

**DOSAGEM DE MICROCONCRETOS LEVES DE ALTO
DESEMPENHO PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-FABRICADOS DE
PEQUENA ESPESSURA – ESTUDO DE CASO**

David de Paiva Gomes Neto

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013621

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Tecnologia do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinício Costa Agnesini



São Carlos

1998

Class.	TESE - UDESC
Aut.	21/04
Tombo	215 131

st 100 3330

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

G633d

Gomes Neto, David de Paiva

Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura : estudo de caso / David de Paiva Gomes Neto. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Tecnologia do Ambiente Construído.

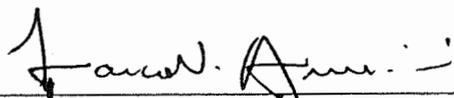
Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinício Costa Agnesini.

1. Concreto de alto desempenho. 2. Concreto leve. 3. Sílica ativa. 4. Argila expandida. 5. Microconcretos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **DAVID DE PAIVA GOMES NETO**

Dissertação defendida e aprovada em 15.10.98
pela Comissão Julgadora:



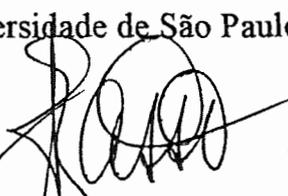
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIO COSTA AGNESINI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **LAÉRCIO FERREIRA E SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **JOSÉ SAMUEL GIONGO**
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **ADMIR BASSO**
Coordenador da Área de Tecnologia do Ambiente Construído



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*“Não existe processo de angústia que não se desfaça ao
toque do trabalho”*

André Luiz

*À minha amada mãe,
grande exemplo em minha vida .*

Agradecimentos

Ao Professor Marcos Agnesini pela excelente orientação.

À CAPES, pelo fornecimento da bolsa de estudos.

Às empresas do Grupo Holderbank, Ciminias S.A. e H^f Holderchem pela doação dos materiais.

Ao meu irmão e amigo Rubinho, pelos conselhos e incentivos, principalmente no início desta jornada.

Ao meu pai, pelo apoio concedido.

À Professora Sílvia Uchôa, da Universidade Federal de Alagoas, pela ajuda e orientação nas horas de decisão.

Ao grande amigo Gustavo por estar presente em grandes momentos e por ajudar a tomar os momentos iniciais menos difíceis.

Aos primeiros e inesquecíveis amigos, Luciana Paraguassú, Luciana Calixto, Luana, Vanessa, Carlão, Regina e André, por tantas alegrias divididas.

À Sandra por inúmeras demonstrações de amizade e carinho.

Aos amigos de Maceió, Topó, Romel, Patrick e Renata, pela formação da grande família "Boulevard".

À Stella, Rodrigo, Artis, Sílvia, Renata e Alexandre Seixas, pelas novas e especiais amizades.

A todos os colegas do departamento de Arquitetura pelos momentos de descontração.

Ao Marcelinho, pela grande paciência e colaboração.

Aos técnicos, Paulão, Nivaldo e Sérgio pelas orientações e amizade durante o período de ensaios.

Aos Professores Samuel e Laércio, pela excelente banca de defesa.

E, acima de tudo, à Deus por permitir o cumprimento desta tão preciosa fase de minha vida.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 02 – DEFINIÇÕES	5
2.1. Concreto de alto desempenho (CAD).....	5
2.2. Concreto estrutural leve (CL).....	7
2.3. Concreto leve de alto desempenho (CLAD).....	8
CAPÍTULO 03 - DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DOS CL'S E CLAD'S...	10
CAPÍTULO 04 – AGREGADOS LEVES PARA CLAD'S	16
4.1. Introdução.....	16
4.2. Classificação dos agregados leves.....	17
4.3. Propriedades dos agregados leves.....	17
4.4. Especificações para os agregados leves.....	18
4.5. Argilas para fabricação de agregados leves.....	19
4.6. Condições para argilas expandidas de alta qualidade.....	23
4.7. Principais aplicações dos agregados leves de argila expandida.....	25
CAPÍTULO 05 – ADIÇÕES MINERAIS	27
5.1. Introdução.....	27

5.2. Classificação das adições minerais de acordo com as características pozolânicas.....	29
5.3. Escória de alto-forno.....	31
5.3.1. Introdução.....	31
5.3.2. Histórico.....	32
5.3.3. Obtenção da escória e do cimento Portland de alto-forno.....	33
5.3.4. Propriedades das escórias de alto-forno.....	34
5.4. Cinzas volantes.....	36
5.4.1. Introdução.....	36
5.4.2. Obtenção.....	36
5.4.3. características das cinzas volantes.....	37
5.4.3.1. Características físicas.....	37
5.4.3.2. Características químicas.....	37
5.4.3.3. Características mineralógicas.....	38
5.4.4. Fatores que influem na pozolanicidade das cinzas volantes.....	38
5.4.5. Desempenho dos concretos e argamassas adicionadas com cinzas volantes.....	39
5.5. “Germes de cristalização”	40
5.6. Sílica ativa.....	41
5.6.1. Introdução.....	41
5.6.2. Histórico – aplicações.....	42
5.6.3. Produção.....	48
5.6.4. Propriedades da sílica ativa.....	50
5.6.4.1. Propriedades físicas.....	50
5.6.4.2. Propriedades químicas.....	53
5.6.5. Propriedades dos concretos e argamassas com sílica ativa.....	55
5.6.5.1. Estado fresco.....	56
5.6.5.2. Estado endurecido.....	61
CAPÍTULO 06 – PROPRIEDADES DOS CLAD’S.....	81
6.1. Propriedades físicas do CLAD.....	81
6.1.1. Resistência à compressão.....	81
6.1.2. Resistência à tração.....	83
6.2. Propriedades elásticas.....	85
6.2.1. Módulo de elasticidade.....	85

6.2.2. Comportamento da curva tensão x deformação.....	86
6.2.3. Coeficiente de Poisson.....	87
6.3. Durabilidade.....	87
6.3.1. Resistência ao gelo e degelo.....	87
6.3.2. Permeabilidade.....	88
6.3.3. Resistência à corrosão.....	90
6.3.4. Resistência à carbonatação.....	90
6.3.5. Resistência à abrasão.....	90

CAPÍTULO 07 – ANÁLISES EXPERIMENTAIS.....	92
7.1. Introdução.....	92
7.2. Dosagem.....	95
7.3. Características dos materiais empregados.....	97
7.3.1. Cimento Portland.....	97
7.3.2. Agregado miúdo.....	98
7.3.2.1. Argila expandida.....	98
7.3.2.2. Areia natural.....	99
7.3.2.3. Agregado composto por 60% de argila expandida e 40% de areia (em massa)	100
7.3.3. Aditivo.....	103
7.3.4. Adição.....	103
7.4. Traços dos microconcretos.....	103
7.5. Produção dos microconcretos.....	106
7.6. Ensaio realizados.....	107
7.6.1. Resistência à compressão (NBR-5739/1974).....	107
7.6.2. Resistência à tração por compressão diametral (NBR- 7222/1982).....	108
7.6.3. Massa específica no estado fresco (NBR-9833/1987).....	108
7.6.4. Módulo de elasticidade (NBR-9778/1986).....	109
7.6.5. Massa específica (NBR-9778/1986).....	109
7.7. Resultados obtidos.....	109
7.7.1. Resistência média à compressão, resistência média à tração, massa específica e fator de eficiência.....	109
7.7.2. Módulo de elasticidade.....	113
7.8. Análise dos resultados.....	115

7.8.1. Resistência à compressão.....	115
7.8.2. Consumo de cimento.....	122
7.8.3. Fator de eficiência.....	124
7.8.4. Resistência à tração por compressão diametral.....	125
7.8.5. Comportamento das curvas tensão x deformação.....	125
7.9. Comparação com microconcretos de massa específica normal.....	130
7.9.1. Realização dos ensaios.....	130
7.9.2. Discussão dos resultados.....	132
7.10. Exemplos práticos de dosagens dos microconcretos leves de alto desempenho.....	136
CAPÍTULO 08 – CONCLUSÕES.....	140
CAPÍTULO 09 – SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144

Lista de figuras

FIGURA 3.1 -	Plataforma Glomar Beaufort Sea 1, Ártico.....	14
FIGURA 4.1 -	Foto da argila expandida.....	23
FIGURA 5.1 -	Centro Empresarial Nações Unidas, São Paulo.....	44
FIGURA 5.2 -	Estádio do Pacaembú, São Paulo.....	46
FIGURA 5.3 -	Ponte Bernardo Goldfarb.....	47
FIGURA 5.4 -	Túnel JK.....	47
FIGURA 5.5 -	Ponte sobre o Rio Maranhão.....	48
FIGURA 5.6 -	Produção da sílica ativa.....	49
FIGURA 5.7 -	Micrografia eletrônica de transmissão da sílica ativa..	51
FIGURA 5.8 -	Gráfico exsudação (g/cm ²) x tempo (min).....	59
FIGURA 5.9 -	Ensaio de aderência.....	65
FIGURA 5.10 -	Ensaio de permeabilidade.....	67
FIGURA 5.11 -	Influência da cura na carbonatação.....	72
FIGURA 5.12 -	Carga total passante após 6 horas de ensaio.....	74
FIGURA 5.13 -	Teor de cloretos retido no 1º cm de profundidade.....	74
FIGURA 5.14 -	Permeabilidade a ions cloreto.....	76
FIGURA 5.15 -	Relação entre expansão após 224 dias e teor de sílica reativa no agregado.....	77
FIGURA 5.16 -	Expansão de barras de concreto devido à reação álcali-sílica.....	79
FIGURA 7.1 -	Curva granulométrica da argila expandida.....	101
FIGURA 7.2 -	Curva granulométrica da areia natural quartzosa.....	102
FIGURA 7.3 -	Curva granulométrica do agregado composto por argila e areia.....	102

FIGURA 7.4 -	Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM I.....	116
FIGURA 7.5 -	Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM II.....	116
FIGURA 7.6 -	Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM III.....	117
FIGURA 7.7 -	Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM IV.....	117
FIGURA 7.8 -	Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM V.....	118
FIGURA 7.9 -	Gráfico f_{c1} x relação a/c para as DOSAGEM II e DOSAGEM III.....	119
FIGURA 7.10 -	Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM II.....	120
FIGURA 7.11 -	Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM III.....	120
FIGURA 7.12 -	Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM IV.....	121
FIGURA 7.13 -	Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM V.....	121
FIGURA 7.14 -	Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e consumo de cimento.....	122
FIGURA 7.15 -	Relação entre fatores de eficiência e consumos de cimento.....	123
FIGURA 7.16 -	Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica.....	124
FIGURA 7.17 -	Relação entre fator de eficiência e relação a/c.....	125
FIGURA 7.18 -	Variação das curvas tensão x deformação dos diferentes consumos de cimento para a DOSAGEM II, com 63 dias.....	126
FIGURA 7.19 -	Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem sílica ativa, com 1 dia (DOSAGEM I e DOSAGEM II).....	126

FIGURA 7.20 -	Varição das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem sílica ativa, com 63 dias (DOSAGEM I e DOSAGEM II).....	127
FIGURA 7.21-	Varição das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem areia, com 63 dias (DOSAGEM II e DOSAGEM III).....	127
FIGURA 7.22-	Varição das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem areia, com 1 dia (DOSAGEM II e DOSAGEM III).....	128
FIGURA 7.23 -	Varição das curvas tensão x deformação para microconcretos com cimentos diferentes, com 1 dia (DOSAGEM II e DOSAGEM IV).....	128
FIGURA 7.24 -	Varição das curvas tensão x deformação para microconcretos com cimentos diferentes, com 63 dias (DOSAGEM II e DOSAGEM IV).....	129
FIGURA 7.25 -	Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.....	133
FIGURA 7.26 -	Relação entre fator de eficiência e relação a/c para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.....	133
FIGURA 7.27 -	Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e consumo de cimento para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.....	134
FIGURA 7.28 -	Relação entre fator de eficiência e consumo de cimento para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.....	134

Lista de tabelas

TABELA 5.1 -	Utilização das escórias de alto-forno.....	32
TABELA 5.2 -	Áreas específicas de diversos materiais.....	51
TABELA 5.3 -	Composição química de alguns materiais.....	54
TABELA 5.4 -	Composição química de sílicas ativas brasileira e norueguesa.....	54
TABELA 5.5 -	Normas de diversos países para teores máximos de cloretos.....	73
TABELA 7.1 -	Classificação dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras.....	93
TABELA 7.2 -	Classificação dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos.....	94
TABELA 7.3 -	Características dos cimentos.....	97
TABELA 7.4 -	Análise química dos cimentos.....	98
TABELA 7.5 -	Ensaio de granulometria da argila expandida.....	99
TABELA 7.6 -	Ensaio de granulometria da areia natural quartzosa...	100
TABELA 7.7 -	Ensaio de granulometria do agregado composto em massa por argila expandida (60%) e areia (40%).....	101
TABELA 7.8 -	Traços dos microconcretos para a DOSAGEM I.....	104
TABELA 7.9 -	Traços dos microconcretos para a DOSAGEM II.....	104
TABELA 7.10 -	Traços dos microconcretos para a DOSAGEM III.....	105
TABELA 7.11 -	Traços dos microconcretos para a DOSAGEM IV.....	105
TABELA 7.12 -	Traços dos microconcretos para a DOSAGEM V.....	106

TABELA 7.13 - Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, argila expandida e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM I	110
TABELA 7.14 - Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM II.....	110
TABELA 7.15 - Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM III.....	111
TABELA 7.16 - Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI-RS, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM IV.....	112
TABELA 7.17 - Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI-RS, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM V.....	112
TABELA 7.18 - Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, argila expandida e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM I.....	113
TABELA 7.19 - Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM II.....	113
TABELA 7.20 - Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM III.....	114
TABELA 7.21 - Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI-RS, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%). – DOSAGEM IV.....	114

TABELA 7.22 - Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI-RS, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM V.....	115
TABELA 7.23 - Traços em massa dos microconcretos de massa específica normal.....	131
TABELA 7.24 - Resultados dos ensaios para microconcretos de massa específica normal.....	132
TABELA 7.25 - Propriedades dos microconcretos para $f_{ck} = 50$ MPa..	137
TABELA 7.26 - Tempo para desforma e cura dos microconcretos.....	138
TABELA 7.27 - Propriedades dos microconcretos para $f_{ck} = 40$ MPa..	139

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- American concrete Institute
ASTM	- American Society for Testing Materials
CAD	- Concreto de Alto Desempenho
CANMET	- Canadian Department of Minerals, Energy and Technology
CENPES	- Centro de Pesquisas da Petrobrás
CL	- Concreto Leve
CLAD	- Concreto Leve de Alto Desempenho
CPV-ARI	- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPV-ARI-RS	- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos
EB	- Especificação Brasileira
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
NBR	- Norma Brasileira Registrada
SA	- Sílica Ativa
USP	- Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

A%	-	Relação água/materiais secos
a/c	-	Relação água/cimento
a/(c + sa)	-	Relação água/(cimento + sílica ativa)
Al ₂ O ₃	-	Óxido de alumínio
CaCO ₃	-	Carbonato de cálcio
CaO	-	Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	-	Hidróxido de cálcio
C-S-H	-	Silicato tricálcico hidratado
f _{ci}	-	Resistência à compressão a j dias de idade
f _{ck}	-	Resistência característica à compressão
Fe ₂ O ₃	-	Óxido de ferro
f _{tk}	-	Resistência característica à tração por compressão diametral
Gpa	-	Giga Pascal
K ₂ O	-	Óxido de potássio
MgO	-	Óxido de magnésio
MPa	-	Mega Pascal
Na ₂ O ₃	-	Óxido de sódio
NaOH	-	Hidróxido de sódio
SiO ₂	-	Dióxido de silício
φ _{máx}	-	Dimensão máxima característica
γ	-	Massa específica
μm	-	Micrômetro

Resumo

GOMES NETO, D. P. (1998). *Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura - estudo de caso*. São Carlos, 1998. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho trata do estudo de microconcretos leves de alto desempenho, utilizando argila expandida e sílica ativa, direcionados à tecnologia de pré-fabricados.

Na parte teórica são apresentados definições, desenvolvimento histórico, características e propriedades dos concretos leves de alto desempenho (CLAD's), bem como, da sílica ativa e da argila expandida. Na parte experimental foram idealizados cinco tipos de dosagens diferentes para análise das propriedades dos microconcretos: resistência à compressão, massa específica, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e consumo de cimento.

Pretende-se demonstrar o potencial de emprego do material na produção de pré-fabricados de pequena espessura para execução de coberturas industriais, galerias, pontilhões rodoviários, lajes e vigas de edifícios.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho; concreto leve; sílica ativa; argila expandida; microconcretos.

Abstract

GOMES NETO, D.P. (1998). *Mixes of high performance lightweight aggregate microconcretes for production of low-thickness pre-cast materials – study of case*. São Carlos, 1998, 157p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This thesis deals with the study of high performance lightweight aggregate microconcretes using expanded clay and silica fume for pre-cast material technology.

In the theoretical part, definitions, history, characteristics and properties of high performance lightweight aggregate concretes, as well as, silica fume and expanded clay, are presented. In the experimental part, five kinds of mixes were created to analyse microconcrete properties: compressive strength, density, splitting tensile strength, modulus of elasticity and cement content.

The application potential on the production of low-thickness pre-cast material, for the execution of industrial covers, aqueducts, small bridges, slabs and beams, is intended to be demonstrated.

Keywords: High performance concrete; lightweight aggregate concrete; silica fume; expanded clay; microconcrete.

Capítulo 01 - Introdução

O concreto de cimento Portland é considerado o material manufaturado mais utilizado, pois, oferece excelentes propriedades, tais como, durabilidade e propriedades mecânicas a um baixo custo, além da possibilidade de trazer benefícios ecológicos ao incorporar determinados tipos de resíduos, como por exemplo, os industriais. Apesar de sua aparente simplicidade, é um material complexo que apresenta uma distribuição heterogênea de materiais sólidos, bem como vazios de várias formas e tamanhos. Por ser um material largamente utilizado e apresentar uma certa complexidade, o concreto vem sendo estudado e evoluído ao longo do tempo, e uma prova dessa evolução é o conhecimento e a utilização do concreto de alto desempenho (CAD).

O concreto de alto desempenho tem sido pesquisado e utilizado nos últimos anos em diversos países. O termo “concreto de alto desempenho” é hoje considerado mais adequado que o termo, por muitos utilizado, “concreto de alta resistência”, já que apresenta superioridade em outras características além da resistência mecânica, como baixa permeabilidade, excelente durabilidade, ótima aderência a concretos velhos e ao aço, baixa segregação, entre outras.

Paralelamente aos concretos de massa específica normal, os chamados “concretos estruturais leves” vêm sendo desenvolvidos, ao longo dos anos, com o objetivo básico de reduzir o peso próprio e o custo total das estruturas, pois como cita o Comitê 213 do ACI (1987): “enquanto o concreto estrutural leve pode custar mais por metro cúbico do que um concreto de

massa específica normal, a estrutura pode custar menos como resultado de um peso próprio reduzido”. Reduz-se assim o custo das fundações, das estruturas (com seções menores), e das armaduras de aço.

Atualmente algumas pesquisas, inclusive no Brasil, vêm sendo realizadas, com a finalidade de unir as características otimizadas do **concreto de alto desempenho (CAD)** com a massa específica reduzida do **concreto leve (CL)** obtendo-se, assim, o que pode-se denominar de **concreto leve de alto desempenho (CLAD)**.

Em alguns países como os Nórdicos e os da América do Norte muitas pesquisas e aplicações vêm sendo realizadas nas áreas de construção pesada e exploração de petróleo.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar, através de experimentos em laboratório, o comportamento de microconcretos produzidos com agregados leves de argila expandida ($\phi_{\text{máx}} = 6,3 \text{ mm}$), com ou sem adição de sílica ativa, dando-se um enfoque especial à relação entre suas resistências mecânicas e massas específicas e criando condições para que esses microconcretos leves de alto desempenho possam ser utilizados em pré-fabricados de pequena espessura, como por exemplo, coberturas industriais, galerias, pontilhões rodoviários, painéis portantes, lajes e vigas de edifícios, que normalmente são produzidos com microconcretos de massa específica normal.

O concreto de alto desempenho, de um modo geral, apresenta um grande potencial de emprego em pré-fabricados, pois:

- atinge grandes resistências em poucas idades e, desta forma, em geral, dispensa a cura térmica e caso seja utilizada esta pode ser reduzida e com menor temperatura. Este fato, além das vantagens industriais

decorrentes, resulta em pré-fabricados com maiores resistências mecânicas finais;

- para elementos em contato com meios agressivos, principalmente peças esbeltas, tem-se uma durabilidade incomparavelmente maior;
- as elevadas resistências mecânicas possibilitam a utilização de componentes leves e execução de estruturas com grandes vãos.

A utilização dos microconcretos estudados em pré-fabricados permite a obtenção de elevadas resistências à compressão ($f_{ck} \geq 50$ MPa), altas resistências mecânicas à baixa idade ($f_{cj} \geq 30$ MPa para um dia) permitindo desformas rápidas, baixa permeabilidade, alta resistência à corrosão das armaduras devido à carbonatação ou ao ataque de cloretos e alta resistência do concreto frente ao risco de deterioração por lixiviação ou formação de compostos expansivos.

Os pré-fabricados são caracterizados, também, pela esbeltez (espessura entre 40mm e 60 mm), leveza e pequenas espessuras do cobrimento de concreto à armadura (média de 10 mm a 15 mm, no máximo 30 mm).

Na dosagem dos microconcretos o parâmetro “durabilidade” é fixado a partir de modernos conceitos nos quais considera-se a vida útil desejada para o pré-fabricado, ou seja, o período de tempo que se deseja que a estrutura atenda a certos requisitos funcionais com um mínimo de manutenção (vida útil de projeto, normalmente, corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de cloretos ou a frente de carbonatação atinjam a armadura e ocasionem uma possível despassivação). A dosagem de microconcretos para valores de $f_{ck} \geq 50$ MPa possibilita a especificação de espessuras mínimas, bem como, qualidade do cobrimento.

A leveza dos pré-fabricados é garantida, não só pela pequena espessura, mas também através da utilização, além dos agregados normais, dos agregados leves. Com esta técnica, obtêm-se microconcretos com baixas

massas específicas sem prejuízo da resistência mecânica e durabilidade dos pré-fabricados.

O objetivo fundamental da pesquisa é o desenvolvimento de estudo na área da tecnologia do CAD, com ênfase na industrialização, sob condições rigorosas de controle de qualidade de elementos pré-fabricados, leves, produzidos com microconcretos de elevado desempenho. Tal estudo é direcionado, principalmente, para a indústria de pré-fabricados na região de São Carlos (Centro-Norte do Estado de São Paulo), na qual o interesse por esta tecnologia é crescente.

Apesar desta pesquisa ser direcionada à produção de microconcretos para pré-fabricados, a tecnologia desta pode ser perfeitamente aplicada em outras situações, tais como concretos usuais, utilizando agregados leves com maiores dimensões.

Inicialmente neste trabalho, será apresentada uma parte teórica contendo definições, histórico e algumas características e propriedades do CLAD e dos materiais utilizados em sua produção. Na segunda parte serão apresentados os experimentos realizados, os resultados obtidos, como também algumas discussões e conclusões.

Capítulo 02 - Definições

De início serão dadas definições para concreto de alto desempenho de massa específica normal (CAD) e para concretos leves (CL), considerando que o concreto leve de alto desempenho (CLAD) é uma união das características desses dois tipos de concretos.

2.1. Concreto de alto desempenho (CAD)

Antes das definições, convém salientar que o termo “concreto de alta resistência” (CAR) é correntemente utilizado por diversos autores, já que a resistência à compressão é utilizada como parâmetro de comparação entre o concreto usual e o de alto desempenho, porém, fica subentendido que além da alta resistência mecânica este possui outras qualidades, como citado anteriormente.

Para concretos de alta resistência, o Comitê 363 do ACI (1992) define como concretos que devem ter resistências à compressão de 41 MPa ou mais. Porém, este cita que embora 41 MPa tenha sido selecionado como o limite inferior, não implica que existe uma mudança drástica nas propriedades dos materiais ou nas técnicas de produção. Na realidade, todas mudanças que ocorrem a partir de 41 MPa representam um processo que começa com concretos de baixa resistência e continua com os concretos de alta resistência.

De acordo com SHAH apud MEHTA & MONTEIRO (1994)¹, para misturas feitas com agregados normais, os concretos de alta resistência são aqueles que têm resistência à compressão maior que 40 MPa. Contudo, dois argumentos bastante esclarecedores justificam essa definição:

- a maioria dos concretos convencionais estão na faixa de 21 MPa e 42 MPa. Para produzir concretos com mais de 42 MPa são necessários controle de qualidade severo e maior cuidado na seleção e na dosagem dos materiais (plastificante, aditivos minerais, tipo e dimensão dos agregados, etc.). Então, para distinguir esse concreto especialmente formulado, que tem uma resistência superior a 42 MPa, deve-se chamá-lo de alta resistência;
- estudos experimentais mostraram que, em muitos aspectos, a microestrutura e as propriedades do concreto com resistência à compressão acima de 42 MPa, são consideravelmente diferentes das do concreto convencional.

Segundo MINDESS (1994), concreto de alta resistência é definido como um concreto que apresenta uma resistência aos 28 dias de, no mínimo, 60 MPa.

Pode-se notar que existem diferentes definições para concreto de alta resistência e que essas dependem de fatores como a época e o local de sua aplicação.

No que se refere ao local da aplicação, o Comitê 363 do ACI (1992) comenta que em regiões onde concretos com resistência à compressão de 62 MPa são normalmente produzidos, concreto de alta resistência pode ser considerado entre 83 MPa e 103 MPa. Entretanto, em regiões onde o limite superior de resistência à compressão de concretos utilizados

¹ SHAH, S.P. (1981) *Conc. Int.*, vol 3, n.5, pp. 94-98 apud MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo, PINI, p. 396.

comercialmente é de 34 MPa, concreto com 62 MPa é considerado de alta resistência.

Já quanto a época, o Comitê 363 do ACI (1992) cita que, nos anos 50, concreto com resistência à compressão de 34 MPa era considerado de alta resistência. Nos anos 60, concretos entre 41 MPa e 52 MPa de resistência à compressão eram usados comercialmente. No início da década de 70, concretos com 62 MPa já eram produzidos e mais recentemente, resistências à compressão próximas de 138 MPa foram utilizadas em pré-moldados de concreto.

A NBR-8953/1992 não define concretos de alta resistência, porém, apresenta duas classes: a Classe I, com concretos de resistências entre 20 MPa e 50 MPa, e a Classe II, com concretos de resistências entre 55 MPa e 80 MPa.

2.2. Concreto estrutural leve (CL)

Para concreto estrutural leve, o Comitê 213 do ACI (1967) define como os concretos que possuem uma resistência à compressão aos 28 dias superior a 17,5 MPa e um massa específica aos 28 dias que não exceda 1850 kg/m^3 . São concretos que geralmente utilizam agregados leves expandidos feitos com folhelhos, argilas, ardósias, escórias e cinzas volantes pelotizadas.

De um modo geral, MEHTA & MONTEIRO (1994) definem concreto estrutural leve como um concreto estrutural em todos os sentidos, exceto que, por razões de economia do custo total, o concreto é feito com agregados leves, sendo, portanto, sua massa específica aproximadamente dois terços da massa específica do concreto feito com agregados naturais típicos.

2.3. Concreto leve de alto desempenho (CLAD)

Quanto ao concreto leve de alto desempenho existe uma certa dificuldade em defini-lo, já que uma definição baseada em níveis de resistência (como a do concreto de alta resistência) ou de massa específica (como a do concreto leve) é considerada pouco útil.

Desta maneira, atualmente procura-se considerar um parâmetro que relacione a resistência à compressão e a massa específica do material, denominado por SPITZNER apud ARMELIN et al. ²(1994) como **fator de eficiência** e por HOLM & BREMNER (1994) como **eficiência estrutural**, e é definido pela razão entre a resistência à compressão e a massa específica seca do material, representada pela expressão a seguir.

$$\text{Fator de Eficiência} = f_c / \gamma \text{ (MPa.dm}^3\text{/kg)}$$

Onde: f_c = resistência à compressão (MPa)

γ = massa específica seca do material (kg/dm³)

Deste modo, segundo ARMELIN et al. (1994), considera-se como concreto leve de alto desempenho, por exemplo, um concreto de resistência à compressão de 30 MPa desde que sua massa específica seja inferior a 1200 kg/m³, do mesmo modo que um concreto de resistência 60 MPa e massa específica de 2400 kg/m³, ambos apresentando fator de eficiência igual a 25 MPa.dm³/kg.

Se analisarmos os limites utilizados pelo Comitê 213 do ACI (1967) para definir concretos estruturais leves, ou seja, resistência à compressão mínima e massa específica máxima, aos 28 dias, de 17,5 MPa e 1850 kg/m³, respectivamente, tem-se um fator de eficiência de 9,46 MPa.dm³/kg, o que

confere um alto desempenho para os exemplos dados acima por ARMELIN et al. (1994).

Porém, como ocorre com o CAD, a definição do CLAD varia conforme a região e a época de sua execução. Existem exemplos, citados mais adiante, que para o nível tecnológico da época, os concretos leves poderiam ser considerados como de alto desempenho.

² SPTIZNER, J. (1994). High Strength Concrete., Cap.II, RILEM apud ARMELIN et al. *Alta resistência com argila expandida*. Revista Ibracon, ano IV, n.09, ago/set, 1994

Capítulo 03 - Desenvolvimento histórico dos CL's e CLAD's

Apesar das primeiras aplicações dos concretos estruturais leves terem ocorridos neste século, há registros bem mais antigos da utilização da pedra pome como agregado leve pelos gregos e romanos. MITIDIARI (1976) cita que a cúpula do Pantheon, em Roma, de 43 m de diâmetro, é um dos exemplos mais antigos.

Durante a Primeira Guerra Mundial, segundo HOLM & BREMNER (1995), navios e barcas de concreto com resistência à compressão de 35 MPa (350 kgf/cm²) e massa específica de 1760 kg/m³ ou menos foram construídos pelo "Emergency Fleet Building Corp", utilizando agregado de folhelho expandido. Este exemplo foi considerado extraordinário na época, pois concretos de massa específica normal apresentavam resistências em torno de 15 MPa com massas específicas bem mais elevadas que as dos navios e barcas.

Na década de 20, de acordo com MITIDIARI (1976), concretos leves armados foram utilizados para construir o "Park Plaza Hotel" de St. Louis e o prédio da "South-Western Bell Telephone Building" em Kansas City, nos Estados Unidos.

No começo da década de 30 o concreto estrutural leve foi utilizado para a construção da pista superior da ponte da baía de São Francisco-Oakland e que, segundo o Comitê 213 do ACI (1967), foi a solução para o projeto econômico da ponte. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994) essa

econômico da ponte. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994) essa economia foi em torno de 3 milhões de dólares em aço. Desde então numerosos tabuleiros de pontes em concreto leve foram construídos em todo o mundo.

Durante a Segunda Guerra Mundial foram construídos 105 navios de concreto leve, permitindo-se uma economia de chapas de aço, para assim serem utilizadas em situações especiais.

Após a Segunda Guerra Mundial, houve um considerável aumento de estudos e aplicações do concreto estrutural leve, elaborado com vários tipos de agregados leves, para execução de estruturas de prédios, tabuleiros de pontes e produtos pré-moldados.

A partir desse conhecimento, várias obras de recuperação e expansão foram realizadas tirando-se proveito da leveza desses concretos. Como exemplos, dados pelo Comitê 213 do ACI (1967), têm-se o aumento de quatro andares de um prédio de lojas em Cleveland e a substituição da estrutura de suspensão da ponte "Tacoma Narrows", após seu colapso, incorporando faixas adicionais de pista. Em ambos os casos utilizaram-se concretos leves sem necessidade de substituição ou reforço das fundações.

Na década de 50, estruturas de muitos pavimentos foram realizadas com concretos leves, tais como, o "Prudential Life" de 42 pavimentos, em Chicago, que utilizou pilares com esse tipo de concreto, e o "Statler Hilton Hotel" de 18 andares, com estruturas e lajes de piso de concreto leve.

Com a comprovada eficiência dos concretos leves, várias pesquisas e aplicações foram estimuladas em vários países do mundo. Exemplos notáveis são citados pelo manual da CINASITA S.A. (única produtora de argila expandida em escala industrial do Brasil), são alguns deles: a ponte pênsil de Vicent Thomas em Los Angeles; o arranha-céu "1000 Lake Shore

Plaza” com 58 andares e o conjunto Marina City com duas torres de 65 andares, ambos em Chicago; a cobertura do aeroporto de Twin Cities (Minneapolis e St. Paul) em casca prismática delgada, com 56 mil metros quadrados de área coberta; a cúpula do auditório da Universidade Illinois, com 120 m de diâmetro; a cobertura do “Metropolitan Opera House” de New York em cascas cilíndricas delgadas, entre outros. Todos esses concretos leves foram executados com argila expandida.

