

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO NO ESTADO DO PARÁ:**

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE  
PRODUÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM OS  
MATERIAIS DISPONÍVEIS EM BELÉM ATRAVÉS DO EMPREGO  
DE ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM.

MÁRCIO SANTOS BARATA

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

**Profª Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
Orientadora

**Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

**Profª Denise Carpena Coitinho Dal Molin** (Orientadora)  
Doutora pela EPUSP / SP (UFRGS)

**Prof. Vladimir Antônio Paulon**  
Doutor pela EPUSP / SP (UNICAMP)

**Prof. Rui Alberto Cremonini**  
Doutor pela EPUSP / SP (UFRGS)

**Profª Maria Luisa Canãs Martins**  
Doutora pela Universidad Politécnica de Madri (UCPel)

*“... Quanto mas você faz pela Terra  
mas próxima sua relação com Deus”*

***Ben Harper***

**À minha mãe, Edna**  
**À minha avó, Neusa**  
**À minha esposa, Ana Kelly**  
**À minha irmã, Dani**

## AGRADECIMENTOS

À professora Denise Dal Molin, pelo grande apoio, amizade e orientação ao longo destes quase três anos de convivência.

Ao professor Roberto de Freitas Neves (UFPA), pela orientação e amizade durante o desenvolvimento do trabalho experimental, como também pela idéia de utilização do rejeito.

Aos professores Carlos Petter (LAPROM) e Bergman (LACER), pela apoio nas análises química e física dos materiais.

Ao professor José Luiz Duarte Ribeiro pelo orientação quanto ao planejamento do trabalho experimental.

A professora Maria Alba Cincotto pelo material didático sobre argila calcinada, que foi imprescindível para o desenvolvimento dessa parte da pesquisa.

Aos amigos Fontes e Airton, além da grande amizade, pela dedicação e eficiência no desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

À Diana, pelo auxílio na realização de todos os ensaios.

Ao Sidney (LAPROM), pela grande ajuda e orientação no que diz respeito aos trabalhos relacionados com caulim.

À CAMARGO CORREA INDUSTRIAL e à CAULINS DA AMAZÔNIA (CADAM), pelo fornecimento e transporte dos materiais de Belém a Porto Alegre.

À CAPES e ao CNPq, cujo apoio financeiro foi fundamental para a efetivação dessa pesquisa.

Aos amigos do LACER (Hélio, João Paulo, Adriana, Margareth e Alberto), pela colaboração nos trabalhos de calcinação do rejeito e pela orientação no que diz respeito aos conhecimentos sobre Ciências dos Materiais.

À Ângela Ferreira e ao Rafael Stolfo, pelo companheirismo e troca de experiências durante a realização da pesquisa experimental.

Ao João (“caco”), André (“enrrugals”) e Adriano, *meus grandes e eternos amigos*.

Ao Washington, por quem tenho grande admiração e amizade.

Ao Maurício, Eduardo Hilbk, Fábio, Antônio Eduardo e Nelson, pela convivência e amizade durante esses anos em Porto Alegre.

Aos meus familiares, pelo incentivo, carinho e compreensão pela ausência durante três longos anos.

À minha esposa Ana Kelly, pelo apoio, carinho, amizade e paciência durante esses anos de ausência.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XVII</b>
<b>"ABSTRACT" .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	4
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	6
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	7
<b>2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....</b>	<b>9</b>
2.1 CONCEITO .....	9
2.2 APLICAÇÕES.....	12
2.3 MICROESTRUTURA .....	13
2.4 MATERIAIS.....	15
2.4.1 Cimento.....	15
2.4.2 Agregados .....	16
2.4.2.1 Agregado graúdo .....	16
2.4.2.2 Agregado miúdo .....	19
2.4.3 Água.....	19
2.4.4 Aditivo superplastificante .....	19
2.4.5 Sílica Ativa .....	20
2.4.5.1 Obtenção.....	21
2.4.5.2 Características físicas e químicas da sílica ativa .....	21
2.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM SÍLICA ATIVA .....	23
2.5.1 Trabalhabilidade .....	23
2.5.2 Resistência à compressão.....	24
2.5.3 Durabilidade.....	27
2.5.3.1 Permeabilidade .....	27
2.5.3.2 Ensaios de penetração de água e íons agressivos .....	29

<b>3. O USO DE ARGILA CALCINADA COMO ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 HISTÓRICO E PERSPECTIVAS.....	38
3.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS ARGILAS CALCINADAS .....	41
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS ARGILAS CALCINADAS .....	43
3.3.1 A influência da natureza e do conteúdo do argilomineral .....	43
3.3.2 A influência da finura da argila calcinada .....	45
3.3.3 A influência das condições de calcinação.....	47
3.4 O EFEITO DA ARGILA CALCINADA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	51
3.4.1 Propriedades no estado fresco.....	51
3.4.2 Propriedades no estado endurecido.....	53
3.4.2.1 Resistência mecânica.....	53
3.4.2.2 Durabilidade .....	56
3.5 REJEITO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE CAULIM UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL .....	60
<b>4. PESQUISA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>67</b>
4.1 PRIMEIRA ETAPA : DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA ÓTIMA DE CALCINAÇÃO DO ARGILOMINERAL (METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM ARGAMASSAS) .....	68
4.1.1 Coleta, preparação e calcinação das amostras. ....	68
4.1.2 Ensaio de determinação da atividade pozolânica. ....	70
4.2 SEGUNDA ETAPA : AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÃO (METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM CONCRETO). ....	71
4.2.1 Planejamento dos ensaios .....	71
4.2.2 Ensaios .....	75
4.2.2.1 Resistência à compressão simples .....	75
4.2.2.2 Penetração acelerada de íons cloretos (ASTM C 1202).....	76
4.2.2.3 Taxa de absorção capilar .....	78
4.2.3 Caracterização dos materiais .....	80
4.2.3.1 Cimento .....	80
4.2.3.2 Agregado graúdo .....	81
4.2.3.3 Agregado miúdo .....	85
4.2.3.4 Sílica ativa .....	85
4.2.3.5 Rejeito do beneficiamento de caulim .....	86
4.2.3.6 Aditivo superplastificante.....	88



4.2.4	Proporcionamento dos materiais.....	88
4.2.5	Moldagem, cura e preparação dos corpos-de-prova .....	91
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
5.1	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA ÓTIMA DE CALCINAÇÃO DO REJEITO. ....	93
5.1.1	Características física, química e mineralógicas do rejeito calcinado a diferentes temperaturas.....	93
5.1.2	- Ensaio de Atividade Pozolânica com Cimento Portland (NBR 5752).....	97
5.2	- AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÕES MINERAIS.....	101
5.2.1	- Propriedades das Misturas de Concreto no Estado Fresco.....	101
5.2.2	- Resistência à compressão simples .....	103
5.2.3	- Taxa de absorção capilar .....	107
5.2.4	- Penetração acelerada de íons cloretos .....	111
5.2.5	- Correlação entre resistência à compressão e os demais parâmetros.....	115
5.3	- AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO EMPREGO DE MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÕES MINERAIS.....	117
<b>6</b>	<b>- CONCLUSÕES .....</b>	<b>121</b>
6.1	COM RELAÇÃO AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DO REJEITO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO CAULIM “IN NATURA” E CALCINADO. ....	121
6.2	COM RELAÇÃO À ATIVIDADE POZOLÂNICA DO METACAULIM COM CIMENTO PORTLAND	122
6.3	COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO .....	123
6.4	COM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS.....	123
6.5	COM RELAÇÃO À TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E À PENETRAÇÃO ACELERADA DE ÍONS CLORETOS .....	124
6.6	COM RELAÇÃO AO DESEMPENHO DOS CONCRETOS COM METACAULIM.....	126
6.7	COM RELAÇÃO AO PROJETO FRACIONADO .....	126
<b>7</b>	<b>- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>128</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>131</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>148</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>150</b>

<b>ANEXO C</b> .....	<b>159</b>
<b>ANEXO D</b> .....	<b>163</b>
<b>ANEXO E</b> .....	<b>166</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do tamanho dos poros em pastas de cimento com e sem sílica ativa (MEHTA e GJORV, 1982).....	28
Figura 2 - Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima (Concrete Society Working Party apud PERRATON et ali, 1992).....	29
Figura 3 - A influência da sílica ativa na permeabilidade aos íons cloretos (PLANTE e BILODEAU, 1989). ....	31
Figura 4 - O esquema gráfico do aparato do ensaio desenvolvido por S. Kelham (KELHAM, 1988).....	35
Figura 5 - Relação entre o acúmulo de massa e a raiz quadrada do tempo (GJORV, 1994b). 36	
Figura 6 - Gráfico taxa de absorção versus relação água/aglomerante (SMESPLASS apud GJORV, 1994b). ....	37
Figura 7 - Gráfico resistência capilar versus relação água/aglomerante (SMESPLASS apud GJORV, 1994b). ....	37
Figura 8 - Estrutura cristalina da caulinita (GRIM, 1963). ....	42
Figura 9 - Termograma de uma amostra de argila caulinítica viável para utilização como pozolana, após tratamento térmico (BATTAGIN, 1987). ....	48
Figura 10 - Projeto piloto do forno de calcinação instantânea: (1,2) ciclone refratário de aço - tubo $\phi$ 300mm, (3) coluna de retorno, (4) injetor, (5a, 5b) entrada elétrica, (6) câmara com isolamento térmico. (7) gerador de gás quente, (8) alimentador, (9) coletor de material, (10) resfriador, (11) filtro de ar, (12a, 12b) exaustores, (13) medidor de fluxo de gás, (14) lavador de gases, * - pontos de medição da temperatura (MEINHOLD, SALVADOR, DAVIES e SLADE, 1994).....	51
Figura 11 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com relação a/c, a/(c+M <sub>CAR</sub> ) e a/(c+S <sub>A</sub> ) igual a 0.4 (ZHANG e MALHOTRA, 1995).....	54
Figura 12 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com relação água/aglomerante de 0.4 (CALDARONE et ali, 1994). ....	55

Figura 13 - Evolução da resistência à compressão de argamassas de cimento Portland composto (CP II - Z 32) produzido na Amazônia com a incorporação de metacaulim. ...	56
Figura 14 - Raio limite <i>versus</i> tempo de cura para pastas de referência e com metacaulim (KHATIB e WILD, 1996). .....	57
Figura 15 - Distribuição do tamanho dos poros (< 20nm) em função do tempo de cura para pastas de referência e com metacaulim (KHATIB e WILD, 1996).....	58
Figura 16 - Fluxograma do processo de beneficiamento de uma indústria exploradora de caulim localizada na região amazônica.....	63
Figura 17 - Bombeamento da polpa de caulim para as lagoas. ....	64
Figura 18 - Lagoa de sedimentação preenchida com a polpa de caulim. ....	64
Figura 19 - Tubo extravasador por onde a água da polpa é removida da lagoa.....	64
Figura 20 - Lagoa de sedimentação após a evaporação da água excedente. ....	65
Figura 21 - Presença de vegetação após colocação de camada orgânica sobre a superfície da lagoa seca.....	65
Figura 22 - Configuração do projeto fracionado. ....	74
Figura 23 - Esquema gráfico da disposição das células em paralelo.....	77
Figura 24 - Corpo-de-prova prismático preparado para o ensaio de absorção.....	80
Figura 25 - O aparato do ensaio de absorção. ....	80
Figura 26 - Extração do seixo nas jazidas. ....	83
Figura 27 - Peneiramento, lavagem e classificação do seixo. ....	83
Figura 28 - Classificação do seixo em três granulometrias : fina, média e grossa.....	83
Figura 29 - Difratoograma de raio-x da amostra do rejeito de caulim. ....	88
Figura 30 - Termograma da amostra do rejeito de caulim. ....	88
Figura 31 - Consumo de cimento (C) <i>versus</i> m para dosagem sem aditivo. ....	90

Figura 32 - Relação agregados secos/cimento em massa(m) <i>versus</i> relação a/c para dosagens com e sem aditivo. ....	90
Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura do rejeito calcinado a 650°C (FLORES, 1998).....	94
Figura 34 - Comparação da distribuição granulométrica acumulada das partículas da sílica ativa, do metacaulim moído e do rejeito <i>in natura</i> . ....	95
Figura 35 - ATD do rejeito calcinado em diversas temperaturas: a) 700°C, b) 800°C, c) 900°C. ....	96
Figura 36 - Difratoograma do rejeito calcinado a 700°C.....	96
Figura 37 - Difratoograma do rejeito calcinado a 800°C.....	97
Figura 38 - Difratoograma do rejeito calcinado a 900°C.....	97
Figura 39 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas moldadas no ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland composto CP II F 32.....	98
Figura 40 - Resultados de resistências à compressão aos 28 dias do estudo de dosagem.....	104
Figura 41 - Curvas de comportamento da resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adição de SA.....	106
Figura 42 - Resistência à compressão dos concretos de referência e com adições de sílica ativa e metacaulim. ....	106
Figura 43 - Curvas de comportamento da taxa de absorção capilar em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adição de sílica ativa. ....	108
Figura 44 - Taxa de absorção capilar dos concretos de referência e com adições de sílica ativa e metacaulim .....	110
Figura 45 - Comparação entre as taxas de absorção capilar dos concretos produzidos com seixo do Estado do Pará e com brita basáltica do Rio Grande do Sul. ....	110
Figura 46 - Curvas de comportamento da carga total passante em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adições de sílica ativa. ....	112

Figura 47 - Carga total passante <i>versus</i> teor de adição de sílica ativa.....	113
Figura 48 - Comparação entre a carga elétrica total passante nos concretos produzidos com seixo (Pará) e com brita basáltica (RS).....	114
Figura 49 - Relação entre a carga total passante e a taxa de absorção capilar. ....	115
Figura 50 - Relação entre a taxa de absorção de água e a resistência à compressão.....	116
Figura 51 - Relação entre a carga total passante e a resistência à compressão. ....	117
Figura 52 - Diferença de custo de produção das misturas com e sem sílica ativa <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas dos agregados e os valores de resistência à compressão e abatimento das misturas de concreto produzidas com os respectivos agregados (GUTIÉRREZ E CÁNOVAS, 1996).....	17
Tabela 2 - Composição química da sílica ativa proveniente de diversas formas de produção (AICTIN et ali apud MEHTA, 1986). ....	23
Tabela 3 - Características físicas da sílica ativa (NEBESAR e CARETTE apud MALHOTRA et ali, 1994). ....	23
Tabela 4 - Escala de permeabilidade ao íon cloreto proposta por WHITING (1981).....	31
Tabela 5 - Características químicas para o uso de argilas calcinadas como adição mineral em misturas de concreto de cimento Portland. ....	45
Tabela 6 - Carga elétrica total passante de concretos com relação água/aglomerante de 0.4 (CALDARONE e ali, 1994; ZHANG e MALHOTRA, 1995).....	59
Tabela 7 - Oferta mundial de caulim nos principais países produtores (DNPM, 1996).....	61
Tabela 8 - Valores reais <i>versus</i> valores codificados das relações água/aglomerante e dos teores de adição de SA. ....	74
Tabela 9 - Planejamento dos ensaios para cada propriedade.....	75
Tabela 10 - Aleatorização da ordem de execução das betonadas.....	75
Tabela 11 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32.....	81
Tabela 12 - Características do seixo de Ourém.....	84
Tabela 13 - Características da areia estudada.....	85
Tabela 14 - Características físicas e químicas da sílica ativa.....	86
Tabela 15 - Características físicas e químicas do rejeito.....	87
Tabela 16 - Composição das misturas de concreto.....	91

Tabela 17 - Características do rejeito “ <i>in natura</i> ” e calcinado em diversas temperaturas. ....	93
Tabela 18 - Resultados do ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland composto CP II F 32.....	98
Tabela 19 - Análise de variância .....	99
Tabela 20 - Comparação múltipla de médias. ....	100
Tabela 21 - Comparação entre as características físicas e químicas do rejeito calcinado e do metacaulim de alta reatividade.....	101
Tabela 22 - Teor de aditivo superplastificante e abatimento das misturas de concreto do experimento. ....	102
Tabela 23 - Resistência à compressão das misturas de concreto (MPa). ....	105
Tabela 24 - Taxa de absorção capilar (25 horas) das misturas de concreto (mm.h <sup>-0.5</sup> ) .....	107
Tabela 25 - Carga total passante das misturas de concreto (Coulombs). ....	111



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACI</b>	American Concrete Institute
<b>ASTM</b>	American Society for testing and materials
<b>ATD</b>	Análise Térmica Diferencial
<b>CAD</b>	Concreto de Alto Desempenho
<b>CH</b>	Hidróxido de Cálcio
<b>C-S-H</b>	Silicato de cálcio hidratado
<b>DMC</b>	Diâmetro máximo característico
<b><math>f_c</math></b>	Resistência à compressão do concreto
<b><math>f_{ck}</math></b>	Resistência característica do concreto
<b>IS</b>	Indian Standard
<b>MC</b>	Metacaulim
<b>MCAR</b>	Metacaulim de alta reatividade
<b>SA</b>	Sílica ativa
<b>ZT</b>	Zona de Transição

## **CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO NO ESTADO DO PARÁ:**

### **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE PRODUÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM OS MATERIAIS DISPONÍVEIS EM BELÉM ATRAVÉS DO EMPREGO DE ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM.**

Márcio Santos Barata

#### **RESUMO**

As construções de concreto no estado do Pará têm se deteriorado de maneira prematura, sendo a corrosão das armaduras o problema de maior incidência, apesar da região não se constituir em um ambiente de extrema agressividade, mesmo nas principais cidades. Uma das principais causas é a utilização de concretos com alta permeabilidade. Em Belém, capital do estado, os agregados empregados nas construções são areias extremamente finas e seixos friáveis, materiais que dificultam a produção de misturas de concreto com relações água/cimento reduzidas, em razão da elevada demanda de água que requerem. Apesar da escassez de agregados de boa qualidade, há grande disponibilidade no estado de materiais pozolânicos altamente reativos como a sílica ativa e o metacaulim, que podem viabilizar técnica e economicamente a produção de concretos de alto desempenho.

Nessa pesquisa investiga-se a possibilidade do uso de concretos de alto desempenho com os materiais disponíveis no estado (cimentos e agregados), empregando adições de sílica ativa e metacaulim. A sílica ativa utilizada no trabalho é subproduto de uma indústria de produção de silício metálico e o metacaulim proveniente da calcinação do rejeito do processo de beneficiamento de uma indústria de mineração de caulim. Os desempenhos das misturas com e sem pozolanas foram avaliados pela resistência à compressão, pela taxa de absorção de água por sucção capilar e pela penetração acelerada de íons cloretos (ASTM C 1202). O teores de adição estudados foram 5%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa e 10% de metacaulim.

Os concretos com adições minerais apresentaram resultados de resistência à compressão significativamente superiores aos dos concretos sem adição para as misturas com baixo a moderado consumo de cimento (relações água/aglomerante elevadas). Com relação a taxa de absorção capilar e a carga elétrica passante, a incorporação das pozolanas reduziu significativamente a permeabilidade das misturas para todas as relações água/aglomerante estudadas. A resistência à compressão dos concretos com 10% de metacaulim foram similares a dos concreto com sílica ativa e as taxas de absorção capilar foram ligeiramente superiores, dando indícios da potencialidade do rejeito do beneficiamento do caulim como adição mineral altamente reativa

A máxima resistência obtida foi de apenas 42MPa, apesar disso, os resultados desse estudo demonstraram que mesmo com resistências convencionais ( $f_{ck}$  entre 15 MPa e 20 MPa), é possível produzir misturas de concreto no Pará com durabilidade bastante superior às empregadas atualmente, através do uso de pozolanas altamente reativas como a sílica ativa e o metacaulim.

## **HIGH PERFORMANCE CONCRETE IN PARÁ STATE.**

### **ECONOMICAL AND TECHNICAL VIABILITY STUDY ON PRODUCTION OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH THE AVAILABLE MATERIAL IN BELÉM USING ADDITIONS OF SILICA FUME AND METAKAOLIN.**

Márcio Santos Barata

#### **ABSTRACT**

Concrete constructions in Pará state often show signs of premature degradation, and the corrosion of steel is the most often observed problem, even though the region cannot be considered a harsh environment, indeed in its urban centers. One of its main causes is the use of high permeability concrete (15 MPa). In Belém, the capital of Pará, the aggregates adopted on constructions are an extremely slender sand and gravel with friable particles, that make it difficult to produce workable mixtures of concrete using low water/bind ratio (W/B) because of the high water demand that those materials require. In spite of the lack of high quality aggregates available on the state, there is a great disposability of high active pozzolans as silica fume and metakaolin, who can support technically and economically the production of high performance concrete.

This paper investigates the feasibility of use of high performance concrete with the available material on state (cement and aggregates), applying silica fume and metakaolin additions. The silica fume used on this report is a by-product from a metal silica industry and the metakaolin is proceeding form the calcination and grinding of the reject of the benefaction process of a mining industry. The performance of the mixtures with or without pozzolans was evaluated through their compressive strength properties, rate of penetration of water and for the penetration of chlorite ions into concrete (ASTM C 1202). The proportions of additions studied were 5%, 10%, 15% and 20% of silica fume and 10% of metakaolin.

The concrete formulation which received mineral admixture displayed higher results for compressive strength when compared with those without additions for mixtures with low to moderate consumption of cement (water/cement ratio). With regard to sorptivity and to the penetration of chlorite ions into concrete, the addition of pozzolans significantly reduced the permeability of the mixtures for the entire water/bind ratio studied. The compressive strength of concrete mixtures with 10% metakaolin was similar to that of silica fume concrete and the sorptivity results were slightly higher, signalling the potentiality of the reject from the benefaction of the kaolin as mineral admixture highly active

The maximum strength achieved was just 42 MPa, even though these results show that it is possible to produce concrete mixtures in Pará State with higher durability than the ones currently in use and this can be achieved by the use of highly reactive pozzolans such as silica fume and metakaolin.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A resistência do concreto, ao longo de muitos anos, foi a única propriedade adotada pelos engenheiros e tecnologistas como parâmetro de qualidade do material, na qual os esforços se convergiram para alcançar valores cada vez maiores. Hoje, ainda acredita-se que somente ao elevar a resistência do concreto, estará se produzindo um material com maior durabilidade. Todavia, exemplos práticos de deterioração prematura de estruturas de concreto demonstram que esse tipo de concepção não pode ser generalizado para qualquer tipo de exposição e condições de carregamento, e fizeram com que atualmente houvesse uma conscientização maior, por parte do meio técnico-científico, sobre a durabilidade das estruturas de concreto.

