agregados. EPUSP-Depto. Eng. Constr. Civil. **Anais**. São Paulo, 1986.

SILVA, Ernan; ALMEIDA, Carlos. Estudo e avaliação comparativa do poder aglomerante da escória de alto-forno granulada. Parte I e Parte II. São Paulo, 1991.

SILVA, Maristela G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SINVASUNDARAM, V. & MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, 1992, Nov-Dez, p. 554-563.

SMOLCZYK, H. G. **Slag structure and identification os slags**. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7th. **Proceedings**. Paris, 1980, v. 1.

SPONHOLZ, Ildo; PRUDÊNCIO Jr., Luiz Roberto; STEIN, Rafael. Estudo comparativo de diferentes metodologias para a seleção de aditivos redutores de água para concreto de alto desempenho. In: 40^o Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Rio de Janeiro, 1998.

STEVULA, L. et al. Hidration products at blastfurnace slag aggregate. Cement-paste interface. **Cement and Concrete Research**, 1994, v. 24, n. 3, p. 413-423.

SWAMY, R. N.; SAKAI, M.; NAKAMURA, N. Role of superplasticizers and slag for high performance concrete. In: Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemicals Admixtures in Concrete. V. M. Malhotra. SP 148-1. **Anais**. Detroit, 1994, p. 1-26.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1990. 474 p.

TAZAWA, E. & MIYAZAWA, S. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. **Cement and concrete Research**, 1997, v. 49, n. 178, p. 15-28.

TITO, Miragaya P. & CANTO, Eduardo Leite. **Química na abordagem do cotidiano**., 1^a Edição. São Paulo: Moderna, 1999.

WAEKENS, Gerardo S., CARMINE, Cláudio O. del. La elaboración del arrabio y del acero. Las escórias siderúrgicas, su generación y propiedades. Niveles de producción. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, 1985, p. 1-31.

WANG *et al.* Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, 1995, v. 7, n. 27, p. 93-102.

WEE, T. H. *et al.* Pore structure controlling the carbonation os a hardened cement matrix blended with mineral admixture. **Advances in Cement Research**, 1999, v. 11, n. 2, p. 81-95.

ZACHARIASSEN, W. H. The atomic arrangement in glass. **The Journal of American Chemical Society**, 1932, v. 54, n. 10, p. 3841-3851.

ZHANG *et al.* Estimation of depth of concrete carbonation. In: Durability of Concrete. Fourth CANMET/ACI International Conference. **Proceedings**. Australia, 1997, v. 1, p. 633-648.

ZAIN, *et al.* A study on the properties of freshly mixed high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 1999, v. 29, p. 1427-1432.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)