Alguns dos exemplos anteriores podem ter sido executados em concreto leve de alto desempenho, levando em consideração a época e o local de suas aplicações.

Atualmente o CLAD tem sido utilizado em vários campos da engenharia, dentre eles, na construção de estruturas de edifícios, com intuito de diminuir a carga permanente na estrutura e nas fundações, aliando suas características de leveza a um considerável aumento de resistência mecânica.

MEHTA & MONTEIRO (1994) citam exemplos de concretos leves em edifícios que, analisando-se conjuntamente suas resistências à compressão e massas específicas, bem como as datas de execução, poderiam, hoje, serem classificados como CLAD. São eles:

- O edifício Lake Point Tower, construído em Chicago, Illinois, em 1968, com 71 pavimentos. As lajes do piso, do segundo ao septuagésimo andar e a área da garagem foram executadas em concreto moldado “in loco”, com uma massa específica de 1730 kg/m^3 e uma resistência à compressão aos 7 dias de 20 MPa a 22 MPa.
- O Australian Square, em Sidney, Austrália, construído em 1967, é uma torre circular (50 pavimentos), de 184 m de altura, e 42,5 m de diâmetro. Uma economia de 13% no custo da construção foi conseguida, utilizando 30.000 m^3 de concreto leve nas vigas, pilares e pisos acima do sétimo

andar. Esse concreto tinha uma resistência média à compressão de 34,3 MPa e uma massa específica média de 1792 kg/m³, aos 28 dias.

- O One Shell Plaza, em Houston, Texas, construído em 1969, é uma estrutura de 52 pavimentos toda em concreto leve. O concreto utilizado possuía uma massa específica de 1840 kg/m³ e resistência à compressão, aos 28 dias, de 41,2 MPa nas paredes de contraventamento, pilares e radier e 31,3 MPa nas estruturas do piso. Caso tivesse sido usado concreto normal, somente uma estrutura com 35 andares poderia ter sido projetada com segurança, pois o solo onde foi construída não suportaria cargas superiores.

A redução da seção utilizando concreto de alto desempenho aliada à inclusão de agregados leves, favorece significativamente, também, a realização de grandes estruturas, como pontes, oferecendo um peso próprio reduzido e ainda assegurando alta qualidade à estrutura, minimizando assim, futuros custos de manutenção. Muitas pontes na América do Norte têm sido construídas com CLAD.

Outra grande utilização do CAD e do CLAD tem sido em obras marítimas. As duas aplicações mais importantes nesta área são as instalações portuárias e as plataformas “offshore”, por apresentarem excelente impermeabilidade, garantindo maior durabilidade no meio marinho, e peso próprio reduzido com a inclusão de agregados leves. Concretos com resistências à compressão com mais de 41 MPa vêm sendo utilizados em estruturas “offshore” desde os anos 70.

O Comitê 363 do ACI (1992) cita que em 1984, a Glomar Beaufort Sea 1 (figura 3.1), no Ártico, foi construída com 9200 m³ de CLAD com massa específica de 1794 kg/m³ e resistência à compressão aos 56 dias de 62 MPa e também, com CAD de massa específica de 2323 kg/m³ e 69 MPa de resistência aos 56 dias.

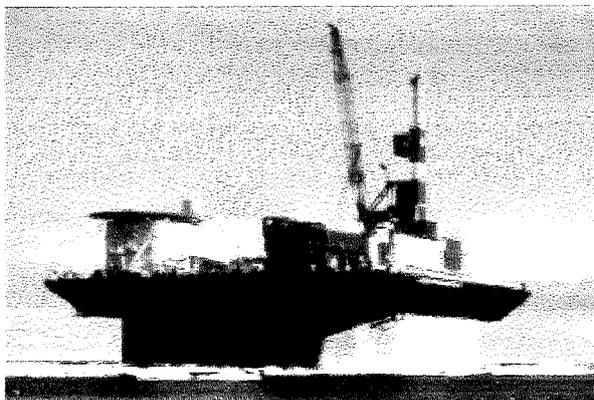


Figura 3.1: Plataforma Glomar Beaufort Sea 1, Ártico (RUSSEL, 1994)

Segundo VALOIS (1994), no Brasil, há cerca de vinte anos eram iniciados estudos de um concreto de alta qualidade para utilização na construção da primeira plataforma "offshore" da Petrobrás, onde se conseguiu com a simples redução da relação água/cimento e uso dos plastificantes comuns, resistência característica à compressão estimada superior a 45 MPa aos 28 dias, muito superior aos valores até então utilizados na região.

Hoje, segundo SANTOS et al. (1994), o concreto leve de alto desempenho representa uma tecnologia de ponta na área de concreto estrutural, tendo sido utilizado nos mais recentes projetos de plataformas "offshore" de concreto, motivando, portanto, estudos no Centro de Pesquisas da Petrobrás, CENPES, com o objetivo de desenvolver um concreto leve de alta resistência no Brasil.

Uma grande aplicação dos CL's e CLAD's, é na produção de estruturas pré-moldadas de concreto. Na América do Norte este tipo de aplicação é bastante comum. No Brasil, a utilização de pré-moldados utilizando concretos estruturais leves vem desde a década de 60, em construções industriais, habitacionais, garagens, viadutos ferroviários entre outras. Importantes exemplos são citados por MITIDIERI (1976), tais como as

passarelas para pedestres sobre a Via Anchieta e o trecho central do interceptor de esgoto do Rio Pinheiros, executado em 1972 pela antiga SANESP, que teve seu manuseio facilitado pelas suas características de leveza.

Capítulo 04 - Agregados leves para CLAD's

4.1 Introdução

Os agregados leves para a construção civil, de um modo geral, são materiais naturais ou artificiais que possuem massa específica bastante inferiores aos agregados normais e são utilizados em concreto quando as principais características são a leveza, a resistência à compressão e isolamento térmica.

Como já foi mencionado, os concretos leves, como os agregados leves, são utilizados há vários séculos. Além dos gregos e romanos, os astecas aproveitavam as propriedades de certas rochas vulcânicas para construir monumentos arquitetônicos, pirâmides e edifícios.

Na segunda metade do século dezoito, segundo manual da CINASITA S.A., começaram a ser utilizadas as escórias de alto forno e de fornalha, resíduos industriais que, após adequado tratamento, apresentavam propriedades semelhantes as dos agregados vulcânicos já citados.

Já neste século, em 1919, de acordo com a referência acima, o americano Stephen J. Hayde registra o invento de um novo agregado artificial, a argila expandida. No mesmo ano, em Kansas City, uma grande usina começa a operar em escala industrial para produzir o novo material que passa a ser conhecido pelo nome de "haydite". Desde então, houve rápida expansão de demanda e hoje têm-se uma centena de usinas espalhadas pelo mundo, a

maioria delas nos Estados Unidos. No Brasil, a argila expandida está sendo produzida em escala industrial desde 1968.

4.2. Classificação dos agregados leves

Os agregados leves podem ser classificados em:

- agregados leves naturais que, segundo MITIDIÉRI (1976), são ocorrências minerais em que os referidos minérios passam por um processo de extração e classificação granulométrica adequada ao seu uso. Como exemplo têm-se as pedras pomes e as escórias vulcânicas;
- agregados leves artificiais, ou subprodutos industriais, tais como as argilas, folhelhos, escórias, vermiculita, perlita e cinzas volantes expandidas. A perlita e vermiculita expandidas são classificadas por alguns autores como agregados muito leves.

4.3. Propriedades dos agregados leves

Para que um agregado leve apresente bom desempenho, SANTOS (1975) cita que o mesmo tem que apresentar as seguintes propriedades:

- *baixa massa específica* - propriedade essa que é desejada para o uso em concreto leve, com o objetivo de diminuir seu peso próprio;
- *resistência mecânica elevada* - as partículas do agregado leve devem apresentar, individualmente, a melhor resistência possível; variações na resistência mecânica e na massa específica aparente podem ser obtidas por variações no processamento do agregado; partículas possuindo forma esférica e um casca superficial grossa são as mais resistentes mecanicamente em comparação com outros tipos de agregado;
- *ausência de pontas e arestas agudas* - o agregado ideal deve possuir partículas de superfícies arredondadas, de preferência esféricas, para ser atingido o máximo valor da relação resistência à compressão para

volume de argila no concreto; partículas irregulares, de arestas agudas, produzem concreto de má trabalhabilidade, difícil de moldar em torno da armadura do concreto e com tendência a formar vazios;

- *pequena absorção de água* - é desejável, uma vez que agregado cheio de poros abertos tende a desidratar o concreto, impedindo a pega do cimento; uma saturação prévia com água pode compensar esse efeito;
- *distribuição granulométrica* - importante para assegurar boa trabalhabilidade; deve haver faixa adequada de dimensões, inclusive teor conveniente de finos, para que o concreto possa ser moldado em formas complexas e em torno das armaduras. Essas distribuições granulométricas podem ser analisadas através das especificações EB-228 (1969), EB-229 (1969) e EB-230 (1969), como também pela norma ASTM C-130-42;
- *inércia química do agregado* - necessária, pois, reações entre o agregado e o cimento Portland ou as armaduras são prejudiciais ao concreto;
- *custo do agregado leve* - fator básico que determina sua aceitação para o emprego em construção; o custo superior inicial do concreto leve em relação à areia, ao cascalho e à pedra britada deve ser superado, quer pela economia nas massas de aço e de concreto quer pela obtenção de melhores propriedades em isolamento térmica e acústica.

4.4. Especificações para os agregados leves

O American Society for Testing Materials (ASTM), como também a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabeleceram as seguintes especificações para agregados leves:

- *agregados leves para concreto de elementos de alvenaria* (ASTM - C 330-64T/ ABNT - EB-228/69) - três tipos gerais de agregados leves estão incluídos nessa especificação: agregados preparados por expansão, calcinação ou sinterização de produtos como a escória de alto-forno, argila, diatomita, cinzas volantes, ardósia, folhelho ou vermiculita;

agregados constituídos por materiais naturais como pomes, escória vulcânica ou tufo; agregados constituídos por cinzas provenientes da combustão de carvão ou coque.

- *agregados leves para concreto isolante térmico* (ASTM - C 331-64T/ ABNT - EB-229/69) - dois tipos gerais de agregados leves estão incluídos nessa especificação: agregados preparados por expansão de produtos, como por exemplo a vermiculita, para a produção de concreto leve de massa específica aparente entre 240 kg/m^3 e 800 kg/m^3 e baixa condutibilidade térmica; agregados preparados por expansão, calcinação, ou sinterização de produtos como a escória de alto-forno, argila, diatomita, cinzas volantes, ardósia ou folhelho e agregados constituídos por materiais naturais como pomes, escória vulcânica ou tufo;
- *agregados leves para concreto estrutural* (ASTM - C 332-61/ ABNT - EB-230/69) - dois tipos gerais de agregados leves estão incluídos nessa especificação: agregados preparados por expansão, calcinação, ou sinterização de produtos como a escória de alto-forno, argila, diatomita, cinzas volantes, ardósia ou folhelho; agregados constituídos por materiais naturais como pomes, escória vulcânica ou tufo;

As especificações citadas acima estabelecem vários requisitos para os agregados leves, como de granulometria, massa específica aparente, impurezas orgânicas, perda ao fogo, manchamento e também para o concreto feito com agregado leve.

4.5. Argilas para fabricação de agregados leves

Os agregados de argila expandida podem ser obtidos por dois processos:

a) por sinterização:

Nesse processo a matéria-prima é misturada com uma proporção adequada de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Depois o

material é levado à uma grelha móvel de um forno para ser queimada, formado-se gases, provocando a ação expansiva.

SANTOS et al. (1986) afirmam que o agregado obtido por este processo possui todos os poros abertos, sem recobrimento algum, aumentando consideravelmente a absorção de água. A massa específica obtida varia de 650 kg/m^3 a 900 kg/m^3 . Além disso, segundo o manual da CINASITA S.A., o produto final é um clínquer de aspecto muito irregular e de arestas vivas, que exige britagem para atender a todas as graduações granulométricas necessárias para o preparo de concretos.

b) por forno rotativo (nodulação)

Esse processo, segundo SANTOS et al. (1986), aproveita as características de determinadas argilas expandirem-se quando submetidas a temperaturas elevadas, próximas do ponto de fusão incipiente, em decorrência da formação de gases (à temperatura de vitrificação ou um pouco acima) que ficam aprisionados pela capa externa vítrea da pelota, formada também nas mesmas condições pela viscosidade do material.

Segundo o manual da CINASITA S.A., o produto é, neste caso, constituído de grãos de granulometria variada, de formato arredondado regular, com o âmago formado por uma massa esponjosa micro-celular, envolta por uma casca cerâmica vitrificada, resistente e impermeável, que confere ao agregado uma porosidade fechada.

O agregado produzido por esse processo pode ser chamado de encapado, pois possui um cobrimento de material fundido que diminui sensivelmente a absorção de água e, portanto, aumenta a resistência mecânica.

Antes da queima do material em forno rotativo e após a coleta da matéria-prima, o processo de fabricação da argila expandida segue as seguintes etapas, descritas por SANTOS et al. (1986):

1. *Homogeneização*

A matéria-prima, vinda do estoque (que deve estar localizado o mais próximo possível da fábrica), é lançada em depósitos para homogeneização do material.

2. *Desintegração*

Do depósito, o material é lançado em um desintegrador que reduz os grandes torrões a um diâmetro máximo de 5 cm.

3. *Mistura e nova homogeneização*

O material é transportado através de esteiras para um misturador cuja finalidade é deixar a argila com a plasticidade adequada para ser extrudada (etapa mais adiante). Normalmente é adicionada a quantidade de água corrigida eletronicamente, no caso de indústrias com tecnologia mais avançada ou por estimativa, no caso de indústrias pequenas. Logo após ser umedecido e homogeneizado, o material passa diretamente para o laminador.

Nessa etapa podem ser adicionados aditivos para melhorar a plasticidade da argila e as propriedades piroexpansivas.

4. *Laminação*

Nessa etapa, os torrões de argila ou alguns materiais sólidos de dimensões maiores que 5 mm são eliminados. A laminação é realizada por dois cilindros

rotativos entre os quais passa o material. A mistura fica mais trabalhável e preparada para a extrusão.

5. *Pelotização*

Esta etapa é realizada por extrusão contínua (a máquina é conhecida como maromba) onde um parafuso força a massa plástica contra uma placa de grande diâmetro perfurada por orifícios circulares. O material que sai pelos orifícios é cortado por uma lâmina rotativa. Desta forma são obtidas as pelotas, em forma de cilindros com diâmetro e altura de aproximadamente 15 mm.

A forma geométrica da pelota é um fator muito importante na obtenção dos agregados.

6. *Secagem e queima*

Esta é considerada a etapa mais importante do processo e ocorre no forno rotativo.

A disposição das aletas internas para a condução do material, a inclinação, o tempo de permanência do material dentro do forno e outros detalhes específicos, dependem de cada material e devem ser estudados visando a maior economia do processo e desempenho do produto.

Na primeira parte do forno, o material (em pelotas) é secado pelos próprios gases de combustão.

Na zona de combustão, o forno atinge a temperatura máxima prevista para a expansão das pelotas, dentro dos requisitos exigidos para cada material (entre 1000°C e 1350°C).

Neste processo o combustível pode ser óleo ou gás.

7. *Resfriamento*

O equipamento para o resfriamento pode ser um cilindro no qual é soprado ar através de ventiladores.

A troca térmica aquece o ar que é reaproveitado na combustão a processar-se no forno.

8. *Estocagem/Classificação/Estocagem final*

Como o mercado necessita de diversas granulometrias, os agregados leves após a produção são britados e/ou classificados em peneiras vibratórias e armazenados para a futura comercialização.

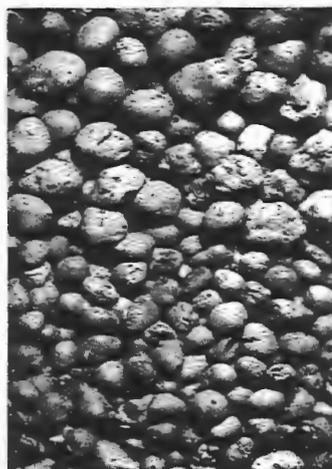


Figura 4.1: Foto da argila expandida. (SHORT & KINNIBURGH, 1962)

4.6. Condições para argilas expandidas de alta qualidade

As condições necessárias para que o inchamento ou expansão pirolástica de uma argila produza uma estrutura celular, essencial para um agregado leve de alta qualidade, são as seguintes, segundo SANTOS (1975):

- o material na condição pirolástica deve possuir um teor suficiente de vidro para fechar os poros e reter os gases formados;
- o material deve conter quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para produzir o grau de inchamento suficiente para se obter a massa específica aparente desejada;
- as substâncias produtoras de gás devem liberar quantidade adequada, em velocidade adequada, dos componentes voláteis, em temperatura e tempo que coincidam com as condições pirolásticas ótimas do material;
- nessas condições ótimas de tempo-temperatura-formação de vidro, o vidro deve possuir uma viscosidade adequada que permita a incorporação de um grande número de bolhas ou vesículas para dar uma baixa massa específica aparente à partícula do agregado e dar uma espessura de parede das vesículas que leve à máxima resistência ao esmagamento do mesmo;
- o material deve inchar em uma estrutura celular na temperatura a mais baixa possível, por razões econômicas. Por outro lado, essas temperaturas baixas de inchamento não devem ser devidas à presença de fundentes ou sais alcalinos, que posteriormente irão liberar compostos solúveis que poderão enfraquecer o concreto leve;
- a faixa ou intervalos de temperaturas em que ocorre o início do inchamento e a fusão total deve ser superior a 20°C, para evitar que os fragmentos de agregado leve se grudem e provoquem o entupimento do forno.

Se não existir teor de fundentes adequado para formar uma fase vítrea ou se uma fase vítrea de baixa viscosidade é formada desde o início, os gases escapam e não há inchamento da partícula de argila, mas esses defeitos podem ser corrigidos pela adição de fundentes adequados, pelo deslocamento do período de liberação de gás para uma temperatura mais alta, por um aquecimento mais rápido com menor introdução de ar ou pela adição de substâncias que levam a viscosidade da fase vítrea. A composição mineralógica, principalmente a das impurezas existentes nas

argilas, folhelhos argilosos e ardósias é o fator predominante nas propriedades de inchamento.

4.7. Principais aplicações dos agregados leves de argila expandida

De acordo com o manual da CINASITA S.A., a argila expandida encontra aplicações variadas em diversos campos da engenharia, destacando como as mais importantes:

- concreto leve estrutural com redução de peso de 25% a 30% em relação ao concreto tradicional, sem prejuízo das demais propriedades do concreto, tais como, resistência mecânica, impermeabilidade, retração de secagem, entre outras.
- blocos de concreto leve, com redução de 40% do peso em relação aos blocos fabricados com brita e areia, utilizados como elemento de vedação ou estrutural;
- como isolamento térmico, no estado solto ou em concreto sem finos, com grande facilidade de manuseio. O concreto leve estrutural em substituição ao concreto comum apresenta melhor isolamento térmico em coberturas de residências e edifícios;
- enchimento de vazios e regularização de pisos. No estado solto ou em concreto sem finos resulta num método econômico e versátil de aplicação em enchimento de rebaixos, regularização de desníveis acentuados de pisos e coberturas, entre outros;
- misturas asfálticas a quente. As misturas para pavimentação com agregado leve apresentam redução de massa específica em relação as misturas tradicionais de 30% e com propriedades anti-derrapantes;
- concreto refratário em mistura com cimento aluminoso sendo utilizado como isolante refratário até 1000°C;
- outras aplicações menores: chapisco de alvenaria com o objetivo de alívio de peso; mistura com gesso na moldagem de placas e painéis

objetivando a redução de custo do produto final sem aumento de peso,
etc..

Capítulo 05 - Adições minerais

5.1. Introdução

As adições minerais, de acordo com ALMEIDA (1996), já eram conhecidas antes de Cristo pelos gregos e romanos, que utilizavam esses materiais, chamados de pozolânicos, para construir muitas obras, e algumas delas existem até os dias atuais. Com o tempo o emprego desses materiais foi diminuindo pela escassez de produtos naturais com propriedades pozolânicas. Recentemente, têm sido descobertos materiais com propriedades pozolânicas, muitos deles subprodutos industriais poluentes, como por exemplo a sílica ativa.

Uma definição dada por MEHTA & MONTEIRO(1994) para adições minerais é que estas são materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes. Embora as pozolanas no estado natural ou após ativação térmica estejam sendo empregadas em algumas regiões do mundo, por razões econômicas, muitos subprodutos estão se tornando rapidamente uma fonte principal de adições minerais para concreto.

Porém, para melhor compreender a definição acima é necessário que tenha-se, também, definições para subproduto e pozolana (definida no próximo item).

Segundo CINCOTTO (1988), um material pode ser definido como subproduto quando este deixa de ser acumulado e sem destinação, denominado assim de resíduo, e passa a apresentar uma aplicação qualificada.

Este ainda diz que para que a qualificação de resíduo altere-se para subproduto, faz-se necessário o estudo do mesmo quanto suas características e possível utilização e que na área de materiais de construção, a utilização do resíduo deve estar relacionada à interação material-energia-meio ambiente, envolvendo deste modo a participação imprescindível de órgãos governamentais, das indústrias de materiais de construção e daquelas produtoras dos resíduos.

MEHTA & MONTEIRO (1994) comentam que fornos de usinas termoelétricas que empregam carvão como combustível e fornos metalúrgicos que produzem ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício, são as maiores fontes de subprodutos. Acumular esses subprodutos em aterros representa uma perda de material e causa sério problema de poluição ambiental.

Ainda, comentam que o descarte desses subprodutos como agregado para concreto e em sub-leito de rodovias é um aproveitamento menos nobre que não utiliza o potencial destes materiais pozolânicos e cimentantes. Com controle de qualidade adequado, grandes quantidades de subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, na forma de cimentos Portland compostos ou de adições minerais. Quando as propriedades pozolânicas ou cimentantes de um material são tais que ele pode ser substituto parcial do cimento Portland no concreto, isto resulta numa economia significativa de energia e custo.

Na indústria cimenteira essa economia é devida a substituição do clínquer, responsável por um grande consumo de energia, por outros materiais alternativos como as pozolanas.

Nos últimos anos muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de se aproveitar os resíduos industriais e urbanos.

As razões iniciais que motivaram essas pesquisas, de acordo com CINCOTTO (1988), são três. Primeiro, uma preocupação com o esgotamento de reservas de matéria-prima, se não para um país em sua totalidade, pelo menos para regiões específicas. Segundo, a preocupação com a preservação do meio ambiente, afetada pelo consumo crescente de resíduos sólidos descartados e, terceiro, em países carentes de matéria-prima, a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico, reciclando resíduos sólidos.

A partir daí foram sendo descobertas razões bem mais além das apresentadas anteriormente, como o grande desenvolvimento do ponto de vista tecnológico. Um ótimo exemplo é a utilização da sílica ativa em concretos e argamassas, que no início de sua coleta e estudo tinha-se como objetivo principal a redução do problema da poluição ambiental, mas após determinado tempo foram descobertos atributos excepcionais quando aplicada a esses materiais.

5.2. Classificação das adições minerais de acordo com as características pozolânicas

MEHTA & MONTEIRO (1994) classificam as adições minerais, de acordo com as características pozolânicas, em: **pozolânicas, cimentantes e pozolânicas e cimentantes.**

Estes definem uma pozolana como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

Ou de uma forma mais simples, atividade pozolânica pode ser definida como um fenômeno que, à temperatura ambiente, transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante.

A liberação do hidróxido de cálcio se dá principalmente durante a hidratação do silicato tricálcico (C_3S), um dos principais compostos do cimento.

A escória de alto-forno finamente moída é considerada auto-cimentante, isto é, não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos como o C-S-H (silicato tricálcico hidratados). Entretanto, quando a escória granulada de alto-forno hidrata por si mesma, a quantidade de produtos cimentantes formados e as taxas de formação, são insuficientes para a aplicação do material com fins estruturais. Durante a hidratação do cimento Portland com escória, parte do hidróxido de cálcio produzido pelo cimento é consumido pela escória constituinte do cimento.

A sílica ativa é considerada como pozolana altamente reativa; a escória granulada de alto-forno pode ser considerada como material cimentante e pozolânico (dependendo do grau de finura e velocidade de resfriamento - cristalização), igualmente às cinzas volantes (de acordo com o teor de cálcio).

A seguir serão detalhadas as principais adições minerais, provenientes de processos industriais, utilizadas em concretos e argamassas e também na produção de cimentos especiais, dando-se um enfoque especial à sílica

ativa (adição utilizada nesta pesquisa). Será detalhada também, uma adição estudada na década de 60 na França, denominada “germes de cristalização” e que mais atualmente foi produzida na EESC-USP, por AGNESINI (1982), com o objetivo de incrementar as características dos concretos e argamassas, principalmente suas resistências iniciais. Todavia, os resultados até então obtidos não possibilitaram uma conclusão mais adequada sobre a utilização desta adição.

5.3. Escória de alto-forno

5.3.1. Introdução

As escórias granuladas de alto-forno, segundo BATTAGIN (1986), subprodutos da fabricação do gusa, são materiais vítreos, constituídos fundamentalmente de sílico-aluminatos de cálcio, que possuem propriedades hidráulicas latentes.

De acordo com o mesmo autor, as principais razões para a intensa utilização da escória de alto-forno na construção civil são:

- Baixo custo, por se tratar de um subproduto industrial;
- Diminuição do consumo de energia na fabricação do cimento, contribuindo para a economia de combustíveis importados ou não;
- Propriedades específicas que acarretam ao concreto baixo calor de hidratação, baixa permeabilidade, inibição da reação álcali-agregado, com aplicações vantajosas sobre o cimento comum em obras, por exemplo, de concreto massa, obras sujeitas à ação de água do mar, obras sujeitas a solos agressivos e outros.

A tabela 5.1 mostra as diversas utilizações para a escória de alto forno e suas respectivas porcentagens de utilização.

Tabela 5.1: Utilização das escórias de alto-forno

Destinação da escória de alto-forno	Porcentagem de utilização
Reciclagem	1,2
Pavimentação	9,0
Outros	12,2
Aterro	12,9
Fabricação de cimento	64,7

Fonte: SCANDIUZZI & BATTAGIN (1992)

Segundo SCANDIUZZI & BATTAGIN (1992), devido às suas propriedades hidráulicas latentes, as escórias granuladas vêm sendo utilizadas como adição ao cimento Portland de alto-forno, cimento Portland pozolânico e cimento Portland comum, em teores de 35% a 70%, de 15% a 50% e até 5%, respectivamente. De fato, as escórias têm a capacidade de gerar, por ativação ou combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, compostos com propriedades aglomerantes similares ao gerados pelo cimento Portland.

5.3.2. Histórico

De acordo com pesquisas realizadas por MARQUES (1994), os primeiros registros que se encontram na literatura a respeito do emprego das escórias datam de 1774, quando foram descobertas as propriedades cimentícias das escórias em mistura com a cal, porém, o real aproveitamento das escórias foi em 1862, na Alemanha, com o desenvolvimento da granulação da escória na saída do alto-forno.

MARQUES (1991) comenta que o primeiro cimento Portland com escória, em caráter comercial, surgiu em 1882, na Alemanha, com a utilização de clínquer e escória moídos conjuntamente. Em 1909, o governo alemão

oficializou o uso de até 30% de escória no cimento e, posteriormente, foi reconhecido cimento com até 70% de escória.

No Brasil, segundo GASTALDINI (1989), o aproveitamento das escórias iniciou-se efetivamente a partir de 1952, com a fabricação de cimento Portland de alto-forno Tupi, no Rio de Janeiro, com escória proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional.

5.3.3. Obtenção da escória e do cimento Portland de alto-forno

MARQUES (1994) cita que a escória granulada é subproduto da fabricação do ferro gusa e obtida em quantidades consideráveis (cada 1 tonelada de ferro gusa produzido gera 300 kg a 400 kg de escória), constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio sob forma vítrea. Esta é resultado da combinação dos minerais de ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada como fundente. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem, secundariamente, sulfetos de cálcio e manganês e óxido de ferro e manganês.

Os principais processos de produção da escória, segundo GASTALDINI (1989), são: resfriamento forçado ao ar, têmpera com água (granulação da escória) e pelotização. Todos os três processos trazem escórias vítreas e aptas para o cimento.

No Brasil, a produção dos cimentos com escória ocorre na região sul do país, devido ao fato de que as maiores siderúrgicas a carvão mineral estão localizadas nessa região. As escórias só apresentam viabilidade do ponto de vista econômico nas áreas próximas às siderúrgicas devido ao encarecimento dos transportes.

O cimento Portland de alto-forno varia muito em composição e estrutura física, dependendo dos processos utilizados na fabricação do gusa e do método de resfriamento da escória.

5.3.4. Propriedades das escórias de alto-forno

a) Forma e dimensão

GASTALDINI (1989) afirma que visualmente as escórias devem se apresentar sob a forma de grãos porosos, com alguns milímetros de dimensão e aspecto ligeiramente porcelânico, início de vitrificação. Não devem ser espumosas, friáveis à mão e nem conter muita água.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), as escórias menores do que $10\mu\text{m}$ contribuem para as resistências iniciais do concreto até 28 dias; partículas de $10\mu\text{m}$ a $45\mu\text{m}$ contribuem para as resistências a longa idade, mas, partículas maiores do que $45\mu\text{m}$ são difíceis de hidratar.

b) Área específica

A área específica da escória varia de $500\text{ m}^2/\text{kg}$ a $600\text{ m}^2/\text{kg}$, dependendo do processo de obtenção.

c) Composição química

A escória é composta pelos mesmos óxidos que compõem o cimento, porém, em proporções diferentes. Segundo GASTALDINI (1989), a composição é considerada satisfatória se for constituída, em média, de 42% de cal, 30% de sílica, 19% de alumina, 5% de magnésia e 1% de álcalis.

d) Atividade hidráulica da escória de alto-forno

A atividade hidráulica da escória de alto-forno depende de diversos fatores, porém os mais importantes, citados por GASTALDINI (1989) e MARQUES (1994), são:

- Composição química – vários autores relacionam a reatividade das escórias à sua basicidade. Quanto mais básica, mais hidráulica é a escória;
- Vitrificação da escória – o estado não cristalino desta é uma condição estritamente necessária para a sua atividade hidráulica;
- Superfície específica – quanto mais fina a escória maior a resistência mecânica do concreto. Escórias mais finas apresentam uma maior reatividade de suas partículas devido à exposição de uma maior superfície específica ao processo de hidratação.

Os mesmos autores citam que as escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, isto é, endurecem quando misturadas com a água. Porém, suas reações de hidratação são lentas e necessitam de ativadores para acelerar o processo. Os ativadores da escória são classificados em físicos e químicos. Os físicos estão ligados à granulometria e à temperatura, ou seja, o aumento da área específica e da temperatura de cura, promovem uma aceleração na hidratação das escórias. Já os ativadores químicos são o hidróxido de sódio (NaOH), os sulfatos (prejudicial ao concreto) e o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ obtido na hidratação do cimento Portland.

5.4. Cinzas volantes

5.4.1. Introdução

De acordo com KIHARA (1986) as cinzas volantes constituem uma das alternativas mais importantes para as indústrias cimenteiras do Sul e Sudeste do Brasil. São utilizadas na fabricação de cimentos pozolânicos e podem, também, ser empregadas como matéria-prima na fabricação do clínquer. O uso de cinzas volantes, como a escória de alto-forno, favorece a economia de energia na medida que substitui parte do clínquer do cimento, um produto mais nobre e energeticamente dispendioso, por um resíduo industrial pulverizado de custo mais baixo, sem prejuízo da qualidade do concreto.

5.4.2. Obtenção

As cinzas volantes são subprodutos de usinas termoelétricas, resultante da combustão do carvão mineral utilizado como combustível.

MEHTA & MONTEIRO(1994) explicam que durante a combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas modernas, quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais, tais como argilas, o quartzo, e o feldspato, fundem-se a alta temperatura. O material fundido é rapidamente transportado pelas zonas de temperatura mais baixa, onde se solidifica em partículas esféricas de vidro. Parte da matéria mineral aglomera formando cinza de grelha, mas a maior parte dela é arrastada pela corrente de exaustão do gás e é chamada de cinza volante. Esta cinza é subsequenteemente removida do gás por precipitadores eletrostáticos.

5.4.3. Características das cinzas volantes

As principais características das cinzas volantes são: características físicas, químicas e mineralógicas. Dentro dessas, os três parâmetros que controlam o desempenho da cinza volante no concreto, segundo KIHARA & SHUKUZAWA (1982), são a finura e os teores de carbono e de fase vítrea, como será mostrado mais adiante.