A degradação prematura das construções de concreto armado tornou-se um problema de caráter mundial, atingindo os mais variados tipos de obras, sob as mais diversas formas de deterioração. ANDRADE e GONÇALVES (apud HELENE, 1993) mencionam exemplos de diversas edificações nos Estados Unidos, Europa e Golfo Pérsico que foram projetadas para apresentar uma vida útil entre 50 e 100 anos; entretanto, com apenas 5 a 10 anos de construção já apresentavam problemas graves de corrosão das armaduras. MEHTA (1994) cita casos de degradação prematura em túneis, garagens e estruturas marinhas, nos quais atribui a falta de durabilidade do concreto à carência de conhecimento científico sobre essa propriedade tão importante.

O concreto, por ter baixo custo de aquisição, flexibilidade de execução e ser resistente à água, é, indubitavelmente, um dos materiais de construção mais empregados na engenharia. Por essa razão, a repercussão econômica relativa à elevada incidência de manifestações patológicas nas construções com esse material implica em vultosas somas de recursos na recuperação. Segundo levantamento realizado em 1987 por SKALNY (apud HELENE, 1993), os custos destinados a reparos e recuperação de obras civis nos EUA são de aproximadamente 50 bilhões de dólares/ano, que representa cerca de 16 % do volume total de recursos aplicados na construção civil. No Brasil a situação não difere muito; CARMONA FILHO e MAREGA

(1988) estimaram que, no ano de 1987, foram investidos 28 milhões de dólares em obras de recuperação e reforço no país.

Assim como ocorre em diversos países e nas demais regiões do Brasil, as construções de concreto na Amazônia também têm-se mostrado ineficazes tanto do ponto de vista da durabilidade como da resistência. Segundo um levantamento realizado sobre as manifestações patológicas nas edificações de concreto da região (ARANHA, 1994), 58 % dos serviços de recuperação ocorreram quando as obras tinham apenas 10 anos de construção. Quando a análise se estende para períodos de 15 e 20 anos, o percentual acumulado de intervenções sobe para 73 % e 88 %, respectivamente. Apesar da limitação da pesquisa, os dados proporcionam uma pequena amostra do acelerado nível de degradação das edificações na Amazônia Legal\*. As conclusões expostas acima podem ser transcendidas para o Estado do Pará, uma vez que a maioria das informações obtidas no levantamento foram coletadas nesse estado.

ARANHA (1994) constatou que 70 % das manifestações patológicas têm origem nas etapas de planejamento, projeto e execução, sendo a corrosão das armaduras o dano de maior incidência. O autor afirma que a maioria dos problemas são causados por cobrimento inexistente ou inadequado, descuidos na concretagem (transporte, lançamento e adensamento incorretos), ausência de cura e uso de concretos de baixa resistência e elevada permeabilidade ( $f_{ck}$  entre 15 MPa e 18 MPa). SERRA (1997) relata que a resistência de concretos em obra deve ser superior a 25 MPa, caso contrário, fica caracterizado um “estelionato técnico” por parte dos engenheiros.

Diante desse quadro, a efetivação do controle da qualidade de execução das estruturas de concreto, assim como a melhoria de sua produção tornam-se cada vez mais imprescindíveis na região, de modo a reverter a situação atual através da execução de um material com maior durabilidade, desempenho estrutural e resistência mecânica.

A utilização de concreto de alto desempenho (CAD) no Estado do Pará, além de proporcionar maior durabilidade e resistência às construções, exigiria do corpo técnico maior atenção tanto na produção da mistura como também na execução da estrutura, fazendo com

que os cuidados que também deveriam ser tomados nos concretos normais, sejam realmente efetivados.

A produção de CAD está normalmente associada ao emprego de adições minerais, que geralmente são rejeitos ou subprodutos de outras indústrias. No Estado do Pará, em virtude da magnitude e diversidade de minérios, existem inúmeras indústrias de mineração e metalurgia responsáveis pela geração de significativas quantidades de rejeitos que são lançados ao meio ambiente, causando sérios problemas de poluição e desmatamentos.

A maioria desses rejeitos poderia ser aproveitada em grande proporções como matéria-prima para a fabricação de insumos destinados à Construção Civil como telhas, tijolos, pisos, revestimentos e *materiais pozolânicos*. Para essa última finalidade, existem dois materiais que caracterizam-se pelo excelente potencial, são eles: a sílica ativa (SA) e o metacaulim (MC).

A sílica ativa é o subproduto de indústrias metalúrgicas que produzem ferro-silício e silício-metálico. O material é constituído basicamente de sílica amorfa (teores acima de 80%), na forma de partículas esféricas finamente divididas ( $\phi_{50\%} \approx 0.1\mu\text{m}$ ). A capacidade potencial de captação de sílica ativa no Brasil é superior a 150.000 toneladas (DAL MOLIN, 1995), onde apenas três indústrias de produção de ligas de silício possuem equipamento adequado para captação da sílica ativa. Uma delas localiza-se na região centro-sul do Estado do Pará, mais precisamente no município de Tucuruí (a 150 km de Belém por via rodoviária), sendo que a mesma comercializa o produto para alguns estados brasileiros\* a um preço relativamente elevado. Este fato pode ser atribuído, em parte, ao custo elevado de transporte, entretanto, caso fosse comercializada no estado, acredita-se que a parcela correspondente ao transporte seria substancialmente reduzida.

O metacaulim é um material aluminossilicoso proveniente da calcinação de argilas caulínicas entre 600°C e 900°C. Essa adição mineral já é bastante empregada no estado para fabricação de cimento Portland composto e pozolânico. Todavia, a matéria-prima utilizada para produção da pozolana são argilas caulínicas com grande porcentagem de fases pozolanicamente inertes com o quartzo e a muscovita. Alguns pesquisadores vêm

---

\* Amazônia Legal compreende os estados da Região Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), da Região Nordeste (parte do estado do Maranhão) e Região Centro-Oeste (parte do Estado do Mato Grosso)

• A sílica ativa, apesar de ser captada e ensacada no Pará, não é disponível comercialmente nesse Estado.

distinguindo a pozolana proveniente da calcinação dessas argilas do metacaulim de alta reatividade (MCAR), procedente da calcinação de argilas extremamente finas com elevados teores de caulinita.

Dentro desse panorama, localiza-se ao norte do estado, na fronteira com o estado do Amapá, uma indústria que extrai e beneficia caulim para ser empregado como insumo na fabricação de papel. O processo de beneficiamento dessa indústria gera grandes quantidades de um rejeito com excelentes potencialidades para produção de MCAR, mas cujo destino final, atualmente, é a deposição em áreas próximas à mina. O material é constituído basicamente por uma argila caulínica de extrema finura ( $\phi_{50\%} \leq 0.7\mu\text{m}$ ), acompanhada de teores de ferro e titânio na ordem de 5%, cuja quantidade depositada até 1997, segundo estimativas de FLORES (1998) foi de 2.7 milhões de toneladas.

Acredita-se que a realização de um trabalho que investigue a possibilidade de produção de concretos no Pará com desempenho bastante superior ao empregado atualmente, utilizando os materiais de construção disponíveis na região e as adições minerais, seja relevante porque atrairá a atenção do meio técnico local para as vantagens que o uso de CAD acarreta na qualidade das edificações de concreto.

Outro aspecto importante a ser investigado, tanto do ponto de vista técnico quanto do benefício ambiental, seria a utilização do MC proveniente da calcinação do rejeito do beneficiamento de caulim, pois, além de proporcionar uma destinação mais nobre ao mesmo, seriam obtidas algumas informações adicionais sobre o efeito dessa adição mineral nas propriedades do concreto (resistência e durabilidade).

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica de produção de concretos com desempenho bastante superior ao normalmente empregado, utilizando as adições de SA e MC e os materiais disponíveis no mercado da construção civil de Belém (cimento e agregados). A avaliação baseia-se no estudo comparativo entre os concretos de alto desempenho e os convencionais atualmente produzidos, cujas características são a baixa resistência e a elevada permeabilidade (fator responsável pela alta incidência de manifestações patológicas).

Admite-se que o emprego de adições minerais extremamente reativas no concreto melhora as características tecnológicas e reduz consideravelmente o consumo de cimento para uma mesma resistência ou nível de permeabilidade. Parte-se da hipótese que através do uso de SA e MC no concreto é possível produzir no Pará, mesmo com agregados de baixa qualidade (areia fina e seixo friável), misturas de CAD, com baixa permeabilidade, resistência superiores às empregadas atualmente e competitivos economicamente. Completando a hipótese, a adição de MC, em razão da sua extrema finura e do elevado teor de caulinita presente no rejeito do beneficiamento de caulim, pode proporcionar às misturas de concreto desempenho similar ou, em alguns casos, superior ao dos concretos com SA.

O trabalho, especificamente, tem como objetivo determinar a resistência à compressão simples e a permeabilidade das diferentes misturas de concreto utilizadas no experimento. A permeabilidade será avaliada por dois ensaios que medem mecanismos de transporte distintos. O primeiro é a absorção capilar, através de um teste que afere a taxa de absorção de água; e o segundo, a difusão acelerada de cloretos, mediante o ensaio de penetração acelerada de íons cloretos prescrito pela ASTM C 1202 (1992). A seguir são descritos os objetivos específicos a serem alcançados na pesquisa:

- Investigar a temperatura ideal de calcinação do rejeito do beneficiamento de caulim, de modo a obter o metacaulim de maior atividade pozolânica.
- Investigar as mudanças nas propriedades (resistência à compressão, taxa de absorção e penetrabilidade de íons cloretos) do concreto, verificando a influência de várias relações água/aglomerante, teores e tipos de adição mineral (SA e MC).
- Estabelecer correlações entre a resistência à compressão e as demais propriedades analisadas.
- Comparar as diferenças de desempenho entre os concretos com SA e MC, para adições de 10% em relação à massa de cimento.

As normas nacionais versam sobre o dimensionamento de concretos com resistência até 50 MPa. Para resistências superiores, a NBR 8953 (1992) sugere que se adote os critérios de normas internacionais, cuja tecnologia e materiais diferem por completo da realidade brasileira. O Brasil é um país de dimensões continentais, com uma grande diversidade de



materiais, e são poucos os trabalhos que abordam as propriedades dos concretos levando em conta as características dos materiais locais onde se efetivam as pesquisas. Por essa razão, caracteriza-se como objetivo secundário desse estudo, fornecer dados que venham oferecer aos projetistas locais uma contribuição no que se refere a maior compreensão do comportamento do CAD produzido com os materiais do Estado do Pará. No âmbito nacional, subsidiar uma futura normalização desse tipo de concreto, como também o uso de adições minerais como a SA e o MC no concreto.

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho foi dividido em sete capítulos.

No primeiro capítulo, são apresentados argumentos que justificam a importância da realização do trabalho, os seus objetivos (gerais, específicos e secundários), como foi estruturado e suas limitações.

No segundo capítulo, são discutidos aspectos gerais relacionados à conceituação, às aplicações, à estrutura, aos materiais e às propriedades do CAD, dando ênfase a incorporação de SA.

No terceiro capítulo, faz-se um levantamento bibliográfico sobre a utilização de argila calcinada em concretos, enfocando as características das argilas mais adequadas para produção de pozolana, a reação pozolânica e sua influência nas propriedades do concreto. Ainda nesse capítulo é descrito o processo de produção da indústria beneficiadora de caulim que origina o rejeito utilizado como matéria-prima para fabricação do metacaulim.

No quarto capítulo, é abordado o programa experimental, descrevendo o planejamento e a metodologia de execução dos ensaios, assim como as técnicas necessárias para caracterização química, física e mineralógica dos materiais empregados na pesquisa.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os concretos produzidos com os materiais disponíveis no Estado do Pará.

No sexto capítulo são tiradas as conclusões e no sétimo e último capítulo, são feitas algumas considerações finais, sugerindo-se alguns temas para o desenvolvimento de novos trabalhos na área.

#### 1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Toda pesquisa experimental que tem por objetivo estudar o comportamento do concreto é passiva de sofrer algum tipo de limitação. Primeiro, porque hoje em dia são escassos os recursos financeiros e humanos destinados à pesquisa. Segundo, porque são inúmeros os fatores que influenciam as propriedades desse material, tais como : relação água/aglomerante; tipo e consumo de cimento; composição da mistura; tipo e quantidade de adições minerais e aditivos; tipo, granulometria, forma e dimensão máxima característica do agregado graúdo e do agregado miúdo; grau de hidratação do cimento; tipo de cura, entre outros.

As variáveis dependentes avaliadas nesse trabalho foram uma propriedade mecânica (resistência à compressão) e duas relacionadas com a permeabilidade do material, fator responsável pela durabilidade do concreto. A pesquisa não abordou aspectos importantes condizentes com a estabilidade dimensional, como por exemplo o módulo de deformação, propriedade bastante influenciada pelas características do agregado graúdo.

Os fatores controláveis considerados mais importantes em função das variáveis dependentes escolhidas, e dentro das limitações de um programa de mestrado foram a relação água/aglomerante, o tipo e teor de adição. A escolha recaiu nesses fatores porque exercem influência significativa no aumento da resistência à compressão e na redução da permeabilidade do concreto. Com relação à SA, foram estudados cinco teores de adição, enquanto que para o MC apenas um (10% sobre a massa de cimento). A razão é atribuída ao fato da SA ser uma adição mineral já estabelecida e disponível comercialmente no mercado nacional. O objetivo foi obter informações mais aprofundadas sobre sua influência no comportamento dos concretos produzidos com os materiais de Belém, de modo a viabilizar brevemente sua utilização na região. Quanto ao MC produzido da calcinação do rejeito do beneficiamento de caulim, foi estipulado apenas um teor de adição em virtude de ser o primeiro trabalho de pesquisa realizado com esse material. O objetivo foi apenas verificar se o

rejeito, calcinado sob determinadas condições, poderia se tornar uma adição mineral extremamente reativa como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

Outros aspectos importantes, mas que não foram abordados na pesquisa são o efeito da alta temperatura e a influência da cura nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. A elevada temperatura (entre 28°C e 33°C) da região permite a aceleração das reações pozolânicas e de hidratação, contudo, acarreta na redução do efeito fluidificante do aditivo superplastificante, no aumento da temperatura inicial da mistura e proporciona a rápida evaporação da água de amassamento, com isso, surgem problemas no lançamento e adensamento das misturas, de origem térmica e retração plástica.

## 2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

### 2.1 CONCEITO

O conceito de *Concreto de Alto Desempenho*, atualmente, é atribuído às misturas de concreto com excelentes propriedades relacionadas à trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional e, principalmente, à durabilidade\*.

Todas essas características inicialmente foram associadas à denominação *concreto de alta resistência*, em virtude dessa ser, até bem pouco tempo, a única propriedade empregada como parâmetro de controle de qualidade do concreto.

O desenvolvimento do concreto de alta resistência surgiu da necessidade de construir estruturas resistentes a ambientes de extrema agressividade. Buscava-se, por intermédio da alta resistência mecânica, uma estrutura mais densa e resistente à penetração de agentes agressivos.

A concepção não era totalmente incorreta, pois a elevação da resistência é consequência da redução do volume de vazios, que por sua vez acarreta em incrementos no módulo de deformação e na durabilidade. Na prática, porém, inúmeros foram os exemplos de estruturas deterioradas de forma prematura, principalmente pela corrosão das armaduras. A explicação para tais ocorrências pode ser atribuída, em parte, a dois fatores: o critério de projeto voltado para a obtenção de alta resistência inicial e a ausência de cuidados nos procedimentos de cura. Ambos, associados às ações ambientais, proporcionaram nas primeiras idades, o surgimento de microfissuras interconectadas na camada superficial do concreto, que são responsáveis pela penetração de fluidos agressivos através dos diversos mecanismos de transporte.

Nos últimos anos, houve um crescente interesse do meio científico em melhor compreender o comportamento do concreto frente às ações ambientais, com isso, tem-se observado uma mudança no enfoque das pesquisas internacionais e nacionais. Aspectos

---

\* Essas propriedades não necessariamente ocorrerão de forma concomitante nas misturas de CAD.

relacionados à durabilidade passaram a ser objeto de intensa investigação. Isso se refletiu até na própria denominação do material, que segundo ISAIA (1995), hoje há uma tendência de empregar o termo *alto desempenho* ao invés de *alta resistência*. Essa mudança também pode ser constatada pelo fato que, dentre as centenas de obras que optaram pelo uso do CAD, apenas 25% dos casos adotaram como critério de escolha a resistência mecânica (MALIER, 1992).

MEHTA e AITCIN (1990) apontam para a necessidade de melhor definir o que representa “*alto desempenho*”. Na visão dos autores, a durabilidade é a propriedade do concreto que melhor condiz com essa terminologia e não a resistência mecânica. A durabilidade não está interligada somente à resistência, mas sim, a outras propriedades como a baixa permeabilidade, a alta estabilidade dimensional e a alta trabalhabilidade.

Segundo NEVILLE (1997), a denominação *alto desempenho* significa uma definição mais atual para concretos de alta resistência, porque almejava-se, por intermédio dessa propriedade, o melhor aproveitamento de outras como a durabilidade e/ou o módulo de deformação. O autor acredita que o CAD não necessita ser um concreto de alta resistência, mas sim um material com resistência moderada, porém, com baixa permeabilidade e alta resistência ao gelo-degelo.

Por outro lado, as estruturas de CAD, projetadas com ênfase na baixa permeabilidade ou no módulo de deformação, poderão alcançar resistências, no mínimo, moderadas, caso sejam empregados agregados de boa qualidade. Portanto, não é incorreto associar concretos de alto desempenho a patamares de resistências, desde que a seleção dos materiais constituintes, os procedimentos de dosagem e de mistura, o projeto estrutural e as práticas construtivas sejam condizentes com a aplicação específica do material. Acontece que o conceito de *alta resistência* vem sendo modificado pelos avanços na tecnologia do concreto. Nos anos 50, esse termo foi associado a concretos com 35 MPa. Na década de 60, resistências entre 40 e 50 MPa estavam disponíveis comercialmente. No início dos anos 70, o limite passou a ser de 60 MPa. Na década de 80, algumas estruturas foram construídas com resistências superiores a 60 MPa. Hoje em dia, concretos de 100 a 120 MPa estão dentro da capacidade de produção contínua (GJORV, 1994a; KESLER apud NEVILLE, 1994).

Algumas normas internacionais incluíram valores de resistências na ordem de 60 a 85 MPa (DAL MOLIN, 1995). No Brasil, atualmente a NBR 8953 (1992), norma que classifica o

concreto por grupos de resistência, especifica 50 MPa (classe I) como o valor máximo previsto para dimensionamento com as normas nacionais. DINIZ (apud ROCHA, 1997) afirma que há um certo consenso no Brasil que o CAD seria um concreto com 35 MPa.

Uma outra maneira de classificar os concretos sem envolver números é relativizar o conceito de CAD. Alguns pesquisadores atribuem a denominação *alto desempenho* aos concretos com propriedades muito superiores aos usualmente empregados em uma determinada região (DAL MOLIN e AMARAL FILHO apud SERRA, 1997), uma vez que as dificuldades em produzir concretos de 60 MPa e 120 MPa podem ser similares, dependendo da disponibilidade e das características dos materiais locais (AICTIN e NEVILLE, 1993).

A viabilidade de produção do CAD foi facilitada com o advento dos aditivos superplasticantes. O uso desses aditivos químicos possibilita a completa dispersão dos grãos de cimento, permitindo a obtenção de misturas fluidas com baixa relação água/cimento, e com isso, incrementos substanciais na resistência e na durabilidade (RAMANCHANDRAN e MALHOTRA, 1984; RAMANCHANDRAN, 1983).

A adição mineral é outro material largamente empregado na produção de CAD. Por terem uma área específica elevada e a granulometria normalmente mais fina que a do cimento, densificam a zona de transição por ação física e química, produzindo uma microestrutura mais densa e homogênea, com reduzido volume de vazios. MEHTA (1994) afirma que as adições minerais utilizadas hoje em dia na produção de CAD, são a sílica ativa, a cinza volante, a escória de alto-forno, a cinza de casca de arroz, o metacaulim, o pó de calcário e o “*carbon-black*”.

A SA é uma das adições minerais de maior reatividade e, apesar do custo elevado, tem sido largamente empregada na indústria da construção de concreto, particularmente na produção de concreto de alto desempenho e de alta resistência inicial. A incorporação dessa pozolana geralmente proporciona à mistura de concreto melhor estabilidade no estado fresco, alta resistência inicial e baixa permeabilidade (MEHTA, 1986; DETWILLER e MEHTA, 1989; MALHOTRA et ali., 1994; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; GJORV, 1988). Essas propriedades fizeram com que o concreto fosse empregado com êxito em estruturas expostas a ambientes de extrema agressividade como as plataformas marítimas e os pisos industriais, entre outras, conforme será discutido a seguir.

## 2.2 APLICAÇÕES

A acelerada deterioração das estruturas de concreto e os vultosos gastos correspondentes à recuperação fizeram com que a atenção dos engenheiros e cientistas se voltasse, nos últimos anos, para a questão da durabilidade do material. GJORV (1996a) chama a atenção para a grande incidência da corrosão das armaduras em estruturas de concreto, que além de se constituir em um problema técnico e econômico, representa um grande desperdício de recursos naturais e um problema ambiental de caráter local e mundial.

A magnitude desses problemas, recentemente motivou algumas instituições públicas na Europa e África (Marrocos) a levar em consideração, nos empreendimentos de grande porte, a durabilidade como *critério-chave* para habilitar os construtores. A necessidade de oferecer uma garantia de vida útil mínima às construções fez com que os construtores desenvolvessem novos métodos e técnicas construtivas, além de lançar mão das vantagens proporcionadas pelas propriedades do concreto de alto desempenho. Dentro desse panorama, inúmeras obras-de-arte entre pontes e viadutos foram executadas utilizando CAD (CADORET e RICHARD, 1992).

As plataformas marítimas construídas no Mar do Norte são outro grande exemplo de aplicação do CAD. Nessas construções, o concreto deve apresentar resistência necessária não somente ao risco de corrosão das armaduras, mas também, ao forte impacto da ação das ondas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Na América do Norte, de acordo com AICTIN e LAPLANTE (1992), o grande desenvolvimento das estruturas de CAD está relacionado ao seu uso em colunas de edifícios altos. O emprego desse material proporciona a redução das dimensões dos pilares. Com isso, ocorre uma série de benefícios como o aumento da área útil da edificação e da velocidade de execução da obra, uma redução da carga permanente da estrutura e nas fundações, uma diminuição no consumo de materiais e, conseqüentemente, no custo global da edificação, além da maior durabilidade (ACI Committee 363, 1991; COLACO, 1985; DAL MOLIN, 1995; DRAKE, 1985; HOWARD e LEATHAM, 1989; PAGE, 1990; SMITH e RAD, 1989; WEBB, 1993).