5.4.3.1. Características físicas

KIHARA & SHUKUZAWA (1982) indicam que as cinzas volantes, vistas no microscópio eletrônica de varredura, apresentam-se sob a forma de pequenas partículas esféricas, cujas dimensões variam de 0,5 μm a 200 μm e que suas superfícies específicas também são extremamente variáveis, oscilando valores entre 2000 cm^2/g e 8000 cm^2/g . Alguns desses grãos são ociosos ou se encontram fragmentados com ruptura frágil.

KIHARA (1986) indica que partículas de cinzas, com pequeno grau de arredondamento, sugerem exposição limitada às altas temperaturas e partículas arredondadas mais grosseiras, com estrutura vesicular, indicam condições mais altas de temperatura ou maior tempo de permanência na zona de combustão. O processo de formação das partículas esféricas ocorre em condições especiais, às temperaturas altas, próximas a 1400°C. As frações mais finas da cinza são ricas em partículas esféricas vítreas.

5.4.3.2. Características químicas

De acordo com KIHARA (1986), cinzas volantes são materiais extremamente heterogêneos, cuja composição depende essencialmente das condições de calcinação e características do carvão. Qualquer variação desses parâmetros acarretará mudanças significativas na sua composição.

Quimicamente, as cinzas das termoelétricas nacionais apresentam composição sílico-aluminosa, com teores de SiO_2 e Al_2O_3 variando de 55% a 70% e 20% a 30%, respectivamente.

5.4.3.3. Características mineralógicas

KIHARA & SHUKUZAWA (1982) citam que as cinzas volantes brasileiras são constituídas mineralogicamente por uma fase vítrea, de natureza sílico-aluminosa, constituindo a maioria dos grãos de cinza e, secundariamente, por mulita, quartzo, hematita e magnetita, podendo-se encontrar, também, material carbonoso, sendo que o teor de vidro pode ser considerado como um dos índices de qualidade de uma cinza. A formação da fase vítrea de uma cinza volante está relacionada ao conteúdo de argilo-minerais e às condições de calcinação do carvão.

5.4.4. Fatores que influem na pozolanicidade das cinzas volantes

A rigor, o termo "reatividade pozolânica" está relacionado somente à capacidade de reação da pozolana com a cal, mas alguns autores utilizam o termo atividade pozolânica levando em consideração, também, os seguintes fatores:

- Composição química – o conteúdo de SiO_2 e Al_2O_3 está correlacionado com o teor da fase vítrea e evidencia, indiretamente, o comportamento pozolânico das cinzas;
- Finura das cinzas volantes – é o principal parâmetro que influi na atividade pozolânica das cinzas nas idades mais curtas (até 28 dias). A finura adequada às cinzas volantes brasileiras para torná-las mais ativas, está ao redor de $5000 \text{ cm}^2/\text{kg}$ e $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$;

5.4.5. Desempenho dos concretos e argamassas adicionados com cinzas volantes

ISATA (1992) cita que a adição de cinzas volantes ao concreto aumenta a trabalhabilidade, diminui o calor de hidratação, incrementa a resistência mecânica em idades finais e, sobretudo, provê maior durabilidade à ação de agentes intrínsecos ou ambientais.

Segundo o autor, além das razões técnicas, um grande atrativo para substituição parcial do cimento por cinzas volantes é a redução do custo do concreto. O cimento pozolânico tem sido bastante utilizado com esta finalidade, embora não permita a alteração das proporções pelos usuários, restringindo as possibilidades de variação da relação cimento/cinza. Além disso, neste tipo de cimento, a vantagem do menor custo da cinza nem sempre é repassada ao produtor do concreto, como no Brasil, onde o custo do cimento pozolânico é similar ao Portland comum.

Adicionando-se cinzas separadamente ao cimento na betoneira, de acordo com ISATA (1992), obtêm-se algumas vantagens por permitir:

- manejar com flexibilidade a proporção cimento/cinza dentro do consumo total do material cimentício;
- adequar esta proporção às características da cinza e do cimento utilizados, para dado conjunto de propriedades requeridas;
- usufruir das vantagens econômicas proporcionadas pela redução dos custos, dentro dos limites impostos pela dosagem.

5.5. “Germes de cristalização”

No início desta pesquisa foram realizados, também, ensaios com um tipo de adição denominada de “germes de cristalização”, utilizada na década de 60 na França, por DURIEZ & ARRAMBIDE (1961) e reproduzida no Brasil, na EESC-USP, no início da década de 80 por AGNESINI (1982)

Os “germes de cristalização” partem do princípio, segundo DURIEZ & ARRAMBIDE (1961), de que sua adição aos concretos e argamassas provocam e orientam as precipitações de cristais no interior dos mesmos, permitindo acelerar o endurecimento e, também, aumentar suas resistências mecânicas.

Estes, de um modo geral, são obtidos de acordo com as seguintes etapas:

- hidratação do cimento Portland com determinada quantidade de água, formando-se nódulos;
- cura dos nódulos em determinado tempo e temperatura;
- pulverização dos nódulos até dimensão média das partículas de 0,075 mm (peneira nº 200).

Os “germes” podem ser obtidos a partir do mesmo tipo ou tipos diferentes de cimento utilizados na confecção dos concretos e argamassas.

Para a obtenção de resultados satisfatórios, segundo DURIEZ & ARRAMBIDE (1960), deve-se haver preocupação com:

- quantidade de água de amassamento;
- a duração da hidratação;
- temperatura e higrometria de conservação;
- finura da moagem;



- modo de estocagem antes da adição ao cimento.

A partir disso foram realizados, em laboratório, diversos ensaios variando os parâmetros acima citados, tais como tipo de cimento, duração e temperatura de cura, e quantidade de água inserida, porém, como já foi citado, os resultados encontrados foram insuficientes para melhor avaliação do emprego dos “germes de cristalização” obtidos a partir de cimentos fabricados no Brasil.

5.6. Sílica ativa

5.6.1. Introdução

Nos últimos anos, significativa atenção vem sendo dada ao uso da pozolana sílica ativa em substituição parcial ao cimento Portland com o objetivo de se incrementar as propriedades dos concretos e argamassas, principalmente no que se refere às resistências mecânicas e à durabilidade.

A sílica ativa é uma pozolana de alta qualidade pela expressiva reatividade de sua fase silicosa vítrea, área específica extremamente alta das partículas e o formato esférico de seus grãos. Essa potencialidade do material se traduz na prática em:

- velocidade da reação muito superior à das pozolanas tradicionais;
- formação de uma estrutura mais compacta e, conseqüentemente, mais impermeável à penetração de agentes químicos agressivos;
- desenvolvimento de produtos de hidratação do cimento mecanicamente mais resistentes e menos deformáveis;
- maior coesão e menor tendência à segregação e à exsudação das argamassas e concretos no estado fresco;

- complementação apropriada da distribuição granulométrica dos materiais.

Nos itens a seguir são detalhadas as propriedades da sílica ativa, bem como as dos concretos e argamassas adicionados com esse material.

5.6.2. Histórico - aplicações

O primeiro país a estudar as possibilidades de utilização da sílica ativa foi a Noruega, na década de 50. Como já foi dito, o objetivo principal era a redução do problema da poluição ambiental causada pelas indústrias de ferro-silício e silício metálico e para isso foram instalados filtros especiais para a coleta deste material. A utilização em concretos veio com a descoberta de suas excelentes características, tais como alta pozolanicidade.

Na Noruega, em 1971, de acordo com MORAES (1990), a sílica ativa foi utilizada pela primeira vez em concreto estrutural na construção de uma usina de fundição de minérios. Em 1977, esta já era utilizada em concreto projetado e em 1982 boa parte deste tipo de concreto já era adicionado com sílica ativa. Em 1983, produtos pré-moldados eram produzidos com sílica ativa e muitos deles utilizando, também, agregados leves.

É obrigatório por lei na Noruega usar concreto de alto desempenho com sílica ativa para construção das plataformas de petróleo no Mar do Norte. Um exemplo, é a plataforma de Erofisk a 170 km da costa da Noruega, construída com concreto de resistência média à compressão de 43 MPa (28 dias) em suas paredes e de 62 MPa a 68 MPa nas bobinas do quebra-mar onde se previa uma alta resistência à erosão.

A construção da Ponte de New Tjörn na Suécia, em 1981, envolveu, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), o primeiro uso conhecido da sílica ativa em concretos quando o objetivo era diminuir o problema do calor de hidratação, já que esta possuía algumas seções de grandes dimensões, principalmente os pilares.

Nos Estados Unidos as aplicações começaram na década de 70, porém foi na década de 80 que a utilização da sílica ativa se intensificou e hoje pode-se encontrar lá grandes obras realizadas com este material, tais como edifícios altos e pontes. A maioria das aplicações estruturais de concreto de alto desempenho está limitada às áreas metropolitanas de Chicago, New York e Houston.

Um caso considerado importante, citado por MEHTA & MONTEIRO (1994), foi o da bacia de dissipação da barragem de Kinzua, na Pensylvannia, onde foi utilizado concreto com sílica ativa para restauração do concreto erodido, com o objetivo de se obter resistência à abrasão-erosão a longo prazo. Um estudo realizado pelo U.S. Army Corps of Engineers confirmou esse incremento de resistência e para essa obra foi utilizado 18% de sílica ativa em relação à massa de cimento. A resistência à compressão aos 28 dias e aos 90 dias chegaram a 91 MPa e 100 MPa, respectivamente.

No Brasil, de acordo com KIHARA & BUCHER (1986), apenas em 1984 começou uma divulgação mais ampla da sílica ativa, ao mesmo tempo que era lançada a de origem norueguesa no mercado brasileiro. Somente em 1989 esta começou a ser produzida no país.

Apesar da menor utilização em relação a outros países, o Brasil possui grandes aplicações da sílica ativa em diversas situações. A seguir são descritos alguns exemplos brasileiros.

Em 1992, a empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa, precursora na utilização da sílica ativa em concretos, construiu na capital do Estado de São Paulo, o CNEC, um prédio com duas torres de 18 andares. Segundo ALMEIDA et al. (1995), seus pilares foram executados com concreto de 60 MPa, contendo 10% a 12% de sílica ativa em relação à massa de cimento.

No Centro Empresarial Nações Unidas (figura 5.1), também em São Paulo, com 41 andares e 4 subsolos, foram utilizados, de acordo com ROCHA (1997), 11 mil metros cúbicos de concreto contendo 8% de sílica ativa na moldagem de pilares com resistência à compressão de 50 MPa e de lajes protendidas de 30 MPa e 23 cm de espessura.

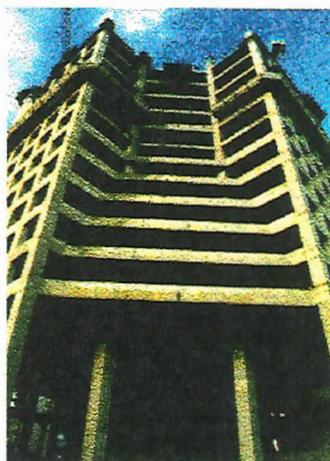


Figura 5.1: Centro Empresarial Nações Unidas, São Paulo (ROCHA, 1997)

ALMEIDA et al. (1995) relatam importantes obras que utilizaram concretos com sílica ativa, algumas delas descritas a seguir:

- em Salvador a Construtora Suarez construiu o Suarez Trade Center utilizando 600 m^3 de concreto de alto desempenho contendo 4% a 12% de sílica ativa em 12 conjuntos de pilares-capitéis em 11 pavimentos, atingindo resistências médias à compressão de 75 MPa aos 28 dias de idade;

- o condomínio Empresarial Previnor (Construtora Poliedro) e o edifício do Banco de Tóquio, ambos também em Salvador, foram executados com sílica ativa variando de 10% a 12%. No primeiro caso esta foi utilizada nos pilares dos cantos e seus respectivos capitéis, e no segundo nos pilares centrais até o quinto pavimento. Em ambos os casos a resistência à compressão atingiu em média 70 MPa aos 28 dias;
- em Brasília, a construtora OAS empregou no Supremo Tribunal de Justiça 12% de sílica ativa nos pilares tronco-cônicos, nos trechos de lajes, nas vigas e vigas paredes, atingindo resistência média à compressão aos 28 dias de 72 MPa;
- no Rio de Janeiro, a Construtora Incomex utilizou 10% de sílica ativa nas vigas protendidas do edifício central da Embratel, atingindo resistências em torno de 50 MPa aos 28 dias;
- no heliporto do Morro do Pão de Açúcar, no Rio de Janeiro, a Construtora OAS empregou 1800 m³ de concreto com 10% de sílica ativa na execução do piso do pavimento;
- na área de recuperação de estruturas são dados como exemplos os reparos no túnel da Rodovia Carvalho Pinto, em São Paulo, do qual foram retirados pedaços de até 20 m² cortados e recuperados com concreto adicionado com sílica ativa. Ensaio realizado em corpos-de-prova mostraram uma aderência de 100% para este caso; Na Usina Hidroelétrica de Itaipú, em Foz do Iguaçu, foram utilizados 10% de sílica ativa no reparo de uma viga da casa de máquinas; No Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro foram feitos reparos nos pavimentos da pista de concreto utilizando 10% de sílica ativa e com resistências à compressão em torno de 57 MPa aos 28 dias; O Othon Palace Hotel, no Rio de Janeiro, teve recuperados os seus peitorís e pérgulas e outro edifício com 45 anos teve 5 lajes em grelha recuperadas com concreto contendo 12% de sílica ativa;

Outro exemplo na área de recuperação, dado por ROCHA (1997), em São Paulo, é o do Estádio do Pacaembú, num setor conhecido como “tobogã” (figura 5.2) que teve como objetivo, com a utilização da sílica ativa, obter maior aderência e impermeabilidade.



Figura 5.2: Estádio do Pacaembú, São Paulo (ROCHA, 1997)

Na execução de pisos, tem-se o exemplo, citado por ROCHA (1997), de uma fábrica de argamassa em Jandira no interior de São Paulo, que empregou concreto de alto desempenho com sílica ativa, com o objetivo de aumentar a resistência à abrasão e à tração na flexão. Segundo MORAES (1990), um piso industrial foi executado em Americana com concreto contendo 5% de sílica ativa, obtendo-se assim, uma redução de 25% da espessura do piso e com elevação da resistência à abrasão.

Em São Paulo, na Ponte Bernardo Goldfarb (figura 5.3) foi usada a sílica ativa objetivando altas resistências iniciais e finais, como também qualidade e rapidez de desforma e no Túnel JK (figura 5.4) foi utilizado concreto projetado com sílica ativa.



Figuras 5.3 e 5.4: Ponte Bernardo Goldfarb e Túnel JK (TÉCHNE, set/out 96, p.15)

Em construção recente de trechos do Metrô de São Paulo, várias peças pré-moldadas também foram executadas com concreto adicionado de sílica ativa.

Uma obra atual que tem chamado a atenção é a ponte sobre o rio Maranhão (figura 5.5), trecho da rodovia GO-237, com 585 m de extensão e 10,40 m de largura. Segundo CORBIOLI (1997), com a utilização de sílica ativa houve economia de 2,4% em fôrma, 2,3% em concreto, 21,3% em armadura passiva e 14,2% na de protensão, equivalendo a 10% do custo total da obra. Outra vantagem da utilização do concreto com sílica ativa nesta obra foi a rapidez na qual foi executada.



Figura 5.5: Ponte sobre o Rio Maranhão (CORBIOLI, 1997)

Na construção da Hidroelétrica de Serra da Mesa, também em Goiás, foi utilizada a sílica ativa, objetivando, além de altas resistências mecânicas, aumento na resistência à agressividade do meio e diminuição do calor de hidratação.

5.6.3. Produção

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a sílica ativa, também conhecida por outros nomes, como fumos de sílica condensada, sílica volatilizada ou simplesmente fumos de sílica, é um subproduto de fornos a arco e de indução das indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício. A redução de quartzo a silício em temperaturas de até 2000°C produz vapor de SiO, que oxida e condensa, em zonas de baixa temperatura, à partículas esféricas minúsculas consistindo de sílica não cristalina.

A figura 5.6 mostra como é realizada a produção da sílica ativa.



Figura 5.6: Produção de sílica ativa (ROCHA, 1997)

Segundo KIHARA & BUCHER (1986), estima-se que entre 10% e 20 % do quartzo adicionado no processo, sai como sílica ativa pela chaminé do forno.

Os gases de combustão passam por filtros onde a sílica ativa bruta é coletada. Logo após ela sofre tratamentos de aglomeração para evitar problemas no transporte e manuseio ocasionados por sua demasiada finura.

A quantidade específica de sílica ativa por tonelada de ferro-silício ou silício elementar pode variar substancialmente com a liga ou metal produzido, matérias-primas utilizadas, condições de operação, modelo e capacidade dos fornos.

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), os subprodutos das indústrias do metal silício e da liga ferro-silício, que produzem ligas com 75% ou mais de silício, contêm 85% a 90% de sílica não cristalina; o subproduto da produção de liga ferro-silício com 50% de silício contém um teor de sílica menor e é menos pozolânico.

KIHARA & BUCHER (1986) citam que a produção mundial de sílica ativa é estimada em 1,2 milhão de toneladas (na década de 80), sendo que aproximadamente um terço deste total deve-se aos Estados Unidos, Noruega e Japão. Em alguns países, como por exemplo na Noruega, por exigências ambientais e de interesse tecnológico, toda a produção de sílica ativa é recuperada e registrada. Por outro lado, em outros países, como o Brasil, com controles ambientais menos rígidos e pelo pouco conhecimento das qualidades da sílica ativa, esta é coletada em menores proporções e os dados de produção são estimativos e/ou especulativos.

Em termos de saúde, MORAES (1990) cita que a sílica ativa, embora sendo respirável, não é considerada causadora de silicose (câncer de pulmão), por ser uma partícula amorfa.

5.6.4. Propriedades da sílica ativa

As características e propriedades, tanto físicas quanto químicas da sílica ativa, dependem da operação do forno, matérias-primas utilizadas e sistema de capitação do pó.

5.6.4.1. Propriedades físicas

As propriedades físicas são: tamanho médio, área específica, forma e natureza das partículas, massas específicas e unitárias, coloração e efeito micro-filler.

a) Tamanho médio, área específica e forma das partículas

A sílica ativa trata-se de um pó extremamente fino - cerca de 100 vezes mais fino que o cimento Portland. De forma esférica, preenche os vazios na matriz do cimento hidratado, aumentando a massa específica do concreto.

De acordo com DUARTE (1994), a sílica ativa encontrada no mercado possui um diâmetro médio de 0,10 μm a 0,15 μm (figura 5.7), equivalente às partículas da fumaça de um cigarro, reagindo mais rápido que qualquer pozolana comum.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a sílica ativa possui uma área específica da ordem de 20.000 m^2/kg a 25.000 m^2/kg . Por um lado, o material é altamente pozolânico, mas por outro, cria problemas de manuseio e aumenta apreciavelmente o consumo de água do concreto, a menos que se acrescente aditivo plastificante.

A tabela 5.2 mostra diferentes áreas específicas de algumas adições e do cimento Portland Comum.

Tabela 5.2: Áreas específicas de diversos materiais

Material	Área Específica (m^2/kg)
Sílica ativa	20.000
Cinzas Volantes	400 a 700
Cimento Portland Comum	300 a 400
Escória de Alto Forno	350 a 600

Fonte: Committee 226 do ACI (1987)

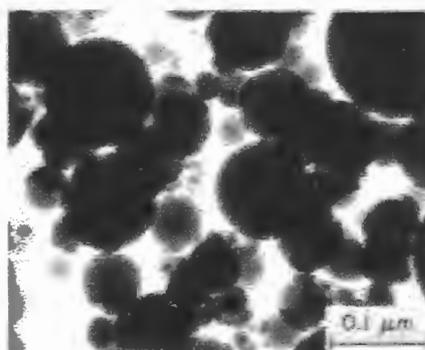


Figura 5.7: Micrografia eletrônica de transmissão da sílica ativa (MEHTA & MONTEIRO, 1994)

b) Natureza das Partículas

KHAYAT & AİTCIN (1992) citam que a sílica ativa é um material composto por partículas amorfas, podendo conter pequenas quantidades de partículas cristalinas resultantes da rápida condensação dos gases SiO, que oxidam rapidamente quando entram em contato com o ar na parte mais fria do forno.

c) Massa específica e massa unitária

A massa específica média da sílica ativa é de 2.200 kg/m^3 e a massa unitária é entre 250 kg/m^3 e 300 kg/m^3 para o pó como é retirado dos filtros e em torno de 600 kg/m^3 para o produto compactado. A título de comparação, o cimento apresenta uma massa específica média de 3.100 kg/m^3 e massa unitária de aproximadamente 1.200 kg/m^3 .

O Committee 226 do ACI (1987) comenta que a menor massa específica da sílica ativa comparada a do cimento Portland significa que quando a substituição do cimento pela sílica ativa é baseada em massa, o volume de sílica ativa adicionado é maior do que o volume de cimento removido. Deste modo, o volume de pasta aumenta e existe de fato uma diminuição do fator água/cimento. Isto explica porque a substituição da massa de cimento pela mesma massa de sílica ativa muda as características reológicas do concreto.

d) Coloração

Segundo KIHARA & BUCHER (1986), a sílica ativa apresenta cor cinza, com tonalidade variando de clara a escura, influenciada, principalmente, pelo conteúdo de carbono na sua composição.

e) Efeito micro-filler

É considerada uma das propriedades mais importantes da sílica ativa. O Committee 234 do ACI (1995) comenta que para uma substituição de 15% de cimento por sílica ativa existem aproximadamente 2.000.000 de partículas de sílica ativa para cada grão de cimento Portland na mistura.

Segundo KIHARA & BUCHER (1986), a forma esférica e diminuta de suas partículas ocupando os espaços intergranulares da pasta de cimento, aumenta o espaço disponível para a precipitação das fases hidratadas, provocando conseqüentemente, um aumento na taxa de hidratação do cimento e facilita a fluidez do concreto.

Sendo que esse filler, como já foi explicado, não é inerte e reage com o hidróxido de cálcio.

5.6.4.2. Propriedades químicas

As propriedades químicas determinadas são: composição química e comportamento pozolânico.

a) Composição química

Conforme KHAYAT & AİTCIN (1992), a composição química da sílica ativa varia conforme o tipo de liga ou metal produzido. O conteúdo de SiO_2 na sílica ativa varia, em sua maior parte, de 85% a 98%.

A tabela 5.3 apresenta a composição química do cimento Portland comum, da escória de alto forno, das cinzas volantes e da sílica ativa.

Tabela 5.3: Composição química de alguns materiais

C. Química	C.P.C	Escória	Cinzas Volantes	Sílica ativa
SiO₂	20,32	38,0	40,9	93,5
Al₂O₃	4,94	6,63	18,6	0,06
Fe₂O₃	2,55	0,40	28,9	0,45
CaO	62,58	35,7	1,87	0,50
MgO	2,23	13,6	1,01	0,67
SO₂	3,46	-	0,87	0,10
Na₂O	0,19	0,36	0,56	0,32
K₂O	0,86	0,40	1,44	0,85

Fonte: RAMEZANIANPOUR & MALHOTRA (1995)

Verificam-se diferenças marcantes das porcentagens de dióxido de silício (SiO₂) e óxido de cálcio (CaO).

A tabela 5.4 faz uma comparação entre as composições químicas das sílica ativas brasileira e norueguesa, realizada na pesquisa de KIHARA & BUCHER (1986).

Tabela 5.4: Composição química de sílicas ativas brasileira e norueguesa

Constituintes	Sílica ativa brasileira	Sílica ativa norueguesa
SiO₂	94,56	97,13
Al₂O₃	0,26	0,94
Fe₂O₃	-	-
CaO	0,53	0,78
MgO	0,52	-
Na₂O₃	0,05	0,14
K₂O	1,29	0,45
P.F.	2,47	1,35

Fonte: KIHARA & BUCHER (1986)

b) Efeito pozolânico

A sílica ativa por ser praticamente só sílica amorfa reage com grande rapidez com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ presente na reação de hidratação do cimento Portland.

Essa reação forma um gel resistente de silicato de cálcio hidratado, semelhante ao produzido pela hidratação do cimento Portland. A velocidade de reação é muito grande, quando comparada a de uma pozolana comum.

Como observam KIHARA & BUCHER (1986), a hidratação do cimento Portland gera uma quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da ordem de 20% da massa do cimento anidro cuja presença tem um efeito negativo sobre a resistência mecânica. A combinação deste hidróxido de cálcio com sílica ativa forma uma estrutura muito mais compacta e mecanicamente mais resistente que o original (sem sílica ativa) .

O efeito pozolânico e microfiller são as razões fundamentais do grande interesse do uso da sílica ativa em concretos , bem como em diversas aplicações especiais com fibras, polímeros e fillers especiais para a obtenção de produtos projetados para a substituição de metais.

5.6.5. Propriedades dos concretos e argamassas com sílica ativa

O efeito da sílica ativa no concreto ou argamassa faz-se sentir tanto no estado fresco quanto no endurecido, pelo seu comportamento pozolânico e micro-filler.

5.6.5.1. Estado fresco

a) Demanda de água e consistência

A sílica ativa modifica o comportamento reológico do concreto ou argamassa. O conjunto de propriedades relativas à trabalhabilidade e exsudação são consideravelmente alterados.

A adição de sílica ativa a um concreto ou argamassa faz aumentar a necessidade de acrescentar mais água à mistura para se atingir a trabalhabilidade desejada, devido a sua elevada área específica que tende a adsorver a água. Porém, como já é de conhecimento, este acréscimo de água aumentará a relação água/cimento, e conseqüentemente diminuirá sua resistência mecânica, bem como aumentará sua permeabilidade. Para isso, é necessário o uso de superplastificante para atingir esta trabalhabilidade, sem afetar as propriedades do material.

Segundo KHAYAT & AİTCİN (1992) esta influência da adição da sílica ativa na demanda de água depende de diversos fatores, em particular da relação água / (cimento + sílica ativa), do conteúdo de sílica ativa, e também da presença de aditivo redutor de água e superplastificantes na mistura.

DUARTE (1994) diz que para concretos convencionais normalmente trabalha-se com abatimentos na faixa de 7 cm a 12 cm. Os mesmos concretos com sílica ativa devem ser feitos com abatimentos mais altos que os convencionais, na faixa de 12 cm a 15 cm no “slump” teste. O uso de superplastificante faz aumentar estes valores, tornando a mistura ótima de se trabalhar, sem interferir na relação água/cimento. O produto final é um concreto diferente, absolutamente coeso, aparentemente seco, mas na verdade fácil de se trabalhar.

Ainda segundo DUARTE (1994), na obra é preciso ficar atento às particularidades deste tipo de concreto. Poderá acontecer que o concreto final de um lançamento possa estar mais seco que no início, havendo, então, necessidade de controle para não permitir a adição de água para melhorar a sua trabalhabilidade.

Os concretos fluidos com sílica ativa têm consistência mais adequada para utilização em peças com alta densidade de aço e geometria complicada, do que os concretos convencionais.

Alguns autores comentam que a inclusão de pequenas porcentagens (até 5%) de sílica ativa não tem muita influência na demanda de água do concreto ou argamassa.

b) Segregação e exsudação

Com a adição da sílica ativa, a exsudação e a segregação dos agregados são praticamente inexistentes, devido ao aumento de coesão do material. Esta característica é a que mais diferencia o concreto com sílica ativa do convencional, no estado fresco.

A exsudação, como explica NEVILLE (1997), é provocada pela incapacidade de os componentes sólidos da mistura reterem toda a água de amassamento quando eles se acomodam, e a água tende a subir para a superfície, podendo ficar retida sob as partículas de agregado graúdo ou sob as armaduras, criando assim zonas com deficiência de coesão, deixando, a água, vazios capilares atrás de si. A exsudação não é necessariamente prejudicial, se prosseguir sem perturbações e a água evaporar, a relação água/cimento real pode diminuir, com um resultante aumento de resistência. A ausência da exsudação pode acarretar a fissuração plástica, como será detalhada no próximo item.

De acordo com o Committee 226 do ACI (1987), o concreto adicionado com sílica ativa apresenta redução da exsudação por causa das mudanças em suas propriedades reológicas. Sendo essas mudanças devidas primeiramente a alta pozolanicidade da sílica ativa que reage com a água, restando assim pouquíssima água livre na mistura para a exsudação.

O aumento da coesão dos concretos adicionados com sílica ativa, permite que este seja utilizado para concretos com altos abatimentos e baixa segregação, sendo aplicados em concretos projetados e concretagem submersa com maior rendimento.

Durante os ensaios desta pesquisa, foi verificado o aumento da coesão da massa quando esta era adicionada com sílica ativa. Durante o adensamento na mesa vibratória, o microconcreto sem adição permite que a argila dirija-se à superfície do corpo-de-prova, o que não acontece com a mistura com sílica ativa. Este pode ser considerado um bom exemplo para se mostrar a redução do problema da segregação dos agregados do concreto com sílica ativa, em seu estado fresco.

DUARTE (1994) salienta que a particular coesão do concreto com sílica ativa ao ser lançado, poderá dar a impressão, à turma de concretagem, que não é necessário vibrá-lo, no entanto, toda a rotina normal de compactação para a eliminação do ar contido na mistura deverá ser cumprida.

A figura 5.8 mostra a relação entre a exsudação, em g/cm^2 , e o tempo, em minutos, para concretos com e sem sílica ativa.

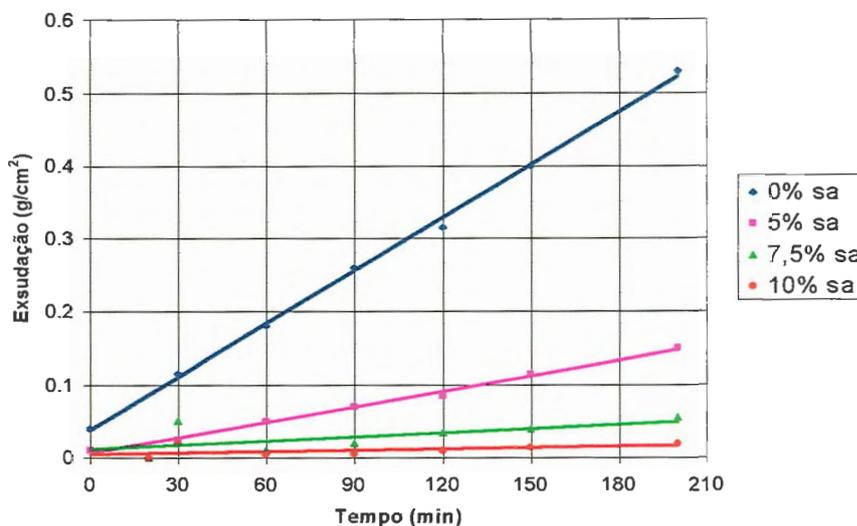


Figura 5.8: Gráfico exsudação (g/cm^2) x tempo (min). (KHAYAT & AÏTCIN, 1992)

c) Fissuração por retração plástica

De acordo com KHAYAT & AÏTCIN (1992), com a utilização da sílica ativa nos concretos há uma significativa redução da exsudação, como foi explicado no item anterior, e com isso os torna mais vulneráveis à fissuração por retração plástica. Ela ocorre devido a perda de água de amassamento por evaporação, por absorção pelos agregados ou outros fatores como absorção pelas fôrmas. A baixa umidade relativa, a velocidade do ar e temperaturas da matriz superiores ao do ambiente são causas que provocam uma rápida evaporação de água superficial. No caso da velocidade de evaporação superar aquela com que a água chega à superfície, por exsudação, ocorrerá a fissuração.

Como a sílica ativa praticamente elimina a chegada de água na superfície do material, a cura torna-se um fator indispensável para um bom desempenho do mesmo. O concreto deve ser protegido do sol e do vento, devendo-se efetuar rapidamente a aplicação do concreto e iniciar o processo de cura o mais rápido possível.

d) Tempo de pega

Segundo KHAYAT & AİTCIN (1992), o concreto com sílica ativa tem um tempo de pega maior que o concreto sem sílica ativa de mesma resistência. A adição desta ao concreto, na ausência de aditivo redutor de água ou superplastificante, pode levar a um maior tempo de pega, comparado ao concreto sem adição de igual resistência, especialmente quando o teor é alto.

Para diminuir este tempo, caso seja necessário, pode-se utilizar aditivos aceleradores de pega.

e) Calor de hidratação

De acordo com as pesquisas de MORAES (1990), o calor desenvolvido nas reações de pozolanicidade por unidade de sílica ativa, a 20°C, é pouco maior do que o desenvolvido durante a hidratação do cimento Portland comum, mas é menor do que o correspondente ao cimento de alta resistência inicial.

KHAYAT & AİTCIN (1992), através de experimentos, verificaram que a adição de sílica ativa aumenta a temperatura no concreto durante os primeiros dois ou três dias, mas que há decréscimo da temperatura em idades mais avançadas, quando comparado a concretos sem adição de sílica ativa com o mesmo conteúdo de cimento. Estes indicam que o aumento da temperatura, nas primeiras idades, está atribuído a um efeito indireto da sílica ativa na aceleração da reação da hidratação do cimento.



5.6.5.2. Estado endurecido

As propriedades descritas a seguir são relacionadas a concretos e argamassas que utilizam agregados de massa específica normal. Para concretos com agregados leves estas propriedades podem ser afetadas pelo tipo de agregado utilizado, sendo então discutidas em outro capítulo.

a) Resistência à compressão

Segundo o Committee 226 do ACI (1987) a principal contribuição da sílica ativa ao desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos e argamassas sob cura a temperaturas normais ocorre dos 3 dias aos 28 dias de idade. De um modo geral, a resistência à compressão do concreto com sílica ativa a um dia de idade é geralmente igual ou um pouco maior que o concreto convencional. Entretanto, aos 28 dias a resistência à compressão é sempre maior e em algumas vezes este crescimento é bastante acentuado. A partir dos 28 dias de idade a contribuição da sílica ativa para o desenvolvimento de resistência é mínimo.

O concreto com sílica ativa apresenta crescimentos de resistências bem mais acentuados que concretos com cinzas volantes e escória de alto-forno, como também suas reações pozolânicas são mais evidentes às primeiras idades.

b) Resistência à tração

A resistência à tração em concretos com sílica ativa crescem na mesma ordem que a resistência à compressão, porém, segundo KHAYAT & AİTCIN (1992), para pequenas adições de sílica ativa, na ordem de 5%, os concretos com e sem aditivos redutores de água, não crescem a

resistência à tração, também como, para maiores adições, na ordem de 25%, diminuem essa resistência.

c) Módulo de elasticidade e comportamento da curva tensão x deformação

De acordo com PEREIRA NETO & DJANIKIAN (1995) as principais diferenças entre as curvas tensão x deformação, em compressão axial, do concreto de alto desempenho em relação ao concreto de resistência normal são:

- relação tensão x deformação mais linear;
- pequeno aumento da deformação quando sujeito à tensão máxima;
- formato mais vertical e linear na parte descendente da curva.

Os autores comentam que estas mudanças de respostas no carregamento são conseqüências da melhoria na interface pasta-agregado no concreto de alta resistência, gerando uma redução da quantidade de microfissuras a baixos níveis de carregamento. Em concretos usuais, com resistências em torno de 30 MPa, as microfissuras instáveis começam a se desenvolver na interface pasta-agregado a aproximadamente 65% da carga de ruptura; as aberturas das fissuras provocam mudança de volume no concreto refletindo na curva tensão-deformação. Em concretos com resistências em torno de 76 MPa, esta falha começa a se propagar a 90% da carga última de ruptura, resultando numa relação tensão-deformação mais linear até esse nível de carregamento. O aumento relativo das deformações laterais é menor para concretos de alto desempenho, provavelmente por apresentar menos microfissuração interna.

Segundo AMARAL FILHO (1992a), no concreto, o agregado domina o módulo de elasticidade. O aumento de rigidez da fase matriz é refletida somente em grau moderado no concreto. Quando o diâmetro máximo do

agregado decresce muito cresce a influência da pasta e quando se usam agregados de pequenos diâmetros e especiais, como a bauxita calcificada, o módulo cresce pelas duas razões, tanto pelo aumento da influência da pasta como pelo alto módulo do agregado utilizado.

AMARAL FILHO (1992a) comenta que não há grandes variações nos módulos com o aumento da resistência à compressão. Na classe de média resistência (de 25 MPa a 50 MPa) o diagrama é similar ao do concreto de Classe I (segundo a NB-1) e, portanto, as hipóteses de comportamento para o dimensionamento podem ser aplicadas ao concreto de até 50 MPa.

Os concretos de resistências entre 50 MPa e 90 MPa apresentam, segundo AMARAL FILHO (1992a), ruptura frágil e não há plastificação. Este confirma que a curva tensão-deformação é relacionada com a microfissuração, com isso, a ductilidade dos concretos de baixa resistência pode ser atribuída a essa microfissuração, impedindo a ruptura frágil. No concreto de alta resistência quase não há fissuração e por isso a ruptura é frágil.

ALMEIDA (1994) explica que o fenômeno da explosão é em função da quantidade de energia acumulada na prensa de ensaio de resistência, liberada de uma vez só no momento de ruptura. Prensas comuns "relaxam" neste momento e prensas de grande rigidez e de deformação controlada comprovam o comportamento pós-ruptura análogo ao do concreto convencional.

Este ainda diz que uma informação importante para o dimensionamento dos concretos de alta resistência (acima de 50 MPa), é que os diagramas tensão-deformação apresentam uma mudança de forma e tornam-se aproximadamente triangulares, isto porque a resposta elástica desses concretos é alta praticamente até próximo da ruptura; depois dela a tensão cai rapidamente com pouca deformação, sendo essa a razão para se limitar

a deformação última. No entanto, é possível manter o diagrama parábola-retângulo com parâmetros ajustados à deformação específica última do concreto de alta resistência.

AMARAL FILHO (1992) ainda afirma que a deformação correspondente à ruptura no concreto de alta resistência é superior a 3‰, maior que a do concreto de Classe I que é de 2‰.

d) Aderência

A adição de sílica ativa ao concreto melhora significativamente as suas propriedades de aderência, sendo elas: aderência aos agregados, aderência às armaduras e aderência do concreto fresco ao concreto endurecido.

KIHARA & BUCHER (1986) citam que no concreto tradicional o agregado apresenta, geralmente, maior resistência mecânica e módulo de deformação mais alto que a pasta endurecida de cimento. O elo mais fraco deste conjunto resistente é a interface cimento/agregado. A experiência tem demonstrado que a sílica ativa atua simultaneamente neste ponto fraco aumentando a resistência intrínseca da pasta e a capacidade de transferir tensões e deformações na junção dos dois componentes.

VIEIRA E DAL MOLIN (1995) explicam que a zona de transição pasta/agregado ou pasta/armadura possuem maior quantidade de cristais orientados de hidróxido de cálcio, com forças Van der Waals de menor intensidade que os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), tornando-a, assim, mais suscetível à formação de microfissuras de interface. Ocorre também, devido a presença de exsudação interna, a concentração de água em torno dos agregados e armaduras, aumentando a relação a/c e diminuindo a resistência da pasta que os envolve.

No que se refere à aderência do concreto às armaduras, a sílica ativa melhora a resistência ao arrancamento, já que com a adição desta a interface entre o concreto e a armadura fica mais densa e com menor porosidade.

De acordo com VIEIRA & DAL MOLIN (1995) o efeito benéfico da sílica ativa na aderência aço/concreto também pode ser explicado pela redução da água livre acumulada na interface e redução da orientação preferencial dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na zona de transição aço/pasta de cimento.

Ensaio de arrancamento realizados pelos autores citados acima comprovaram a eficiência da utilização de sílica ativa objetivando o aumento de aderência entre a pasta de cimento e a armadura. Os resultados são apresentados na figura 5.9. A tensão média de aderência (τ_{bm}) é definida como a média das tensões de aderência correspondente aos escorregamentos pequenos (0,01 mm), aos escorregamentos de serviço (0,10 mm) e aos escorregamentos correspondentes à ruptura de aderência.

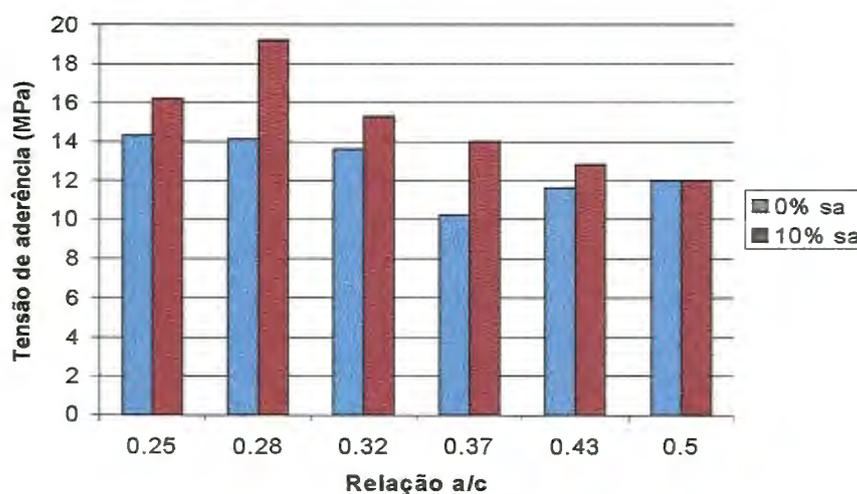


Figura 5.9: Ensaio de aderência (VIEIRA & DAL MOLIN, 1995)

Segundo os mesmos autores, o resultado obtido com o fator a/c 0,25 foi um pouco abaixo do esperado e que a explicação para isso talvez seja a dificuldade de compactação de concretos com baixos valores da relação a/c e a possível deficiência no intertravamento do agregado com as nervuras da barra e, eventualmente, devido a incorporação de ar no concreto, em função da quantidade de aditivo adicionada (para essa relação a/c foi utilizada uma porcentagem de aditivo um pouco mais elevada).

Devido a ótima aderência do concreto fresco ao endurecido muitas obras de reparos têm sido realizadas. Se o reparo for realizado com todos os cuidados necessários, desde a preparação da superfície de ligação até a própria execução, o material apresentará uma resistência à ruptura bastante acentuada, podendo, na maioria das vezes, a ruptura ocorrer no concreto velho e não na superfície reparada.

e) Permeabilidade e Porosidade

FORNASIER & DAL MOLIN (1994) comentam que os poros da pasta representam o volume bruto que não foi ocupado pelos elementos de hidratação, diminuindo de quantidade e tamanho a medida que a hidratação continua, passando de poros capilares a poros gel. Estes últimos estão localizados entre os produtos de hidratação (principalmente C-S-H), ocupando cerca de 28% do volume total do gel. Já os poros capilares têm origem a partir dos espaços ocupados antes pela água de amassamento, sendo essa porosidade tanto maior quanto maior for a quantidade de água utilizada na mistura e menor for o grau de hidratação do cimento.

Teoricamente a porosidade é o quociente entre o volume de vazios e o volume total de um sólido, podendo constituir de 1% a 10% do volume do concreto. Esta é em função da água de amassamento, da porosidade dos agregados, zona de transição e fissurações. Já a permeabilidade é a

propriedade que mede a facilidade de deslocamento de um fluido líquido ou gasoso através de um determinado material.

Concretos e argamassas incorporados de sílica ativa são muito menos permeáveis que os convencionais. AMARAL FILHO (1992a) cita que o coeficiente de permeabilidade pode baixar de 1.000 vezes a 10.000 vezes com adições de cerca de 12% de sílica ativa.

Pesquisas realizadas por vários autores concluíram que o volume da porosidade das pastas é praticamente independente da quantidade de sílica ativa, porém ocorre uma diminuição do tamanho dos poros capilares tornando-os mais finos e reduzindo, assim, a permeabilidade do material.

Ensaio foram realizados por FORNASIER & DAL MOLIN (1994) utilizando a penetração de água sobre pressão. Este ensaio é caracterizado pelo ingresso de água em um corpo-de-prova seco, tornando-se saturada a parte que sofre a penetração. A figura 5.10 apresenta os resultados.

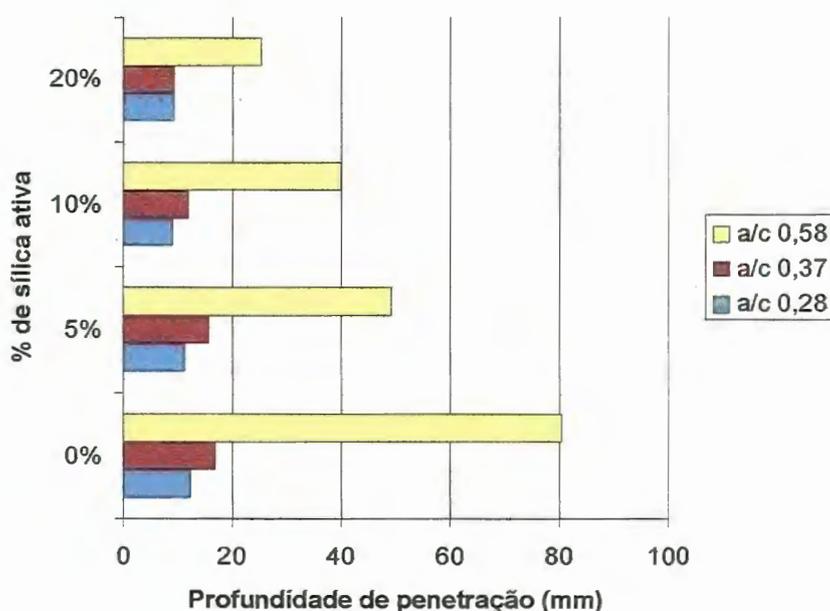


Figura 5.10: Ensaio de permeabilidade (penetração de água sobre pressão) (FORNASIER & DAL MOLIN, 1994)

Tanto a relação a/c quanto o teor de sílica ativa têm uma influência direta sobre a profundidade de penetração de água. Com exceção da relação a/c 0,28 que apresentou um pequeno aumento de permeabilidade ao se passar de 10% a 20% do teor de sílica ativa, todas as demais misturas apresentaram queda de permeabilidade ao aumentar o teor de adição. Pôde-se verificar, também, que para todos os níveis de adição estudados, as relações entre permeabilidade e relação a/c foram diretamente proporcionais e que mantendo-se a mesma relação a/c, as relações entre adição de sílica ativa e permeabilidade também são diretamente proporcionais.

Melhorias em outras propriedades mecânicas do concreto com sílica ativa também são atribuídas à mudança na natureza da porosidade na microestrutura da pasta endurecida.

f) Durabilidade sob repetidos ciclos de gelo e degelo

De acordo com o Committe 226 do ACI (1987), concretos com ar incorporado contendo mais de 20% de sílica ativa resistem satisfatoriamente aos testes de gelo e degelo conduzidos de acordo com a ASTM C 666. Entretanto, alguns testes realizados em concreto com ar incorporado com relação água/cimento de 0,40 e 20% e 30% de sílica ativa, mostraram resultados insatisfatórios. Isto, talvez, devido ao alto teor de sílica ativa que, aumentando muito a densidade do concreto, pode afetar o movimento da água no seu interior, causando assim tensões internas. Porém, concretos com ar incorporado com relação água/cimento inferior a 0,30 apresentaram resultados satisfatórios, de acordo com a norma acima citada.

A utilização do concreto com ar incorporado é devida ao fato deste possuir grande número de pequenas bolhas que permitem expansão quando há o

congelamento, evitando assim o aparecimento de tensões e a possibilidade de desagregação do material.

g) Resistência química

Pela sua baixa permeabilidade, a resistência do concreto com sílica ativa ao ataque de vários agentes químicos tem sido estudada por vários pesquisadores. De um modo geral, concretos contendo sílica ativa têm mostrado aumento de resistência a esses agentes quando comparados a concretos sem adição.

No que diz respeito à resistência química dos concretos com sílica ativa, pode-se citar como principais agressores: ataques de cloretos e sulfatos, lixiviação e eflorescência, reação álcali-sílica, entre outros.

Como citam MEHTA & MONTEIRO (1994), a resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e os constituintes da pasta de cimento. Uma das exceções é a reação álcali-agregados (álcali-sílica) que ocorre entre os álcalis na pasta de cimento e certos materiais reativos quando presentes no agregado, ocasionando a expansão do concreto.

A seguir serão detalhados os principais agentes químicos prejudiciais ao concreto como também à armadura.

g.1) Corrosão das armaduras – carbonatação e penetração de cloretos

De acordo com NEVILLE (1997), o aço envolto pela pasta de cimento hidratada forma rapidamente uma camada de passivação de óxido que aderida fortemente ao aço protege este contra a corrosão ou formação de

ferrugem. Este processo é o que pode-se chamar de passivação. Este estado é mantido por um pH adequadamente alto da água dos poros em contato com a camada passivadora. Portanto, se o pH da água atinge valores baixos, a película protetora é removida e pode ocorrer a corrosão, bastando apenas existir oxigênio, umidade e diferença de potencial necessários para esse processo.

Muitas pesquisas confirmaram que a utilização de sílica ativa em concretos e argamassas reduz o pH da água de poros, devido a sua reação pozolânica. Porém, como citam KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1995), o fato da sílica ativa reagir com o hidróxido de cálcio e reduzir o pH da solução dos poros não traz problemas com relação à proteção às armaduras, pois esta redução não atinge valores críticos, que seriam da ordem de 9,4.

Os dois principais fatores responsáveis pela possível despassivação da armadura do concreto são a carbonatação e a presença de cloretos na água contida nos poros.

O processo de carbonatação origina-se a partir do CO_2 contido no ar, que na presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ presente na pasta de cimento, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3).

Segundo NEVILLE (1997) a carbonatação reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento de valores entre 12,6 e 13,5 para cerca de 9 e, quando todo o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se carbonata, o pH é reduzido a 8,3. A redução a estes níveis pode ocasionar a despassivação da armadura.

O autor ainda comenta que em concretos contendo somente cimento Portland, é apenas a carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que importa, porém, quando se esgota o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como no caso através das reações pozolânicas da sílica ativa, também é possível a carbonatação do C-S-H. Quando isso

ocorre, não é apenas o CaCO_3 que se forma, mas também, simultaneamente, o gel de sílica, com poros grandes (maiores que 100 nm) que facilita a carbonatação subsequente.

KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1995) comentam que resultados contraditórios têm sido publicados sobre o efeito da sílica ativa na carbonatação de concretos, tais como, que concretos com sílica ativa apresentam profundidades de carbonatação igual ou superior aos concretos convencionais.

O fator fundamental que controla a carbonatação, citado por NEVILLE (1997), é a difusividade da pasta de cimento hidratada e que esta é uma função do sistema de poros da pasta de cimento durante o período que ocorre a difusão do CO_2 , concluindo que são importantes o tipo e conteúdo de cimento, a relação a/c e o grau de hidratação.

Outro fator fundamental com relação a carbonatação, tanto do concreto convencional como o com sílica ativa, é a cura. A figura 5.11 mostra a profundidade de carbonatação de concretos com 28 dias de idade com resistências à compressão entre 30 MPa e 60 MPa, curados em água durante 28 dias, como também curados ao ar com 65% de umidade relativa.

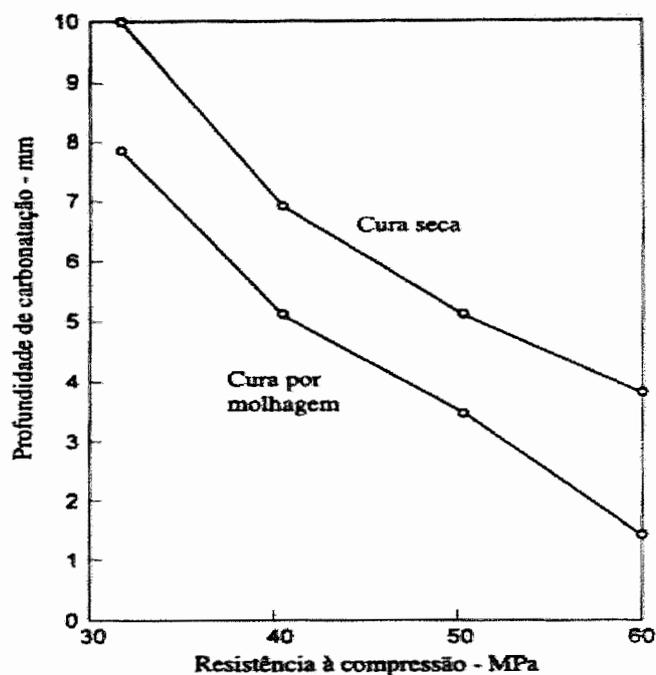


Figura 5.11: Influência da cura na carbonatação (NEVILLE, 1997)

A presença de cloretos na água de poros dos concretos também provoca a despassivação das armaduras. As estruturas que mais sofrem com esse tipo de agressão são as situadas em regiões marinhas e, também, em clima temperado, onde se utiliza o sal para evitar o congelamento de pistas, pontes e viadutos.

Tanto o teor de cloretos permitido no concreto quanto a forma de expressar os níveis de penetração não estão bem estabelecidos, existindo várias divergências entre as normas de diversos países. A tabela 5.5 mostra o teor de cloretos máximo indicado por várias normas.

Tabela 5.5: Normas de diversos países para teores máximos de cloretos

País	Norma	Limite de Cl ⁻ P/ Despassivar		Referência
		C. Armado	C. Protendido	
Brasil	NBR 6118	0,05%	-	Água De Amassamento
	NBR 7197	-	0,05%	
	NBR 6092	-	0,05%	
Espanha	EH-88	0,40%	-	Cimento Cimento
	EP-80	-	0,10%	
E.U.A	ACI 222	0,20%	0,06%	Cimento
	ACI 201	0,20%		
	ACI 318	0,3% - amb. Normal 0,15% - amb. cloretos 1,0% - amb. seco		
Europa	CEB	0,05%	0,025%	Concreto Cimento Cimento
	CEB-FIP	0,40%	0,20%	
	ENV 206	0,40%	0,20%	
Inglaterra	CP-110	0,35% - 0,5%	0,6%	Cimento
Japão	JSCE SP-2	0,60 kg/m ³	0,30 kg/m ³	Concreto
Noruega	NS 3474	0,60%	0,002%	Cimento
Emirados Árabes	CIRIA SP31	0,30%	-	Cimento

Fonte: KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1994)

Devido ao fato da presença de sílica ativa diminuir um pouco o pH da água contida nos poros do concreto, este torna-se menos tolerante aos íons cloretos. Porém, pelo fato do concreto com sílica ativa apresentar baixa porosidade este torna-se bastante resistente à penetração dos cloretos.

KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1994) realizaram ensaios com argamassas contendo sílica ativa, baseados no método ASTM C1202-91, que possibilita a rápida determinação da resistência à penetração de cloretos através da medida da corrente elétrica que passa pelo corpo-de-prova ensaiado. Este método baseia-se em princípio eletroquímico utilizando-se duas células, uma com cloretos e outra sem cloretos. É gerada uma diferença de potencial entre as células, originando uma corrente que induz o transporte do íon cloreto através do corpo-de-prova colocado entre as duas células. O

produto da corrente pelo tempo, expresso em Coulombs, indica a carga que atravessa o corpo-de-prova, revelando a maior ou menor resistência da argamassa à penetração de cloretos. Os resultados obtidos na pesquisa são mostrados nas figuras 5.12 e 5.13.

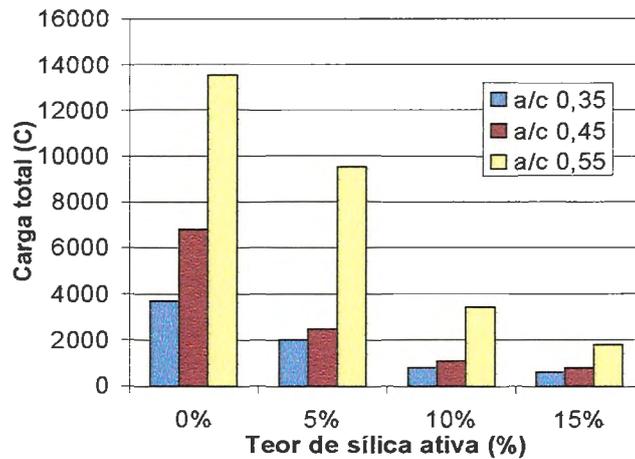


Figura 5.12: Carga total passante após 6 horas de ensaio (KULAKOWSKI & DAL MOLIN 1994)

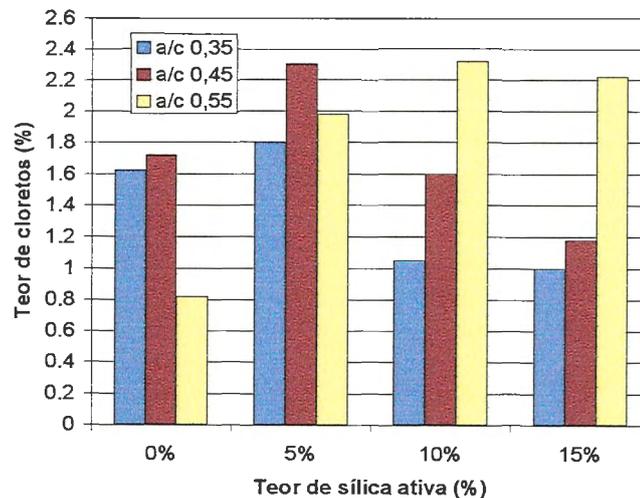


Figura 5.13: Teor de cloretos retido no 1° cm de profundidade (KULAKOWSKI & DAL MOLIN 1994)

Até uma carga de 1000 C, a permeabilidade do material pode ser classificada como muito baixa; de 1000 C a 2000 C como baixa; de 2000 C

a 4000 C como moderada; e acima de 4000 C é considerada alta. Na figura 5.12 pode-se notar, com exceção do teor de 5% de sílica ativa com relação a/c 0,55, todos os teores de sílica ativa apresentaram permeabilidade de muito baixa a moderada para todas relações a/c.

Através da análise do teor de cloretos retido no primeiro centímetro de profundidade, KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1994) concluíram que este tipo de ensaio de penetração de cloretos é muito agressivo, pois, todos os resultados encontrados foram bastante acima do permitido pelas diversas normas da tabela 5.5, sendo, assim, o ensaio considerado satisfatório para avaliar qualitativamente as argamassas em questão.

A figura 5.14 representa os ensaios realizados por TORII & KAWAMURA (1994) e mostra mudanças na permeabilidade a íons cloretos, em argamassas contendo sílica ativa, em função do tempo de cura. A penetração dos íons cloretos nestas argamassas cai drasticamente após 7 dias na medida que a porcentagem de sílica ativa é aumentada. Em particular, a penetração dos íons cloretos em argamassas contendo 10% e 15 % de sílica ativa aos 91 dias é bastante baixa, aproximadamente 1000 Coulombs, enquanto que a argamassa sem adição mostra alta penetração aos íons cloretos em qualquer idade, na qual foi maior que 10.000 Coulombs mesmo aos 91 dias.

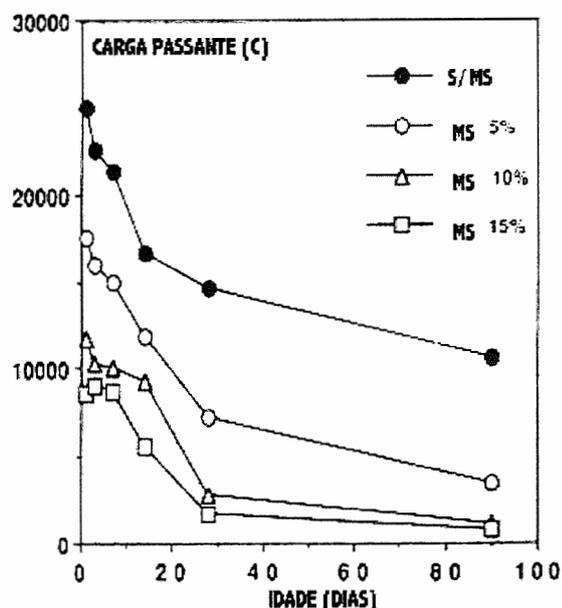


Figura 5.14: Permeabilidade a íons cloreto (TORII & KAWAMURA, 1994)

TORII & KAWAMURA (1995) concluíram que a permeabilidade dos concretos com sílica ativa aos íons cloretos está intimamente relacionada à quantidade e continuidade de seus poros.

Em resumo, como citam KULAKOWSKI & DAL MOLIN (1995), pode-se dizer que o efeito negativo da redução do pH, como também os possíveis aumentos da carbonatação, aparentemente são insignificantes em relação à redução da porosidade do concreto com sílica ativa, devido suas reações químicas e físicas, propiciando, assim, excelente proteção às armaduras.

g.2) Reação álcali-sílica

Como citam MEHTA & MONTEIRO (1994), reações químicas envolvendo íons alcalinos do cimento Portland (ou de outras fontes), íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem existir no agregado, podem acarretar a expansão e fissuração do concreto, levando a perda de

resistência, elasticidade e durabilidade do mesmo. Este fenômeno é conhecido como reação álcali-sílica ou reação álcali-agregado.

Informações importantes, dadas por NEVILLE (1997), a respeito da reação álcali-sílica:

- esta reação pode ser desagregante e se manifestar por fissuração. As aberturas de fissuras podem ser desde 0,1 mm até 10 mm, em casos extremos. Na maioria dos casos essa reação prejudica a aparência e a utilização da estrutura, como também sua integridade. As fissuras podem facilitar a entrada de agentes agressivos;
- a evolução e as conseqüências dessa reação são influenciadas pelas proporções de diversos íons na água contida nos poros e pela disponibilidade de álcalis e de sílica. A expansão causada pela reação é tanto maior quanto maior o teor de sílica reativa, mas até certo teor de sílica; com teores maiores a expansão é menor. A figura 5.15 ilustra este fato. A relação entre sílica reativa e álcalis que produz o máximo de expansão geralmente se situa entre 3,5 e 5,5;

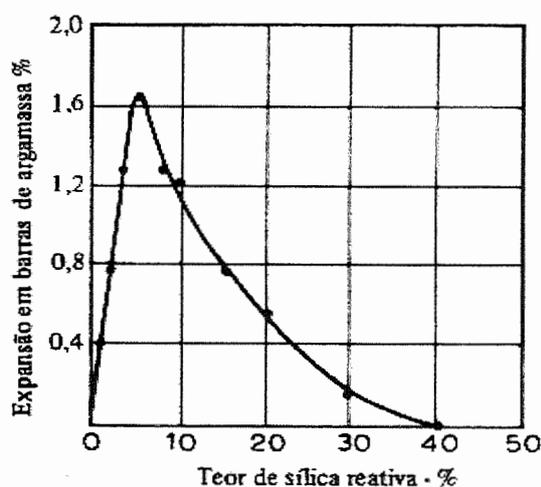


Figura 5.15: Relação entre expansão após 224 dias e teor de sílica reativa no agregado (NEVILLE, 1997)

- a variação do teor de sílica no concreto pode fazer com que a relação álcali-sílica se afaste do ponto mais desfavorável. A expansão devida a essa reação pode ser reduzida ou eliminada adicionando-se à mistura sílica reativa na forma de partículas muito finas. Como mostra a figura 5.15, no intervalo de baixos teores de sílica, a expansão aumenta com o teor de sílica, mas com teores maiores a situação se inverte;
- as pozolanas, de um modo geral, são benéficas na mistura porque reduzem a permeabilidade do concreto e, portanto, reduzem a mobilidade dos agentes agressivos, tanto os que estão presentes no concreto como os provenientes do ambiente e, além disso, o C-S-H formado pela atividade pozolânica incorpora uma certa quantidade de álcalis, abaixando o valor do pH e a reação álcali-sílica somente ocorre com altas concentrações de OH^- , isto é, com altos valores do pH da água contida nos poros.

Segundo o Committee 226 do ACI (1987), a vantagem adicional na utilização de sílica ativa no combate a reação álcali-sílica em relação as outras pozolanas é que esta pode ser aplicada em menores quantidades, comparada com os outros materiais, para se atingir o mesmo resultado.

Na figura 5.16, RASHEEDUZZAFAR & HUSSAIN (1991) mostram a redução da expansão em barras de concreto devido a reação álcali-sílica, com 6 meses de idade, contendo cimentos misturados com sílica ativa e escória de alto-forno. Pode-se notar a diferença das proporções de sílica ativa e escória para se atingir os mesmos resultados.

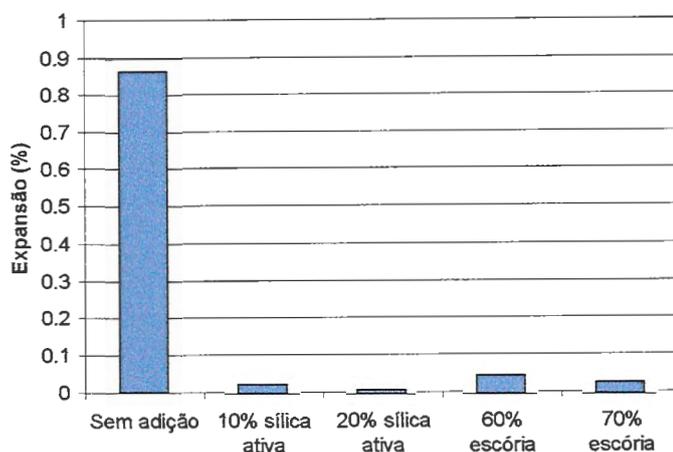


Figura 5.16: Expansão de barras de concreto devido à reação álcali-sílica (RASHEEDUZAFAR & HUSSAIN, 1991)

g.3) Lixiviação e eflorescência

A eflorescência freqüentemente ocorre nas superfícies expostas do concreto submetidas a umedecimento e secagem ou à percolação da água através do concreto. A lixiviação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ carbonata a superfície e, se ela é constante, ocorrerá um aumento na porosidade do concreto, com decréscimo na sua resistência e durabilidade.