O CAD, ultimamente, tem sido empregado nos mais variados tipos de construções tais como : pavimentos e rodovias (AICTIN e SARKAR, 1994; AICTIN e PIEGON, 1986;

HELLAND, 1990), reatores nucleares (COSTAZ, 1992; de LARRARD et ali, 1990); reparos e recuperação de estruturas (CHORINSKY, 1990), túneis (BROCHERIEIX, 1992; SILVA, 1997), pré-moldados (AMARAL FILHO, 1992), vertedouros e dissipadores de barragens (ALMEIDA, 1994; PAULA LEITE et ali, 1996).

Além dos empregos citados acima, outro campo de aplicação bastante interessante são nas instalações agropecuárias, como por exemplo nos pisos de fazendas produtoras de leite e de criação de suínos e nos defumadores de aves. A baixa permeabilidade do CAD oferece maior resistência aos agentes agressivos provenientes da alimentação, da urina e das fezes dos animais e, sobretudo, impede a proliferação de bactérias, reduzindo sensivelmente a transmissão de doenças, principalmente no caso dos suínos (NEVILLE, 1997; GAGNÉ et ali, 1996).

No Brasil, o uso do CAD é bastante restrito, todavia, algumas obras são dignas de citação como por exemplo a construção, em São Paulo, de um prédio comercial de 41 pavimentos e quatro subsolos, com pilares de 50 MPa, utilizando 8% de sílica ativa. Em Salvador e Brasília foram construídos alguns edifícios com concreto de 60 MPa. (SILVA FILHO, 1996; SILVA, 1996). Em Goiás, foi construída a primeira ponte no país com  $f_{ck}$  superior a 50 MPa (CORBIOLI, 1997). Outras aplicações desse material são em pisos industriais e na recuperação de estruturas (ROCHA, 1997). Segundo ALMEIDA (1994), o número reduzido de empreendimentos que utilizam o CAD não conseguiu despertar o interesse do meio técnico para aplicações mais corriqueiras no restante do país.

### 2.3 MICROESTRUTURA

O CAD se diferencia do concreto de resistência normal pela microestrutura densa, homogênea e pouco cristalina. Segundo MONTEIRO (1993), o CAD é um dos melhores exemplos de como o engenheiro obtém as propriedades desejadas do concreto através da otimização de sua microestrutura.

No concreto de resistência normal, o efeito de superfície causado pelos agregados (“efeito parede”) e a exsudação interna são responsáveis pela zona de transição (ZT) ser uma região com relação água/cimento superior à da matriz de cimento. Isso ocasiona o desenvolvimento de uma estrutura altamente heterogênea, porosa e cristalina (presença de cristais de hidróxido de cálcio e etringita). Essas características tornam a ZT vulnerável à



microfissuração, principalmente nos primeiros dias de hidratação (MONTEIRO, 1993; MONTEIRO e MEHTA, 1985, 1986a, 1986b; HOSHINO, 1988). Uma das maneiras de reduzir esses efeitos é por meio da redução da relação água/cimento e da incorporação de partículas com granulometria mais fina que o cimento como por exemplo a SA e MC, entre outras.

A SA, através da sua atividade pozolânica, reage com o hidróxido de cálcio (CH) liberado pela hidratação do cimento Portland e forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com baixa relação Ca/Si. Essa característica proporciona ao C-S-H maior capacidade de fixar íons como os álcalis e o alumínio, aumentando desse modo a resistência do concreto a ambientes agressivos e à reação álcali-agregado. ZHANG e GJORV (1991) investigaram a capacidade da SA de remover o CH de pastas com baixa porosidade. Os pesquisadores constataram que, independente da relação água/aglomerante, a incorporação de 16% de SA consumiu todo o conteúdo de CH disponível.

A extrema finura e a forma esférica das partículas da SA produzem um mecanismo físico responsável pelos seguintes benefícios: a) redução da exsudação interna porque bloqueia os canais de fluxo de água; b) empacotamento mais eficiente das partículas finas na superfície do agregado, eliminando o *efeito parede*; c) presença de vários pontos de nucleação, evitando a formação preferencial de grandes cristais de CH.

A combinação do efeito físico e químico da SA acarreta em uma mudança considerável na microestrutura do concreto, principalmente na ZT. Essa fase passa a ser menos porosa, pouco cristalina e constituída por camadas de C-S-H, que devido a sua elevada área superficial específica, proporciona diversos pontos de ligação entre a pasta de cimento e o agregado (MONTEIRO, 1985).

Essas mudanças microestruturais repercutem na resistência mecânica do concreto, melhorando a aderência tanto entre a pasta e o agregado como entre a pasta e a armadura (MONTEIRO, 1985, 1993; GJORV et ali, 1990).

A melhor aderência faz com que o CAD se comporte como um material compósito, no qual o agregado não se constitui apenas como um filer inerte, mas sim como um componente ativo que contribui para o aumento de resistência (BENTUR et ali, 1988; AICTIN, 1989; GOLDMAN e BENTUR, 1989).

## 2.4 MATERIAIS

MEHTA e AICTIN (1990) afirmam que a seleção dos materiais é um problema porque os cimentos e os agregados disponíveis apresentam grande variedade de composição e propriedades, e não existe uma sistemática clara que permita escolher facilmente os materiais constituintes, além da diversidade de aditivos químicos e adições minerais disponíveis no mercado. A respeito das adições minerais, nesse capítulo serão abordados aspectos relacionados apenas à sílica ativa, por ser uma das pozolanas avaliadas na pesquisa experimental e porque o metacaulim, a outra adição estudada, será discutida no capítulo 3.

A seguir serão apresentadas algumas considerações sobre os materiais do ponto de vista da produção de concreto de alto desempenho.

### 2.4.1 Cimento

A composição mineral e química, assim como a finura, são fatores importantes a serem considerados na seleção do cimento, pois repercutem na resistência inicial e final do concreto (GJORV, 1994a). Segundo o autor, o teor de  $C_3A$  e a distribuição granulométrica exercem influência na trabalhabilidade e no requerimento de água. Nas situações em que a alta resistência inicial não é requerida, cimentos com baixos teores de  $C_3A$ ,  $C_3S$  e álcalis vão apresentar reduzida taxa de liberação de calor de hidratação e com isso, contribuir para o desenvolvimento de altas resistências finais. MEHTA (1996) acrescenta que elevados teores desses compostos podem incompatibilizar o uso do cimento com determinado superplastificante.

GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) compararam cimentos de finuras distintas com diversos teores de SA e obtiveram as seguintes conclusões: a) em relação à resistência à compressão, os cimentos com maior finura são menos eficientes para relações água/aglomerante reduzidas, pois consomem rapidamente grande parte da água da mistura, interrompendo de forma prematura as reações pozolânicas e de hidratação; b) em relação à consistência, cimentos com menor finura e baixos teores de  $C_3A$  são a melhor escolha, pois apresentam maior abatimento para o mesmo consumo de superplastificante; c) em relação ao tempo de pega, concretos com cimentos de menor finura podem apresentar a desvantagem de não serem desmoldados após 24 horas, devido ao retardo no tempo de pega quando se empregam altas dosagens de superplastificante (3%).

## 2.4.2 Agregados

Os agregados adequados para a produção de CAD devem ser resistentes, densos, são, isentos de substâncias deletérias, limpos, britados, com dimensões equidimensionais e bem graduado (ALMEIDA, 1996; MEHTA, 1996), além de outras particularidades que são discutidas a seguir.

### 2.4.2.1 Agregado graúdo

#### 2.4.2.1.1 Absorção

Segundo NEVILLE (1997), a porosidade e a permeabilidade do agregado exercem influência na resistência e na durabilidade do concreto. De modo geral, absorção de água pelo agregado está diretamente relacionada com a sua porosidade, embora somente os poros em contato com o exterior possam ser preenchidos com água (PETRUCCI, 1980).

Agregados porosos, com alto valor de absorção, geralmente proporcionam misturas de menor resistência em relação aos concretos com agregados de maior densidade. Com relação à durabilidade, concretos com a presença de agregados do tipo “cherts”, folhelhos, calcários e arenitos têm se mostrados suscetíveis a danos causados pelo intemperismo de ciclos alterados de umedecimento e secagem, gelo e degelo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) desenvolveram uma pesquisa que objetivou fixar diretrizes para selecionar os materiais para CAD. Os autores observaram que a absorção dos agregados afeta diretamente a consistência das misturas, constituindo-se, dentre as demais propriedades do agregado, como a mais influente sobre esse aspecto. Concluíram que os agregados adequados são aqueles com absorção igual ou inferior a 1%. Na tabela 1, os agregados com as maiores taxas de absorção, no caso o calcário e a opala, corresponderam às consistências mais rígidas, enquanto que os de absorção inferior a 1% melhoram a consistência das misturas.

TABELA 1 - Propriedades físicas dos agregados e os valores de resistência à compressão e abatimento das misturas de concreto produzidas com os respectivos agregados (GUTIÉRREZ e CÁNOVAS, 1996).

<b>Agregado</b>	<b>Massa Específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>DMC* (mm)</b>	<b>abrasão Los Angeles (%)</b>	<b>f<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>abatimento (mm)</b>
granito 1	2.65	0.97	0.20	12	13	100	17
granito 2	2.67	0.96	0.21	14	17	101	21
calcário	2.50	2.44	0.27	10	26	117	11
basalto	2.99	1.20	0.21	12	15	102	20
opala	1.54	3.46	0.24	13	23	87	6.5

\* dimensão máxima característica.

#### 2.4.2.1.2 Dimensão máxima característica (DMC)

O elevado consumo de cimento e a incompatibilidade de módulo de deformação entre a pasta e o agregado tornam o CAD mais suscetível à microfissuração na ZT, provocada pelas movimentações de retração, fluência e variação térmica (ROGALA et ali, 1995; MEHTA, 1996). Esses efeitos podem ser reduzidos com o uso de partículas menores de agregado graúdo. O fato de agregados menores acarretarem em maiores consumos de água para uma mesma trabalhabilidade e pode ser compensado pelo uso do superplastificante (NEVILLE, 1997).

Nas mistura de CAD com alta resistência, GJORV (1994a) sugere que se empregue agregados com DMC de 10 a 14 mm. Outros relatos na literatura indicam que ótimos resultados foram obtidos com o valor máximo de 19 mm (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ACI Committee 363, 1991; DAL MOLIN, 1995). De acordo com MEHTA e AICTIN (1990), existe controvérsias a respeito da DMC do agregado, porém, em misturas de concreto com alta resistência, há dados suficientes comprovando que o uso de partículas com 25 mm prejudicam a resistência e a obtenção de baixa permeabilidade.

#### 2.4.2.1.3 Distribuição granulométrica

Os fatores dependentes da distribuição granulométrica são a quantidade de água necessária para molhagem dos sólidos, a trabalhabilidade da mistura, a tendência à exsudação e a fração volumétrica dos agregados (NEVILLE, 1997).

MEHTA (1996) e ALMEIDA (1996) afirmam que se a distribuição granulométrica do agregado for adequada, a ponto de proporcionar maior densidade de empacotamento das partículas, menor será o consumo de cimento para uma determinada trabalhabilidade, reduzindo o custo da mistura.

A utilização de agregados friáveis deve ser evitada, ou então, tomados alguns cuidados especiais, pois esses materiais estão sujeitos ao desgaste no seu manuseio, durante a mistura e no transporte do concreto. A trituração do agregado altera a distribuição granulométrica, aumentando a área específica dos mesmos e, conseqüentemente, a demanda de água, reduzindo de forma prejudicial a trabalhabilidade da mistura. GUTIÉRREZ e CÁNOVAS (1996) sugerem que agregados adequados para CAD devem apresentar abrasão “*Los Angeles*” igual ou inferior a 15%.

#### 2.4.2.1.4 Resistência à compressão

As mudanças na microestrutura do concreto através da redução da relação água/cimento e, principalmente, da incorporação de adições minerais altamente reativas e finamente divididas, transformaram-no em um material constituído praticamente por duas fases (agregado e matriz de cimento), conforme foi abordado no item 2.3. Com isso, a resistência do agregado passou a ser constituir em um fator limitante na resistência do CAD, pois muitas vezes a resistência da matriz é superior a do agregado (BAALBAKI et ali., 1991; AICTIN e NEVILLE, 1993). Essa nova característica provoca uma alteração na forma de fratura do concreto. A superfície de ruptura se torna lisa com as fissuras atravessando tanto a matriz de cimento quanto as partículas do agregado.

De acordo com as observações de CARRASQUILLO (1985), os agregados naturais mais favoráveis para o uso em CAD são o basalto, o quartzo e alguns tipos de calcários de estrutura fina.

#### 2.4.2.1.5 Forma e textura superficial

A forma e a textura superficial do agregado graúdo são mais relevantes à medida que se eleva a resistência à compressão do concreto (GIACCIO et ali, 1996). No CAD, a resistência da rocha-mãe torna-se importante, porém, a resistência da aderência entre o agregado graúdo e a matriz também é um fator limitante e depende, entre outros fatores, da

forma e da textura do agregado (ACI Committe 363, 1991; GONÇALVES et ali, 1990).

NEVILLE (1997) acredita que na produção de CAD com alta resistência inicial, o emprego de agregados graúdos com textura áspera proporciona melhor aderência devido a maior área superficial de contato. O uso de agregados com partículas arredondadas, como por exemplo o seixo, é adequado sob o ponto de vista da redução da relação água/cimento, porém, a aderência na interface matriz-agregado pode vir a ser prejudicada pela textura superficial lisa, principalmente na resistência à flexão. Quanto a forma, o autor diz que partículas equidimensionais são preferíveis porque possuem menor área específica superficial (menor demanda de água) e se acomodam de maneira mais isotrópica (homogeneidade).

No caso de mistura de CAD projetada com ênfase na baixa permeabilidade, na qual a alta resistência inicial não seja necessária, o uso de agregados lisos e arredondados acaba sendo mais adequado em razão da menor demanda de água que requerem. Além do que, o ganho de aderência mecânica proveniente da textura áspera é irrelevante perante a forte aderência química entre a pasta e o agregado para as idades mais avançadas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

#### 2.4.2.2 Agregado miúdo

No CAD, devido à elevada quantidade de finos, reduz-se o consumo de areia (entre  $420 \text{ kg/m}^3$  e  $750 \text{ kg/m}^3$ ) ou então se emprega um agregado miúdo com módulo de finura mais elevado (DAL MOLIN, 1995; ALMEIDA, 1990). A areia adequada para utilização em CAD deve apresentar um módulo de finura entre 2.5 e 3.2 (PETERMAN e CARRASQUILLO, 1986; HOWARD e LEATHAM, 1989; ACI Committee 363, 1991; GJORV, 1994a; MEHTA e AICTIN, 1990; CAS-A23.1, 1994).

#### 2.4.3 Água

Os requisitos de qualidade da água para misturas de CAD são os mesmos para concretos de resistência normal.

#### 2.4.4 Aditivo superplastificante

Os aditivos superplastificantes, também denominados de aditivos redutores de água de

alta eficiência, são capazes de reduzir o conteúdo de água de três a quatro vezes em comparação com os aditivos redutores de água normais (plastificantes), sem que haja retardamento no tempo de pega, exsudação ou segregação excessiva (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Enquanto os plastificantes diminuem o teor de água em aproximadamente 5 a 10%, os superplastificantes são capazes de reduzir em até 40% (CURSO DE TECNOLOGIA DE ADITIVOS, 1983).

Hoje em dia, a maior parte dos aditivos superplastificantes disponíveis no mercado são a base de naftaleno sulfonatos condensados com formaldeído e de trimetil-melamina sulfonada condensada com formaldeído, na forma de solução aquosa com 40% de sólidos (COLLEPARDI, 1994; CURSO DE TECNOLOGIA DE ADITIVOS, 1983). Apesar do preço elevado, a preferência por esses polímeros é atribuída à grande capacidade de reduzir o conteúdo de água na mistura sem afetar o tempo de pega e/ou incorporar ar (BUCHER, 1988). Entretanto, torna-se crescente o interesse das pesquisas no desenvolvimento do superplastificante a base de lignossulfonatos por causa do baixo custo relativo dessa substância (RAMACHANDRAN, 1994).

#### **2.4.5 Sílica Ativa**

A SA é um subproduto da indústria siderúrgica de produção de ligas de silício. Esse material consiste de partículas de sílica amorfa esféricas e finamente divididas com diâmetro médio de 0.1 $\mu$ m. Essas características lhe confere, além da alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland, a capacidade de proporcionar melhor empacotamento das partículas de cimento (assunto discutido no item 2.3). Por essas razões, hoje em dia, a sílica ativa é uma adição mineral largamente empregada na produção de concretos de alto desempenho.

Esse material, ao longo dos anos, recebeu inúmeras denominações, como por exemplo, pó de sílica, aerosol, sílica volatizada, sílica pirogênica, microsílica, fumo de sílica ou fumo de sílica condensado. Segundo alguns autores (MALHOTRA e CARETTE, 1983; AICTIN, 1983), o último termo é mais apropriado porque condiz com o processo de geração do subproduto, tanto que tem sido empregado na maioria das publicações internacionais, como também nas normas canadense (CSA-A23.5, 1992), americana (ASTM 1240, 1993), norueguesa (NS 3474,-89) e nas recomendações do Comitê do ACI 234 (1996). No Brasil, esse subproduto inicialmente ficou mais conhecido como microsílica, porém, recentemente,

o seu uso como adição mineral ao concreto foi normatizado pela ABNT (NBR 13956, 1997; NBR 13957; 1997) com a denominação de sílica ativa.

#### 2.4.5.1 Obtenção

A SA constitui-se no subproduto do processo de obtenção do silício metálico e ferro-silício. A produção dessas ligas se dá em grandes fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico, onde ocorre a redução do quartzo pelo carbono a temperaturas acima de 2000°C. As matérias primas utilizadas no processo de transformação são o quartzo de alta pureza, o carvão ou coque (fonte de carbono), cavacos de madeira e, eventualmente, o minério de ferro no caso da produção de ferro-silício. Essas indústrias, por requererem altíssimos consumos de energia, geralmente se localizam em regiões com grande disponibilidade de energia proveniente de hidroelétricas (MALHOTRA, 1993).

MEHTA (1986) relata que as reações químicas no forno são muito complexas, mas uma delas gera a formação de um vapor de óxido de silício que ao ser transportado para a parte superior do forno, onde entra em contato com o ar, oxida e condensa na forma de esferas extremamente finas ( $\phi_{\text{medio}} \sim 0.1\mu\text{m}$ ), contendo teores de dióxido de silício na fase vítrea superiores a 80 por cento. A remoção da SA dos gases de exaustão se dá por meio de filtros de tecidos denominados *filtros de manga*. Maiores detalhes sobre a captação e forma de comercialização do produto podem ser obtidas na tese de doutorado de DAL MOLIN (1995).

MALHOTRA (1993) relata que os principais países produtores de sílica ativa são os EUA (130.000 toneladas/ano), a Noruega (120.000 toneladas/ano) e a Rússia. A produção mundial está estimada em 1.6 milhão de toneladas/ano (NAGATAKI, 1994). DAL MOLIN (1995) calculou a captação potencial de sílica ativa no Brasil no ano de 1993. O valor foi superior a 150.000 toneladas, número que tornaria o país um dos maiores produtores desse material.

#### 2.4.5.2 Características físicas e químicas da sílica ativa

O conteúdo de  $\text{SiO}_2$  na SA depende do tipo de liga que está sendo produzido. Os subprodutos oriundos de ligas de silício-metálico e ferro-silício com 50% ou mais de silício, geralmente contêm teores acima de 80% de  $\text{SiO}_2$  (MEHTA, 1986). MALHOTRA e MEHTA (1996) acreditam que a sílica ativa com percentual superior a 78 é adequada para o uso nas



indústrias de cimento e concreto. Na Noruega, o teor mínimo de  $\text{SiO}_2$  estabelecido pelas entidades é 85% (DASTOL apud DAL MOLIN, 1995). As composições químicas da sílica ativa proveniente de diversas formas de produção são encontradas na Tabela 2 (AICTIN et ali apud MEHTA, 1986).

A maioria das partículas da SA encontra-se na faixa de  $0.01\mu\text{m}$  a  $0.3\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro médio na ordem de  $0.1\mu\text{m}$  a  $0.2\mu\text{m}$ , cerca de cem vezes inferior a partícula de cimento ( $\phi_{\text{médio}} = 10\mu\text{m}$ ). A área específica, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio, varia de 13.000 a 30.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , com valor médio entre 20.000 e 25.000  $\text{m}^2/\text{kg}$  (MEHTA e MONTEIRO, 1994; MALHOTRA et ali, 1994).

A massa específica da SA é de aproximadamente  $2.2 \text{ kg}/\text{dm}^3$ . A massa unitária na forma natural encontra-se entre 200 e 300  $\text{kg}/\text{m}^3$ , fato que dificulta bastante o seu transporte e manuseio. Quando o subproduto é densificado ou pelotizado, a massa unitária passa a ser de 500 a 700  $\text{kg}/\text{m}^3$  (KHAYAT e AICTIN, 1993; MEHTA, 1986; MALE, 1989).

As análises mineralógicas de diferentes tipos de sílica ativa realizadas por difratometria de raio-x, indicam que as mesmas são constituídas essencialmente por sílica não-cristalina (HJORTH apud MALHOTRA et ali, 1994). A estrutura amorfa e a granulometria finamente dividida são as principais razões para a excelente atividade pozolânica da SA. Alguns autores afirmam que a elevada reatividade dessa adição mineral é atribuída, principalmente, às suas características mineralógicas e granulométricas e não à sua composição química e ao tipo de liga que a originou (MEHTA, 1989; BATRAKOV et ali, 1993).

Algumas características físicas da sílica ativa proveniente de ligas de silício metálico e ferro-silício 75% são mostradas na Tabela 3 (NEBESAR e CARETTE apud MALHOTRA et ali, 1994).

TABELA 2 - Composição química da sílica ativa proveniente de diversas formas de produção (AICTIN et ali apud MEHTA, 1986).

Componentes	Si	FeSi-75%	FeSi-50%
SiO <sub>2</sub>	94	89	83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.6	2.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.4	2.5
CaO	0.5	0.2	0.8
MgO	1.1	1.7	3.0
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.2	0.3
K <sub>2</sub> O	0.05	1.2	2.0
C	1.0	1.4	1.8
S	0.2	-	-
MnO	-	0.06	0.2
perda ao fogo	2.5	2.7	3.6

TABELA 3 - Características físicas da sílica ativa (NEBESAR e CARETTE apud MALHOTRA et ali, 1994).

Características Físicas	Si	FeSi - 75%
Passante na peneira 45µm (%)	94.6	98.2
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /kg)	20.000	17.200
Índice de atividade pozolânica com cimento(%)	102.8	96.5
Demanda de água (%)	138.8	139.2
Índice de atividade pozolânica com cal (%)	8.9	-

## 2.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM SÍLICA ATIVA

Nesse item serão discutidos aspectos das propriedades do CAD com a incorporação de sílica ativa, uma vez que as referentes às misturas de CAD com metacaulim serão abordadas no capítulo 3.

### 2.5.1 Trabalhabilidade

MEHTA e MONTEIRO (1994) esclarecem que o esforço necessário para adensar o concreto é regido pelas suas *características de fluxo* e pela facilidade com que a eliminação dos vazios pode ser atingida sem abalar a *estabilidade*. A estabilidade é um índice qualitativo que avalia, simultaneamente, a capacidade de retenção da água (oposto à exsudação) e do

agregado graúdo na massa do concreto fresco (oposto à segregação). Portanto, segundo os autores, a trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos duas componentes principais: **fluidez** ou **consistência**, que descreve a facilidade de mobilidade e a **coesão**, que representa a resistência à exsudação e à segregação.

A presença de SA proporciona um efeito *estabilizante* às misturas de concreto, ou seja, reduz a tendência à exsudação e à segregação. MEHTA (1989) atribui o fato à extrema finura das partículas de sílica ativa que segmentam os canais de fluxo de água interno e aumentam o contato sólido-sólido, tornando a mistura coesa e adequada para concreto projetado, operações de bombeamento e lançamentos por tremonhas. O Comitê 226 do ACI (1987) atribui a alteração nas propriedades reológicas ao aumento no volume da pasta quando se substitui uma pequena parte de cimento por SA. Na verdade, ocorre uma redução da relação água/aglomerante em volume, visto que a massa específica da SA é significativamente menor que a do cimento.

Em contrapartida à melhor estabilidade, as misturas com SA requerem maior energia de vibração para um mesmo abatimento em comparação às misturas sem adição. Segundo SELLEVOLD e NILSEN (1987), o ensaio do abatimento do tronco de cone não é indicado para avaliar a trabalhabilidade de concretos com SA. Porém, esse método de ensaio continuará sendo empregado nas obras pela sua praticidade. Os autores sugerem, como solução, aumentar o abatimento do tronco de cone para as misturas com SA.

### **2.5.2 Resistência à compressão**

O uso de SA é o único modo de produzir concretos com níveis de resistência superiores a 80 MPa (FIP-CEB,1990; AICTIN e NEVILLE, 1993). Atualmente está bem estabelecido no meio técnico que a incorporação de SA contribui significativamente para o desenvolvimento da resistência do concreto, seja pelo efeito físico, seja pela reação pozolânica, mecanismos que proporcionam o fortalecimento da ZT entre o agregado e a matriz de cimento (MALHOTRA et ali, 1994).

Existem dois métodos de utilizar a SA no concreto. O primeiro, largamente empregado, é substituir parte do cimento pela adição mineral. Nesse caso, dependendo do percentual de substituição, as resistências nas primeiras idades (1 e 3 dias) podem ser inferiores às das misturas de controle, especialmente para relações água/aglomerante

superiores a 0.5. O segundo método consiste em adicionar um teor de SA à massa de cimento. Essa forma de uso não prejudica a resistência inicial do concreto e ainda acarreta em um aumento significativo na resistência à compressão em comparação às misturas de referência no período entre o terceiro e o vigésimo oitavo dia de cura úmida (MEHTA, 1986).

A eficiência da SA no desenvolvimento da resistência à compressão depende de vários fatores como o seu teor e forma de incorporação (adição ou substituição), da relação água/aglomerante, do conteúdo de material cimentício, da composição do cimento, do tipo e dosagem de superplastificante e das condições e do tempo de cura (MALHOTRA e MEHTA, 1996; JAHREN, 1983; ISAIA, 1995; WILD et ali, 1995).

O **teor de incorporação** é um parâmetro importante na resistência à compressão dos concretos com SA. MALHOTRA e MEHTA (1996) apontam que o teor ótimo de *substituição* geralmente está compreendido entre 7 a 10%. Porém, em casos especiais, substituições de até 15% no concreto têm sido empregadas com sucesso. Esse último valor foi considerado por YOGENDRAN et ali (1987) como a dosagem ótima de SA para misturas de concreto com 28 dias de idade e relação água/aglomerante de 0.34. Para o caso da *adição*, não foi encontrado nenhum relato da literatura que apontasse o teor ótimo de SA, contudo, mais adiante no texto serão discutidos alguns aspectos sobre esse modo de emprego.

O **consumo de cimento** e a **relação água/aglomerante** são fatores interdependentes e que influenciam o efeito da SA sobre a resistência à compressão dos concretos. YOGENDRAN et ali (1987) investigaram concretos com consumo de cimento entre 375 e 500 kg/m<sup>3</sup>, relações água/aglomerante de 0.28 e 0.34 e níveis de *substituição* de SA variando de 5 a 25%. Os pesquisadores concluíram que para misturas com elevado consumo de cimento, o fator de eficiência da SA decresce com o aumento do consumo de cimento e com a redução da relação água/aglomerante. Entende-se por fator de eficiência (K), a quantidade de cimento que pode ser substituída por SA para obter o mesmo valor da propriedade estudada (DAL MOLIN, 1995), no caso da referida pesquisa, a resistência à compressão.

MALHOTRA (apud MEHTA, 1986) comparou a evolução da resistência de concretos de referência e com 5%, 10% e 15% de *substituição* de SA, considerando relações água/aglomerante de 0.4, 0.5 e 0.6 e consumos de cimento de 431, 340 e 284 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. O autor constatou que a incorporação de SA não aumentou a resistência à compressão até os 3 dias de idade para as relações água/aglomerante de 0.5 e 0.6. No entanto,

para os concretos com relação água/aglomerante de 0.4, observou-se incrementos significativos de resistência com a SA. Para as idades de 7 e 28 dias, independente da relação água/aglomerante, houve aumentos na resistência à compressão, sendo que esses foram proporcionais ao teor de substituição de cimento pela pozolana.

De maneira geral, para as misturas com substituição parcial de cimento por SA, a evolução da resistência de concretos com SA é maior quando comparada às das misturas de referência no período entre o terceiro e o vigésimo oitavo dia, repercutindo em resistências superiores nas idades de 7 e 28 dias (MEHTA, 1986; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; CARETTE e MALHOTRA, 1993, DETWILLER e MEHTA, 1989). Para idades mais avançadas, praticamente não há diferenças de resistência entre os concretos com e sem SA (MAAGE e SELLEVOLD, 1987). FOURE (apud GJORV, 1994) explica que a baixa taxa de desenvolvimento de resistência após os 28 dias em concretos de alto desempenho com SA é relativa à falta de água para hidratação adicional.

No caso das misturas com *adição* de SA, MEHTA (1986) afirma que inúmeros pesquisadores têm observado que a eficiência da SA sobre a resistência do concreto é relativamente superior para misturas com reduzido consumo de cimento (entre 200 e 250 kg/m<sup>3</sup>). PISTILLI et ali (1984) perceberam que a adição de 10% de SA, numa mistura com consumo de cimento de 237 kg/m<sup>3</sup> e relação água/aglomerante de 0.72, resultou em ganhos de resistência de 20%, 40% e 50%, em relação às misturas de controle, para as idades de 2, 7 e 28 dias, respectivamente. Enquanto que para uma mistura com consumo de cimento de 297 kg/m<sup>3</sup>, a adição de 24 kg/m<sup>3</sup> de SA aumentou a resistência à compressão em apenas 10%, 20% e 8.4% para as idades de 7, 28 e 90 dias, respectivamente. MALHOTRA, CARETE e AICTIN (apud MALHOTRA e CARETE, 1983) também constataram que a SA é mais eficiente para as misturas com reduzido consumo de cimento. Os pesquisadores obtiveram incrementos de resistência na ordem de 158% aos 91 dias para misturas com consumo de cimento de 175 kg/m<sup>3</sup> e 20% de adição de SA.

DAL MOLIN (1995) desenvolveu um programa experimental no qual avaliou o desempenho de concretos com e sem *adição* de sílica ativa, abrangendo várias idades, tipos de cura e relações água/aglomerante (0.28 a 0.58). De acordo com os resultados dessa pesquisa, o aumento de resistência com a adição de 10% de SA no concreto, comparativamente às misturas sem adição, variou entre 7 e 16%, porém não houve uma tendência definida no comportamento dos concretos com adição em função da relação água/aglomerante. A

divergência de resultados entre as pesquisas referendadas pode ser atribuída à diversidade de parâmetros envolvidos nos ensaios.

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), o **uso do aditivo superplastificante** é essencial para assegurar a completa dispersão da sílica ativa nas misturas de CAD. DETWILLER e MEHTA (1989) atribuem a plena ação dos mecanismos químico e físico da SA à importância de se obter uma boa dispersão de suas partículas assim como realizar uma cura adequada.

As **condições e o tempo de cura** são fatores determinantes na resistência dos concretos com SA. Como a contribuição da SA para o desenvolvimento da resistência ocorre até o vigésimo oitavo dia, é natural que a cura, principalmente nas primeiras idades, afete significativamente a resistência desses concretos (SELLEVOLD e NILSEN, 1987, MEHTA, 1986). KHAYAT e AICTIN (1993) apontam um período de 7 dias de cura úmida como adequado para que concretos com SA desenvolvam suas resistências potenciais. Conclusões semelhantes foram obtidas por vários pesquisadores (LOLAND e HUSTAD, PETERSSON et ali, apud SELLEVOLD e NILSEN, 1987).

### **2.5.3 Durabilidade**

#### **2.5.3.1 Permeabilidade**

O termo *permeabilidade*, na verdade, refere-se à penetração de um fluido no concreto através de um gradiente de pressão externa. O ingresso de fluidos e íons agressivos não se efetua tão somente por meio da permeabilidade, mas também quando há um gradiente de concentração (difusão) ou de pressão interna (absorção) e por efeito de um campo elétrico (migração) (HELENE, 1993; NEVILLE, 1997). Portanto, o que realmente interessa é a *penetrabilidade* do concreto, termo que expressa o acesso e o movimento global dos fluidos no concreto. Porém, a denominação *permeabilidade* normalmente é empregada no meio científico para definir o mesmo fenômeno e será aceita nesse trabalho, exceto quando houver a necessidade de distinguir os diversos mecanismos de transporte.

A durabilidade do concreto é largamente controlada pela sua permeabilidade (MEHTA, 1989; PERRATON et ali, 1992). A medida que se reduz a permeabilidade, o concreto se torna mais resistente a ambientes agressivos. Isso ocorre de maneira mais

acentuada quando se incorpora adições minerais, pois há um refinamento da estrutura dos poros da matriz e da zona de transição. Essa redução é substancialmente maior em concretos com SA, em razão do efeito físico e químico dessa pozolana (MALHOTRA et ali, 1994).

Os fatores de eficiência da SA relacionados à permeabilidade do concreto são muito maiores do que para a resistência à compressão (KHAYAT e AICTIN, 1993), especialmente quando se emprega teores reduzidos de SA em concretos de baixa resistência (SELLEVOLD, 1987).

Ensaio de intrusão de mercúrio em pastas de cimento endurecidas com e sem sílica ativa indicam que a presença dessa adição mineral reduz sensivelmente a quantidade de poros capilares grandes, refinando a estrutura dos poros, apesar de não alterar a porosidade total em relação às pastas sem adição (Figura 1) (ZHANG e GJORV, 1991; MEHTA e GJORV, 1982). MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que a resistência e a permeabilidade do concreto são controladas pela distribuição do tamanho dos poros e não pela porosidade total (relação entre o volume dos poros e o volume total do concreto).

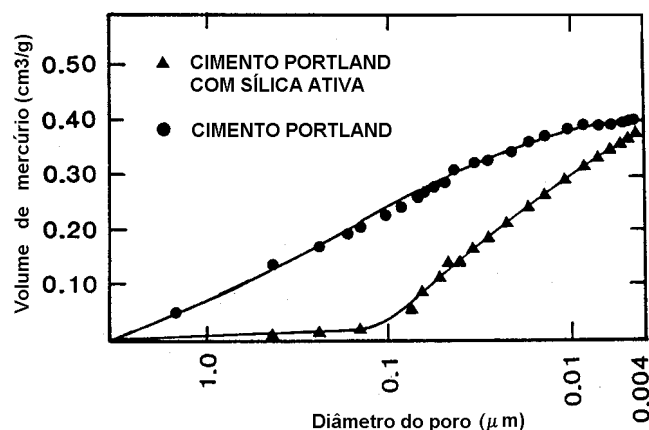


FIGURA 1 - Distribuição do tamanho dos poros em pastas de cimento com e sem sílica ativa (MEHTA e GJORV, 1982).

Nos últimos anos, inúmeras construções de concreto armado foram deterioradas precocemente pela corrosão das armaduras, fenômeno desencadeado pela penetração de fluidos e íons agressivos no concreto (gás carbônico, oxigênio e água com ou sem cloretos e sulfatos). Por causa disso, há um grande esforço do meio científico em desenvolver e aprimorar ensaios que possam melhor caracterizar a resistência do concreto à penetração de fluidos que contenham íons cloretos (GJORV e SAKAI, 1995).

### 2.5.3.2 Ensaio de penetração de água e íons agressivos

Os agentes agressivos presentes na atmosfera ou dissolvidos em água, dependendo das condições ambientais, podem penetrar no concreto por diversos mecanismos de transporte (absorção por sucção capilar, difusão ou permeabilidade) (NEVILLE, 1997). Em geral, a absorção de água e a difusão de gases (dióxido de carbono e oxigênio) e vapor d'água são mecanismos de penetração que ocorrem em concretos porosos ou parcialmente saturados. No caso do sistema de poros estar saturado e existir um diferencial de pressão externa, a permeabilidade passa a ser o mecanismo de transporte de massa preponderante. Entretanto, quando a porosidade é reduzida ou o concreto se encontra completamente saturado, o mecanismo de difusão iônica (cloretos e sulfatos) se torna predominante (GJORV e SAKAI, 1995; ZHANG e GJORV, 1991). A Figura 2 ilustra como uma mesma peça estrutural pode estar sujeita a diferentes mecanismos de transporte. A seguir são descritos alguns ensaios de penetração de água e íons agressivos desenvolvidos a partir dos diversos mecanismos de transporte existentes.

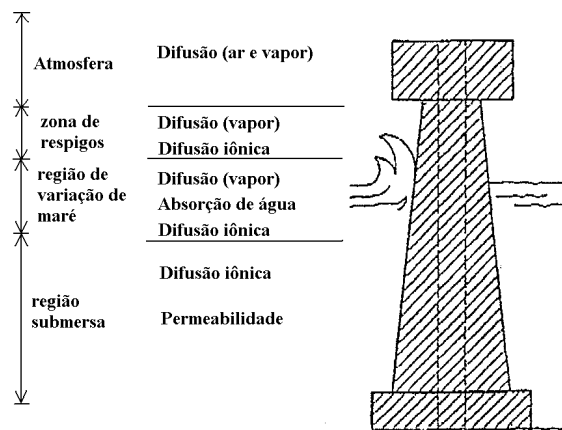


FIGURA 2 - Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima (CONCRETE SOCIETY WORKING PARTY apud PERRATON et ali, 1992).

#### 2.5.3.2.1 Permeabilidade à água

O teste de permeabilidade à água não é adequado para averiguar a percolação de água no CAD, porque esse concreto apresenta reduzido percentual de poros capilares, que são os responsáveis pela taxa de escoamento de água sob pressão em materiais porosos (PERRATON et ali, 1992; WOLF, 1991). Segundo GJORV (1994b), o maior problema do ensaio de permeabilidade à água em CAD se deve à alta densidade desse material. Isso



explica porque o efeito da sílica ativa sobre a permeabilidade à água não é significativo em concreto de alto desempenho (GJORV, 1983).

Nas misturas de CAD, raramente a pressão externa será a força impulsionadora dos fluidos que ingressam no concreto. Portanto, surgiu a necessidade de desenvolver novos ensaios relacionados a outros mecanismos de transporte, como a difusão e a absorção por sucção capilar.

#### 2.5.3.2.2 Difusão iônica acelerada (teste de migração)

A difusão iônica é um dos principais mecanismo de penetração de cloretos em estruturas de concreto de alto desempenho. Entretanto, a determinação de coeficientes de difusão através de ensaios sob condições naturais demanda bastante tempo. Esse fato motivou o desenvolvimento de ensaios que utilizassem campo elétrico (migração) para acelerar a penetração de cloretos (GJORV, 1996b).

O primeiro teste que empregou o campo elétrico surgiu nos EUA no início dos anos 80 (WHITING, 1981), e foi denominado “*AASHTO T 277-83 Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*”. Esse ensaio surgiu da necessidade de se avaliar a qualidade dos concretos de tabuleiros de pontes expostos ao efeito dos sais degelantes. A ASTM, posteriormente, corrigiu algumas deficiências do método e, em 1992, normatizou o ensaio com a denominação “*ASTM C 1202 Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*”(HELENE, 1993; ISAIA, 1995). O ensaio consiste em determinar a carga elétrica total que atravessa uma amostra de concreto, associando esse valor à permeabilidade do concreto aos íons cloretos.

WHITING (1981) propôs uma escala que relaciona valores de carga elétrica total passante ao tipo de mistura de concreto e à sua respectiva resistência à penetração dos íons cloreto (Tabela 4).

TABELA 4 - Escala de permeabilidade ao íon cloreto proposta por WHITING (1981).

<b>Carga total passante (Coulomb)</b>	<b>Permeabilidade</b>	<b>Tipo de concreto (relação a/c estimada)</b>
> 4000	alta	concreto com a/c > 0.6
entre 2000 e 4000	média	Concreto com a/c entre 0.4 e 0.5
entre 1000 e 2000	baixa	concreto com a/c < 0.4
entre 100 e 1000	muito baixa	concreto látex
< 100	desprezível	concreto polímero

PERRATON et ali (1992) observaram que para uma determinada relação água/cimento, a introdução de SA produz efetivamente concretos com baixa permeabilidade aos íons cloretos. Os pesquisadores concluíram que o efeito máximo é alcançado com teores de 8 a 10% de SA. PLANTE e BILODEAU (1989) também constataram que adição de 8% (sobre a massa de cimento) reduz significativamente a carga elétrica passante no concreto. Essa redução, segundo os autores, é atribuída principalmente ao aumento na densidade da matriz de cimento devido a presença da SA, mas também à redução da relação água/aglomerante, conforme pode ser visto na Figura 3. Em ambas as pesquisas, observou-se que a incorporação de SA permite a obtenção de concretos com baixa permeabilidade aos íons cloretos (carga passante entre 1000C e 2000C) através de relações água/cimento superiores à indicada na tabela 4.

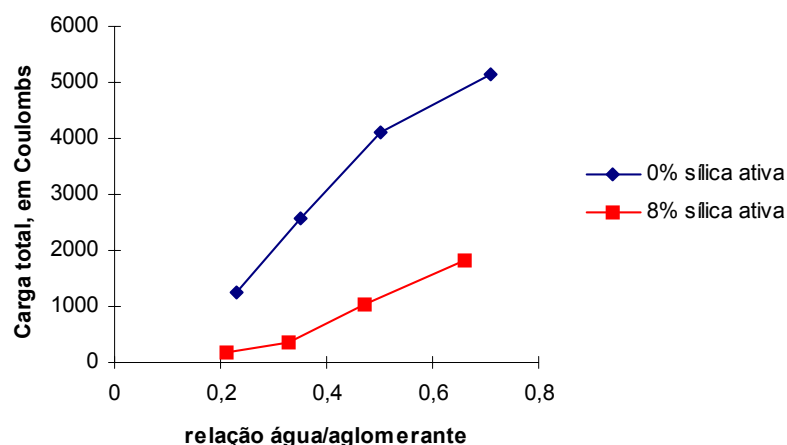


FIGURA 3 - A influência da sílica ativa na permeabilidade aos íons cloretos (PLANTE e BILODEAU, 1989).

O método tem sofrido críticas porque não fornece qualquer informação sobre a mobilidade iônica do cloreto. ANDRADE (1993) afirma que a corrente total aferida

representa o fluxo de todos os íons presentes na solução dos poros ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) e não somente o fluxo de cloretos. Além do que, a geração de calor proveniente da voltagem excessiva (60V) modifica a velocidade do fluxo dos íons, principalmente em concretos extremamente porosos.

Inúmeras modificações foram proposta como o monitoramento do cloreto na célula de NaOH e a redução da tensão aplicada e do tempo de duração do ensaio (CABRERA e CLAISSE, 1990; TANG e NILSSON, 1992; DETWILLER et ali, 1991; GJORV e SAKAI, 1995). Todavia, nenhum desses ensaios podem prever a vida útil da estrutura, porque aferem somente a facilidade de mobilidade iônica dos íons cloretos no concreto (DETWILLER et ali, 1994).

BERKE et ali (1993) constataram que concretos com reduzidos valores de carga elétrica passante não necessariamente são imunes à penetração de cloretos e à corrosão das armaduras. ISAIA (1995) também afirma que o ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) não traduz com fidedignidade a durabilidade dos concretos, especialmente em relação aqueles com elevado teor de pozolana, e os resultados do método devem ser encarados com reserva.

Na verdade, o método ASTM C 1202 mede a **resistividade elétrica do concreto** e não a **resistência do material à penetração dos íons cloretos** (GJORV, 1996b). As vantagens do ensaio são relativas à execução fácil e rápida, além do que, pode ser aplicado em quase todos os tipos de concreto, incluindo o concreto de alto desempenho (PERRATON et ali, 1992). Isso permite uma avaliação comparativa do efeito de diversas adições minerais no concreto.