MORAES (1990) constatou em suas pesquisas que quanto maior a adição de sílica ativa e melhores as condições de cura, maior será a resistência do concreto à lixiviação. Também, verificou que pesquisas realizadas em concretos com diversos teores de sílica ativa mantidos em água do mar, apresentaram perdas de resistência com relação à eflorescência para todas as amostras.

g.4) Ataques de sulfatos

Com relação ao ataque de sulfatos, a presença de sílica ativa aumenta a resistência dos concretos frente à agressão desse compostos.

MORAES (1990) indica que em ensaios realizados com cimentos de alto-forno, pozolânico e resistente a sulfatos, as argamassas de cimento pozolânico e de alto-forno com sílica ativa, apresentaram melhor durabilidade do que as preparadas com cimento resistente a sulfatos.



Capítulo 06 - Propriedades dos CLAD's

6.1. Propriedades físicas dos CLAD's

6.1.1. Resistência à compressão

HOLM & BREMNER (1994) comentam que alto desempenho em concretos leves pode ser alcançado sem necessariamente possuírem conteúdo de materiais aglomerantes maior que os concretos de alto desempenho de massa específica normal (CAD). Este pode ser alcançado com uma seleção adequada do agregado leve a ser aplicado. Durante a trituração dos agregados leves suas resistências à compressão são limitadas, sendo por isso anti-econômico o esforço de produzir CLAD utilizando grandes quantidades de cimento.

ARMELIN et al. (1994) realizaram experimentos utilizando agregados graúdos e miúdos de argila expandida na produção de concretos e microconcretos. Estes encontraram que para os traços de concreto, utilizando agregados graúdo e miúdo, a resistência não ultrapassou o limite de 37 MPa, mesmo para traços de relação a/c 0,31 e consumo de cimento de 545 kg/m³. A explicação dada foi que isto ocorreu como consequência do elevado teor de ar incorporado, de até 13,5% (foi utilizado um aditivo superplastificante com efeito de incorporação de ar para controlar a segregação do agregado graúdo) e, também, como uma limitação imposta pela resistência do próprio agregado graúdo. No caso dos microconcretos, nos quais apenas agregado miúdo foi empregado, obtiveram-se resistências

à compressão em torno de 58 MPa e 65 MPa (para 28 dias e 63 dias, respectivamente), concluindo que sendo o agregado miúdo mais denso que o graúdo, este permitiu limite mais elevado de resistência à compressão.

Como mencionam os autores citados, uma análise apenas da resistência à compressão do concreto leve tem pouco sentido sem a análise de sua massa específica. Segundo os mesmos, foram encontrados nos ensaios fatores de eficiência, para microconcretos, de até 34 MPa.dm³/kg, com um consumo de cimento de 560 kg/m³. Estes concluíram através de comparações, que os microconcretos produzidos tiveram eficiência equivalente aos dos CLAD's produzidos na América do Norte, Europa e Japão.

Estudos foram realizados por ZHANG & GJORV (1991c) utilizando quatro tipos de argila expandida e um tipo de cinza volante sinterizada, 10% de sílica ativa e, em alguns casos, areia natural substituindo em parte o agregado leve miúdo (em torno de 40%) na produção de CLAD's. O consumo de cimento variou de 400 kg/m³ a 600 kg/m³ e a relação $a/(c+ms)$ de 0,28 a 0,44. Os agregados graúdos foram utilizados em todas as misturas. Para as diversas misturas, a resistência à compressão aos 28 dias variou de 57,3 MPa a 102,4 MPa e as massas específicas secas em estufa de 1435 kg/m³ a 1735 kg/m³, conferindo elevados fatores de eficiência (entre 40 MPa.dm³/kg e 60 MPa.dm³/kg). Porém, os autores afirmam que a resistência à compressão não foi muito afetada pelo aumento do conteúdo de cimento ou pela substituição do cimento pela sílica ativa e nem pela substituição do agregado leve miúdo pela areia natural. Segundo os mesmos, os resultados mostraram claramente que o tipo de agregado leve é o fator primário que controla a resistência à compressão dos concretos.

Na maioria das misturas de concreto do experimento acima, a resistência à compressão parou de crescer entre 7 dias e 28 dias de idade. Isto indica que a resistência à compressão atingiu o mais alto nível de resistência que o

agregado pode suportar e por isso o aumento de resistência da matriz de cimento não traz nenhum benefício. Após 28 dias, a fratura do concreto, de um modo geral, se deu através do agregado para quase todas as misturas.

Mesmo com um agregado leve poroso, os testes mostraram claramente que uma resistência à compressão com mais de 100 MPa pode ser obtida. Para a maioria dos materiais homogêneos, como os cerâmicos, a resistência está intimamente relacionada com a porosidade, mas esse não é o caso para um material composto como o CLAD. O uso de uma matriz densa e de alta resistência irá resultar numa resistência total bem mais alta do que seria esperado considerando o agregado isoladamente, fraco e poroso. No CLAD, o módulo de elasticidade do agregado é geralmente menor que o da matriz. Quando o CLAD é sujeito à uma carga de compressão axial, o agregado leve é submetido à um confinamento lateral gerado pela matriz que o envolve, suportando uma sollicitação maior do que se estivesse sozinho.

6.1.2. Resistência à tração

Segundo HOLM & BREMNER (1994) a resistência à tração dos CLAD é limitada devido ao fato que aproximadamente 50% do volume do agregado leve é constituído de poros.

Nos ensaios realizados por ZHANG & GJORV (1991c) foram encontradas resistências à tração por flexão variando de 5,4 MPa a 7,3 MPa e por compressão diametral de 3,5 MPa a 5,6 MPa. Através de comparações com outros ensaios já realizados, com agregados de massa específica normal, os mesmos chegaram a conclusão que tanto a resistência à tração por flexão quanto a por compressão diametral são menores que as do concreto de massa específica normal de mesma resistência à compressão.

Para CLAD's, a relação entre a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão é sugerida por ZHANG & GJORV (1991c) através da equação:

$$f_t = 0,73 f_{ck}^{1/2}$$

onde,

f_t = resistência à tração por flexão em MPa e

f_{ck} = resistência característica à compressão em MPa.

Como também, sugerem a seguinte expressão para relacionar a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão:

$$f_{tk} = 0,23 (f_{ck}^2)^{1/3}$$

onde,

f_{tk} = resistência característica à tração por compressão diametral em MPa e

f_{ck} = resistência característica à compressão em MPa.

Ensaio de ruptura à tração em corpos-de-prova de CLAD, de acordo com HOLM & BREMNER (1994), têm mostrado claramente alto teor de umidade na superfície rompida, demonstrando que misturas bem compactadas contendo adições (como sílica ativa e cinzas volantes) são essencialmente impermeáveis e libera a umidade muito lentamente. Mesmo os corpos-de-prova secos ao ar por vários meses apresentaram umidade em 90% da superfície rompida.

6.2. Propriedades elásticas

6.2.1. Módulo de elasticidade

HOLM & BREMNER (1995) citam que embora a fórmula do ACI 318, $E_c = 0,043 \gamma^{1,5} f_c^{1/2}$, tenha apresentado resultados satisfatórios em estimar o módulo de elasticidade dos concretos de resistência normal e concretos leves com resistências entre 20 MPa e 35 MPa, esta não é adequada para determinar o módulo de elasticidade para concretos de altas resistências. Porém, o ACI 213-77 modificou a fórmula para melhor se estimar o módulo de elasticidade do CLAD:

$$E_c = C \gamma^{1,5} f_c^{1/2}$$

Onde,

$C = 0,40$, entre 35 MPa e 41 MPa e

$C = 0,38$, acima de 41 MPa.

Nos ensaios realizados por ZHANG & GJORV (1991c), relatados nos itens anteriores, foram encontrados módulos de deformação variando de 10 GPa a 20 GPa, enquanto que em concretos utilizando agregados de massa específica normal esses valores variam de 35 GPa a 95 GPa. Os mesmos sugerem que, para CLAD's, a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão pode ser realizada através da seguinte fórmula:

$$E_c = 1,19 (f_{ck})^{1/3}$$

Onde,

E_c = módulo de elasticidade em GPa e

f_{ck} = resistência característica à compressão em MPa

6.2.2. Comportamento da curva tensão x deformação

ZHANG & GJORV (1991c) comentam que, para CLAD's, a parte ascendente da curva tensão x deformação torna-se mais linear a medida que a resistência do concreto cresce, enquanto que a parte descendente da curva torna-se mais íngreme. Nos ensaios realizados estes encontraram deformações últimas, para os vários CLAD's moldados, variando de 3,3 mm/m a 4,6 mm/m, que são maiores que as tipicamente observadas em concretos de massa específica normal com o mesmo nível de resistência à compressão. Os mesmos ainda fazem comentários importantes sobre os diferentes comportamentos das curvas tensão x deformação para as variadas misturas realizadas:

- a deformação última decresce com o aumento do conteúdo de cimento. Isto é provavelmente devido à baixa deformabilidade com altos conteúdos de cimento e, conseqüentemente, maior resistência;
- a curva tensão x deformação é mais linear para os concretos com sílica ativa comparados aos concretos sem sílica ativa, devido a melhor zona interfacial entre o agregado e a pasta de cimento para o concreto com adição;
- o efeito da substituição parcial do agregado leve miúdo pela areia natural é insignificante;
- o comportamento da curva tensão x deformação depende muito das propriedades dos agregados leves. Houve grande variação do comportamento da curva para os diversos tipos de agregados utilizados.

Em concretos de agregado leve, ao contrário dos concretos normais, a propagação de fissuras ocorre tipicamente através do agregado causando um colapso mais abrupto do concreto.

6.2.3. Coeficiente de Poisson

Experimentos investigando as propriedades elásticas do CLAD têm encontrado um coeficiente de Poisson médio de 0,20 (semelhante ao dos concretos usuais) com pequenas variações devidas à idade, nível de resistência ou agregados utilizados.

6.3. Durabilidade

6.3.1. Resistência ao gelo e degelo

Por vários anos, muitos programas experimentais foram conduzidos pelo Canadian Department of Minerals, Energy, and Technology (CANMET) utilizando vários tipos de concreto expostos a ambientes marinhos gelados. Estes, ora eram imersos na água do mar durante a maré alta, ora eram expostos ao ar gelado durante a maré baixa. Em 1978, os corpos-de-prova ensaiados eram compostos de agregados normais com vários tipos de cimento e contendo adições. Relações a/c de 0,40, 0,50 e 0,60 foram usados para se atingir resistências aos 28 dias de 30 MPa, 26 MPa e 24 MPa, respectivamente. Em 1980, essas misturas foram repetidas, com exceção de que a pedra britada de 40 mm foi substituída por folhelho expandido de 25 mm. Os agregados miúdos utilizados em ambas as vezes foram areias naturais disponíveis comercialmente. Os consumos de cimento para os concretos leves foram 480 kg/m³, 360 kg/m³ e 240 kg/m³, produzindo resistências à compressão de 36 MPa, 30 MPa e 19 MPa, respectivamente. Os resultados encontrados confirmaram pequenas diferenças encontradas entre o concreto leve estrutural com 8 anos e concreto de massa específica normal com 10 anos, após duas submersões por dia e aproximadamente 1000 ciclos de congelamento e descongelamento.

6.3.2. Permeabilidade

Os concretos convencionas apresentam uma relação a/c significativamente maior que o necessário para as reações químicas associadas à hidratação do cimento Portland. Esta água em excesso torna o material poroso, e muitos desses poros apresentam comunicação com a superfície, sendo um fator prejudicial a durabilidade do concreto.

Tanto o CAD quanto o CLAD, possuem pouca água excedendo o necessário para hidratar o cimento, tornando o concreto menos permeável. Os dois tipos de concreto geralmente possuem adições, como a sílica ativa, e superplastificantes, o que leva a uma densificação da pasta de cimento após um relativo curto período de cura úmida.

HOLM & BREMNER (1994) citam que os agregados, tanto leves quanto os normais, apresentam pouca influência sobre a permeabilidade a gases e líquidos. Nos dois casos, as pequenas fissuras formadas na trituração, durante a produção, tem muito pouco efeito sobre a permeabilidade. Análises microscópicas indicaram que os agregados leves possuem uma estrutura vesicular com poros não-interconectados, nos quais o fluxo de gases e líquidos é insignificante.

ZHANG & GJORV (1991b), com os mesmos traços utilizados para determinação das propriedades físicas dos CLAD's, realizaram outros ensaios para analisar a permeabilidade à penetração de água e à penetração de cloretos desses concretos , nos quais encontraram os seguintes resultados:

a) Penetração de água

- a permeabilidade decresceu para aumentos de conteúdo de cimento de 400 kg/m^3 para 500 kg/m^3 , porém para conteúdos em torno de 600 kg/m^3

notou-se um acréscimo da permeabilidade, provavelmente devido a fissuras térmicas;

- a permeabilidade de concretos com areia natural, substituindo parcialmente o agregado leve miúdo (em torno de 40%), foi menor que a dos concretos que possuíam apenas agregado leve miúdo. Isto pode ser atribuído a formação de um concreto mais denso quando se utiliza areia natural;
- a permeabilidade dos concretos com diferentes tipos de agregados leves, porém com uma mesma matriz (pasta de cimento), foram semelhantes, mesmo os agregados apresentando porosidade e características completamente diferentes. Com isso verifica-se que a permeabilidade do CLAD é muito mais dependente da qualidade da pasta de cimento. Mesmo os concretos com agregados mais porosos apresentaram penetrações semelhantes aos concretos feitos com agregados mais densos.

b) Penetração de cloretos

Através do ensaio de penetração acelerada de cloretos, método já explicado no capítulo 5, ZHANG & GJORV (1991b) chegaram às seguintes conclusões:

- as cargas que passaram através dos concretos ensaiados variaram de 100 Coulombs a 1000 Coulombs, considerados como uma permeabilidade muito baixa;
- como no caso da permeabilidade à penetração de água, as cargas decresceram de 294,1 Coulombs a 198,5 Coulombs com o acréscimo do conteúdo de cimento de 400 kg/m³ a 500 kg/m³, mas não houve nenhuma mudança para conteúdos de cimento em torno de 600 kg/m³;
- para os concretos com sílica ativa, a penetração de cloretos foi muito mais baixa do que os concretos sem sílica ativa. Com a adição, a

resistividade do concreto foi de 3 vezes a 4 vezes maior que a dos concretos sem adição;

- para os concretos que tiveram areia natural substituindo parcialmente o agregado leve miúdo, a penetração de cloretos foi mais baixa que os concretos sem areia, porém a diferença não foi significativa;
- alguns concretos contendo agregados leves mais porosos apresentaram ausência de penetração de cloretos, isto podendo ser devido a formação de uma melhor interface pasta/agregado para esses casos.

6.3.3 Resistência à corrosão

A resistência à corrosão do CLAD, segundo HOLM & BREMNER (1994), é no mínimo comparável a do CAD. Investigações em pontes e estruturas marinhas indicaram que a integridade interna e a mínima microfissuração limita efetivamente a rápida intrusão de agentes agressivos à armadura.

6.3.4 Resistência à carbonatação

Com uma alta qualidade das pastas, típica do CAD, este problema não é de grande importância. Medidas em pontes e estruturas marinhas de concretos contendo agregados leves, têm mostrado que a taxa de carbonatação é muito baixa nesses concretos.

6.3.5 Resistência à abrasão

De acordo com a ASTM C779 a tendência ao desgaste para os concretos com agregados leves e os normais são iguais e que os concretos leves podem ser usados satisfatoriamente em situações abrasivas, onde concretos normais são especificados.

Pontes de concreto leve expostas à travessia de mais de 100 milhões de veículos por mais de vinte anos, têm demonstrado resistência ao desgaste comparável a dos concretos normais.

Capítulo 07 - Análises Experimentais

7.1. Introdução

A parte experimental deste trabalho é fundamentada em novos conceitos de durabilidade sugeridos, aqui no Brasil, por HELENE (1995). Segundo este, os conceitos apresentam uma forma adequada e moderna para prever a evolução da deterioração das estruturas de concreto armado através de modelos de comportamento que viabilizam projetar para durabilidade e não somente para resistência mecânica.

Segundo HELENE (1995), para o problema da durabilidade das estruturas de concreto, devem-se considerar os seguintes aspectos:

- a classificação da agressividade do meio ambiente (ao concreto e à armadura);
- a classificação da resistência do concreto e da armadura a um determinado tipo de agente agressivo;
- os modelos (de preferência numéricos) de deterioração e envelhecimento das estruturas de concreto;
- a correspondência entre a agressividade do meio e a resistência à deterioração e ao envelhecimento da estrutura de concreto;
- e a vida útil desejada, ou seja, o período de tempo que se deseja que a estrutura atenda a certos requisitos funcionais e de segurança com um mínimo de exigências de manutenção.

Para a execução dos microconcretos leves de alto desempenho levou-se em consideração o aspecto referente a resistência do concreto (e da armadura) frente a determinados tipos de agentes agressivos.

Para isso, nas tabelas 7.1 e 7.2, HELENE (1995) oferece valores orientativos, tomados a partir de várias referências bibliográficas sobre o tema, que podem ser adotados quando se deseja uma adequada proteção referente à corrosão das armaduras e à deterioração dos concretos. Lembrando-se que para as armaduras os principais agentes deletérios são a carbonatação e o ataque de cloretos e para os concretos são a lixiviação provocada por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas; a expansão por ação de sulfatos com o aluminato tricálcico (C_3A) presente na pasta de cimento e a expansão devida a reações dos álcalis de cimento com certos agregados reativos (expansão álcali-agregado).

Tabela 7.1: Classificação dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras

Classe de Concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Máximo a/c	Deterioração por Carbonatação	Deterioração por cloretos
			Teor de Adições	Teor de adições
Durável	≥ C50	≤ 0,38	≤ 10% de pozolana, de sílica ativa ou de escória de alto-forno	≥ 20% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 65% de escória de alto forno
Resistente	C35 C40 C45	≤ 0,50	≤ 10% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≤ 15% de escória de alto forno	≥ 10% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 35% de escória de alto forno
Normal	C25 C30	≤ 0,62	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Fonte: HELENE (1995)

Tabela 7.2: Classificação dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos

Classe de concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Deterioração por expansão		Deterioração por lixiviação
		Teor de C ₃ A no cimento anidro	Teor de adições	Teor de adições
Durável	C50	≤ 5%	≥ 20% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 65% de escória de alto forno	≥ 20% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 65% de escória de alto forno
Resistente	C35 C40 C45	≤ 5%	≥ 10% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 35% de escória de alto forno	≥ 10% de pozolana ≥ 8% de sílica ativa ≥ 35% de escória de alto forno
Normal	C25 C30	≤ 8%	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Fonte: HELENE (1995)

É de interesse desta pesquisa manter os microconcretos na faixa entre resistente e durável, tanto para o concreto quanto para a armadura. Para atingir as exigências quanto a proteção ao concreto, frente aos riscos de deterioração por expansão ou lixiviação, é recomendável a utilização do cimento CPV-ARI-RS, pois este proporciona à mistura um baixo teor de C₃A.

Assim, mesmo os microconcretos estando fora das recomendações indicadas nas tabelas 7.1 e 7.2 (tais como possuir uma relação água/cimento menor que 0,50, para serem considerados como resistentes), estes ainda apresentam altos valores de fator de eficiência, como mostram os exemplos no final deste capítulo, e podem ser utilizados em situações de menor exposição a agentes agressivos.

No item a seguir são relatados os tipos e proporções dos materiais utilizados na produção dos microconcretos leves de alto desempenho, bem como os seus procedimentos de execução, para se atingir os níveis citados anteriormente e indicados nas tabelas anteriores.

7.2. Dosagem

Para esta pesquisa foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 75 mm x 150 mm de microconcretos leves com adição ou não de sílica ativa, utilizando cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS), agregado leve de argila expandida com $\phi_{\text{máx.}} = 6,3$ mm, em alguns casos areia natural substituindo parcialmente a argila expandida (em 40% da massa total do agregado) e aditivo superplastificante acelerador, tipo SPA, de acordo com a NBR-11768/1992

A substituição parcial da argila expandida por areia teve como objetivo otimizar a composição granulométrica do agregado, já que a argila apresentou poucos finos em sua composição. Com isso, procurou-se melhorar as características e propriedades dos microconcretos, tais como, trabalhabilidade, consumo de cimento e resistência mecânica sem prejudicar demasiadamente as propriedades de leveza do material.

Os traços dos microconcretos foram determinados através de uma metodologia inteiramente experimental. Através desses traços e suas respectivas relações a/c foram realizadas as funções $f_{cj} = F(a/c)$ para várias idades.

Inicialmente tentou-se dosar os microconcretos adotando-se consistências fixadas pelo espalhamento de 160 ± 10 mm (NBR-7215/1991) e teores de água/materiais secos (A%) em torno de 20%. Durante a execução desses

microconcretos apareceram problemas de adensamento devido à baixa trabalhabilidade das misturas e, após a desforma dos corpos-de-prova, foram notadas muitas falhas em suas superfícies. Assim, novos experimentos foram realizados, desta vez utilizando-se consistências em torno de 200 ± 10 mm e teores água/materiais secos mais elevados (em média 24%). Os microconcretos com areia substituindo parcialmente a argila expandida necessitaram teores de água/materiais secos menores que os sem areia. Nestes microconcretos obteve-se uma melhor composição granulométrica e utilizou-se menor quantidade de argila na mistura, diminuindo-se, portanto, a absorção de água. Com o aumento dos teores água/materiais secos foram obtidas misturas com ótima trabalhabilidade. Os corpos-de-prova moldados com estas misturas não apresentaram defeitos no acabamento e dificuldades de adensamento, obtendo-se nos ensaios excelentes resultados para as resistências à compressão.

Para esses traços foram utilizados 10% de sílica ativa e 1,5% de aditivo superplastificante acelerador, ambos em relação a massa de cimento. Estas proporções otimizadas foram empregadas por AGNESINI & SILVA (1997) em dosagens de microconcretos.

Para a utilização da areia natural, substituindo parcialmente a argila expandida, foram realizados ensaios iniciais variando as proporções desses agregados. A mistura de 60% de argila expandida e 40% de areia natural foi a que trouxe melhores resultados considerando-se o fator de eficiência, como também o consumo de cimento. Esta proporção também foi utilizada nas pesquisas de ZHANG & GJORV (1991).

7.3. Características dos Materiais empregados

7.3.1. Cimento Portland

Na produção dos microconcretos foram empregados dois tipos de cimento: cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) e cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS). As características físicas e mecânicas destes cimentos, prescritas pelas NBR-5733/1991 e NBR-5737/1991, e análise química, estão representadas nas tabelas 7.3 e 7.4.

Tabela 7.3: Características dos cimentos

Características e Propriedades		Un.	CPV-ARI		CPV-ARI-RS	
			S/SPA	C/SPA	S/SPA	C/SPA
Finura	Resíduo # 200 (NBR-11579)	%	0,3		0,1	
	Sup. Esp. Blaine (NBR-7224)	m ² /kg	451		475	
Tempo de pega	Início (NBR-11581)	min	128	110	185	115
	Fim (NBR-11581)	min	190	170	264	300
Expansibilidade a quente (NBR-11582)		mm	-		0,4	
f _{cj} (NBR-7215)	1dia	MPa	28,4		20,3	
	3 dias	MPa	42,3		33,2	
	7dias	MPa	46,7		40,0	
	28 dias	MPa	55,1		52,0	

Fonte: CIMINAS S.A.(1995)

Tabela 7.4: Análise química dos cimentos

Compostos	CPV-ARI	CPV-ARI-RS
SiO₂	19,55	24,12
Al₂O₃	4,98	5,85
Fe₂O₃	3,08	2,92
CaO	64,84	58,74
MgO	0,60	2,23
SO₃	2,86	3,12
CO₂	2,50	-
K₂O	0,70	0,80
P.F	2,93	2,22

Fonte: CIMINAS S.A (1995)

7.3.2. Agregado miúdo

7.3.2.1. Argila expandida

O agregado leve utilizado foi a argila expandida “Cinasita 500” produzida pela Cinasita S.A – Indústria e Comércio, apresentando as seguintes características:

- composição granulométrica: o resultado obtido no ensaio de granulometria (NBR-7217/1987) está representado na tabela 7.5 e na figura 7.1;
- substâncias nocivas: a argila expandida utilizada não apresentou, segundo a EB-230/1969, teores excessivos de impurezas orgânicas, torrões de argila, perda ao fogo e manchamento;
- índices físicos : massa específica (NBR-9776/1987) = 1,26 kg/dm³, massa unitária (NBR-7251/1982) = 0,71 kg/dm³;
- absorção (NBR-9777/1986): índice de absorção após 1 hora igual a 2,8 %, e após 24 horas igual a 7,2%.

Tabela 7.5: Ensaio de granulometria da argila expandida

Peneira (#) (mm)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
9,5	0
6,3	1
4,8	18
2,4	70
1,2	87
0,6	96
0,3	98
0,15	99
Resíduo	100

Dimensão máxima característica: $\phi_{\text{máx}} = 6,3$ mm (NBR-7211)
Módulo de finura: MF = 5,68 (NBR-7211)

7.3.2.2. Areia Natural

Na dosagem de alguns traços de microconcretos foi utilizada areia natural quartzosa, proveniente do Rio Mogi-Guaçu – Município de São Carlos – SP, apresentando as seguintes características:

- composição granulométrica: o resultado do ensaio de granulometria da areia (NBR-7217/1987) está indicado na tabela 7.6 e na figura 7.2;
- substâncias nocivas: o agregado miúdo preencheu todos os requisitos da norma NBR-721/1982, quanto à presença de substâncias nocivas aos microconcretos;
- índices físicos: massa específica (NBR-9776/1987) = $2,63 \text{ kg/dm}^3$, massa unitária no estado solto – areia seca (NBR-7251/1982) = $1,52 \text{ kg/dm}^3$;
- forma dos grãos: número de angulosidade médio (British Standard – BS 812) = 6,5 e índice de esfericidade médio = 0,60;

Tabela 7.6: Ensaio de granulometria da areia natural quartzosa

Peneiras (#) (mm)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
9,5	1
6,3	1
4,8	3
2,4	5
1,2	13
0,6	38
0,3	82
0,15	99
Resíduo	100

Dimensão máxima característica: $\phi_{\text{máx}} = 2,4$ mm (NBR-7211)

Módulo de finura: MF = 2,40 (NBR-7211)

Classificação NBR-7211: areia fina (zona 2)

7.3.2.3. Agregado composto por 60% de argila expandida e 40% de areia (em massa)

- Composição granulométrica: o resultado do ensaio de granulometria (NBR-7217) está representado na tabela 7.7 e na figura 7.3;
- Massa unitária em estado compactado seco (NBR-7810) = 1000 kg/m^3



Tabela 7.7: Ensaio de granulometria do agregado composto em massa por argila expandida (60%) e areia (40%)

Peneira (#) (mm)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
9,5	0
6,3	1
4,8	10
2,4	40
1,2	65
0,6	78
0,3	93
0,15	99
Resíduo	100

Dimensão máxima característica: $\phi_{\text{máx}} = 6,3 \text{ mm}$ (NBR-7211)

Módulo de finura: MF = 3,85 (NBR-7211)

Classificação NBR-7211: areia grossa (zona 4)

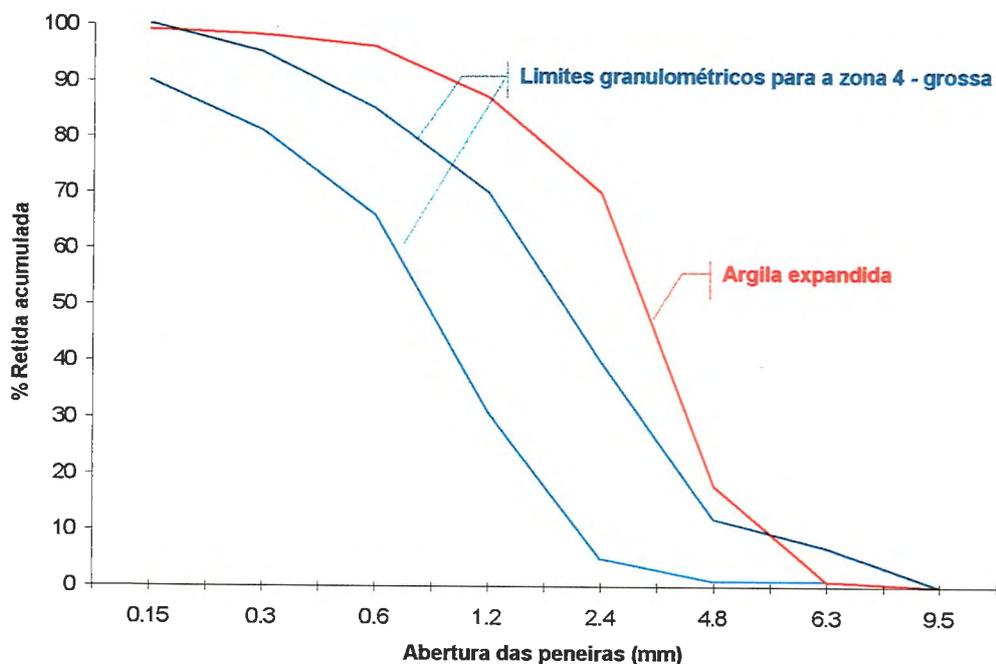


Figura 7.1: Curva granulométrica da argila expandida

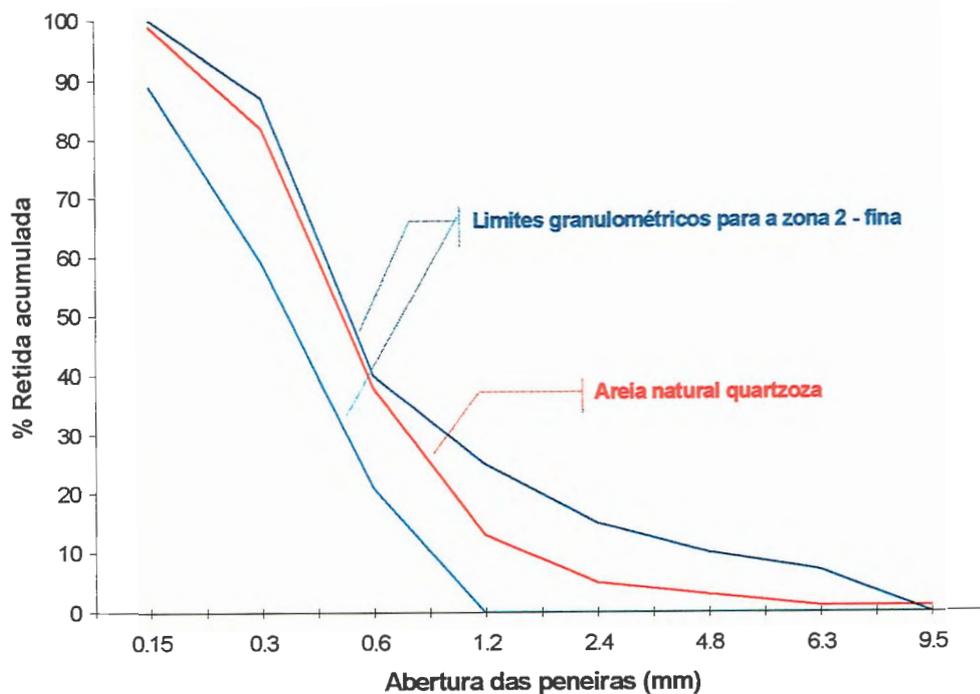


Figura 7.2: Curva granulométrica da areia natural quartzosa

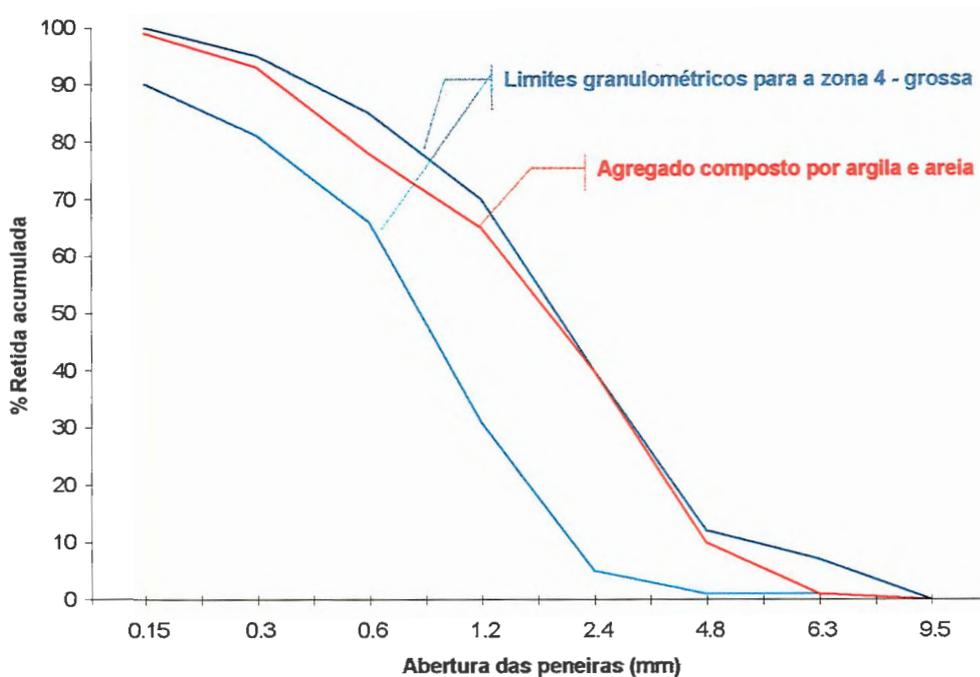


Figura 7.3: Curva granulométrica do agregado composto por argila e areia

7.3.3. Aditivo

O aditivo utilizado foi o superplastificante acelerador com elevado efeito redutor de água, tipo SPA, segundo a classificação da ABNT (NBR-11768), fabricado pelas Empresas do Grupo HolderBank, Ciminias S.A e H^c Holderchem.