#### 2.5.3.2.3 Absorção por sucção capilar

Outro mecanismo de transporte relevante para a durabilidade é a absorção capilar. No caso de concretos não saturados expostos a soluções salinas, as forças capilares podem ocasionar a infiltração dos cloretos de forma mais rápida que a difusão iônica (KROPP et ali, 1995)

As medidas de absorção eram determinadas, anteriormente, por um ensaio que mede a porcentagem do volume de poros em relação ao volume total da amostra. Na realidade, esse teste fornece dados sobre a porosidade do concreto e não sobre a facilidade com que um

fluido penetra no mesmo. De maneira geral, a metodologia consiste em secar o corpo-de-prova até a constância de massa. Em seguida, submergi-lo em água para determinar o acréscimo de massa em relação à massa seca. Conforme o tipo de procedimento de secagem empregado, diferentes resultados de absorção podem ser obtidos. Portanto, segundo NEVILLE (1997), os valores de absorção total não podem ser usados como medida de qualidade do concreto. A ABNT propõe dois ensaios para medir a absorção da água: um por imersão (NBR 9778, 1987) e outro por capilaridade (NBR 9779, 1995).

A tendência atual é a realização de ensaios que meçam a velocidade de absorção da água por um determinado período de tempo. HALL (1989), revisando vários métodos de determinação da penetração de água em concreto, sugeriu que os dados de absorção acumulativa da água sobre um período razoável de tempo são mais precisos do que a medição de um único ponto que determina o índice de absorção total (teste anteriormente citado). Nos ensaios ficou demonstrado a existência da seguinte relação:

$$i = S.t^{1/2} \quad (\text{eq.1})$$

sendo que  $i$  = absorção acumulativa de água por unidade de área da seção transversal em contato com a água ( $\text{kg/m}^2$ ,  $\text{g/cm}^2$  ou mm).

$t$  = tempo medido no momento de determinação da massa (h, min ou seg.).

$S$  = taxa de absorção de água por sucção capilar ( $\text{mm/h}^{1/2}$ ).

A equação 1 mostra que a absorção acumulada de água está diretamente relacionada com a raiz quadrada do tempo. A formulação matemática desse mecanismo de transporte se baseia na teoria do fluxo capilar em material insaturado, que adapta a idéia do fluxo de Darcy para material poroso, porém, adotando como força motriz a sucção capilar proveniente da estrutura dos poros não saturados. Segundo HALL (1989), essa teoria, desenvolvida para mecânica dos solos, oferece uma boa descrição do processo de fluxo capilar em materiais cimentícios.

Na prática, o efeito da qualidade do concreto de cobrimento é o que realmente interessa para a durabilidade (HELENE, 1993; DHIR et ali, 1986). Nesse sentido, inúmeros ensaios de campo foram desenvolvidos nos últimos anos para medir a taxa de absorção de água por sucção capilar da camada superficial do concreto (ISAT, FIGG e CAT) (CARINO, 1996). Entretanto, os valores dos testes são significativamente afetados pela condição inicial

de umidade e isso deve ser levado em consideração no momento da avaliação dos resultados. DHIR et ali (1987) observaram que um valor reduzido de taxa de absorção pode ser atribuído tanto às características inerentes de baixa absorção quanto ao fato de que os poros de um concreto de baixa qualidade já estejam preenchidos com água. Portanto, o maior obstáculo nos ensaios de campo é a dificuldade de levar a amostra a um estado de umidade conhecido e uniforme. Uma solução parcial é a de pré-condicionar o corpo-de-prova. A maneira mais eficiente seria através da secagem à temperatura de 105°C até a constância de massa. Todavia, essa exigência não pode ser atendida para as condições de campo (NEVILLE, 1997; DHIR et ali, 1987).

Em relação aos ensaios de laboratório, arranjos geométricos que meçam o fluxo unidirecional são preferíveis porque facilitam a aquisição de dados e simplificam a formulação matemática (HALL, 1989). Quanto à condição de umidade da amostra, caso difira de um tipo de concreto a outro, os parâmetros de sucção não podem ser comparados. Quando o teor de umidade da amostra for elevado, investigações têm demonstrado que a absorção acumulada de água ( $i$ ) não é função direta da raiz quadrada do tempo (equação 1). Por isso, a secagem à temperatura de 105°C até a constância de massa é freqüentemente utilizada (GJORV, 1994b). Entretanto, outros trabalhos submetem as amostra à secagem em temperaturas mais baixas.

HALL (1989) cita um ensaio laboratorial bastante simples desenvolvido pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Manchester (Inglaterra). A metodologia do teste consiste em registrar, ao longo do tempo, o incremento de massa de um prisma de concreto (50x50x150 mm), apoiado sobre pequenos suportes, de modo que o nível de água fique, no máximo, 5 mm acima da superfície de absorção. A tendência geral dos resultados demonstrou que os menores valores de taxa de absorção foram obtidos para concretos e argamassas com maior densidade (misturas de alto desempenho). Os corpos-de-prova foram submetidos à cura úmida por 10 dias e, em seguida, pré-condicionados à temperatura de 40°C até a data do ensaio. Os valores de taxa de absorção para concretos com 28 dias e relação água/cimento de 0.4 foram na ordem de 0.01 mm/h<sup>1/2</sup>.

HO et ali (1986) obtiveram a taxa de absorção capilar por meio de um ensaio que afere a profundidade de penetração da água no concreto. Essa metodologia permite avaliar quanto tempo a água leva para penetrar em uma determinada espessura de concreto. O procedimento de secagem das amostras consistiu em expô-las por 21 dias à temperatura de 23°C e à

umidade relativa de 50 %. A medida da profundidade de penetração foi realizada visualmente na superfície de fratura do corpo-de-prova rompido à flexão. Os resultados alcançados nesse experimento variaram de  $3 \text{ mm/h}^{1/2}$  até  $26.8 \text{ mm/h}^{1/2}$ , conforme o tipo de concreto e o tempo de cura. Segundo os pesquisadores, o concreto deve apresentar uma taxa de absorção inferior a  $3 \text{ mm/h}^{1/2}$ , porque esse valor garante que durante um período de chuva de 24 horas (fato bastante improvável, mas passivo de ocorrência em algumas localidades), a água não alcance a armadura recoberta por uma camada de 15 mm de concreto.

KELHAM (1988) desenvolveu um outro método laboratorial que mede a taxa de absorção do concreto em função da profundidade de penetração da água (princípio semelhante ao anteriormente descrito). Na preparação do corpo-de-prova, as superfícies laterais da amostra são seladas de modo que apenas a face inferior fique em contato com a água. A extremidade superior fica sujeita à pressão atmosférica por intermédio de um tubo plástico em contato com o ar. A Figura 4 mostra o aparato do ensaio.

O ensaio registra, ao longo do tempo, o acúmulo de massa de um corpo-de-prova submerso na água. De posse das leituras, traça-se o gráfico (*i versus  $t^{1/2}$* ) e se constata que o comportamento do concreto é representado por duas retas (Figura 5). O ponto de inflexão das retas, denominado “*nick point*”, corresponde ao momento em que a umidade alcança a outra extremidade do corpo-de-prova. A partir daí, a taxa de incremento de massa se torna muito lenta (reta de menor declividade) indicando que o mesmo se encontra efetivamente saturado. A taxa de absorção capilar é determinada pela relação entre a espessura do corpo-de-prova (50 mm) e a raiz quadrada do tempo necessário para saturá-lo ( $t_{\text{cap}}$ ).

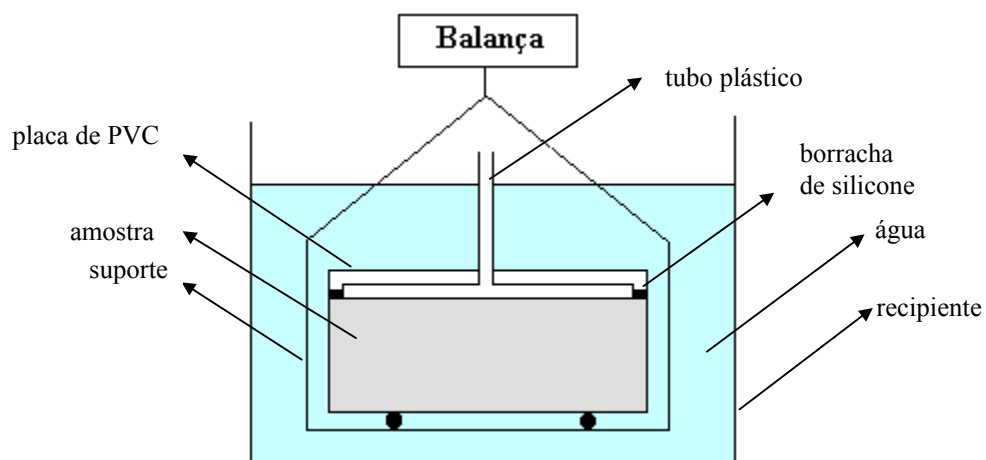


FIGURA 4 - O esquema gráfico do aparato do ensaio desenvolvido por S. Kelham (KELHAM, 1988).

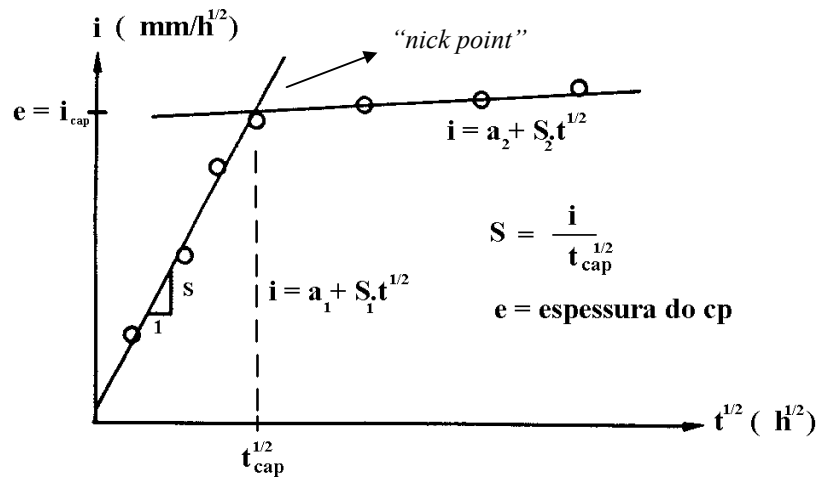


FIGURA 5 - Relação entre o acúmulo de massa e a raiz quadrada do tempo (GJORV, 1994b).

KELHAM (1988) estudou o efeito da cura sobre a taxa de absorção de três misturas de concreto: de referência, com 25 % de cinza volante e com 60 % de escória de alto-forno. As taxas de absorção capilar obtidas foram de 14.3-20 mm/h<sup>1/2</sup>, 9.9-24.6 mm/h<sup>1/2</sup>, 7.6-28.4 mm/h<sup>1/2</sup>, respectivamente. Os valores inferiores correspondem à cura ao ar e os superiores à cura úmida. Na cura úmida, a taxa de absorção dos concretos com adição mineral são menores que a do concreto de referência. No caso da cura ao ar, constata-se justamente a situação contrária. Isso demonstra que concretos com adição mineral são muito mais suscetíveis ao efeito das condições de cura do que as misturas com cimento Portland comum. Todos os corpos de prova foram pré-condicionados à temperatura de 105°C por seis dias antes da imersão em água. O tempo necessário para saturação das amostras variou entre 3 e 48 horas, dependendo do tipo de cura. GOPALAN (1996) sugere que as espessuras das amostras utilizadas nesse teste sejam reduzidas para 25 mm; desse modo, há uma considerável redução da duração do ensaio e dos erros provenientes de medidas sucessivas.

Na Noruega, o ensaio de sucção capilar determina dois parâmetros: a taxa de absorção capilar e a resistência capilar. Entende-se por resistência capilar, a relação entre o tempo necessário para saturar efetivamente o corpo-de-prova e o quadrado de sua espessura (equação 2).

$$m = t_{cap}/e^2 \quad (\text{eq. 2})$$

sendo  $m$  = resistência capilar (seg/m<sup>2</sup>)

$t_{cap}$  = tempo necessário para saturar efetivamente o corpo-de-prova (seg)

$e$  = espessura do corpo-de-prova (m)

Os gráficos das Figuras 6 e 7 mostram o efeito da SA na taxa de absorção e na resistência capilar de concretos com diversas relações água/aglomerante. Dependendo da relação água/aglomerante, a incorporação de 5% de SA reduziu a taxa de absorção do concreto de 13 a 26% e incrementou a resistência capilar de 47 a 65% em relação às misturas de referência (SMESPLASS apud GJORV, 1994b).

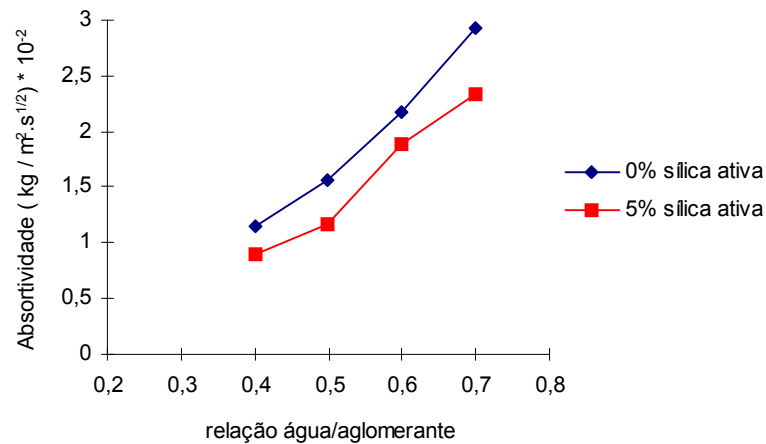


FIGURA 6 - Gráfico taxa de absorção versus relação água/aglomerante (SMESPLASS apud GJORV, 1994b).

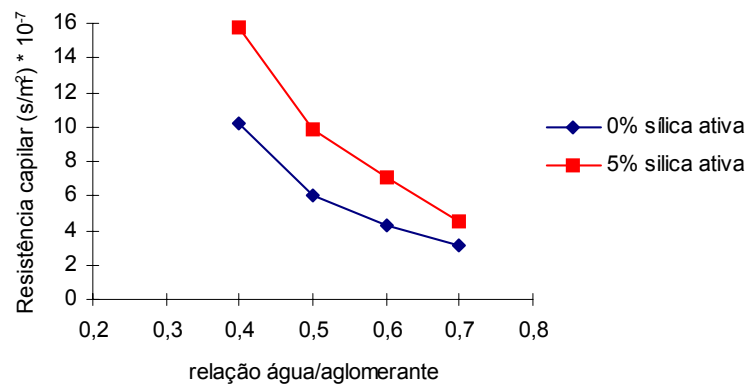


FIGURA 7 - Gráfico resistência capilar versus relação água/aglomerante (SMESPLASS apud GJORV, 1994b).

Os resultados de taxa de absorção obtidos nos diversos ensaios são bastante distintos e chegam a diferir em até três escalas de valores, fato que torna a comparação direta extremamente difícil. Isso é atribuído às diversas maneiras como a propriedade é aferida (seja por avaliação da profundidade de penetração ou pelo incremento de massa) e aos procedimentos de pré-condicionamento das amostras (seja pelo tempo de exposição, como também pela temperatura e umidade distintas).



### 3. O USO DE ARGILA CALCINADA COMO ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETOS.

Nesse trabalho o termo *argila* é atribuído a uma rocha finamente dividida, constituída essencialmente por argilominerais, podendo conter outros minerais que não são considerados argilominerais (calcita, dolomita, quartzo, gipsita, aluminita, pirita e outros), matéria orgânica, sais solúveis e outras impurezas (SOUZA SANTOS, 1992). Segundo o referido autor, os *argilominerais* são definidos quimicamente como sendo silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter certos teores de elementos alcalinos ou alcalino-terrosos. O termo caulim é empregado para designar as argilas que são constituídas basicamente pelo argilomineral caulinita.

#### 3.1 HISTÓRICO E PERSPECTIVAS

A utilização da argila calcinada como pozolana ocorre há mais de vinte séculos e antecede o uso do cimento. Segundo PAPADIKIS e VENUAT (1968), há mais de 2700 anos os etruscos e, posteriormente, os gregos na ilha de Santorin já utilizavam materiais pozolânicos de origem vulcânica em suas construções. Os romanos descobriram que argamassas de cal e tufos vulcânicos, extraídos das regiões de Nápoles e Roma, constituíam-se em excelentes produtos cimentantes. Um dos locais de aquisição desse material situava-se ao redor do Monte *Puzzuoli*, daí a origem da denominação *pozolana*.

Outra forma utilizada pelos romanos para obtenção de pozolana foi através da moagem de tijolos e telhas cerâmicas. Empregavam esse tipo de material nas regiões onde não havia disponibilidade de tufos e cinzas vulcânicas. O mesmo princípio foi aplicado no Egito e na Índia, onde os construtores nativos fabricavam uma pozolana procedente da moagem de tijolos de alvenaria, que era denominada de “*homra*” pelos egípcios e “*surkhi*” pelos hindus. Até os dias de hoje, o “*surkhi*” continua a ser empregado e produzido da maneira tradicional na Índia, Indonésia e outros países em desenvolvimento.

Há evidências que o emprego de argamassas de cal e argila calcinada foi bastante difundido na Europa no século XVII. Em 1754, Smeaton realizou experimentos com intuito de viabilizar a utilização desse tipo de argamassa na construção do farol de Eddystone

(COOK, 1986). Oitenta anos depois, trabalho semelhante foi efetivado na reconstrução da ponte de Londres (LEA, 1970). Segundo o mesmo autor, Frémy foi o primeiro a identificar, em 1868, a relação entre a propriedade pozolânica das argilas e o seu grau de desidroxilação.

Em meados do século XIX, com o desenvolvimento do cimento Portland, as argilas calcinadas caíram em desuso em razão das excelentes propriedades do novo aglomerante. O seu emprego somente foi restabelecido após algum tempo como adição mineral em cimentos Portland pozolânicos (ZAMPIERI, 1989). O primeiro relato dessa forma de utilização foi na Inglaterra, em 1909, com a fabricação do Cimento Vermelho de Potter (*“Potter’s Red Cement”*), que normalmente era empregado em construções expostas à ação das águas. Na França, a Companhia Lafarge produziu durante muito tempo, até aproximadamente 1915, um cimento com incorporação de pozolana proveniente da calcinação de argilas (LEA, 1970). Em 1902, no Egito, uma mistura de argila calcinada e cimento Portland foi empregada na construção da barragem de Aswan e, posteriormente, na barragem de Sennar durante os anos de 1919 e 1925. Nos EUA, por volta de 1940 e no final da década de 60, as pozolanas naturais e as argilas calcinadas constaram de um extenso programa de investigação sobre suas potencialidades de uso em argamassas e concretos, realizado pelo *Corps of Engineers* e pelo *Bureau of Reclamation*. Todavia, a partir dos anos 80, o uso da argila calcinada limitou-se aos locais onde não havia disponibilidade de subprodutos industriais como a cinza volante e a escória de alto-forno, por causa dos elevados custos de ativação térmica necessária para o desenvolvimento da atividade pozolânica (COOK, 1986).

O panorama, hoje em dia na Europa, está se modificando, a escassez no fornecimento desses subprodutos industriais (fato que eleva consideravelmente os custos de aquisição) e os problemas relacionados à proteção ambiental e à economia de recursos energéticos motivaram a efetivação de pesquisas que investigassem o emprego de fontes de energia e matéria-prima alternativas. Um grupo de pesquisadores do Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lion na França (INSA) desenvolveu estudos sobre a viabilidade de produção de cimentos pozolânicos a partir de matérias-primas com baixo custo de aquisição e largamente disponíveis (argila, calcário, lateritos e gesso), utilizando para calcinação desses materiais a energia solar (ZAMPIERI, 1989; MURAT, 1983a; 1983b; MURAT e COMEL, 1983; AMBROISE et alii, 1985a; 1985b; 1994).

Assim como ocorreu no Egito, Índia, EUA, Dinamarca, França e Inglaterra, o uso da argila calcinada no Brasil foi praticamente restrito a obras marítimas e de barragens. O

primeiro emprego em concreto foi durante a construção da barragem de Jupia (Mato Grosso do Sul), no período de 1962 a 1969. A incorporação da pozolana no concreto-massa da barragem teve como objetivo reduzir a expansão ocasionada pela reação álcali-agregado. Além desse benefício, outros foram alcançados como a redução da temperatura adiabática, da exsudação, do custo da obra e houve um aumento da resistência do concreto para idades superiores a 90 dias. Diante dessas melhorias, a usina de produção da pozolana, montada apenas para atender a obra de Jupia, foi mantida para a construção de outras três grandes barragens, são elas: Ilha Solteira (1968-1979), Capivara (1970-1975) e Água Vermelha (1973-1979). Nessas obras foram empregados teores de até 50% de substituição de cimento por argila calcinada (SAAD et ali, 1982; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; CASTRO SOBRINHO, 1970; GITAHY, 1963). Em 1982, durante a construção da barragem de Tucuruí no Estado do Pará, foi empregado na comporta de navegação uma mistura pobre de concreto compactado a rolo com  $65 \text{ kg/m}^3$  de cimento Portland comum e  $38 \text{ kg/m}^3$  de argila calcinada e moída (ANDRIOLO et ali, 1984). Na referida barragem, que atualmente encontra-se em fase de ampliação, cogita-se novamente o emprego da argila calcinada para a construção das estruturas de concreto da eclusa e da casa-de-força.

Após a desativação da Usina de Jupia, foram várias as cimenteiras que produziram, de meados da década de 70 até o início dos anos 80, cimentos com incorporação de argila calcinada, são elas : Cimentos Tupi (Volta Redonda-RJ), Cimento Itaú de Corumbá, CIMEPAR (Paraíba) e Companhia de Cimento Itambé (Paraná). Contudo, todas as companhias tiveram suas fábricas desativadas em razão de outras opções mais vantajosas economicamente como a cinza volante e outros subprodutos (ZAMPIERI, 1989; BATTAGIN, 1987).

Segundo BATTAGIN (1987), o uso da argila calcinada na fabricação de cimento Portland pozolânico no Brasil é muito reduzido. No ano de 1985, representava apenas 17% do volume total de pozolana consumido para fabricação de cimento Portland pozolânico, sendo a produção restrita à região Nordeste do país. Hoje em dia, são bastante reduzidas as fábricas que produzem cimento Portland com argila calcinada, sendo uma delas localizada no estado do Pará. Na Índia, a situação é bastante distinta, as pozolanas obtidas da calcinação de argilas são largamente utilizadas na produção de cimento Portland pozolânico, sendo que esse tipo de cimento representou, em 1982, 65% da produção total de cimento desse país. (NARANG e AHLUWALIA, apud COOK, 1986).

Em alguns países ou regiões que não dispõem de subprodutos industriais, as argilas calcinadas, apesar do custo elevado de produção, representam a melhor alternativa tanto técnica quanto econômica para a produção de cimento pozolânico. AMBROISE et ali (1994) afirmam que a incorporação de até 30% de caulim calcinado nos cimentos Portland não prejudica as propriedades das misturas de concreto, sendo sua fabricação perfeitamente viável em países onde há escassez de adições minerais provenientes de subprodutos industriais. No Brasil, as argilas calcinadas constituem-se nos materiais com maior potencialidade de emprego como pozolana, porque apresentam a vantagem da vasta distribuição no território nacional em comparação à restrita localização de fontes produtoras de cinzas volantes na região Sul e à reduzida ocorrência de pozolanas naturais na região Nordeste (KIHARA e SHUKUZAWA, 1982).

Nos EUA, Canadá, França e Inglaterra estão sendo desenvolvidos estudos promissores sobre a utilização de uma argila calcinada, produzida industrialmente e com excelentes propriedades pozolânicas, com vistas à obtenção de misturas de concreto de alta resistência e alto desempenho. Essa adição mineral tem sido denominada de *metacaulim de alta reatividade* (MCAR) com a finalidade de distingui-la do metacaulim proveniente das argilas e cinzas vulcânicas que contêm quantidades indefinidas de caulinita termicamente ativada.

A produção dessa pozolana está sendo realizada atualmente por duas das maiores empresas do setor de mineração de caulim: a *Engelhard Corporation* e a *ECC Kaolin* (“*English China Clay*”). O processo consiste, primeiramente, no peneiramento a úmido de argilas cauliniticas de modo que as fases inertes sejam removidas. Posteriormente, o material lavado é calcinado a uma temperatura específica. Após a queima, realiza-se a moagem da argila calcinada até a que a mesma alcance o diâmetro médio de  $1.5\mu\text{m}$  (ENGELHARD CORPORATION, 1994; CALDARONE et ali, 1994; CALDARONE e GRUBER, 1995; ZHANG e MALHOTRA, 1995; WILD et ali, 1996; 1997). Outros campos de aplicação desse material encontram-se na produção de concreto colorido isento de eflorescências e de matrizes de cimento reforçadas com fibras de aço e de vidro (BANTHIA e YAN, 1996; AMBROISE et ali, 1994).

### 3.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS ARGILAS CALCINADAS

As argilas por si só não são pozolânicas a menos que a estrutura cristalina dos minerais aluminossilicosos (argilominerais) seja transformada em uma estrutura amorfa e

desordenada através de tratamento térmico. Em outras palavras, a atividade pozolânica das argilas está relacionada à variação de sua estrutura cristalina.

Na Figura 8 é mostrada a estrutura cristalina do argilomineral caulinita, constituída por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e octaedros de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ligados entre si por íons hidroxila (silicato hidratado de alumínio -  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{10}$ ). Quando a caulinita é submetida a temperaturas entre  $400^\circ\text{C}$  e  $700^\circ\text{C}$ , ocorre a desidroxilação da mesma, ou seja, a remoção dos íons hidroxilas da sua estrutura cristalina, ocasionando a destruição do seu arranjo atômico. Forma-se então, um componente amorfo à difração de raio-x e de elevada desordem cristalina (área específica elevada e grande instabilidade química) denominado *metacaulinita* ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), que é responsável pela atividade pozolânica. Para temperaturas de calcinação superiores a  $900^\circ\text{C}$ , são formados a partir da metacaulinita, a mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) e o espinélio Al/Si, compostos cristalinos estáveis, de menor área superficial específica e com reduzida ou praticamente nenhuma atividade pozolânica (MANNING, 1995; GRIM, 1963; SOUZA SANTOS, 1992; ANDRIOLO, 1984; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

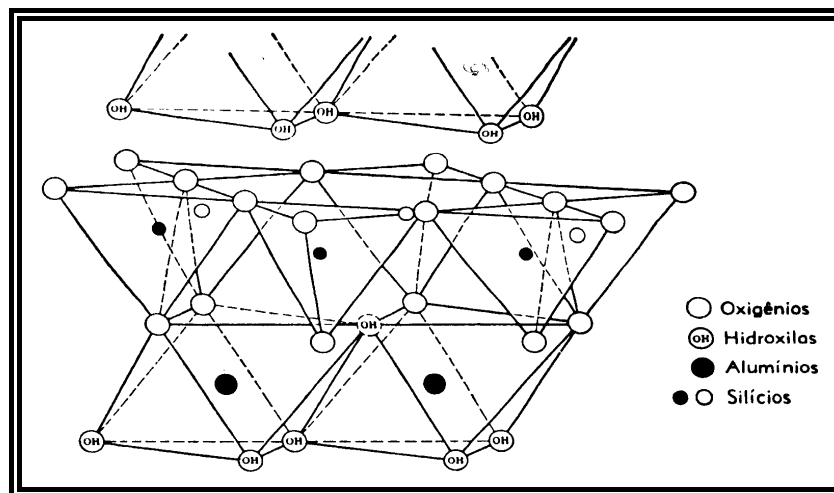


FIGURA 8 - Estrutura cristalina da caulinita (GRIM, 1963).

As reações pozolânicas entre a argila calcinada e o CH são reações de dissolução e formação de novos compostos. A argila termicamente ativada, pelo fato de estar em forte desequilíbrio físico-químico por causa do tratamento térmico, quando entra em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland (pH na ordem de 13.5), promove na superfície de suas partículas a dissolução do silício e do alumínio que, posteriormente, com a disponibilidade de cálcio irão cristalizar-se em aluminatos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratado (ZAMPIERI, 1989). Segundo HE et alii (1995), os produtos da reação pozolânica entre a argila calcinada e o CH mais comumente encontrados

são o C-S-H e o  $C_4AH_x$ .

Nas argilas ricas em Al, como por exemplo o caulim, as reações entre a metacaulinita e o CH se processam de maneira muito rápida e os produtos dessas reações são os aluminatos de cálcio hidratados hexagonais (carboaluminato e o  $C_4AH_{13}$ ), a gehlenita hidratada ( $C_2ASH_8$ ) e um silicato de cálcio hidratado (C-S-H<sub>1</sub>) com relação Ca/Si variável entre 0.8 a 1.5 (MURAT, 1983a; 1983b; AMBROISE, MURAT e PERA, 1986; AMBROISE et ali, 1994; DRON, 1974; ARIIZUMI, 1968). Segundo ZAMPIERI (1989), que comparou a mineralogia dos hidratos formados em argamassas de cal-pozolana com os dados obtidos nos ensaios mecânicos, os principais responsáveis pela resistência mecânica das misturas são o C-S-H e a gehlenita hidratada.

Alguns autores afirmam que sob condições de cura acelerada (55°C) ocorre a formação da hidrogranada ( $C_3AH_6$ ), a partir do  $C_4AH_{13}$  (TURRIZIANI, apud SOUZA SANTOS, 1992; ZAMPIERI, 1989). De SILVA e GLASSER (1993) afirmam que pelo fato da gehlenita hidratada e o CH serem incompatíveis, é provável que haja a formação de hidrogranada após longos períodos de cura. Os pesquisadores acreditam que a cinética de hidratação lenta aos 20°C retarda essa transformação e proporciona condições adequadas para o estabelecimento de um estado persistente de não-equilíbrio.

### 3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS ARGILAS CALCINADAS

A atividade pozolânica das argilas calcinadas depende da natureza (tipo, grau de cristalização e composição mineralógica) e do conteúdo do argilomineral presente, da finura do material e das condições de calcinação (equipamento, tempo e temperatura). Além do que, limita-se diante da presença de minerais pozolanicamente inertes como quartzo, feldspato, óxidos e hidróxidos de ferro, entre outros (AMBROISE et ali, 1993; MURAT, 1983b). A maneira como cada um dos fatores acima citados influencia na atividade pozolânica da argila calcinada será descrita de forma mais detalhada nos próximos itens.

#### 3.3.1 A influência da natureza e do conteúdo do argilomineral

SOUZA SANTOS (1992) afirma que as argilas mais utilizadas para a fabricação de pozolanas são as cauliniticas e as montmoriloníticas, muito embora os argilominerais do grupo da paligorsquita sejam também empregados com menor frequência. A norma indiana IS

: 1344 (1968), conseqüência da vasta experiência adquirida por esse povo ao longo de muitos anos utilizando a argila calcinada, menciona que a calcinação deve ser efetuada em argilas pertencentes ao grupo das caulínicas, das montmoriloníticas (ou esmecitas) e das ilitas. AMBROISE et ali (1985b) compararam a atividade pozolânica de diversas argilas termicamente ativadas com cal e constataram que os argilominerais do grupo das caulinitas são as matérias-primas mais interessantes para fabricação cimento Portland pozolânico. Os pesquisadores também observaram que argilas montmoriloníticas e do grupo das micas mal cristalizadas (ilitas) produziram cimentos com baixa resistência aos 28 dias. No programa experimental realizado por HE et ali (1995), no qual foi avaliado a influência do tipo de argilomineral e das temperaturas de calcinação sobre a resistência à compressão de argamassas com cimento Portland comum, observou-se que as argilas caulínicas, independente da temperatura estudada (entre 500°C e 900°C), e a montmorilonítica a 800°C apresentaram os maiores índices de atividade pozolânica.

AMBROISE et ali (1985b) afirmam que as argilas caulínicas mais puras e com pior grau de cristalização são as que apresentam o melhor desempenho. ZAMPIERI (1989) também constatou em trabalho experimental que a caulinita mal cristalizada apresenta a maior taxa de desidroxilação e isso repercute na maior reatividade pozolânica.

A atividade pozolânica de um material está relacionada à sua composição mineralógica, ou seja, ao teor de sílica amorfa ou não-cristalina. No caso das argilas termicamente ativadas, esse componente está associado à porcentagem de argilomineral presente. Segundo AMBROISE et ali (1993), a produção de pozolanas altamente reativas é possível através da calcinação de argilas contendo 90% de caulinita. Entretanto, é comum encontrar nas argilas teores por vezes significativos de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) cristalina, fase pozolanicamente inerte e constituinte do quartzo, mineral normalmente encontrado na maioria dos solos e que se caracteriza pela expressiva dureza. Segundo AMBROISE et ali (1985a, 1985b), teores de até 10% (sobre a massa total de metacaulim) de fases inertes finamente divididas como o quartzo e a mica não afetam de modo significativo a resistência à compressão das misturas de concreto com metacaulim. No trabalho experimental realizado por ZAMPIERI (1989), substituições de até 40% de argilas caulínicas de alta pureza por quartzo de mesma granulometria chegam a reduzir em 22% a resistência à compressão de misturas de cal-pozolana aos 7 dias.

A composição química das argilas calcinadas, embora hoje em dia não seja um parâmetro adequado para averiguar sua potencialidade pelo fato de não distinguir a sílica cristalina da não-cristalina, pode ser estabelecida com a finalidade de exercer um controle de produção ou de recepção de um material de uma determinada origem ou procedência (SOUZA SANTOS, 1992). De acordo com LEA (1938), as argilas utilizadas para fabricação de pozolana devem conter de 50% a 65% de  $\text{SiO}_2$  e de 17% a 38% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sendo que a atividade pozolânica aumenta com o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . BATTAGIN (1987) acredita que essa afirmação está relacionada com fato das argilas com maiores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentarem maiores teores de argilomineral, e cita o exemplo da caulinita, cuja composição química é de 46.54% de  $\text{SiO}_2$ , 39.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 13.96% de  $\text{H}_2\text{O}$ . O autor conclui de maneira geral que, quanto maior o teor de  $\text{SiO}_2$ , a partir de uma determinada faixa de composição química, maior é a quantidade de quartzo na argila e, portanto, menor a sua atividade pozolânica. A Tabela 5 mostra alguns limites químicos prescritos pelas normas indiana (IS 1344) e americana (ASTM 618 C ) para as argilas calcinadas.

TABELA 5 - Características químicas para o uso de argilas calcinadas como adição mineral em misturas de concreto de cimento Portland.

<b>Características químicas exigidas</b>	<b>Indiana IS 1344</b>	<b>Americana ASTM 618</b>
( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) - mín.	70%	70%
$\text{SiO}_2$ - min.	40%	-
CaO - max.	10%	-
MgO - max.	3%	-
$\text{SO}_3$ - max.	3%	4%
umidade (água livre) max.	-	3%
álcalis solúveis em água - max.	0.1%	-
material solúvel em água - max.	1%	-
perda ao fogo max.	5%	10%

### 3.3.2 A influência da finura da argila calcinada

A atividade pozolânica de uma adição mineral, um dos fatores responsáveis pelo desenvolvimento da resistência e pela redução da permeabilidade do concreto, é função não somente da composição mineralógica, mas também do tamanho de suas partículas e da sua área superficial específica (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Tanto que as normas indiana e americana impõem valores mínimos de finura às argilas calcinadas (superfície específica e/ou



resíduo na peneira 45 $\mu$ m). A norma indiana (IS 1344) estabelece um limite máximo de 12% de material retido na peneira 325 mesh (45 $\mu$ m) e uma superfície específica Blaine mínima de 3200 cm<sup>2</sup>/g. A ASTM C 618 (1991) especifica apenas que o percentual máximo retido na mesma peneira deve ser de 34%. Os pesquisadores citados acima comentam que o percentual máximo de 20% para partículas maiores que 45 $\mu$ m é adequado para assegurar qualidade e uniformidade do material.

MIELENS et ali (1950) relatam que todas as pozolanas produzidas a partir da calcinação de argilas necessitam de moagem até uma finura suficiente para desenvolver de forma mais satisfatória a atividade pozolânica. Um exemplo disso pode ser constatado na construção da barragem de Jupuíá, na qual estudos técnicos relacionados à produção da pozolana demonstraram que a argila caulínica calcinada deveria ser moída até alcançar a superfície específica Blaine de 8500 cm<sup>2</sup>/g para melhor desenvolver as propriedades pozolânicas (SAAD et ali, 1982; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; CASTRO SOBRINHO, 1970). Entretanto, no estudo realizado por HE et ali (1995), os autores não notaram mudanças significativas na área superficial específica do caulim quando calcinado entre as temperaturas de 500°C e 900°C.

MASSAZZA e COSTA (1979) observaram que nas primeiras idades de hidratação do cimento, a atividade pozolânica está fundamentalmente relacionada à superfície específica, e nas idades posteriores, ao conteúdo de sílica e alumina reativa da pozolana. Por essa razão, o efeito da moagem é mais preponderante nas primeiras idades e repercute de maneira muito acentuada sobre a cinética da reação pozolânica e, conseqüentemente, no desenvolvimento de resistência. AMBROISE et ali (1993, 1994) constataram, em argamassas, que substituições de 10% e 20% de cimento Portland comum por um metacaulim com área superficial específica de 20.000 m<sup>2</sup>/kg, repercutiram na aceleração da hidratação do cimento e, conseqüentemente, na elevação da temperatura adiabática nas primeiras horas. Esses fatores contribuíram para o aumento das resistências iniciais das argamassas com metacaulim em relação às misturas de referência. Esse comportamento também foi observado no trabalho experimental de ZHANG e MALHOTRA (1995), no qual a temperatura máxima da mistura de concreto com MCAR (metacaulim com área superficial específica de 16.500 m<sup>2</sup>/kg e diâmetro médio de 1.5 $\mu$ m) foi superior e ocorreu mais cedo que as dos concretos com SA e de referência.

### 3.3.3 A influência das condições de calcinação

De acordo com o que foi exposto nos itens anteriores, a atividade pozolânica das argilas ativadas termicamente está relacionada à mineralogia e à finura dos argilominerais, que por sua vez são aspectos afetados pelas condições de calcinação : temperatura, tempo e equipamento de calcinação.

**A temperatura ótima de calcinação**, na qual se obtém a máxima atividade pozolânica da argila caulínica calcinada, encontra-se entre 650°C e 850°C de acordo com os resultados encontrados na literatura (FORREST, 1975; MIELENS et ali, 1950, SAAD et ali, 1982; RUAS, 1972; MURAT, 1983a; MURAT e COMEL, 1983; SAAD MORSY et ali, 1997; AMBROISE et ali, 1993; CALDARONE et ali 1994). Esse intervalo é semelhante ao recomendado pela norma indiana IS (entre 700°C e 800°C).

O efeito da temperatura de calcinação nas argilas normalmente é monitorado pela análise térmica diferencial (ATD). A Figura 9 mostra as curvas termodiferencial e termogravimétrica de uma amostra de argila caulínica, adequada para o uso como pozolana, submetida a tratamento térmico. Observa-se que o pico da reação endotérmica a 550°C corresponde à desidroxilação da caulinita. Essa reação persiste até 980°C, na qual inicia-se a recristalização do retículo desordenado (reação exotérmica) com a nucleação da mulita e conseqüente perda de atividade pozolânica potencial (BATTAGIN, 1987). COOK (1986) chama atenção para o fato da temperatura ótima de calcinação, citada no parágrafo anterior, não estar diretamente relacionada com a temperatura de desidroxilação da caulinita indicada pelo pico endotérmico da ATD (540°C-550°C).

Segundo SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986), a ATD constitui-se em um método de controle conveniente na fabricação da argila calcinada. A argila caulínica, por exemplo, estará bem calcinada quando não apresentar o pico endotérmico entre 500°C e 560°C, ou seja, já houve a formação da metacaulinita; entretanto, deverá apresentar o pico exotérmico a 950°C, significando que a formação de compostos com estrutura cristalina estável, a partir da metacaulinita existente, não ocorreu até a referida temperatura.

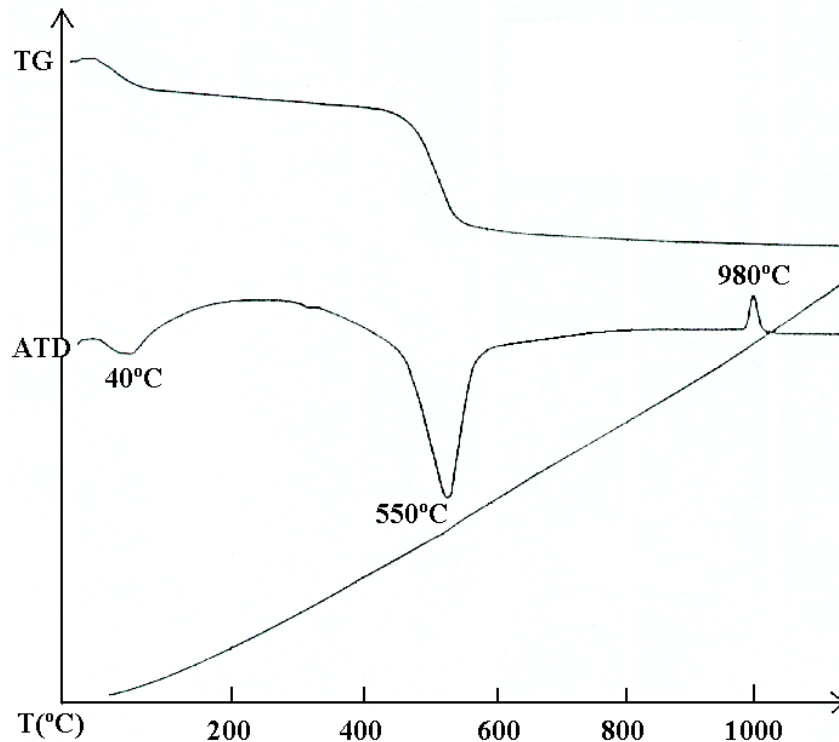


FIGURA 9 - Termograma de uma amostra de argila caulínica viável para utilização como pozolana, após tratamento térmico (BATTAGIN, 1987).

Além da temperatura, está bem estabelecido no meio técnico que o **tempo de calcinação** também exerce influência na reatividade da pozolana. Estudos experimentais comprovaram que exposições prolongadas a temperaturas acima da faixa de desidroxilação (aproximadamente 500-550°C) promovem a recristalização e, conseqüentemente, a redução das propriedades pozolânicas (COOK, 1986).

Uma outra variável que deve ser levada em consideração na determinação das condições de calcinação é a finalidade da pozolana. Por exemplo, do ponto de vista da resistência mecânica, FORREST (1975) chegou à conclusão que o caulim, calcinado a 800°C por uma hora, apresentava o melhor desempenho. Todavia, para o controle da reação álcali-agregado, o mesmo material calcinado entre 587°C e 810°C por uma hora demonstrou excelentes resultados na redução da expansão.

No passado, as pozolanas de argila calcinada eram obtidas da pulverização e moagem de rejeitos de tijolos e telhas cerâmicas. Segundo SPENCE (1975), essa prática é ineficiente porque produz pozolanas com grande variabilidade de qualidade e, em certos casos, sem nenhuma atividade pozolânica.

Nos dias de hoje, **o método de produção** mais empregado é através da calcinação em fornos rotativos. Esse equipamento foi extensivamente utilizado no Brasil, EUA e na Índia. O comprimento dos fornos varia de 6.5 a 40 m e o diâmetro de 1 a 3 m. A produção diária pode ser de 12.5 a 100 mil toneladas, dependendo do tamanho do forno e das condições de calcinação. Os combustíveis normalmente utilizados são o gás natural ou o óleo. O tempo de permanência no forno tem sido de aproximadamente uma hora, apesar de ter sido utilizada uma argila calcinada por duas horas na construção da barragem de Brakra (COOK, 1986). Na construção da barragem de Jupuíá, a produção de pozolana foi de 10 ton/hora e o equipamento empregado um forno rotativo com 2.5 metros de diâmetro e 37 metros de comprimento. O combustível foi o óleo do tipo “*bunker oil*”, cujo consumo foi de aproximadamente 70 kg por tonelada de pozolana e a temperatura final de queima foi de 750°C (CASTRO SOBRINHO, 1970; SAAD et alii, 1982; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

Na Índia foram desenvolvidos outros três processos de calcinação, dentre os quais cabe destacar o método que empregava um forno de leito fluidizado. Nesse processo, o tempo de calcinação é reduzido a poucos minutos, mas suficiente para queimar toda argila introduzida no forno. O projeto piloto desse forno chegou a produzir 20 toneladas por dia e o custo de produção foi bastante competitivo em relação aos demais métodos de ativação térmica (GUPTA e RAO, 1978; DAVE apud COOK, 1986).