7.3.4. Adição

A adição utilizada foi a sílica ativa procedente da fábrica de Sorocaba-SP, da empresa Ciminias S.A – Grupo Holderbank, apresentando as seguintes características:

- teor de sílica = 85%;
- superfície específica = 15,2 m²/g;
- massa específica = 2,22 kg/dm³.

7.4. Traços dos microconcretos

Para a produção dos microconcretos foram idealizadas cinco dosagens diferentes, detalhadas nas tabelas 7.8 a 7.12.

DOSAGEM I) Microconcretos com cimento Portland CPV-ARI, argila expandida e aditivo SPA (1,5%)

Tabela 7.8: Traços dos microconcretos para a DOSAGEM I

Cimento : Agregado (kg/kg)	a/c (kg/kg)	a/(c+sa) (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)*
1:0,15	0,30	-	1324
1:0,40	0,35	-	966
1:0,67	0,40	-	781
1:0,96	0,45	-	635
1:1,22	0,50	-	548
1:1,50	0,55	-	483

* Consumo de cimento efetivo descrito no item 7.6.3

DOSAGEM II) Microconcretos com cimento Portland CPV-ARI, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%)

Tabela 7.9: Traços dos microconcretos para a DOSAGEM II

Cimento : Agregado (kg/kg)	a/c (kg/kg)	a/(c+sa) (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)*
1:0,15	0,33	0,30	1207
1:0,40	0,37	0,34	944
1:0,67	0,42	0,38	741
1:0,96	0,48	0,44	613
1:1,22	0,54	0,50	534
1:1,50	0,62	0,56	454

* Consumo de cimento efetivo descrito no item 7.6.3

DOSAGEM III) Microconcretos com cimento Portland CPV-ARI, utilizando o agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%).

Tabela 7.10: Traços dos microconcretos para a DOSAGEM III

Cimento : Agregado (kg/kg)	a/c (kg/kg)	a/(c+sa) (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)*
1:0,15	0,34	0,31	1225
1:0,40	0,36	0,33	998
1:0,67	0,40	0,36	841
1:0,96	0,44	0,40	708
1:1,22	0,47	0,43	619
1:1,75	0,51	0,46	508
1:2,00	0,57	0,52	455

* Consumo de cimento efetivo descrito no item 7.6.3

DOSAGEM IV) Microconcretos com cimento Portland CPV-ARI-RS, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%).

Tabela 7.11: Traços dos microconcretos para a DOSAGEM IV

Cimento : Agregado (kg/kg)	a/c (kg/kg)	a/(c+sa) (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)*
1:0,15	0,35	0,32	1157
1:0,40	0,38	0,35	934
1:0,67	0,43	0,39	743
1:0,96	0,49	0,45	617
1:1,22	0,55	0,50	531
1:1,50	0,62	0,56	470

* Consumo de cimento efetivo descrito no item 7.6.3

DOSAGEM V) Microconcretos com cimento CPV-ARI-RS, utilizando o agregado composto de argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%).

Tabela 7.12: Traços dos microconcretos para a DOSAGEM V

Cimento : Agregado (kg/kg)	a/c (kg/kg)	a/(c+sa) (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)*
1:0,15	0,35	0,32	1205
1:0,40	0,37	0,34	1008
1:0,67	0,40	0,36	841
1:0,96	0,44	0,40	704
1:1,22	0,47	0,43	625
1:2,00	0,57	0,52	462

* Consumo de cimento efetivo descrito no item 7.6.3

7.5. Produção dos microconcretos

Os microconcretos foram moldados em corpos-de-prova cilíndricos de 75 mm x 150 mm, preparados em misturador planetário. Para os microconcretos adicionados de sílica ativa, as misturas eram realizadas da seguinte maneira:

- 1°) o cimento e a areia (quando utilizada) eram colocados inicialmente na cuba com parte da água, sem a argila expandida;
- 2°) era adicionada uma lama formada pela sílica ativa, o restante da água e o superplastificante;
- 3°) por último era colocada a argila expandida.

Logo após a mistura, a massa era colocada nas fôrmas e adensada em mesa vibratória com colocação de duas camadas.

Após a desforma (24 horas após a moldagem), os corpos-de-prova eram levados para a câmara úmida até as datas de seus respectivos ensaios.

A argila expandida era adicionada por último, pois adotou-se um método, sugerido por ARMELIN et al. (1994), com o objetivo de amenizar o problema da absorção de água pela argila expandida. Estes realizaram ensaios variando a ordem de colocação dos materiais e concluíram que a adição da argila expandida à pasta de cimento fluída mantém a trabalhabilidade por aproximadamente duas horas, enquanto que as outras misturas (colocando parte da argila expandida inicialmente) exigiam a redosagem do superplastificante. Além do menor consumo de aditivo e melhor manutenção da trabalhabilidade, segundo os mesmos, esta ordem de mistura apresenta maior controle e precisão de dosagem do aditivo na central dosadora.

Para o problema da absorção pela argila expandida e conseqüente perda de trabalhabilidade, ZHANG & GJORV (1991) misturavam inicialmente a argila expandida grossa com aproximadamente metade da água por 10 minutos. Então o cimento, a sílica ativa e os agregados leves miúdos, juntos com o resto da água e aditivos, eram adicionados e misturados por mais 5 minutos.

7.6. Ensaio realizados

7.6.1. Resistência à compressão (NBR-5739/74)

Foram moldados 12 corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão a 1 dia, 3 dias, 28 dias e 63 dias, para cada traço.

Para os microconcretos com sílica ativa foram ensaiados, para alguns traços, corpos-de-prova com 8 horas e 12 horas de idade.

Na data do ensaio os corpos-de-prova eram retirados da câmara úmida e capeados com pasta de enxofre para a obtenção de superfícies mais uniformes.

7.6.2. Resistência à tração por compressão diametral (NBR-7222/82)

Para as dosagens com sílica ativa foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral com 1 dia de idade. Juntamente com a cura adequada, a resistência à tração é importante para combater a fissuração por retração plástica e a fissuração por retração química (através da hidratação do cimento).

7.6.3. Massa específica no estado fresco (NBR-9833/87)

As massas específicas no estado fresco foram determinadas pelo método gravimétrico. Através dessas eram calculados os consumos de cimento reais (efetivos) a partir das seguintes relações:

- $C = \gamma / (1,115 + a + x)$, para microconcretos com sílica ativa e superplastificante;
- $C = \gamma / (1,015 + a + x)$, para microconcretos apenas com superplastificante

Onde: C = consumo de cimento (kg/m^3);

γ = massa específica no estado fresco (kg/m^3);

a = massa do agregado em relação ao cimento;

x = relação água/cimento.

7.6.4. Módulo de elasticidade (NBR-8522/83)

O módulo de elasticidade foi determinado para todos os traços, nas idades de 1 dia e 63 dias, a 50% da resistência de ruptura.

7.6.5. Massa específica (NBR-9778/86)

As massas específicas das amostras secas foram determinadas aos 28 dias, de acordo com a norma citada, para todos os traços.

7.7. Resultados obtidos

7.7.1. Resistência média à compressão, resistência média à tração, massa específica e fator de eficiência

Nas tabelas 7.13 a 7.17 são indicados os valores médios para a resistência à compressão (NBR-5739/74), resistência à tração por compressão diametral (NBR-7222/82), massa específica (NBR-9778/86) e fator de eficiência dos vários microconcretos ensaiados. Os fatores de eficiência foram determinados através da relação entre resistência à compressão e massa específica aos 28 dias de idade.

Tabela 7.13: Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, argila expandida e aditivo SPA (1,5%) - DOSAGEM I

Traço (massa)	f_{c1} (MPa)	f_{c3} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{c63} (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
1:0,15 x=0,30	40,9	53,2	64,0	70,6	1754	36,5
1:0,40 x=0,35	39,0	49,3	50,2	59,6	1557	32,2
1:0,67 x=0,40	33,7	44,5	45,0	52,0	1450	31,2
1:0,96 x=0,45	24,7	36,4	42,4	47,6	1358	33,1
1:1,22 x=0,50	15,2	31,6	40,7	43,3	1319	30,9
1:1,50 x=0,55	12,8	26,0	34,1	37,3	1295	26,3

Tabela 7.14: Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) - DOSAGEM II

Traço (massa)	f_c 8 horas (MPa)	f_c 12 horas (MPa)	f_{c1} (MPa)	f_{c3} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{c63} (MPa)	f_{t1} (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
1:0,15 x=0,33	2,49	14,9	61,4	69,2	72,0	73,4	3,7	1701	42,3
1:0,40 x=0,37	1,36	10,3	47,6	53,4	66,5	72,5	2,5	1559	42,7
1:0,67 x=0,42	0,5	3,5	43,3	46,2	62,0	58,3	2,2	1476	42,0
1:0,96 x=0,48	0,5	3,2	37,3	44,0	56,3	53,9	2,2	1395	40,4
1:1,22 x=0,54	0,5	0,9	32,8	39,2	52,0	50,7	1,3	1373	37,9
1:1,50 x=0,62	-	-	22,8	38,0	46,5	46,1	-	1310	35,5

Tabela 7.15: Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM III

Traço (massa)	f_c 8 horas (MPa)	f_c 12 horas (MPa)	f_{c1} (MPa)	f_{c3} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{c63} (MPa)	f_{t1} (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
1:0,15 x=0,34	1,3	11,5	51,2	62,0	73,4	70,1	2,8	1719	42,7
1:0,40 x=0,36	-	-	49,1	60,5	69,6	71,9	-	1686	41,3
1:0,67 x=0,40	0,6	6,6	46,1	56,6	68,3	67,5	2,3	1661	41,1
1:0,96 x=0,44	0,5	5,3	43,9	52,2	66,2	61,2	2,2	1597	41,5
1:1,22 x=0,47	0,5	3,7	38,4	54,3	62,8	61,1	2,2	1596	39,3
1:1,75 x=0,51	0,3	2,3	34,8	48,3	59,2	56,7	1,7	1593	37,2
1:2,00 x=0,57	-	-	28,0	40,8	54,6	51,3	-	1547	35,3

Tabela 7.16: Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI-RS, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) - DOSAGEM IV

Traço (massa)	f_c	f_c	f_{c1}	f_{c3}	f_{c28}	f_{c63}	f_{t1}	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
	8 horas (MPa)	12 horas (MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
1:0,15 x=0,35	0,3	1,5	43,9	58,3	69,4	74,9	1,8	1632	42,5
1:0,40 x=0,38	0,3	1,4	39,2	52,9	62,7	63,1	1,3	1553	40,4
1:0,67 x=0,43	0,3	1,2	34,0	46,2	56,5	61,2	1,1	1475	38,3
1:0,96 x=0,49	0,2	1,1	24,1	43,7	49,4	55,8	0,9	1404	35,2
1:1,22 x=0,55	0,2	0,9	22,2	36,5	47,7	51,7	0,9	1371	34,8
1:1,50 x=0,62	-	-	18,6	30,7	46,5	51,2	-	1314	35,4

Tabela 7.17: Propriedades dos microconcretos com CPV-ARI-RS, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM V

Traço (massa)	f_c	f_c	f_{c1}	f_{c3}	f_{c28}	f_{c63}	f_{t1}	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
	8 horas (MPa)	12 horas (MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
1:0,15 x=0,35	0,3	1,9	46,5	57,4	68,5	86,4	1,4	1674	40,9
1:0,40 x=0,37	0,3	1,3	40,6	52,0	64,5	78,4	1,1	1634	39,5
1:0,67 x=0,40	-	-	37,2	49,4	62,3	73,9	-	1609	38,7
1:0,96 x=0,44	0,2	1,2	29,1	45,8	61,5	64,2	0,6	1557	39,5
1:1,22 x=0,47	0,2	1,0	27,8	39,6	55,4	66,7	0,5	1520	36,4
1:2,00 x=0,57	0,2	0,9	20,9	33,1	53,1	56,6	0,5	1517	35,0

7.7.2. Módulo de elasticidade

Os resultados dos módulos de elasticidade tangente a 50% da resistência de ruptura (1 dia e 63 dias), para todos os traços, são mostrados nas tabelas 7.18 a 7.22.

Tabela 7.18: Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, argila expandida e aditivo SPA (1,5%) - **DOSAGEM I**

Traço (massa)	E_1 (GPa)	E_{63} (GPa)
1:0,15: x=0,30	11,4	19,0
1:0,40: x=0,35	11,4	17,1
1:0,67: x=0,40	9,3	15,1
1:0,96: x=0,45	8,4	13,4
1:1,22: x=0,50	7,4	12,0
1:1,50: x=0,55	7,4	10,9

Tabela 7.19: Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) - **DOSAGEM II**

Traço (massa)	E_1 (GPa)	E_{63} (GPa)
1:0,15: x=0,33	12,4	18,2
1:0,40: x=0,37	10,9	17,3
1:0,67: x=0,42	9,8	15,5
1:0,96: x=0,48	8,7	14,7
1:1,22: x=0,54	8,3	10,6
1:1,50: x=0,62	7,6	8,6

Tabela 7.20: Módulos de elasticidade para os microconcretos com CPV-ARI, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM III

Traço (massa)	E_1 (GPa)	E_{63} (GPa)
1:0,15: x=0,34	11,9	18,6
1:0,40: x=0,36	10,7	18,4
1:0,67: x=0,40	10,6	17,7
1:0,96: x=0,44	9,4	17,2
1:1,22: x=0,47	8,5	12,3
1:1,75: x=0,51	7,6	11,3
1:2,00: x=0,57	6,9	8,5

Tabela 7.21: Módulos de elasticidade para microconcretos com CPV-ARI-RS, argila expandida, sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) - DOSAGEM IV

Traço (massa)	E_1 (GPa)	E_{63} (GPa)
1:0,15: x=0,35	5,8	11,5
1:0,40: x=0,38	5,3	11,2
1:0,67: x=0,43	4,4	9,8
1:0,96: x=0,49	4,0	9,3
1:1,22: x=0,55	3,5	8,4
1:1,50: x=0,62	2,2	8,3

Tabela 7.22: Módulos de elasticidade para microconcretos com CPV-ARI-RS, agregado composto por argila expandida (60%) e areia (40%), sílica ativa (10%) e aditivo SPA (1,5%) – DOSAGEM V

Traço (massa)	E_1 (GPa)	E_{63} (Gpa)
1:0,15: x=0,35	6,3	11,7
1:0,40: x=0,37	5,7	10,9
1:0,67: x=0,40	4,9	9,6
1:0,96: x=0,44	4,6	9,0
1:1,22: x=0,47	3,8	8,1
1:2,00: x=0,57	3,4	7,2

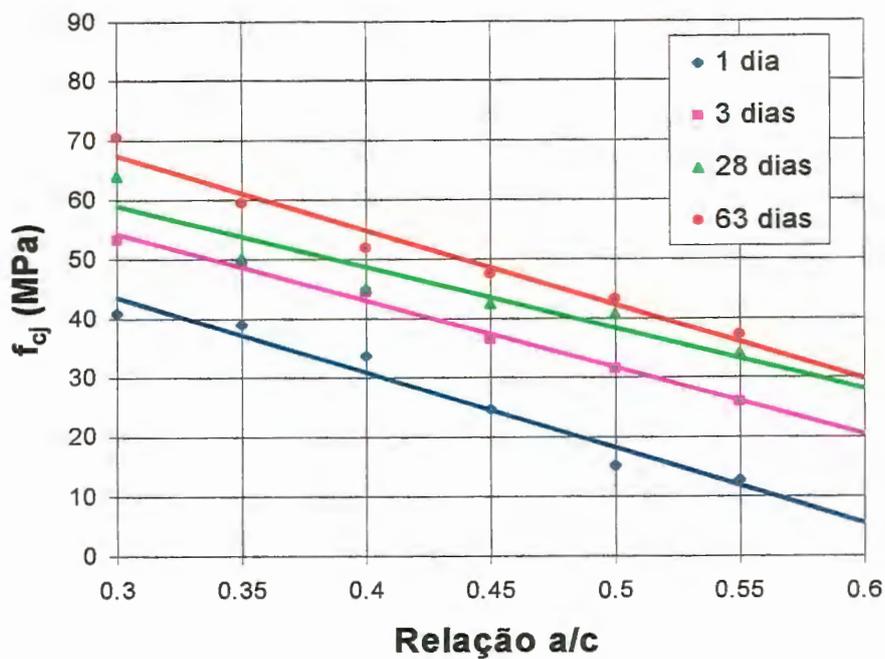
7.8. Análise dos resultados

Através dos resultados obtidos nos experimentos, foram elaborados gráficos, relacionando as principais características dos microconcretos (resistência à compressão, massa específica, fator de eficiência, relação a/c e consumo de cimento), podendo-se, assim, melhor analisar os seus comportamentos.

7.8.1. Resistência à compressão

As figuras 7.4 a 7.8 mostram as resistências à compressão em função das relações a/c, para cada tipo de dosagem.

DOSAGEM I (CPV-ARI + ARGILA)



DOSAGEM II (CPV-ARI + ARGILA + SÍLICA ATIVA)

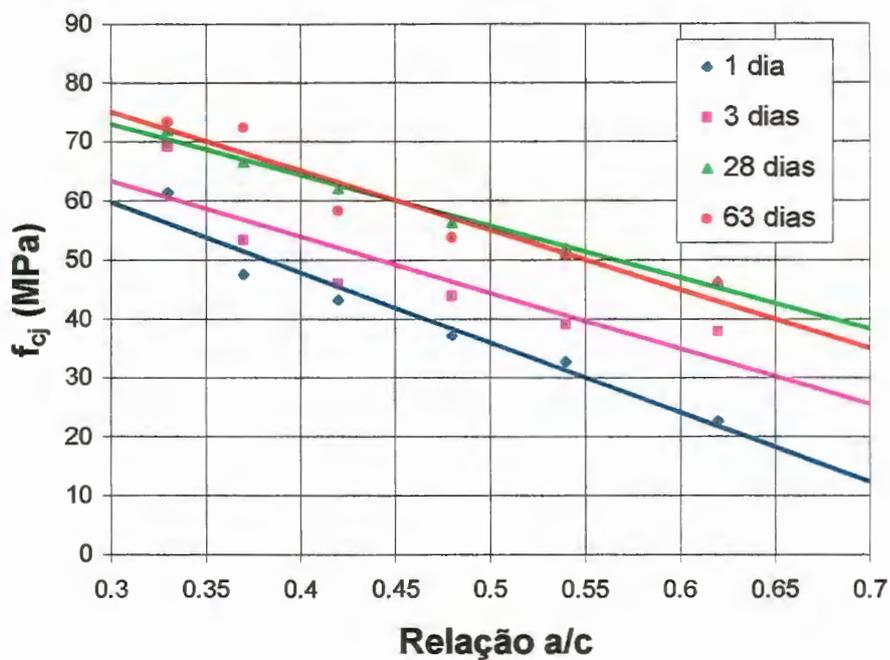
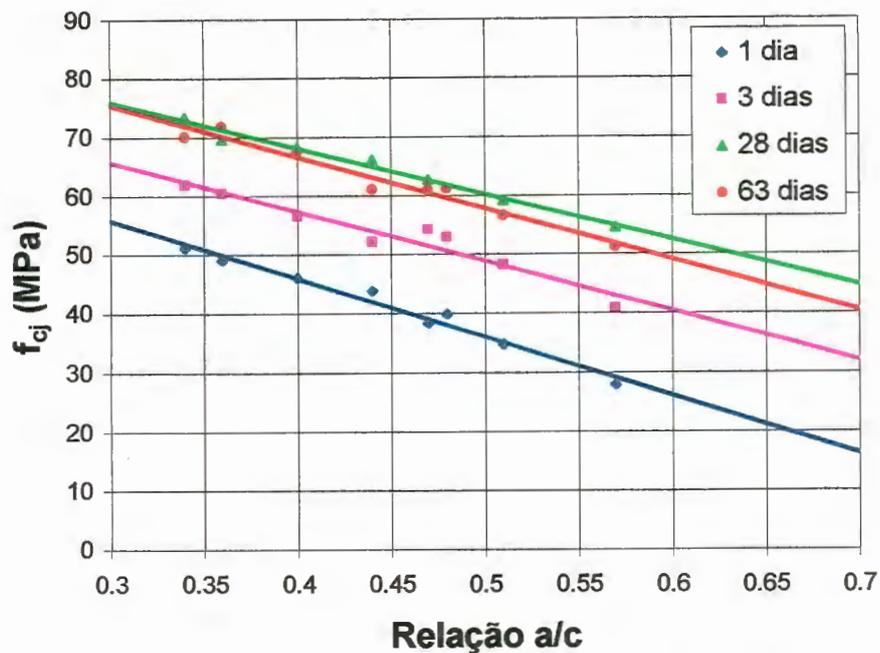
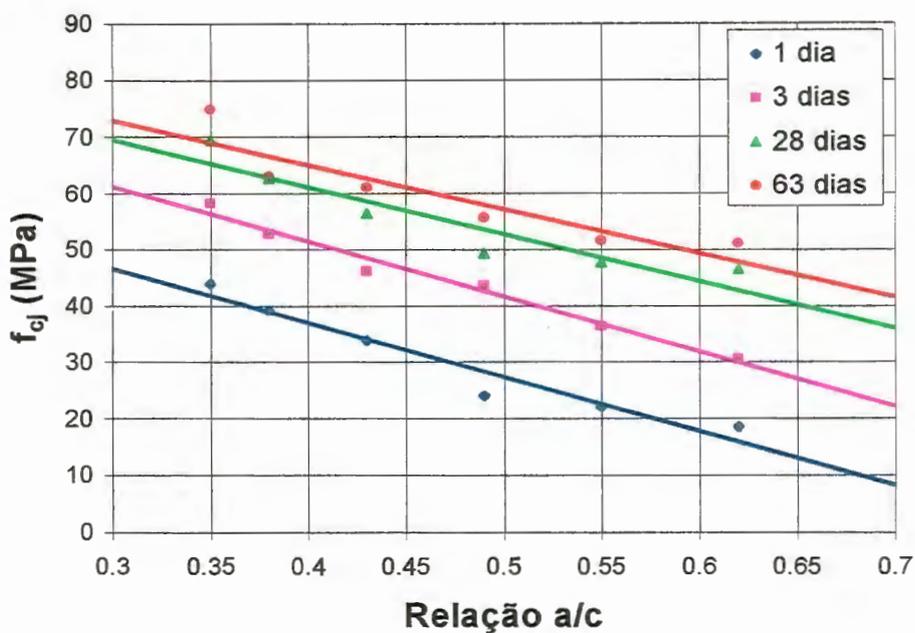


Figura 7.4 e 7.5: Gráfico f_{cj} x relação a/c para a DOSAGEM I e DOSAGEM II

DOSAGEM III (CPV-ARI + ARGILA + AREIA + SÍLICA ATIVA)



DOSAGEM IV (CPV-ARI-RS + ARGILA + SÍLICA ATIVA)



Figuras 7.6 e 7.7: Gráficos f_{cj} x relação a/c para as DOSAGENS III e IV

DOSAGEM V (CPV-ARI-RS + ARGILA + AREIA + SÍLICA ATIVA)

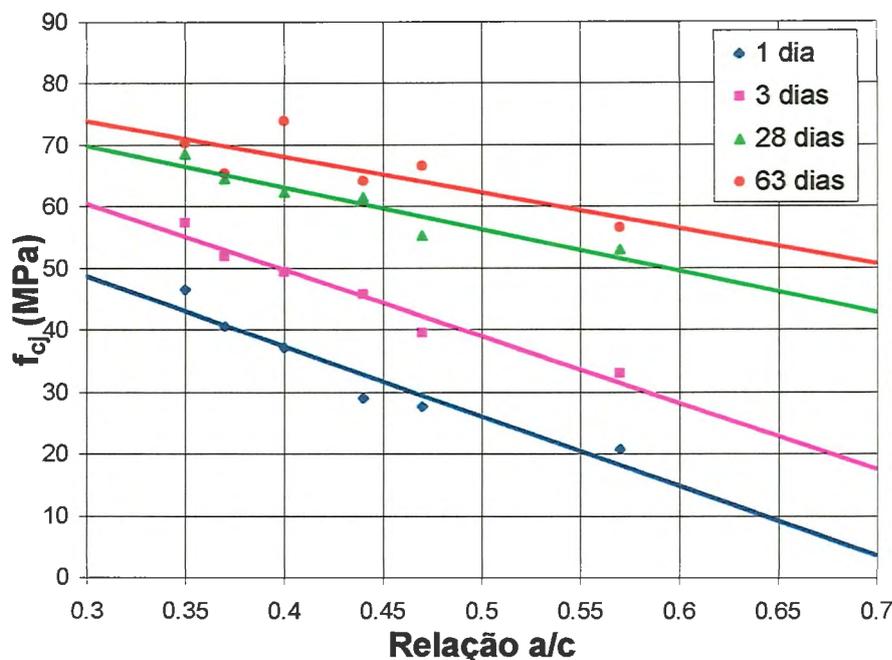


Figura 7.8: Gráficos f_{c_j} x relação a/c para as DOSAGENS V

Através dos gráficos que mostram o comportamento das resistências à compressão em função da relação a/c, nota-se grande aumento de resistência, para todas as idades, quando adiciona-se a sílica ativa aos microconcretos. Embora vários autores comentem que o aumento das resistências mecânicas de concretos com sílica ativa ocorre em idades mais avançadas (entre 3 dias e 28 dias), verificou-se que a resistência à compressão no 1º dia de idade teve um aumento considerável com a adição do material. Citam-se, como exemplo, os microconcretos com cimento CPV-ARI, argila expandida e sílica ativa (DOSAGEM II), que apresentaram resistência em torno de 36 MPa para relação a/c de 0,50, com 1 dia de idade, enquanto que os mesmos microconcretos, porém, sem adição de sílica ativa (DOSAGEM I), apresentaram resistência próxima de 18 MPa para a mesma relação a/c, conferindo acréscimo de 100% quando utilizou-se a adição. Essa taxa de crescimento se confirma principalmente para os traços mais pobres, porém, para os traços mais ricos, por exemplo com

relação a/c de 0,35, o crescimento é da ordem de 40%. A figura 7.9 ilustra este fato.

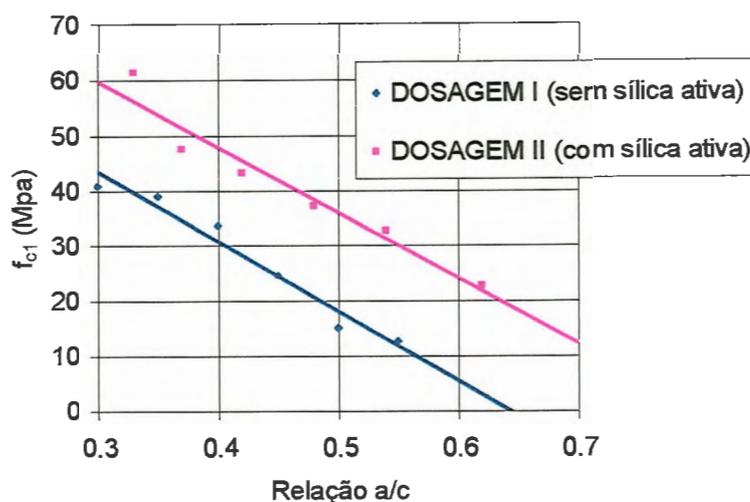


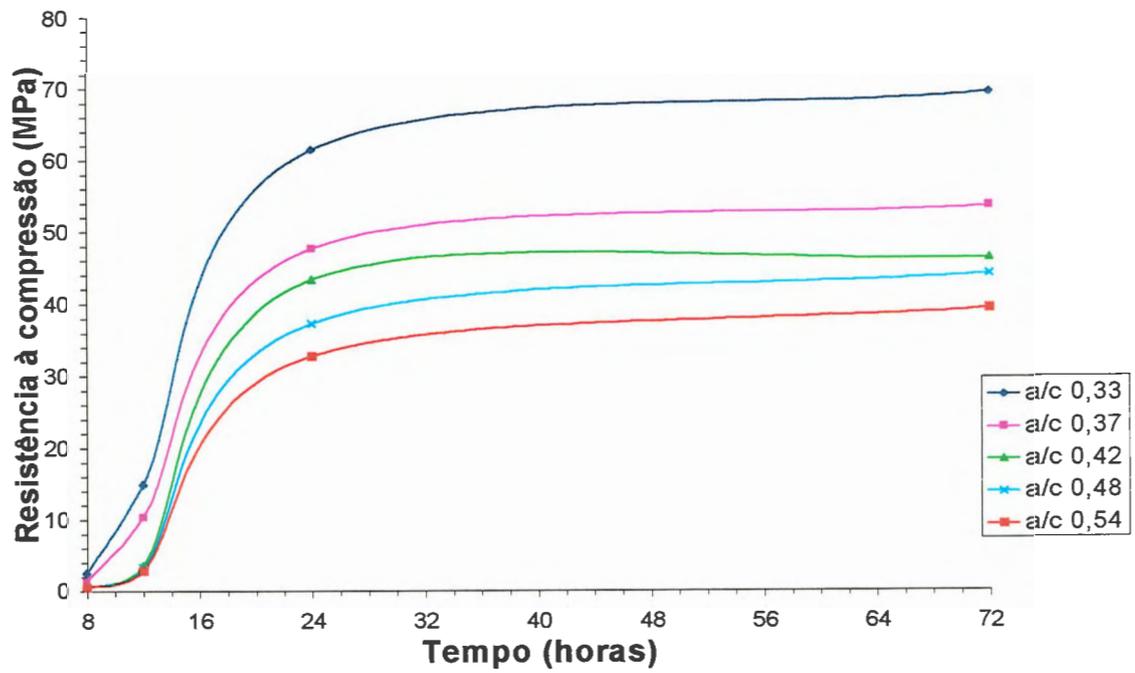
Figura 7.9: f_{c1} x relação a/c para a DOSAGEM I e DOSAGEM II

Nota-se também que, nas DOSAGENS II e III, as resistências à compressão aos 63 dias apresentaram uma pequena redução em relação às resistências aos 28 dias de idade a medida que crescia a relação a/c . Os microconcretos contendo cimento CPV-ARI-RS não apresentaram esta redução de resistência.

As figuras 7.10, 7.11, 7.12 e 7.13 mostram o desenvolvimento das resistências à compressão de 8 horas a 72 horas de idade, para os microconcretos referentes às DOSAGEM II, DOSAGEM III, DOSAGEM IV e DOSAGEM V, respectivamente. Através destas definem-se os tempos adequados para a desforma (entre 9 e 10 MPa) e de cura do material (até 70% do f_{ck}).

Os microconcretos produzidos com cimento CPV-ARI já apresentavam crescimento de resistência com 8 horas, enquanto que os que possuíam cimento CPV-ARI-RS só apresentaram crescimento de resistência a partir das 12 horas de idade.

DOSAGEM II (CPV-ARI + ARGILA + SÍLICA ATIVA)



DOSAGEM III (CPV-ARI + ARGILA + AREIA + SÍLICA ATIVA)

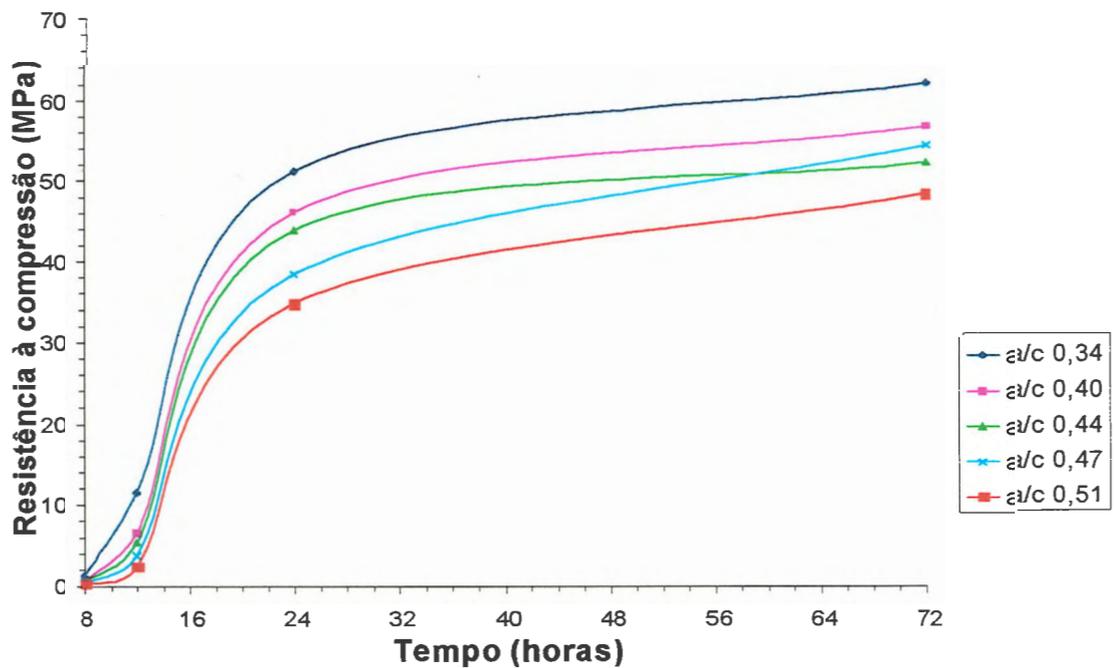
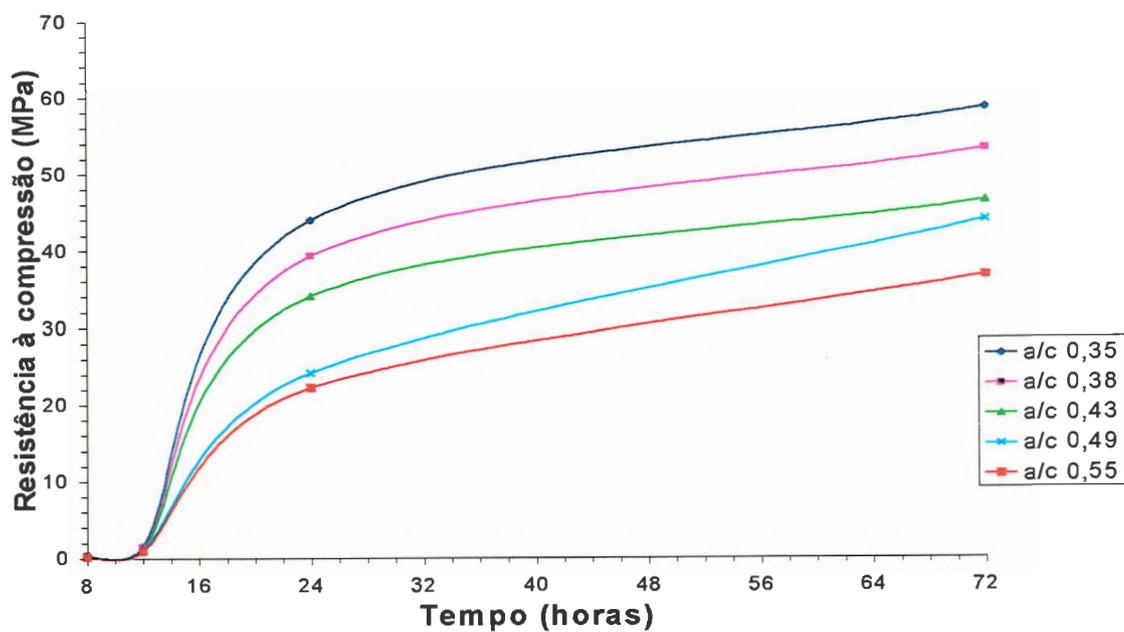


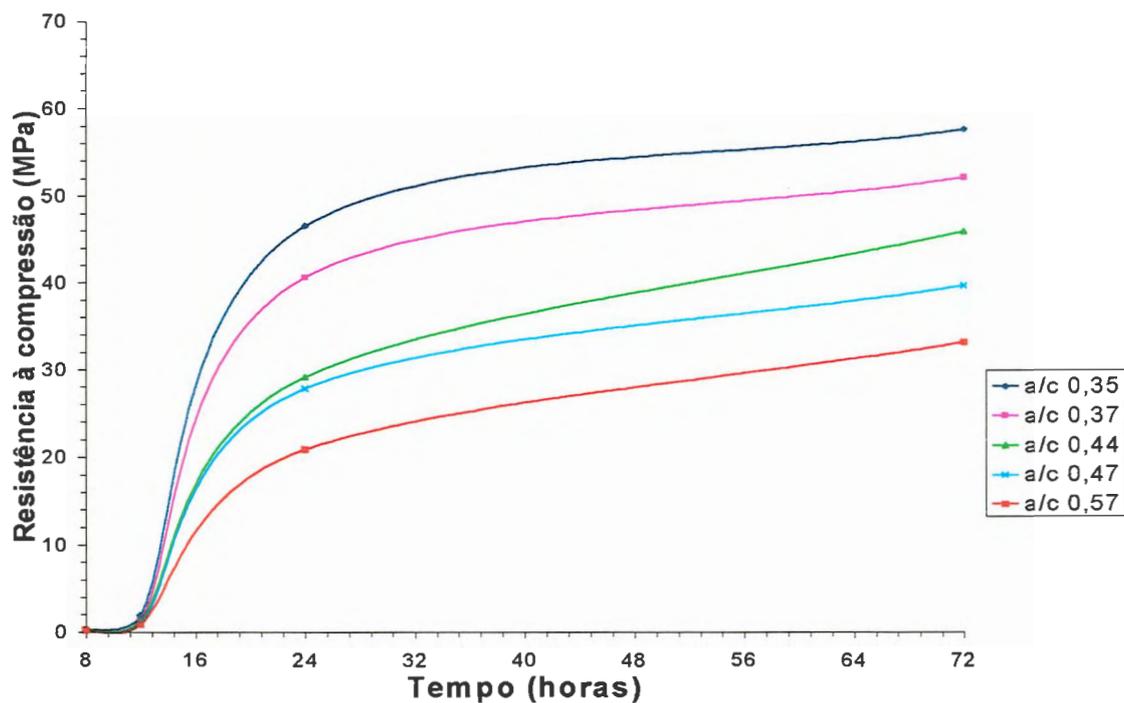
Figura 7.10 e 7.11: Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM II e DOSAGEM III, respectivamente.



DOSAGEM IV (CPV-ARI-RS + ARGILA + SÍLICA ATIVA)



DOSAGEM V (CPV-ARI-RS + ARGILA + AREIA + SÍLICA ATIVA)



Figuras 7.12 e 7.13: Desenvolvimento da resistência à compressão, nas primeiras 72 horas de idade, para os microconcretos da DOSAGEM IV e DOSAGEM V, respectivamente.

7.8.2. Consumo de cimento

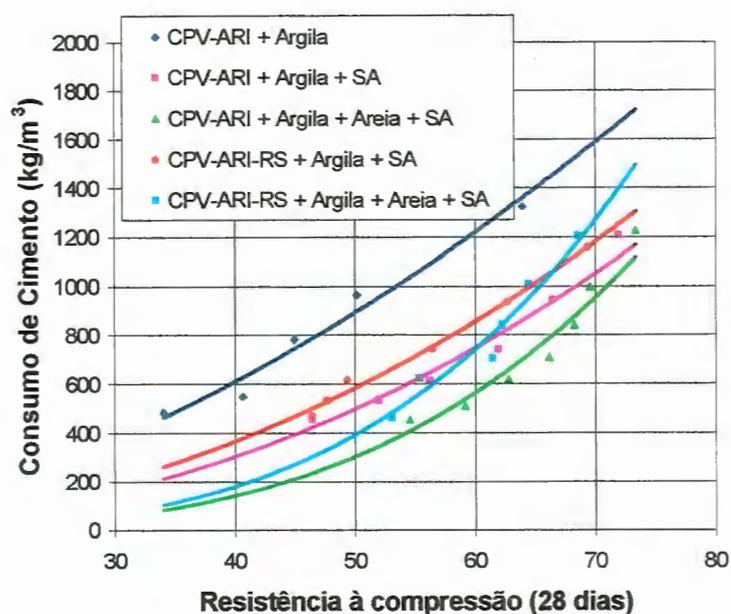


Figura 7.14 : Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e consumo de cimento

Quanto ao consumo de cimento, nota-se, através da figura 7.14, grande diferença entre os microconcretos adicionados de sílica ativa e os sem adição. Os microconcretos com cimento CPV-ARI, contendo areia em substituição parcial à argila expandida (DOSAGEM III), demonstraram menores consumos em relação aos demais, provavelmente devido a formação de uma melhor composição granulométrica quando se utiliza os dois tipos de agregados.

Pôde-se verificar, também, que os microconcretos contendo cimento CPV-ARI-RS apresentaram consumos de cimento mais acentuados, para os mesmos níveis de resistência, em relação aos microconcretos com cimento CPV-ARI contendo os mesmos materiais.

Analisando-se os microconcretos de uma forma global, dando-se importância tanto à resistência à compressão quanto à massa específica,

comprovou-se que, dentro desse aspecto, os microconcretos com CPV-ARI, argila, sílica ativa e sem areia (DOSAGEM II) apresentaram resultados semelhantes aos dos microconcretos com areia (DOSAGEM III), como mostra a figura 7.15.

Deste modo, para atingirem o mesmo nível de fator de eficiência, os microconcretos contendo cimento CPV-ARI e sílica ativa (DOSAGEM II e DOSAGEM III) apresentaram consumos de cimento menos elevados que os demais. Já os microconcretos sem adição de sílica ativa (DOSAGEM I) necessitaram de altíssimos consumos de cimento para a mesma situação.

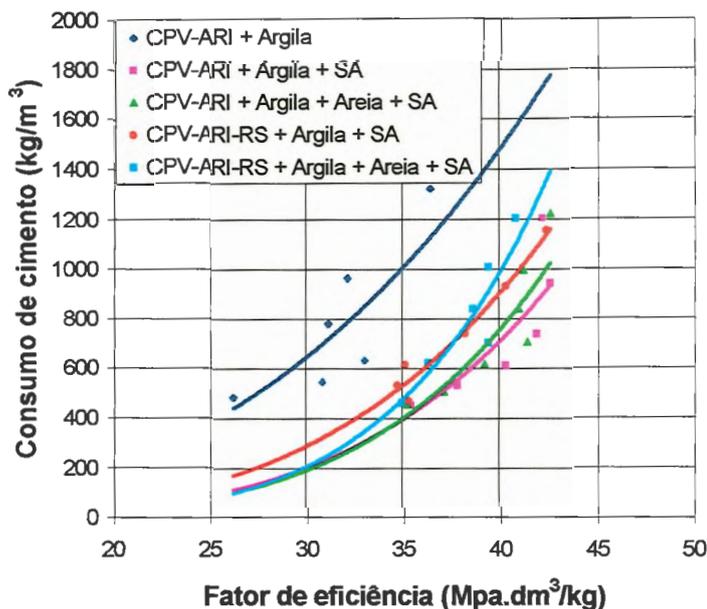


Figura 7.15: Relação entre fatores de eficiência e consumos de cimento

Quanto ao consumo de cimento, pode-se dizer que a inclusão de areia traz benefícios apenas quando a análise é feita em relação à resistência mecânica, porém, quando deseja-se, também, a redução da massa específica do material, esta não apresenta nenhuma vantagem.

7.8.3. Fator de eficiência

A partir da figura 7.16, que relaciona massa específica e resistência à compressão, constatou-se que os microconcretos produzidos com cimento CPV-ARI, argila e sílica ativa (DOSAGEM II) apresentaram menores massas específicas, para os mesmos níveis de resistência à compressão, em relação aos demais microconcretos. Os microconcretos com areia (DOSAGEM III e DOSAGEM V) apresentaram massas específicas mais elevadas que os que não possuíam areia (DOSAGEM II e DOSAGEM IV).

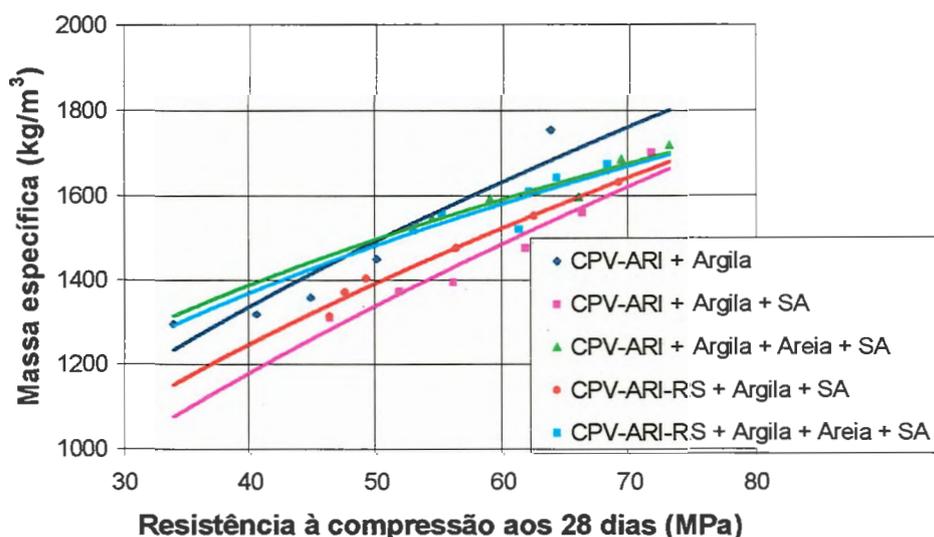


Figura 7.16: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica

A figura 7.17 mostra o comportamento do fator de eficiência em função do relação a/c dos microconcretos ensaiados. Percebe-se, mais uma vez, a grande vantagem da adição de sílica ativa e o melhor desempenho dos microconcretos contendo cimento CPV-ARI (DOSAGEM II e DOSAGEM III).

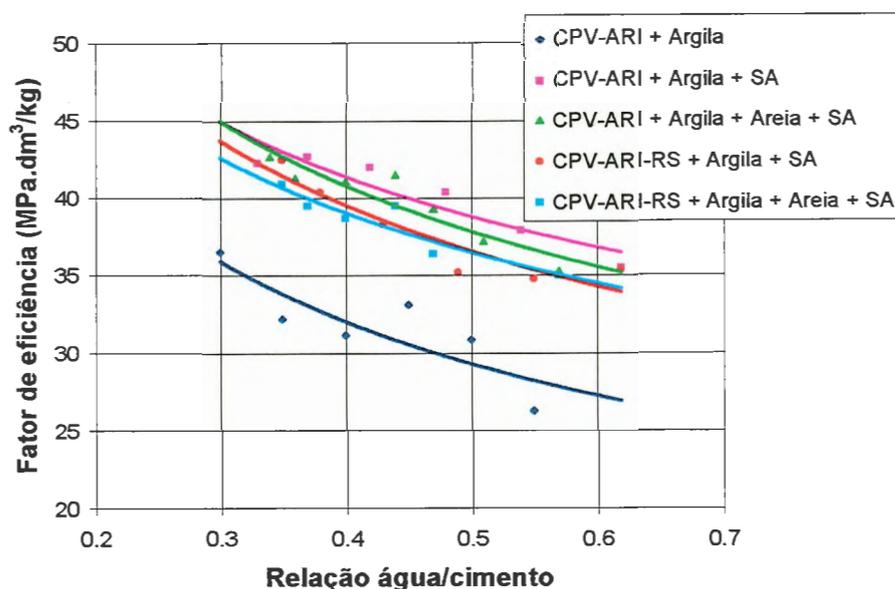


Figura 7.17: Relação entre fator de eficiência e relação a/c

7.8.4. Resistência à tração por compressão diametral

A partir dos ensaios de tração por compressão diametral concluiu-se que os microconcretos já apresentavam resultados, com 1 dia de idade (tabelas 7.13 a 7.17), para combater, juntamente com a cura adequada (por submersão), as fissuras por retração plástica e química.

7.8.5. Comportamento das curvas tensão x deformação

As figuras 7.18 a 7.24 mostram o comportamento das curvas tensão x deformação para os diversos tipos de microconcretos, de acordo com as variáveis existentes (consumo de cimento, adição de sílica ativa, utilização de areia e tipo de cimento).

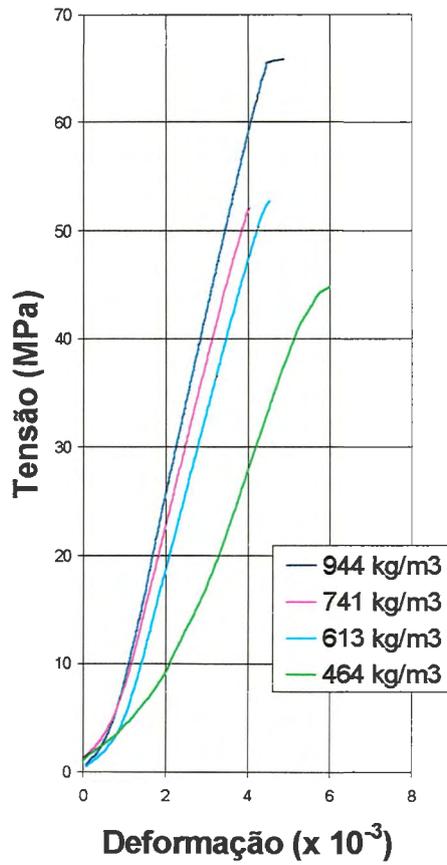
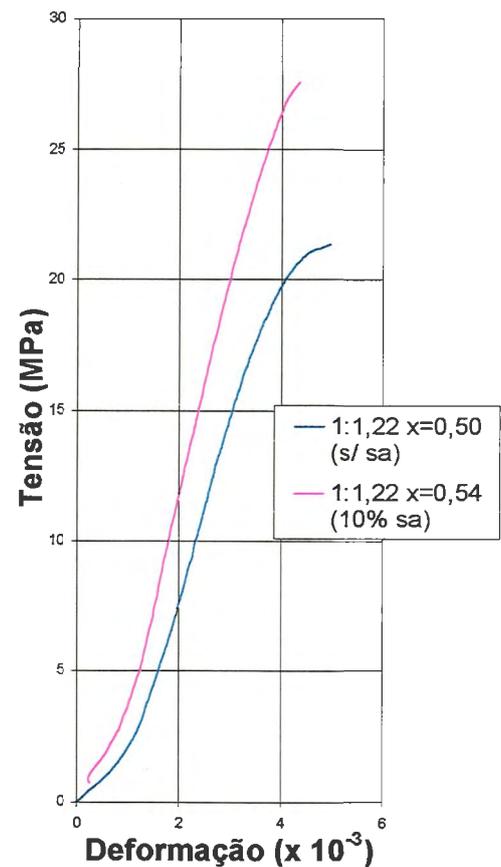


Figura 7.19: Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem sílica ativa, com 1 dia (DOSAGEM I e DOSAGEM II).

Figura 7.18: Variação das curvas tensão x deformação dos diferentes consumos de cimento, para a DOSAGEM II, com 63 dias.



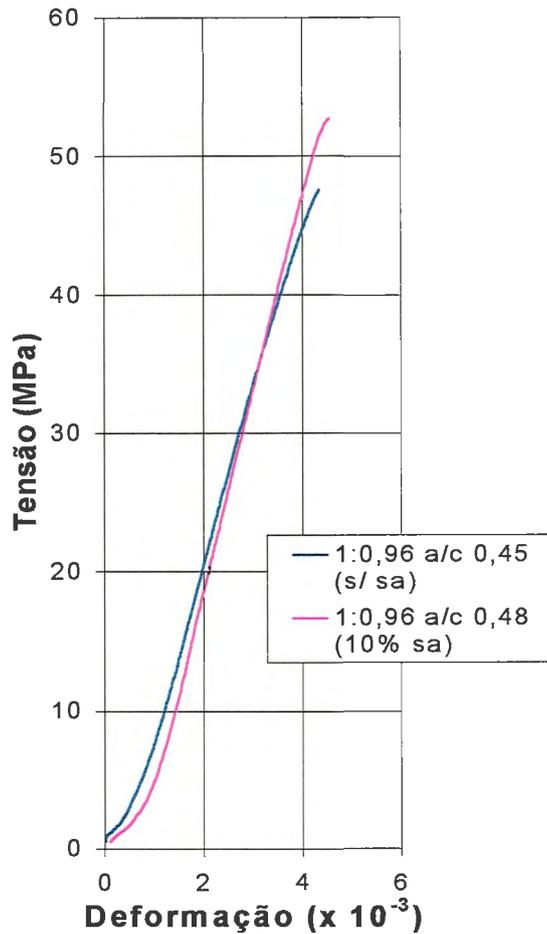
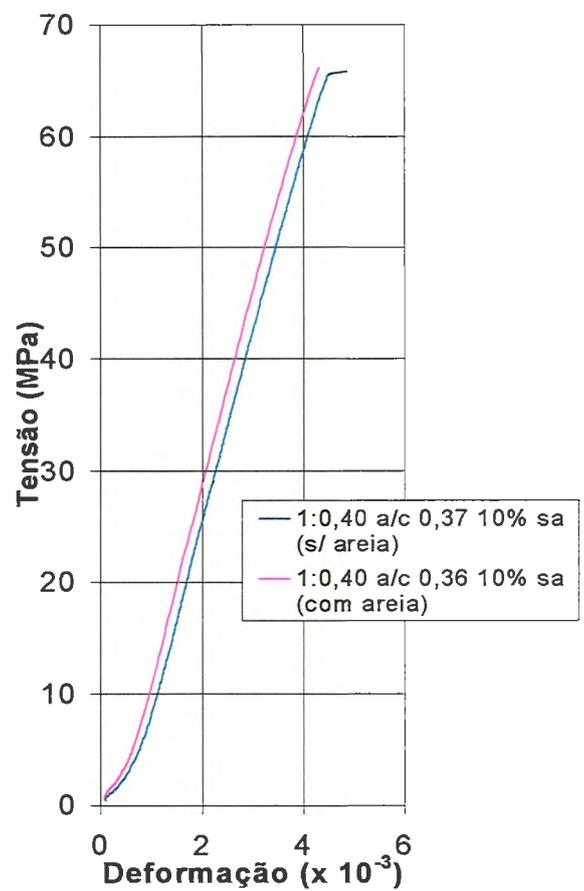


Figura 7.20: Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem sílica ativa com 63 dias (DOSAGEM I e DOSAGEM II).

Figura 7.21: Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem areia com 63 dias (DOSAGEM II e DOSAGEM III)



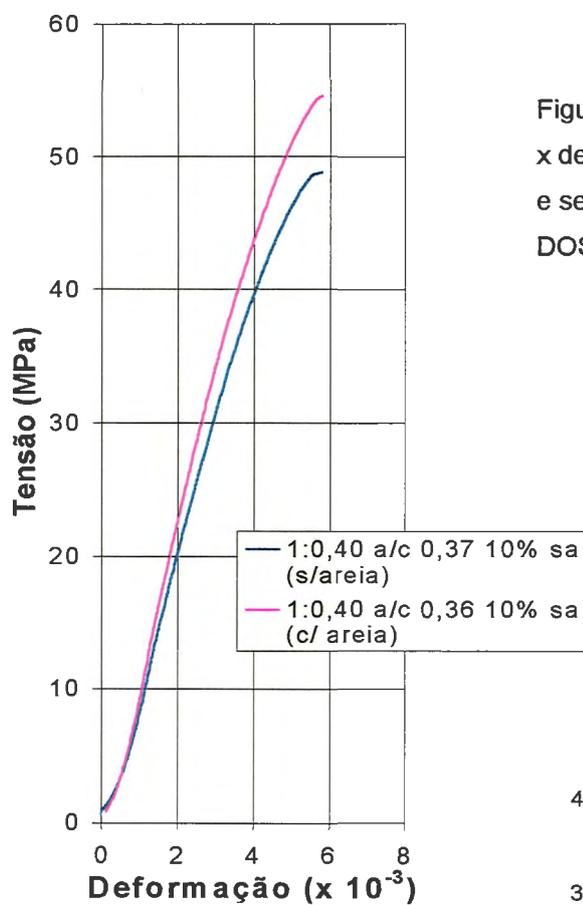
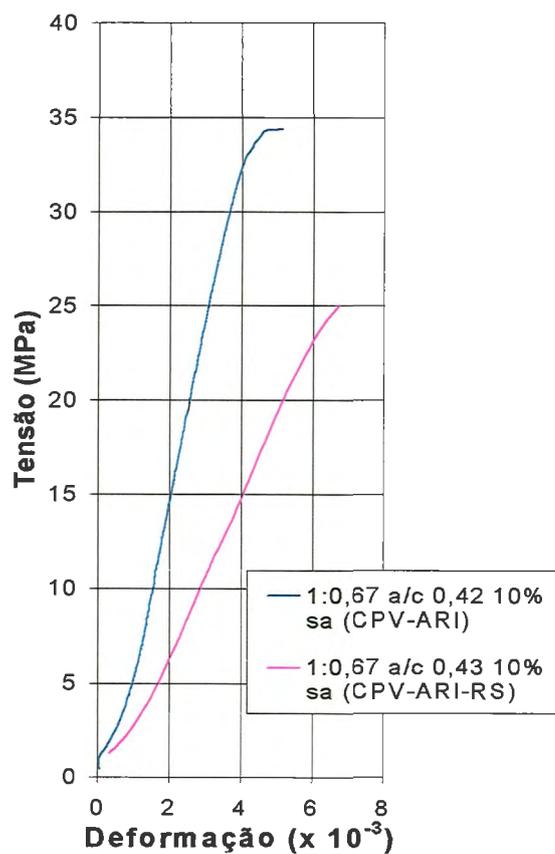


Figura 7.22: Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com e sem areia, com 1 dia (DOSAGEM II e DOSAGEM III).

Figura 7.23: Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com cimentos diferentes, a 1 dia (DOSAGEM II e DOSAGEM IV)



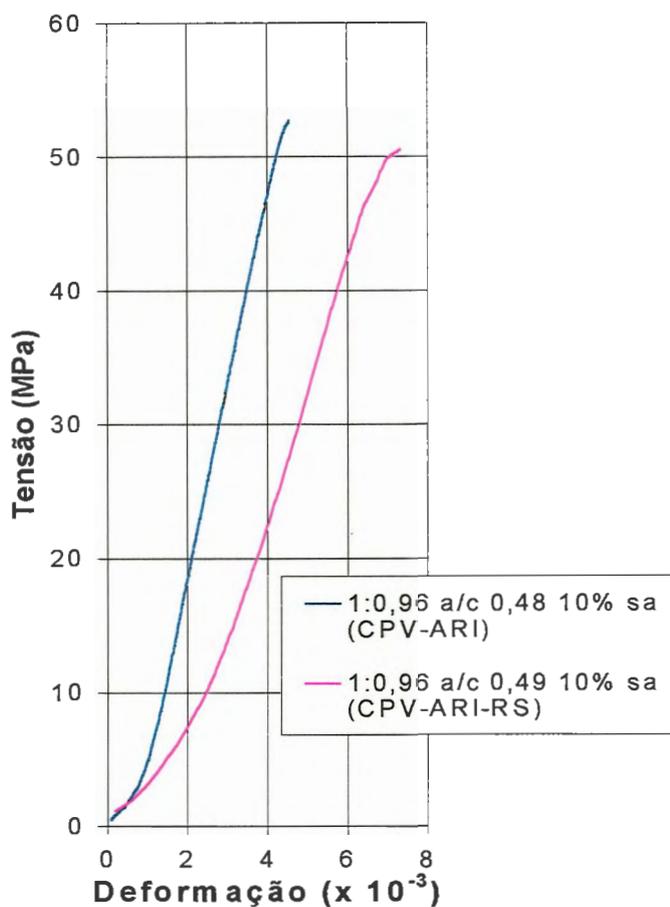


Figura 7.24 : Variação das curvas tensão x deformação para microconcretos com cimentos diferentes, aos 63 dias (DOSAGEM II e DOSAGEM IV)

Analisando-se os gráficos de comparação entre as curvas tensão x deformação, pôde-se comprovar as seguintes observações, feitas também por ZHANG & GJORV (1991), para concretos leves de alto desempenho:

- Pela figura 7.18 comprova-se que a deformação última decresce com o aumento do conteúdo de cimento e que quanto maior o consumo mais

linear é a relação tensão/deformação, devido a baixa deformabilidade com altos conteúdos de cimento;

- Também verifica-se, através da figura 7.19, que a curva tensão x deformação é mais linear para os microconcretos com sílica ativa em comparação aos sem adição, devido a melhor zona interfacial entre o agregado e a pasta de cimento nos microconcretos com sílica ativa. Porém, alguns resultados mostraram uma semelhança no comportamento das curvas tensão x deformação, como no caso da figura 7.20 , para 63 dias;
- A substituição parcial da argila expandida pela areia natural praticamente não tem nenhuma influência sobre as curvas tensão x deformação dos microconcretos, como mostram as figuras 7.21 e 7.22;
- Os microconcretos com cimento CPV-ARI-RS demonstraram deformações bem mais acentuadas que os produzidos com cimento CPV-ARI, tanto para 1 dia, quanto para 63 dias. Esta observação é ilustrada nas figuras 7.23 e 7.24.

7.9. Comparação com microconcretos de massa específica normal

7.9.1. Realização dos ensaios

Com o objetivo de comparação, foram realizados alguns ensaios em microconcretos de massa específica normal, utilizando traços de ensaios já realizados por AGNESINI & SILVA (1997). Os microconcretos possuíam agregados com dimensão máxima característica de 9,5 mm (não apresentando grande diferença em relação aos utilizados nos microconcretos leves) e foram moldados com os mesmos cimentos utilizados na produção dos microconcretos leves (CPV-ARI e CPV-ARI-RS). Os agregados utilizados foram a areia natural quartzosa (mesma utilizada nos concretos leves, substituindo parcialmente a argila expandida) e

agregado graúdo proveniente de basalto britado com as seguintes características:

- composição granulométrica (NBR-7217/87): foram utilizadas pedras britadas de graduação 0 (zero), com módulo de finura (MF) igual a 5,11;
- substâncias nocivas: o agregado preencheu todos os requisitos da norma NBR-7211 (1982), quanto a presença de substâncias nocivas ao concreto;
- índices físicos: massa específica = $2,90 \text{ kg/dm}^3$ (NBR-9776/87), massa unitária = $1,47 \text{ kg/dm}^3$ (NBR-7251/82), massa unitária no estado compactado seco = $1,67 \text{ kg/dm}^3$ (NBR-7810/82).
- forma dos grãos: o índice de forma (NBR-7809) apresentou para o agregado em questão valor inferior a 3, portanto, enquadrado na respectiva especificação (NBR-7211/82).

A sílica ativa e o aditivo foram os mesmos utilizados na produção dos microconcretos leves, porém a proporção da sílica ativa para os concretos de massa específica normal foi de 15% em relação à massa de cimento. A produção dos microconcretos foi de forma idêntica para os dois casos. Na tabela 7.23 são apresentados os traços utilizados. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 7.24.

Tabela 7.23: Traços em massa dos microconcretos de massa específica normal

Cimento	1:a:p	a/c (kg/kg)	a/c+sa (kg/kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
CPV-ARI	1:0,75:1,75	0,31	0,27	627
	1:1,20:2,20	0,37	0,32	504
	1:1,65:2,60	0,42	0,36	427
CPV-ARI-RS	1:0,75:1,75	0,33	0,29	619
	1:1,20:2,20	0,39	0,34	498
	1:1,65:2,60	0,42	0,36	427

abela 7.24: Resultados dos ensaios para microconcretos de massa específica normal*

Cimento	1:a:p	f_{c28} (MPa)	Massa específica (kg/m³)	Fator de eficiência (MPa.dm³/kg)
CPV-ARI	1:0,75:1,75 x=0,31	88,8	2346	37,9
	1:1,20:2,20 x=0,37	87,9	2340	37,5
	1:1,65:2,60 x=0,42	79,3	2331	34,0
CPV-ARI-RS	1:0,75:1,75 x=0,33	75,4	2333	32,3
	1:1,20:2,20 x=0,39	74,3	2315	32,1
	1:1,65:2,60 x=0,42	71,3	2344	30,4

7.9.2. Discussão dos resultados

A partir dos ensaios realizados para os dois tipos de microconcretos foram montados gráficos comparativos que relacionam os microconcretos leves, referentes à DOSAGEM II (CPV-ARI, argila e sílica ativa) e à DOSAGEM III (CPV-ARI, argila, areia e sílica ativa), e os microconcretos de massa específica normal moldados com CPV-ARI, areia, pedra britada e sílica ativa. As mesmas tendências encontradas para estes foram também notadas para os microconcretos moldados com cimento CPV-ARI-RS.