MURAT e COMEL (1983) investigaram a influência do tipo de equipamento na reatividade do metacaulim. Os autores observaram que calcinação de caulins extremamente finos em fornos rotativos proporcionou uma agregação de suas partículas mediante o superaquecimento do leito, o que levou à formação de uma pozolana de menor grau de amorfização e com menor reatividade em relação ao metacaulim produzido no forno de leito fixo. AMBROISE et alii (1994) também constataram que houve uma aglomeração do caulim durante a calcinação em forno rotativo, entretanto, todas as partículas do material calcinado eram menores que 20µm.

A calcinação de argilas mediante o emprego de fornos rotativos ou de leito fluidizado, pelo fato de requererem horas ou alguns minutos, ocasionam uma excessiva aglomeração do material e, conseqüentemente, a necessidade de moagem da pozolana. A moagem geralmente é efetivada em moinhos de bolas ou do tipo martelo e empregada conjuntamente com diversos tipos de classificadores e coletores (SALVADOR, 1995; COOK, 1986). Alguns materiais como o caulim calcinado são fáceis de moer e requerem tempos mínimos de moagem,

entretanto, quando a argila apresenta elevados teores de minerais de extrema dureza e não suscetíveis aos efeitos da calcinação, como por exemplo o quartzo, são necessárias várias horas de moagem para que o material calcinado apresente uma finura adequada (HE et alii, 1995). A moagem representa de 25% a 30% do custo total necessário para produção de pozolanas de argilas calcinadas, portanto, é imprescindível a minimização dessa etapa o quanto possível (COOK, 1986).

O processo de calcinação instantânea (*“flash-calcination”*) de caulins com granulometria fina foi desenvolvido na França e Inglaterra com o intuito de ser empregado nas indústrias de papel, tintas e polímeros. Todavia, vem encontrando aplicabilidade recente na produção de adições minerais ao concreto. Esse método de ativação térmica reduz o tempo de calcinação a poucos segundos e não ocasiona a aglomeração das partículas da argila, eliminando dessa forma a etapa de moagem do processo de produção da pozolana. Além desse processo apresentar menor dispêndio de energia, o metacaulim produzido da calcinação instantânea apresenta uma reatividade similar ou melhor que o proveniente dos processos convencionais de calcinação citados anteriormente (SALVADOR, 1995).

Na calcinação instantânea, o caulim pulverizado é inserido em uma câmara onde há fluxo contínuo de gás quente no qual a temperatura é mantida constante por alguns segundos. Decorrido o período de tempo, o material calcinado é submetido a um brusco resfriamento por meio de troca de calor com um gás resfriado a baixas temperaturas, originando um metacaulim com características diferenciadas em relação aos produtos calcinados em fornos convencionais como a baixa densidade, alta capacidade de retenção de água e a alta opacidade (SALVADOR, 1995; BRIDSON, DAVIES e HARRISON, 1985; DAVIES, 1985; SLADE, DAVIES, ATAKÜL e HOOPER, 1992). A Figura 10 mostra, esquematicamente, o projeto piloto do forno de calcinação instantânea desenvolvido conjuntamente por pesquisadores franceses do Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lion na França (INSA) e ingleses do Departamento de Química da Universidade de Exeter (Grã-Bretanha) (MEINHOLD, SALVADOR, DAVIES e SLADE, 1994).

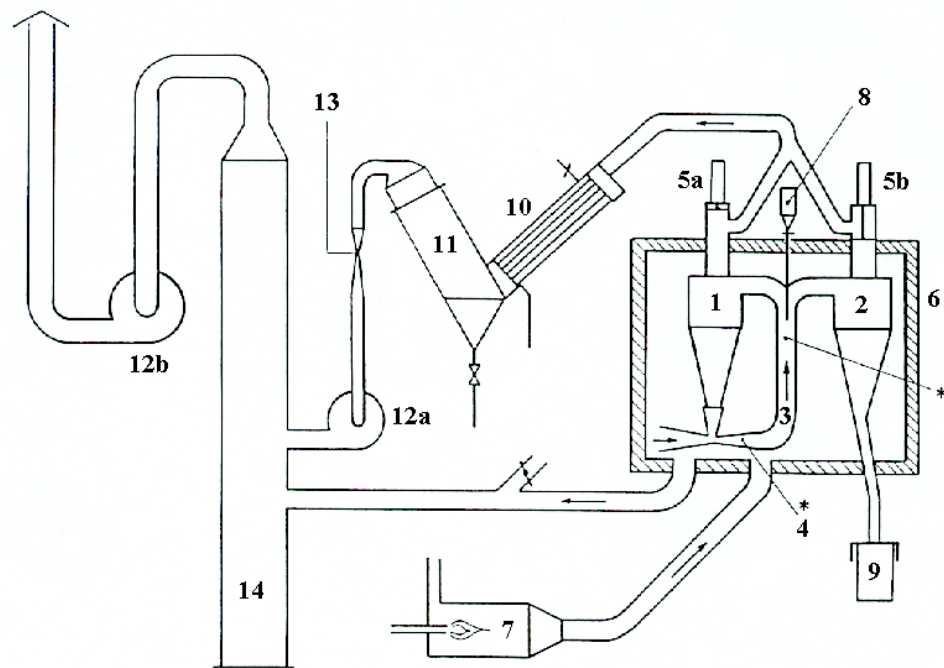


FIGURA 10 - Projeto piloto do forno de calcinação instantânea: (1,2) ciclone refratário de aço - tubo  $\phi$  300mm, (3) coluna de retorno, (4) injetor, (5a, 5b) entrada elétrica, (6) câmara com isolamento térmico. (7) gerador de gás quente, (8) alimentador, (9) coletor de material, (10) resfriador, (11) filtro de ar, (12a, 12b) exaustores, (13) medidor de fluxo de gás, (14) lavador de gases, \* - pontos de medição da temperatura (MEINHOLD, SALVADOR, DAVIES e SLADE, 1994).

### 3.4 O EFEITO DA ARGILA CALCINADA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Nesse item serão abordados os efeitos da incorporação da argila calcinada nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido.

#### 3.4.1 Propriedades no estado fresco

As misturas com incorporação de argilas calcinadas, ao contrário do concretos com cinza volante ou escória de alto-forno, normalmente requerem uma **demandade água** superior em relação às de referência para obter uma determinada consistência. Com isso, surgem problemas relacionados à dispersão das partículas e à trabalhabilidade da mistura, que hoje são superados com o emprego do aditivo superplastificante (WILD et ali, 1996). Segundo CALDARONE et ali (1994), os concretos com adição de MCAR requereram de 25 a 35% a menos de superplastificante que as misturas com sílica ativa. ZHANG e MALHOTRA (1995) utilizaram as mesmas adições minerais como substituição de 10% sobre a massa de

cimento e não observaram diferenças de dosagens de superplastificante. Em ambas as pesquisas, independente da forma de utilização (adição ou substituição), os concretos com metacaulim requereram maiores quantidades de superplastificante que as misturas de referência.

A **exsudação** das misturas com argila calcinada, assim como ocorre nos concretos com sílica ativa, é consideravelmente menor que nos concretos de referência. As partículas extremamente finas da pozolana proporcionam um melhor empacotamento dos grãos de cimento, reduzindo os canais ascendentes de água. SAAD et ali (1982) mostraram que em misturas com baixo consumo de cimento, incorporações de até 50% de argila calcinada reduzem a exsudação à metade da obtida com a mistura sem pozolana. Estudos realizados com o MCAR demonstraram que exsudação das misturas com essa adição mineral foi bastante reduzida, entretanto, um pouco mais acentuada que a do concreto com sílica ativa, mas apresentaram maior facilidade de acabamento e foram menos “pegajosas” (ZHANG e MALHOTRA, 1995; CALDARONE et ali, 1994; ENGELHARD CORPORATION, 1994).

Com relação à **elevação da temperatura autógena**, a temperatura máxima obtida com uma mistura de concreto com 10% de MCAR foi de 52.8°C, valor superior a da mistura com 10% de SA (46.1°C) e a da mistura de referência (45.6°C). A maior temperatura ocorreu por volta das 15 horas de hidratação, enquanto nas outras misturas, o pico máximo foi observado na 19ª e na 20ª hora, respectivamente. ZHANG e MALHOTRA (1995) atribuem a elevação da temperatura, no estágio inicial de hidratação, à alta reatividade do metacaulim com o CH. No trabalho experimental realizado por AMBROISE et ali (1994), as elevações de temperatura máximas medidas variaram de 41°C a 49°C, sendo que as temperaturas das argamassas com substituições de 10%, 20% e 30% de metacaulim foram superiores às de referência. Segundo os pesquisadores, esses resultados confirmam o efeito acelerador do metacaulim sobre a hidratação do cimento. WILD et ali (1996) também acreditam que a elevação da temperatura nas primeiras horas em misturas com metacaulim ocorre por causa da aceleração da hidratação do cimento Portland, desencadeada por essa adição mineral.

No caso da barragem de Jupia, houve uma redução na elevação adiabática de temperatura das misturas de concreto-massa com metacaulim, especialmente nas primeiras idades. SAAD et ali (1982) atribuem o fato aos elevados níveis de substituição de cimento por pozolana, na ordem de 30% e 50%.

### 3.4.2 Propriedades no estado endurecido

#### 3.4.2.1 Resistência mecânica

A resistência do concreto com a incorporação de argila calcinada pode apresentar comportamentos distintos, conforme as características físicas e a composição mineral do tipo de material empregado. Quando a pozolana for extremamente fina (granulometria muito menor que a do cimento Portland) e constituída basicamente por caulinita termicamente ativada, o desenvolvimento de resistência no concreto ocorre nas primeiras idades, acompanhado por uma elevada liberação de calor decorrente da alta reatividade dessa adição mineral (assunto abordado no item anterior). O emprego desse tipo de argila calcinada (metacaulim de alta reatividade), cujos estudos estão em desenvolvimento, é associado à produção de concreto de alta resistência inicial e alto desempenho, e os teores utilizados variam entre 10% e 20%. Todavia, se o material adicionado ao concreto possuir quantidades elevadas de fases pozolanicamente inertes como quartzo e mica e não for tão fino quanto o anterior, as reações pozolânicas serão mais lentas e, portanto, a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento de resistência, conseqüentemente, menores. Essas pozolanas menos reativas geralmente são aplicadas nas estruturas de concreto-massa em teores elevados de substituição.

Segundo WILD et ali (1996), quando o metacaulim de alta reatividade (área superficial específica de  $12.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) é empregado como substituição parcial de cimento, são três os fatores que contribuem para sua influência sobre a resistência à compressão do concreto : o efeito filer, a aceleração da hidratação do cimento e a reação pozolânica com o CH. O efeito filer é imediato, a aceleração da hidratação do cimento atinge o máximo dentro das primeiras vinte e quatro horas e o efeito máximo da reação pozolânica ocorre entre o sétimo e o décimo quarto dia. A partir daí, não são observados acréscimos na resistência em relação ao proporcionado pelas misturas de cimento Portland comum.

A contribuição efetiva do metacaulim no aumento de resistência do concreto se restringe até o décimo quarto dia, independente do nível de substituição. KHATIB e WILD (1996) atribuem a ocorrência do fenômeno às seguintes justificativas: a) formação de uma camada inibidora, constituída por produtos de hidratação, que envolve as partículas de metacaulinita impedindo, dessa forma, a reação pozolânica com o CH; b) formação de grandes poros, a partir da dissolução dos cristais de CH, que não podem ser totalmente preenchidos com os produtos da hidratação posterior (BENTZ e STUTZMAN, 1994); c)



transformação do  $C_2ASH_8$  e  $C_4AH_{13}$ , produtos de menor densidade, em produtos de maior densidade como a hidrogranada, ocasionando um decréscimo no volume de sólidos, conseqüentemente, um aumento na porosidade e uma redução no desenvolvimento de resistência (de SILVA e GLASSER, 1990). De acordo com os pesquisadores, não existe razão para que essas causas não ocorram simultaneamente, entretanto, são necessários estudos mais aprofundados para investigar esse comportamento.

ZHANG e MALHOTRA (1995) também constataram o rápido desenvolvimento de resistência do concreto com metacaulim, principalmente nas primeiras idades. Misturas com MCAR apresentaram resistências superiores até o sétimo dia quando comparadas com o concreto com sílica ativa. Para idades posteriores aos 28 dias, as resistências foram ligeiramente menores. Com relação ao concreto de referência, as resistências do concreto com metacaulim foram superiores até os 180 dias. A Figura 11 mostra o desenvolvimento de resistência à compressão das mistura de controle e com substituições de 10% de sílica ativa e metacaulim de alta reatividade.

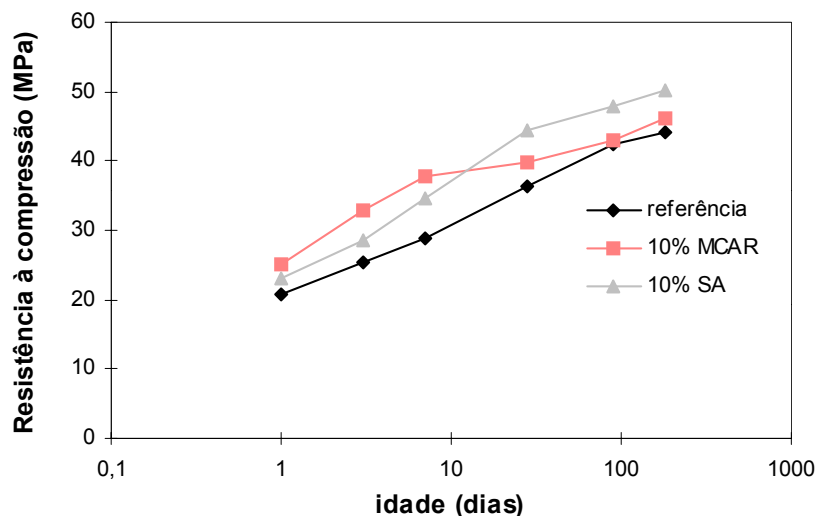


FIGURA 11 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com relação  $a/c$ ,  $a/(c+MCAR)$  e  $a/(c+SA)$  igual a 0.4 (ZHANG e MALHOTRA, 1995).

Resultados divergentes, referentes ao desenvolvimento de resistência de misturas com MCAR ( $\phi_{50\%} = 1.5\mu m$ ), foram observados em outras pesquisas que empregaram teores de 5% e 10% dessa pozolana como adição à massa de cimento (ENGELHARD CORPORATION, 1994; CALDARONE et ali, 1994). As resistências à compressão dos concretos com MCAR foram significativamente maiores que as obtidas com os concretos de controle e ligeiramente superiores as das misturas com SA para todas as idades observadas, e não apenas até o

período entre o sétimo e o décimo quarto dia, chegando a atingir valores próximos de 60MPa aos 28 dias e de 80MPa após 365 dias (Figura 12).

A alta reatividade do metacaulim, proveniente da calcinação de argilas com alto teor de caulinita, também pode ser constatada no concreto-massa das barragens de Jupia, Ilha Solteira, Capivara e Água Vermelha. A resistência à compressão de concretos contendo teores de substituição de 30% e até 50% de metacaulim em relação aos concretos sem pozolana foram praticamente as mesmas aos 90 dias e superiores após 1 ano (SAAD et ali, 1982; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; CASTRO SOBRINHO, 1970).

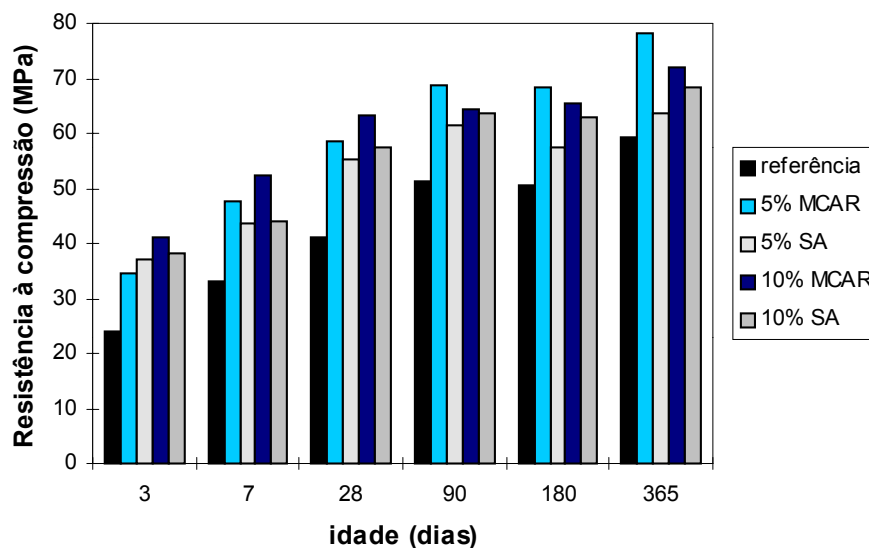


FIGURA 12 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com relação água/aglomerante de 0.4 (CALDARONE et ali, 1994).

Outro exemplo do rápido desenvolvimento de resistência do concreto com metacaulim é o cimento Portland Composto (CP II - Z 32) produzido na Amazônia, mais especificamente no Estado do Pará (Município de Capanema). Esse aglomerante hidráulico é constituído por teores que variam de 6% a 14% de argila caulínica calcinada por uma hora em forno rotativo a uma temperatura de 800°C. De acordo com Figura 13, a velocidade de reação desse cimento é bastante intensa até os 7 dias, na qual alcança aproximadamente 75% da resistência aos 28 dias, além do que, apresenta resistências bastante superiores às exigidas pela norma NBR 11578 (1991), chegando a alcançar, por exemplo, valores próximos a 48 MPa de resistência final, enquanto a referida norma prescreve 32MPa\*.

\* Resultados fornecidos pela Cimentos do Brasil SA (CIBRASA).

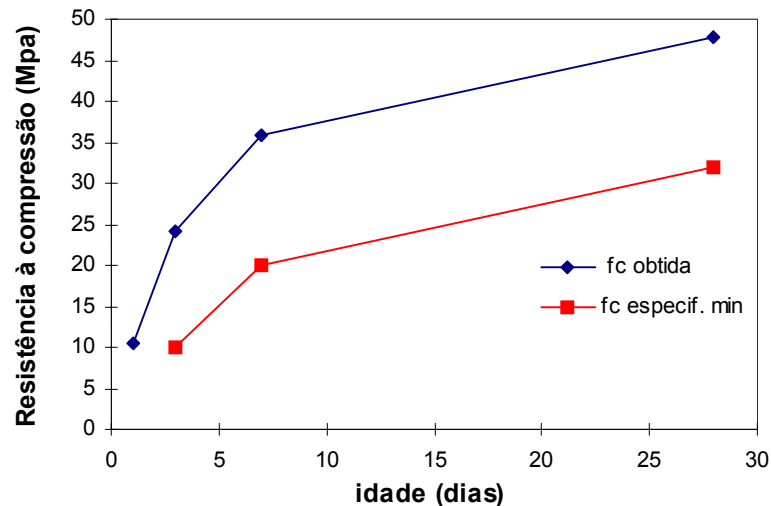


FIGURA 13 - Evolução da resistência à compressão de argamassas de cimento Portland composto (CP II - Z 32) produzido na Amazônia com a incorporação de metacaulim.

#### 3.4.2.2 Durabilidade

A incorporação de materiais pozzolânicos, seja substituindo ou como adição à massa de cimento, aumenta a durabilidade de argamassas e concretos de cimento Portland, desde que seja efetuada uma cura adequada. Este fato ocorre porque o CH, produzido das reações de hidratação do cimento, reage com a pozolana para formar produtos de hidratação secundários (C-S-H de baixa densidade) que preenchem os vazios capilares grandes e refinam a estrutura dos poros; conseqüentemente, a permeabilidade do sistema é reduzida e há um aumento na resistência mecânica e na durabilidade. Outro aspecto positivo da reação pozzolânica é a redução do teor de CH da matriz de cimento, tornando-a mais resistente ao ataque de sulfatos e à ocorrência da reação álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

KHATIB e JONES (1996) avaliaram, através de ensaios de intrusão de mercúrio, a influência da incorporação de metacaulim na *porosidade* e na *distribuição do tamanho dos poros* de pastas de cimento Portland. No trabalho experimental, os teores de substituição de cimento por metacaulim estudados foram 5%, 10% e 15%, sendo que todas as pastas foram moldadas com relação água/aglomerante de 0.55 e adequadamente curadas por períodos que variaram de 1 a 365 dias. Os resultados da pesquisa demonstraram que a incorporação de metacaulim nas pastas de cimento proporciona o refinamento da estrutura dos poros, apesar de ter sido observado um aumento no volume total de poros em relação ao das pastas de

referência. O raio limite\* das pastas decresce e a quantidade de poros menores que 20nm aumenta a medida que se eleva o teor de metacaulim (Figuras 14 e 15).

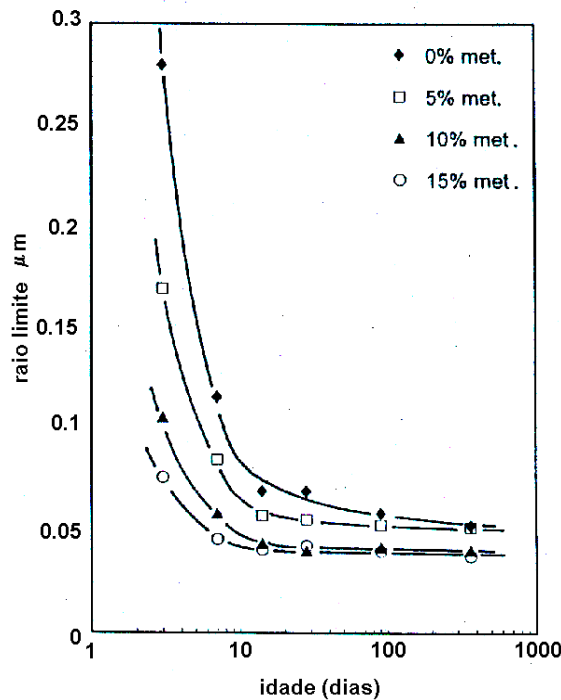


FIGURA 14 - Raio limite *versus* tempo de cura para pastas de referência e com metacaulim (KHATIB e WILD, 1996).