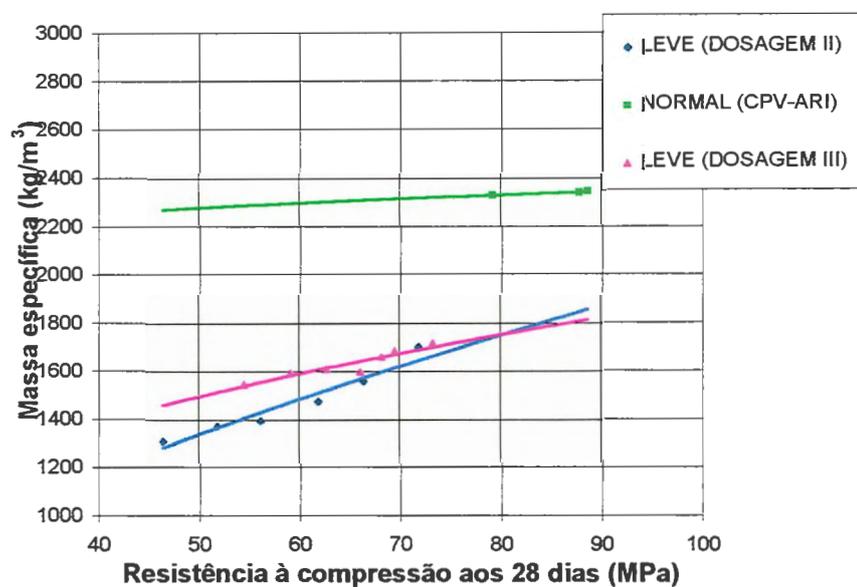


Figura 7.25: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e massa específica para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.

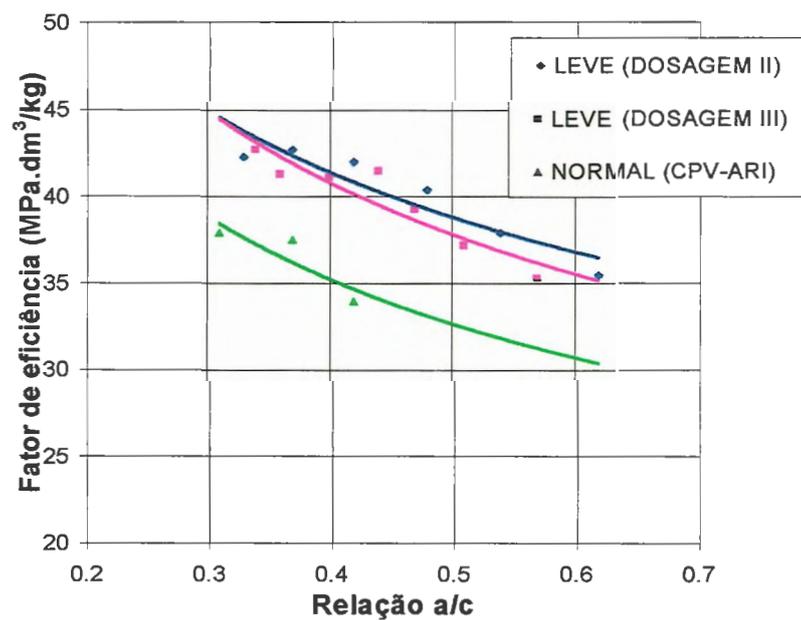


Figura 7.26: Relação entre fator de eficiência e relação água/cimento para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI.

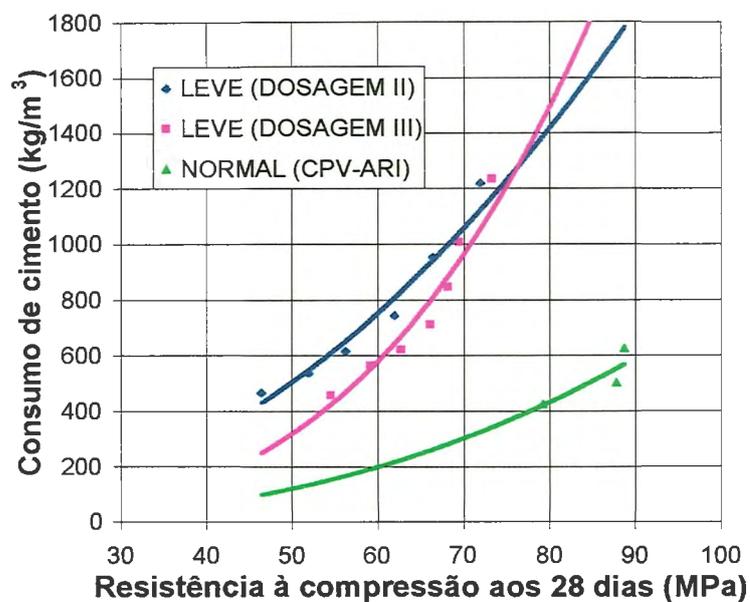


Figura 7.27: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e consumo de cimento para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI

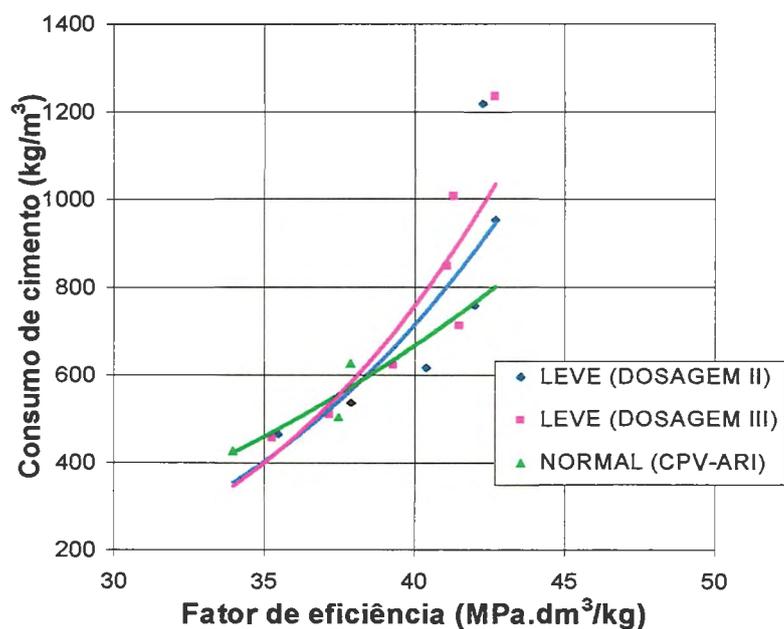


Figura 7.28: Relação entre fator de eficiência e consumo de cimento para microconcretos leves e normais com cimento CPV-ARI

Através das figuras 7.25 e 7.26 nota-se a grande vantagem dos microconcretos leves, em relação aos de massa específica normal, referente ao fator de eficiência. Com relação ao consumo de cimento, se for feita uma análise considerando-se apenas a resistência à compressão, os microconcretos de massa específica normal mostram-se mais econômicos que os microconcretos leves (figura 7.27), porém, analisando-se os microconcretos de uma forma global, considerando tanto a resistência à compressão quanto a massa específica, comprova-se que os comportamentos, em relação ao consumo de cimento, são semelhantes para os dois tipos de microconcretos (figura 7.28).

7.10. Exemplos práticos de dosagens dos microconcretos leves de alto desempenho

a) Exemplo para classificação entre “durável” e “resistente”

De acordo com as tabelas 7.1 e 7.2, para que os microconcretos estejam dentro da classificação “durável”, quanto ao risco de corrosão das armaduras e deterioração do concreto, é necessário apresentarem as seguintes características:

1°) Classe de resistência $\geq C 50$;

2°) Relação $a/c \leq 0,38$

3°) Teor de sílica ativa $\leq 10 \%$ (em vista do possível aumento de carbonatação com teores maiores)

Para um $f_{ck} = 50$ MPa (satisfazendo a primeira condição), tem-se:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 sd$$

Para $sd = 4$ MPa (condição A da ABNT)

$$f_{c28} = 56,6 \text{ MPa}$$

Com esse valor, na tabela 7.25, são indicados as propriedades dos microconcretos para cada tipo de dosagem.

Tabela 7.25: Propriedades dos microconcretos para $f_{ck} = 50$ MPa

Dosagem	a/c (figs. 7.4 a 7.8)	Traço (massa)	C. de Cimento (kg/m ³) (fig. 7.14)	M. específica (kg/m ³) (fig. 7.16)	F. de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
DOSAGEM I	0,32	1:0,25	1080	1580	35,8
DOSAGEM II	0,49	1:1,00	620	1420	39,9
DOSAGEM III	0,53	1:0,83	460	1560	36,3
DOSAGEM IV	0,44	1:0,72	740	1470	38,5
DOSAGEM V	0,50	1:1,45	600	1550	36,5

Os microconcretos com areia (DOSAGEM III e DOSAGEM V) apresentaram consumos de cimento mais baixos que os respectivos sem areia (DOSAGEM II e DOSAGEM IV), porém, com fatores de eficiência menores. Nota-se os elevados consumos de cimento para a DOSAGEM I (sem sílica ativa) e DOSAGEM IV (utilizando cimento CPV-ARI-RS).

Os microconcretos considerados neste exemplo, com exceção dos da DOSAGEM III, estão dentro da classificação “resistente”, definida por HELENE (1995), pois, apresentam relação a/c inferiores a 0,50.

Apesar dos microconcretos não satisfazerem uma das condições de alta durabilidade ($a/c \leq 0,38$), estes podem perfeitamente serem indicados em situações de menor exposição aos agentes agressivos.

A tabela 7.26 indica, aproximadamente, os tempos para a cura por submersão (até atingir 70 % do f_{ck}) e desforma do material (entre 9 MPa e 10 MPa), através das figuras 7.10 a 7.13.

Tabela 7.26: Tempo para desforma e cura dos microconcretos

Dosagem	Desforma	Tempo de cura
DOSAGEM I	-	-
DOSAGEM II	14 horas	22 horas
DOSAGEM III	14 horas	24 horas
DOSAGEM IV	14 horas	26 horas
DOSAGEM V	16 horas	45 horas

Os microconcretos da DOSAGEM V, apesar de apresentarem resistências elevadas aos 28 dias, apresentaram baixas resistências nas primeiras idades, necessitando, assim, de maior período para cura e desforma do material.

b) Exemplo para classificação “normal”

Considerando-se que os microconcretos podem ser utilizados em ambientes de menor agressividade, tem-se o seguinte exemplo:

Para um $f_{ck} = 40$ MPa,

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 sd$$

Para $sd = 4$ MPa (condição A da ABNT)

$$f_{c28} = 46,6 \text{ MPa}$$

Na tabela 7.27 são indicadas as propriedades dos microconcretos para este exemplo.

Tabela 7.27: Propriedades dos microconcretos para $f_{ck} = 40$ MPa

Dosagem	a/c (figs. 7.4 a 7.8)	Traço (massa)	C. de Cimento (kg/m ³) (fig. 7.14)	M. específica (kg/m ³) (fig. 7.16)	F. de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
DOSAGEM I	0,41	1:0,73	800	1440	32,4
DOSAGEM II	0,58	1:1,36	440	1270	36,7
DOSAGEM III	0,65	-	240	1450	32,1
DOSAGEM IV	0,55	1: 1,22	520	1330	35,0
DOSAGEM V	0,65	-	300	1440	32,4

Os consumos de cimento foram sensivelmente reduzidos para este exemplo, confirmando, mais uma vez, os menores consumos para os microconcretos com areia (DOSAGEM III e DOSAGEM V), porém, com menores fatores de eficiência. Pelos altos valores das relações a/c (acima de 0,62) não é recomendável a utilização desses dois casos, para este exemplo.

Os microconcretos referentes à DOSAGEM II e à DOSAGEM IV apresentaram ótimos resultados quanto ao fator de eficiência e consumo de cimento, porém, por apresentarem relações água/cimento acima de 0,50, não devem ser aplicados em ambientes de alta agressividade, como o marinho.

Capítulo 08 - Conclusões

A partir dos ensaios realizados na parte experimental da pesquisa, pode-se concluir que:

- a adição de sílica ativa favoreceu significativamente o crescimento das resistências à compressão para todas as idades e dosagens. Com 1 dia de idade houve crescimento de até 100 % na resistência à compressão. Com isso, sendo um fator essencial para a indústria de pré-fabricados, permite desformas rápidas (em média com 14 horas) e redução no tempo da cura térmica;
- a presença de sílica ativa não prejudicou as características de leveza do material e juntamente com as altas resistências à compressão permitiram elevados fatores de eficiência (em média 30% superiores aos dos microconcretos sem a adição);
- os consumos de cimento foram substancialmente reduzidos com a presença de sílica ativa, uma redução em média de 50% para os microconcretos com fator de eficiência em torno de 35 MPa.dm³/kg;
- as propriedades dos microconcretos no estado fresco, tais como trabalhabilidade e coesão, foram visivelmente favorecidas com a utilização de sílica ativa;
- as curvas tensão x deformação dos microconcretos com sílica ativa se apresentaram de forma mais linear que os sem adição, devido a formação de uma melhor zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento;



- a substituição parcial da argila expandida pela areia trouxe benefícios quanto a resistência à compressão, porém, com o aumento da massa específica esta trouxe reduções nos fatores de eficiência quando comparados aos microconcretos sem areia;
- quanto ao consumo de cimento, a utilização da areia traz benefícios apenas quando deseja-se maiores resistências mecânicas, porém, quando o objetivo é a obtenção de fatores de eficiência mais elevados, os microconcretos sem areia apresentaram-se mais vantajosos;
- as curvas tensão x deformação dos microconcretos com areia praticamente não apresentaram mudanças em relação aos sem areia;
- com relação aos cimentos utilizados, os microconcretos produzidos com CPV-ARI-RS consumiram mais cimento que os com CPV-ARI contendo os mesmos materiais, provavelmente devido a elevada superfície específica do cimento CPV-ARI-RS;
- as resistências iniciais foram maiores para os microconcretos com CPV-ARI, mas para as idades avançadas as resistências foram semelhantes. Isto é explicado pelo fato de que o cimento CPV-ARI-RS possui baixo teor de C_2S , responsável pelas resistências iniciais;
- os microconcretos produzidos com cimento CPV-ARI, de um modo geral, apresentaram melhores resultados quanto ao fator de eficiência, em relação aos microconcretos com cimento CPV-ARI-RS. Com os maiores consumos de cimento, os microconcretos com cimento CPV-ARI-RS apresentaram massas específicas mais elevadas, reduzindo seus fatores de eficiência;
- a utilização do cimento CPV-ARI-RS proporcionou deformações bem mais acentuadas aos microconcretos em comparação ao cimento CPV-ARI. Para um dia de idade, isto pode ser explicado por apresentarem baixas resistências iniciais;
- em comparação aos microconcretos de massa específica normal, os microconcretos leves apresentaram melhores resultados quanto ao fator de eficiência;

- os consumos de cimento dos microconcretos de massa específica normal foram menores quando a análise era realizada em função da resistência à compressão, porém, quando se considerou o fator de eficiência, os dois tipos de microconcretos apresentaram consumos aproximados para uma faixa entre $35 \text{ MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$ e $40 \text{ MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$.

Capítulo 09 - Sugestões para estudos futuros

- Os agregados leves, de um modo geral, resultam maior retração, principalmente devido ao fato de possuir baixo módulo de elasticidade, oferecendo menor contenção à retração da pasta de cimento. O processo de retração do concreto leve depende muito da porosidade dos agregados e da sua absorção de água. Por isso, seriam de grande importância estudos de retração plástica para os microconcretos leves de alto desempenho aqui pesquisados. É sugerido, também, a utilização de fibras poliméricas para combater a retração, podendo-se haver redução na taxa de armadura;
- Como foi citado no trabalho, o tipo de agregado, tanto leve quanto o normal, apresenta pouca influência sobre a permeabilidade a gases e líquidos, dependendo quase que exclusivamente da pasta de cimento. Porém, estudo de absorção por imersão e capilaridade seriam importantes, principalmente na possibilidade do material ser utilizado em algum tipo de cobertura.
- Como a resistência dos agregados leves, isoladamente, é inferior a dos agregados normais, seria necessário o conhecimento do comportamento dos microconcretos leves na ruptura, ou seja, se esta ocorre no agregado, na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento ou na própria pasta. Esta análise poderia ser feita através de macrografias e micrografias.
- Como não foram moldadas peças com o material estudado, poderiam ser produzidas, por exemplo, vigas ou lajes para análise de comportamento frente a carregamentos, tais como, medições de deformações.

Referências bibliográficas

ABUD, J. (1991). Alto Desempenho. *Revista Ibracon*. Ano I, n.1, p.____
jul/ago.

ACI COMMITTEE 226 (1987). Silica fume in concrete. *ACI Materials Journal*,
v. 84, n. 02, p.158-166.

ACI COMITTE 234 (1995). Abstract of: guide for the use of silica fume in
concrete. *ACI Materials Journal*, v. 92, n. 04, p.437-440.

AGNESINI, M.V.C. (1982). *Utilização dos germes obtidos pela pulverização
do cimento já hidratado, no preparo de argamassas*. Pesquisa realizada
em laboratório. EESC-USP, São Carlos, SP. /Digitado/

AGNESINI, M.V.C.; SILVA, L.F e.(1994) Controle da resistência à
compressão do concreto: estudo da utilização de corpos-de-prova
cilíndricos de dimensões reduzidas. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36,
Porto Alegre, 1994. *Anais*. Rio Grande do Sul, p. 897-910.

AGNESINI, M.C.; SILVA, L.F. e. (1996a). Dosagem de microconcretos de
elevado desempenho - estudo de caso. In: INTERNATIONAL
CONGRESS ON HIGH - PERFORMANCE CONCRETE, AND
PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES.
Florianópolis, 1996. *Anais*. Santa Catarina, p.167-177.

- AGNESINI, M.C.; SILVA, L.F. e (1996b). Elementos pré-fabricados de pequena espessura – estudo de dosagem de microconcretos de alto desempenho. In: REUNIÃO DO IBRACON, 38, Ribeirão Preto, 1995. *Anais*. São Paulo, p.739-750
- AGNESINI, M.C.; SILVA, L.F. (1996c). Estudo comparativo de tipos de cimento Portland na dosagem de concreto de alto desempenho (CAD). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4, São Paulo, 1996. *Anais*. São Paulo, ABCP, 1996, v.2, p. 647-666.
- AGNESINI, M.C.; SILVA, L.F. e.(1997). Concretos de alto desempenho – estudo de dosagem de microconcretos para pré-fabricados de pequena espessura. In: JORNADA SUL-AMERICANA DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28, São Carlos, 1997. *Anais*. São Carlos, EESC/USP, 1997, v.5, p.1985-1993.
- AGOSTINI, L.R.S.; FUSCO, P.B. (1993). Pilares de Concreto de Alta Resistência. *Revista Ibracon*. Ano III, n.7, p.28-31, jan/fev/mar.
- AGOSTINI, L.R.S.; NUNES, N.L. Análise de um método de cura adequado para concretos de alta resistência. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, v.1, p.479-492.
- AÏTCIN, P.C. (1993). 120 MPa sem mistério. Trad. Por L.A. Falcão Bauer. *Revista Técnica*, v.3, p.29-33, nov/dez 95.
- ALMEIDA, I.R. de. (1994a) Fumo de Sílica e Concreto: Uma União Resistente. *Revista Ibracon*. Ano IV, n.11, p.8-12. Dez.
- ALMEIDA, I. R. de. (1994b). A influência dos agregados. *Revista Ibracon*. Ano IV, n.09, p.36-41, ago/set.

- ALMEIDA, I.R. de. (1996). Superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos. *Revista Técnica*. Ano V, p.30-33, set/out 96.
- ALMEIDA, I.R. de et al.(1995) Exemplos de obras em concreto de alta resistência realizadas no Brasil. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, p.435-450.
- ALVES, E.F.R. et al. (1995). Eficiência do uso de microssílica na redução da expansão álcali-agregado. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, p.617-629.
- AMARAL FILHO, E.M. (1992a). Concreto de Alta resistência - 1ª parte. *Revista Ibracon*. Ano II, n.4, p.40-49, abr/mai/jun.
- AMARAL FILHO, E.M. (1992b). Concreto de Alta resistência - 2ª parte. *Revista Ibracon*. Ano II, n.5, p.52-59, jul/ago/set.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1967). *Guia para concreto estrutural de agregado leve*. Relatório apresentado pelo Comitê ACI - 213.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1985). *High strength concrete*. Detroit. ACI.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1992). *State-of-the-art report on high strength concrete*. Relatório apresentado pelo Comitê ACI - 363. Detroit.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). ASTM C-29/29m/91. *Standart test method for unit weight and voids in aggregate*. Philadelphia.

ARMELIN, H.; LIMA, M.G.; SELMO, S.M.S. (1994). Alta resistência com argila expandida: propriedades de concretos leves de alta resistência com argila expandida nacional. *Revista Ibracon*. Ano Iv, n.9, p.42-47, ago/set.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1969). EB-228 - Agregados leves de elementos para alvenaria. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1969). EB-229 - Agregados leves para concreto isolante térmico. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1969). EB-230 - Agregados leves para concreto estrutural. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1974). NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). NBR 7211 - Agregados para concreto. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). NBR 7222 – Argamassas de concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). NBR 7251 - Agregado em estado solto: determinação da massa unitária. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983). NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. *Rio de Janeiro*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). *NBR 9777 – Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). *NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 7217 - Determinação da composição granulométrica dos agregados*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9776 - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9937 - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991). *NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991). *NBR 5737 – Cimento Portland resistentes a sulfatos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991). *NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland*. Rio de Janeiro.

BARBOSA., M.J. (1985). *Experimentação em argamassa leve de argila expandida*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

BATTAGIN, A.F (1986). Determinação do teor de escória em cimento Portland de alto-forno por dissolução seletiva. *Revista Cerâmica*. v.32, n.200.

CEB/FIP (1977). *Lightweight aggregate concrete*. New York, The Construction Press.

CINASITA. *Concretos leves*. Informações técnicas da Cinasita S.A. Jundiaí, São Paulo.

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. (1988). Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. In: IPT - *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, PINI. Cap. 1, p.23-26.

CINCOTTO, M.A. (1988) Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: IPT - *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, PINI. Cap. 71-74.

COLETÂNEA ABCP/IBRACON (1994/1995). Concretos de Alto desempenho: Definição e Características Técnicas. *Revista Ibracon*. dez/jan.

CORBIOLI, N. (1997). A ponte do Rio Maranhão. *Revista Técnica*, v.5, p.24-29, jul/ago 97.

DAL MOLIN, D.C.C. (1995). *Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica*. São Paulo. 286p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo.

DUARTE, R.D. (1994). O concreto com Microssílica: fabricação, Lançamento e Cura. *Revista Recuperar*. Ano __, n __, p.14-16, set/out.

DURIEZ, M.; ARRAMBIDE, J. (1961). *Nouveau Traité de Matériaux de Construction*. França.

EL DEBS, M.K. et al. (1997). Evolução com o tempo de corrosão da armadura em concreto de granulometria fina observada em ensaio acelerado. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28, São Carlos, 1997. *Anais*, São Carlos, USP, v. 6, p.2411-2420.

FORNASIER, R.S.; DAL MOLIN, D.C.C. (1994). Execução de concreto de baixa permeabilidade com o uso de microssílica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Porto Alegre, v.1, p.519-532.

GASTALDINI, A.L.G. (1989). *Influência da finura e da porcentagem de adição de escória de alto-forno na estrutura das pastas de cimento Portland de alto-forno*. São Paulo. 185p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- GHOSH, S.K.; SAATCIOGLU, M. (1994) Ductility and seismic behaviour. In: SHAH, S.P.; AHMAD, S.H. ed. *High performance concrete: properties and applications*. New York, McGraw-Hill. Cap. 8, p. 237-312.
- GOULART NETO, A.A et al. (1995). Reparos com argamassa de cimento e microssilica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, p.585-600.
- HELENE, P. (1992). Concreto de Elevado Desempenho Para o Ano 2000. *Revista Politécnica*. Ano ____, n. 207, p.37-39.
- HELENE, P.R.L. (1995). Vida Útil das Estruturas. *Revista Técnica*. Ano ____, n.17, p.28-31, jul/ago.
- HIGH PERFORMANCE CONCRETE: ACI INTERNATIONAL CONFERENCE. Singapore, 1994. *Proceedings*. Detroit, 1994.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W.(1995). High strength lightweight aggregate concrete. In: SHAH, S.P.; AHMAD, S.H. ed. *High performance concrete: properties and applications*. New York, McGraw-Hill. Cap. 10, p.341-374.
- ISAIA, G. (1996) Concreto de elevado desempenho com pozolanas para estruturas pré-moldadas com cura normal. In: REUNIÃO DO IBRACON, 38, Ribeirão Preto, 1996. *Anais*. São Paulo, p.693-705.
- ISAIA, G.C.; HELENE, P.R.L. (1994). Normas e recomendações sobre pozolanas em concreto de elevado desempenho: uma avaliação crítica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Porto Alegre, v.2, p.685-698.
- ISATA, G.C. (1992) Desempenho econômico de concreto de alta resistência com cinzas volantes. *Revista do Ibracon*. Ano II, n.3, p.47-51.

KHAYAT, K.H.; AİTCIN, P.C. (1992). Silica fume in concrete - an overview. In: PROCEEDINGS OF FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. *Anais*, V.2 Detroit, 1992.

KERBER, J.A.; ROMAN, H.R (1994). O Encontro dos Concretos. *Revista do Ibracon*. Ano IV, n.9, p.28-34, ago/set.

KIHARA, Y.(1986). O estudo das cinzas volantes brasileiras. *Revista Cerâmica*. v.32, n.193, p.31-38.

KIHARA, Y.; SHUKUZAWA, J.K. (1982). Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil. *Revista Cerâmica*. V.28, n.145, p.15-24, jan.

KIHARA, Y.; BUCHER, H.R.E. (1986) Microssílica: Uma Nova Pozolana Artificial. *Revista Cerâmica*. V.32, n.200, p.211-214, set.

KULAKOWSKI, M.P.; DAL MOLIN, D.C.C. (1994). Estudo do teor de cloretos retidos em argamassas com adição de microssílica para reparos estruturais. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Porto Alegre, v.1, p.145-155.

LESSARD, M. et al. (1993). Testing high-strength concrete compressive strength, *ACI Materials Journal*, v. 90, n. 04, p.303-308.

MASSAZZA, F. (1993) Pozzolanic Cements. *Cement and Concrete Composites*. V. __, n.15, p.185-214.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1.ed. São Paulo. PINI.

- MINDESS, S. (1994). Materials selection, proportioning and quality control. In: SHAH, S.P.; AHMAD, S.H. ed. *High performance concrete: properties and applications*. New York, McGraw-Hill. Cap. 1, p. 1-25.
- MITIDIERI, A. (1976). Agregados leves em pré-moldados de concreto. In: COLÓQUIO SOBRE PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO. São Paulo, 1976. IBRACON.
- MORAES, M.F. de. (1990). *Algumas propriedades mecânicas do concreto com microssílica*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo
- MORAES, M.F. de; TEZUKA, Y. (1992). *Uma abordagem sobre o estado de arte da microssílica*. São Paulo. *Boletim técnico da Escola Politécnica da USP*.
- NEPOMUCENO, A.A. et al. (1995). Módulo de deformação de concretos com e sem microssílica utilizando materiais do Distrito Federal. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, p.677-688.
- NEVILLE, A.M. (1997). *Propriedades do concreto*. São Paulo, PINI.
- PALERMO, G. (1992). Concreto de Alta Resistência proporciona Ganhos às Obras de Metrô. *Revista Ibracon*. Ano II, n.6, p.13-20, out/nov/dez.
- PAULON, V.A.; IBRAIM, F.L. (1995) O efeito de adições na obtenção de concretos de alta resistência. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, v.1., p.493-506.
- PAULON, V.A. (1996). Interface entre pasta de cimento e agregado. *Revista Técnica*. Ano 5, p. 29-31, nov/dez 96 In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, v.1, p.479-492.

- PEREIRA NETO, P.M.; DJANIKIAN, J.G. (1995). *Algumas características do concreto de alta resistência com microssílica*. São Paulo./ Boletim técnico da Escola Politécnica da USP.
- RAMEZANIANPOUR, A.A. MALHOTRA, V.M. (1995). Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Sílica Fume. *Cement and Concrete Composites*. V. __, n.17, p.125-133.
- RASHEDUZZAFAR; HUSSAIN, S.E.(1991). Effect of Microsilica and Blast Furnace Slag on Pore Solution Composition and Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Composites*. V. __, n.13, p.219-225.
- ROCHA, S. (1997). Desempenho medido na prática. *Revista Técnica*, v.5,p.14-22, jul/ago 97.
- ROSSO, T. (1966) *Concretos leves*. Comitê de Pré-Fabricação /Divisão Técnica de Construção Civil. Instituto de Engenharia. São Paulo.
- RUDNAI, G. (1963). *Lightweight concrete*. Budapeste, Akadémiai Kiadó.
- SANTOS, P.S. (1975). *Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras*. v.2. São Paulo. EDUSP.
- RUSSEL, H.G. (1994). Structural design considerations and applications. In: SHAH, S.P.; AHMAD, S.H. ed. *High performance concrete: properties and applications*. New York, McGraw-Hill. Cap. 9, p.313-338.
- SANTOS, M.E. et al. (1986). Argila expandida como agregado para concreto leve./ Tema livre - Apresentado à Reunião Anual de 1986. IBRACON. São Paulo

- SANTOS, A.L.F. et al. (1994). Concreto leve de alto desempenho. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Rio Grande do Sul, p.505-518.
- SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, A.F. (1992). Aspectos da durabilidade de argamassas contendo escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. *Revista do Ibracon*. Jan/fev/mar.1992. p.26-33
- SHORT, A.; KINNIBURGH, W. (1968). *Lightweight concrete*. London, CR Books LTD.
- SILVA, L.F. e. (1988). Argamassas com microsilica: estudo de consistência e resistência. In: REUNIÃO DO IBRACON, 34, Rio de Janeiro, 1992. *Anais*. Rio de Janeiro, p.165-176.
- SILVA, I.S. da. (1995). *Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- SILVA, L.F.; AGNESINI, M.V.C. (1996). Estudo comparativo de tipos de cimento portland na dosagem de concreto de alto desempenho (CAD). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4. São Paulo, 1996. *Anais*. São Paulo, ABCP. v.2, p.647-666.
- SILVA, M.G. da; HELENE, P.(1994) Concreto projetado com adição de microsilica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Porto Alegre, v.1, p.539-552
- SOUSA, M. de. (1992). O argumento dos durões. *Construção*. n 2314, p. 4-7, jun.

TÉCHNE (1996). São Paulo, v.4, set/out 96, p.15.

TEZUKA, Y. (1973). *Concreto leve à base de argila expandida*. São Paulo. 171p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo.

TORII, K.; KAWAMURA, M. (1994). Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume. *Cement and Concrete Composites*. V __, n.16, p.279-286.

VALOIS, G.C. (1994). Estudo e controle tecnológico do concreto de alte resistência. In: REUNIÃO DO IBRACON, 36, Porto Alegre, 1994. *Anais*. Rio Grande do Sul, p.1071-1083.

VIVEKANANDAM, K.; PATNAIKUNI, I. (1995) Microcracking in High Performance Concrete During Hidratation. *Australian Civil Engineering Transactions*. V. CE37, n.4, p.279-283, dez.

VIEIRA, F.; DAL MOLIN, D.(1995) Aderência das barras de aço em concretos de alta resistência com adição de microssílica. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, Goiânia, 1995. *Anais*. Goiânia, v.1, p.451-462.

WERNER JÚNIOR, D. et al.(1995). Uso de microssílica em concretos de usinas hidrelétricas. In: REUNIÃO DO IBRACON, 37, GOIÂNIA, 1995. *Anais*. Goiás, p.601-616.

ZHANG, M.H. ;GJORV, O.E. (1991a). Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 02, p.150-158.

ZHANG, M.H. ;GJORV, O.E. (1991b). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 05, p.463-469.

ZHANG, M.H. ;GJORV, O.E. (1991c). Mechanical Properties of High-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 03, p.240-247.