AMBROISE et ali (1994), investigando o teor ótimo de substituição de cimento por metacaulim, observaram que o aumento no teor de metacaulim transforma uma matriz contendo poros capilares grandes em um sistema com poros substancialmente menores. De acordo com os autores, a quantidade de microporos (0.006 a 0.02μm) aumenta com a incorporação de 20% e 30% de metacaulim. BREDY et ali (1989) constataram que pastas de cimento com teores acima de 30% de metacaulim contêm poros com diâmetro menor que 0.03μm, e com isso, um aumento na durabilidade dessas pastas deve ser esperado.

\* Os autores definem raio limite como sendo a medida de raio correspondente ao momento durante o ensaio de intrusão de mercúrio, no qual o valor do volume de poros acumulativo passa a crescer rapidamente

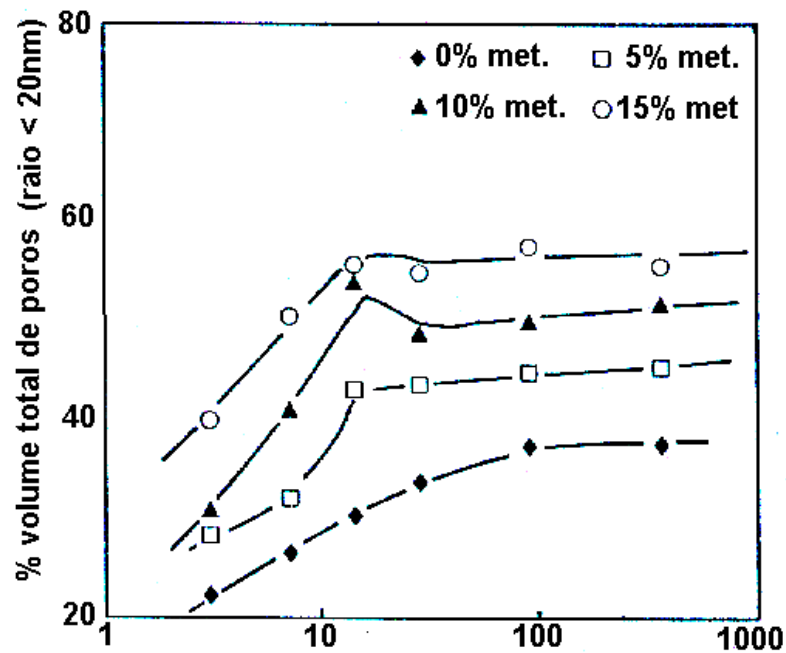


FIGURA 15 - Distribuição do tamanho dos poros (< 20nm) em função do tempo de cura para pastas de referência e com metacaulim (KHATIB e WILD, 1996).

Com relação ao consumo de CH pela reação pozolânica com o metacaulim, KOSTUC et alii (1993) afirmam que teores de substituição de 20% de cimento por metacaulim removem por completo o CH do concreto aos 28 dias de idade. ORIOL e PERA (1995) relatam que incorporações de 30% a 40% de metacaulim são necessárias para consumir todo o CH disponível em pastas com relação água/aglomerante de 0,5, curadas por 28 dias em solução saturada de cal. WILD e KHATIB (1997) observaram que, após um ano de hidratação, pastas com 15% de metacaulim ainda apresentavam 50% do conteúdo de CH de pastas sem pozolanas. Os autores acreditam que o metacaulim seja menos eficiente que a sílica ativa na remoção do CH e sugerem que sejam empregados níveis de substituição acima de 15% para que haja a completa remoção do referido produto de hidratação.

O consumo de CH por adições minerais envolve uma questão bastante polêmica no meio científico. Alguns autores cogitam a possibilidade de que a reação pozolânica venha a reduzir a alcalinidade da solução dos poros do concreto (redução do pH), e com isso, destruir a película passivadora do aço, favorecendo o ocorrência do fenômeno da corrosão (HELENE, 1993; YAMATO et alii, 1993). No intuito de contribuir para o esclarecimento dessa discussão, COLEMAN e PAGE (1997) investigaram a solução dos poros de pastas de referência e com várias porcentagens de metacaulim. De acordo com os resultados, teores de substituição de 10% e 20% de cimento por metacaulim proporcionaram reduções no pH da solução dos poros, entretanto, não a ponto de afetar diretamente a estabilidade do filme passivador que protege a

armadura contra a corrosão, uma vez que o pH da solução da pasta com 20% de metacaulim, para cem dias de cura, ficou em torno de 13.2, superior ao pH de 12.5, valor correspondente à solução saturada de CH (ZHANG e GJORV, 1991).

A camada passivante do aço também pode ser destruída pela penetração de íons cloretos que ocorre através de diversos mecanismos de transporte (assunto discutido no item 2.5.3). CALDARONE et ali (1994) mostraram, através do ensaio de penetração acelerada de íons cloretos (ASTM 1202), que a resistência à penetração de cloretos do concreto com adição de 10% de MCAR foi substancialmente superior à do concreto de referência e similar à da mistura com 10% de SA. Comportamento semelhante foi constatado por ZHANG e MALHOTRA (1995) com o metacaulim de mesma procedência da pesquisa anterior. A Tabela 6 mostra os valores de resistência à penetração de cloretos obtidos nas duas pesquisas experimentais. De acordo com os resultados, os concreto com incorporação de MCAR, independente da forma de utilização (adição ou substituição), apresentam valores de carga elétrica passante inferiores a 1000 Coulombs. Segundo norma americana ASTM C 1202 (1992), essas misturas de concreto podem ser classificadas como de alta resistência à penetração de cloretos.

TABELA 6 - Carga elétrica total passante de concretos com relação água/aglomerante de 0.4 (CALDARONE e ali, 1994; ZHANG e MALHOTRA, 1995).

Misturas	ZHANG e MALHOTRA*		CALDARONE e GRUBER**
	28 dias	90 dias	56 dias
Referência	3175 C	1875 C	4832 C
MCAR - 10%	390 C	300 C	754 C
SA - 10%	410 C	360 C	878 C

Observações:

\* Misturas com substituição de cimento por metacaulim

\*\* Misturas com adição de metacaulim à massa de cimento.

Segundo COLEMAN e PAGE (1997), a redução do pH da solução dos poros das pastas com metacaulim tem outro aspecto positivo: diminui sensivelmente o risco de ocorrência da reação álcali-agregado. Na barragem de Jupia, devido à utilização de agregados contendo calcedônia e opala (minerais altamente reativos com os álcalis presentes no cimento), lançou-se mão do uso de uma argila caulínica calcinada, cujos resultados foram satisfatórios no controle da expansão do concreto (SAAD et ali, 1982; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; CASTRO SOBRINHO, 1970).

### 3.5 REJEITO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE CAULIM UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL

O caulim, conforme visto anteriormente, é um minério basicamente constituído por caulinita, que pertence ao grupo das argilas e caracteriza-se pelo largo consumo e pela diversidade de aplicações industriais. Algumas das propriedades como a alta reflectância, o elevado índice de refração, a forma e a distribuição granulométrica das partículas, a reologia e a compatibilidade com outros materiais fazem com que esse mineral encontre aplicabilidade na indústria papelreira, de tintas, de cerâmica e refratários, da construção civil, de borracha e plásticos, de fertilizantes, de inseticidas e farmacêuticas (DAVIES, 1985).

De 1978 até 1995, a produção mundial de caulim em toneladas subiu de 16.8 milhões para 22.8 milhões, sendo que a indústria papelreira absorve aproximadamente 50% dessa produção, seja para preencher as fibras de celulose (“*filler*”), seja para servir como material de cobertura da superfície do papel (“*coating*”).

Jazidas de caulim são encontradas em muitos países, mas em termos de depósitos significativamente econômicos, tanto em qualidade como em quantidade, cabe destacar os EUA, por ser o maior produtor e detentor das maiores reservas mundiais de caulim sedimentar, que se localizam principalmente nos estados da Geórgia, Carolina do Sul e Alabama e estão estimadas em 7 a 10 bilhões de toneladas. Na Europa, destacam-se como países produtores de caulim de alta qualidade, o Reino Unido (segundo maior mundial), a Comunidade dos Estados Independentes (CEI), a Alemanha, França, Grécia, Espanha e Portugal. Na América Latina, merecem atenção, além do Brasil, a Argentina, Chile, Suriname e Equador. Nos demais continentes, pode-se destacar a República da Coreia (terceira maior produtora), China, Austrália, Indonésia, Índia, África do Sul e Irã (BRISTOW, 1987; LOUGH BROUGH, 1993).

Segundo KENDALL (1996), o Brasil é uma força crescente dentro do mercado mundial das empresas exploradoras de caulim, sendo denominado atualmente como a “*Nova Georgia*”. As reservas brasileiras, estimadas em 1992, são de aproximadamente 1.7 bilhão de toneladas, representando 14.17 % das reservas mundiais. Desse total estimado, cerca de 70 % localiza-se nos estados do Pará e Amapá, mais especificamente nos distritos caulíníticos do Morro do Felipe (AP) e do Rio Capim (PA) (LOUGH BROUGH, 1993). Essas jazidas são de caulim sedimentar, que geralmente é mais apropriado para o uso como cobertura de papel

porque apresenta uma elevada quantidade de partículas inferiores a  $2\mu\text{m}$  (SOUZA SANTOS, 1992). KENDALL (1996) afirma, sem exageros, que o caulim proveniente da região amazônica, tratado com as novas tecnologias de beneficiamento, possui características tecnológicas substancialmente diferentes, em termos de alvura e propriedades reológicas, do que qualquer outro caulim produzido atualmente. A Tabela 7 mostra a oferta mundial de caulim, destacando as reservas e a produção beneficiada dos países produtores (DNPM, 1996).

TABELA 7 - Oferta mundial de caulim nos principais países produtores (DNPM, 1996).

PAÍS	RESERVAS (1)		PRODUÇÃO BENEFICIADA (2)	
	( $10^3$ ) toneladas	%	( $10^3$ ) toneladas	%
Estados Unidos	8.500.000	70.83	8.770	38.47
Brasil	1.700.000	14.17	953	4.18
(CEI)	1.000.000	8.33	800	3.51
Reino Unido	300.000	2.50	2.654	11.64
China	200.000	1.67	700	3.07
República da Coréia	50.000	0.42	2.600	11.40
Outros países	250.000	2.08	6.323	27.53
TOTAL	12.000.000	100	22.800	100

(1): Reservas totais estimadas 1989 (exceto Brasil, 1992)

(2): Produção Mundial (1994)

A produção beneficiada brasileira, no ano de 1995, foi de 1.07 milhão de toneladas de caulins do tipo *coating* e *filler*, e o volume de exportação correspondeu a 580 mil toneladas. Uma indústria de mineração e beneficiamento de caulim, localizada na divisa dos estados do Pará e Amapá, atualmente é responsável por 60% e 98% dos valores respectivamente citados acima (LOUGH BROUGH, 1993).

O processo de beneficiamento e remoção de impurezas dessa indústria, em linhas gerais, consiste da dispersão do caulim em solução alcalina, logo após a extração da mina. A primeira etapa é a separação do resíduo maior que  $44\mu\text{m}$  por meio de sedimentação e peneiras vibratórias. A suspensão peneirada de caulim passa por centrífugas que irão remover as partículas maiores que  $2\mu\text{m}$ . Em seguida, a solução de partículas finas ( $\phi < 2\mu\text{m}$ ) será submetida ao separador magnético, de modo que impurezas (fração magnética) sejam removidas como os óxido de ferro e titânio e até mesmo caulinita com ferro presente na estrutura cristalina, que dão a coloração róseo-escuro e cinza ao caulim. Após as etapas de



centrifugação e separação magnética, a polpa de caulim não-magnético é aglomerada através de soluções ácidas para a melhor eficiência da etapa de branqueamento químico. Posteriormente, a polpa é filtrada em filtro-prensa e, em seguida, redispersa para ser secada em secadores do tipo “*spray-dryer*”. A etapa final do beneficiamento consiste no armazenamento do caulim seco e pulverizado em silos de concreto. A Figura 16 mostra o fluxograma simplificado do processo de beneficiamento dessa indústria.

Esse tipo de beneficiamento produz dois tipos de rejeito, dos quais FLORES (1998) faz a seguinte descrição:

*“O primeiro rejeito é constituído por partículas grosseiras, essencialmente quartzo na forma de areia, que é repostado no próprio local da lavra. O segundo é volumoso (aproximadamente 26% em relação ao total extraído da mina, ou seja, da produção bruta) e composto por uma solução aquosa do argilomineral caulinita sob a forma de partículas empilhadas que não foram totalmente dispersas durante o processo, estando acompanhada por teores de ferro e titânio na ordem de 5%”.*

Devido à relevante produção desse segundo rejeito, consequência da grande quantidade de minério bruto extraído atualmente por essa empresa, cerca de 970 mil toneladas por ano, periodicamente são construídas grandes lagoas próximas ao local da usina, para onde é bombeada a dispersão das partículas magnéticas (óxidos de ferro, titânio e caulinita com ferro na estrutura cristalina) e mais grosseiras de caulim (Figura 17).

A medida que a lagoa vai sendo preenchida com a polpa, as partículas de caulim vão sedimentando e a água excedente é removida da lagoa por meio de um tubo extravasor e lançada no rio, após a devida correção do pH (Figuras 18 e 19). As Figura 20 e 21 mostram uma lagoa de caulim após a evaporação da água excedente, e no estágio posterior, com a presença de vegetação obtida da colocação de uma camada orgânica sobre sua superfície. Pelo fato do rejeito ser bastante volumoso, essas lagoas já se tornaram um problema ambiental de grandes proporções, pois necessitam de imensas áreas de desmatamentos para suas construções.

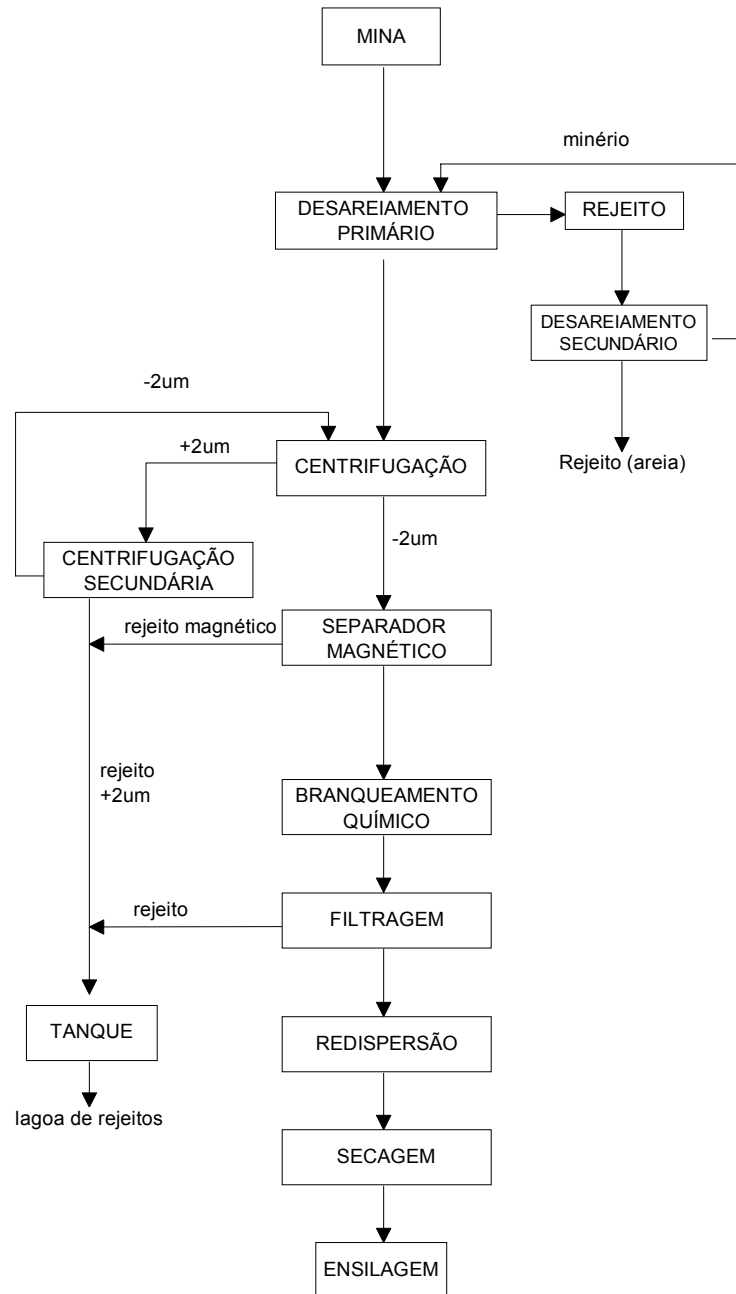


FIGURA 16 - Fluxograma do processo de beneficiamento de uma indústria exploradora de caulim localizada na região amazônica.



FIGURA 17 - Bombeamento da polpa de caulim para as lagoas.



FIGURA 18 - Lagoa de sedimentação preenchida com a polpa de caulim.



FIGURA 19 - Tubo extravasor por onde a água da polpa é removida da lagoa.



FIGURA 20 - Lagoa de sedimentação após a evaporação da água excedente.



FIGURA 21 - Presença de vegetação após colocação de camada orgânica sobre a superfície da lagoa seca.

FLORES (1998) estimou a quantidade de rejeito depositada em aproximadamente 2.7 milhões de toneladas. Esse cálculo foi realizado com base nos dados de produção da empresa desde o início de suas operações, no ano de 1976, até 1997, e no conhecimento prévio da porcentagem de rejeito gerado por tonelada de minério extraído da mina (produção bruta). Ao término de exploração da jazida, estimada em 300 anos<sup>\*</sup>, haverá uma profunda alteração na paisagem local da região, constituída na sua essência por áreas de floresta equatorial, caracterizada pela ampla diversidade de fauna e flora.

Segundo análises prévias realizadas pela pesquisadora anteriormente citada, o material, constituído basicamente pelo argilomineral caulinita com a presença de alguns teores de fases inertes como quartzo, ferro e titânio, possui uma distribuição granulométrica extremamente fina, com diâmetro médio na ordem de 0.5 $\mu$ m. Diante do que foi exposto no

---

\* Informações obtidas através de contatos verbais com o corpo técnico da empresa.

item 3.3, pode-se afirmar que o rejeito na forma de polpa possui requisitos que o habilitam para a produção de uma argila calcinada com excelentes propriedades pozolânicas.

#### 4. PESQUISA EXPERIMENTAL

A obtenção de misturas de CAD está associada à redução da relação água/cimento e, geralmente, à incorporação de pozolanas como a sílica ativa, a cinza volante, a cinza de casca de arroz e o metacaulim, entre outras. O programa experimental do trabalho foi definido com o objetivo de avaliar a influência desses dois *parâmetros* sobre algumas propriedades dos concretos produzidos com os materiais de construção disponíveis no Pará.

Como já foi discutido nos capítulos anteriores, o conhecimento das características e das propriedades do CAD com adição de SA se encontra praticamente estabelecido. Com relação ao uso do metacaulim, os estudos são restritos a regiões onde não há disponibilidade de pozolanas naturais e subprodutos industriais como a cinza volante e a escória de alto-forno. Apesar do número reduzido de trabalhos sobre esse material, há um consenso no meio técnico e científico que a temperatura de calcinação necessária para desenvolver a atividade pozolânica da caulinita encontra-se entre 600°C e 900°C. Nessa faixa de temperatura ocorre o colapso da estrutura cristalina do argilomineral, dando origem à metacaulinita, fase amorfa à difração de raio-x, que em temperaturas próximas à 20°C e na presença de umidade é capaz de combinar-se com o CH, formando novos compostos com propriedades cimentícias (assunto discutido nos itens 3.2 e 3.3).

A temperatura ótima de ativação térmica da caulinita depende das características inerentes do argilomineral presente na argila, do seu conteúdo e grau de cristalização (AMBROISE, MURAT e PERA, 1986) e também do processo de calcinação (SALVADOR, 1995; ZAMPIERI, 1989).

A pesquisa experimental foi dividida em duas etapas. A primeira consistiu em determinar a temperatura ótima de calcinação do caulim estudado, objetivando produzir uma pozolana de maior reatividade. Para isso, procedeu-se o ensaio de atividade pozolânica em argamassas de cimento Portland conjuntamente com técnicas de difratometria de raio-x e análise termodiferencial das amostras calcinadas.

A segunda etapa consistiu em avaliar a possibilidade técnica e econômica de utilização de concretos com desempenho bastante superior ao normalmente empregado na região do

Pará, utilizando adições de SA e MC. As propriedades analisadas foram a resistência à compressão e a durabilidade, sendo essa última, através dos ensaios de penetração acelerada de íons cloretos (ASTM 1202) e de determinação da taxa de absorção de água por sucção capilar (KELHAM, 1988).

Nos próximos itens serão descritos, de maneira detalhada, cada uma dessas etapas, assim como as características dos materiais, dos procedimentos de dosagem, moldagem e preparação dos corpos-de-prova empregados nesse trabalho.

#### 4.1 PRIMEIRA ETAPA : DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA ÓTIMA DE CALCINAÇÃO DO ARGILOMINERAL (METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM ARGAMASSAS).

##### **4.1.1 Coleta, preparação e calcinação das amostras.**

A matéria-prima empregada na fabricação do metacaulim foi o rejeito do processo de produção de uma indústria que beneficia caulim para ser utilizado como cobertura (“*coating*”) na indústria de papel (assunto abordado no item 3.5). A coleta e preparação das amostras desse rejeito seguiram os seguintes passos:

- Captação da polpa de rejeito, com 9% de sólidos, em tanques de coleta antes que a mesma fosse lançada nas lagoas (Figura 17);
- Decantação do material sólido utilizando uma solução de sulfato de alumínio;
- Prensagem da solução decantada em filtro prensa do tipo sanfona. Após esse procedimento, as partículas sólidas do rejeito tomaram a forma de placas espessas (50x50x5cm) com aproximadamente 30% de umidade;
- Secagem das placas em estufa à temperatura de 110°C até que as mesmas obtivessem uma consistência rígida;
- Desagregação manual das placas em tamanhos menores para facilitar a sua secagem na estufa;

- Moagem das placas menores em moinho de bola por 30 minutos. Ao final da moagem, o material se encontrava pulverizado, favorecendo uma calcinação mais homogênea.

O processo de calcinação envolve uma série de variáveis como a carga de material na mufla, taxa de aquecimento, temperatura e o tempo de calcinação. Tornou-se necessário limitar esse número de variáveis em função do equipamento disponível: uma mufla com aquecimento elétrico, temperatura máxima de 1200°C, taxa de aquecimento máxima de 8°C/min e dimensões de 60x60x60cm.

O procedimento de ativação térmica consistiu, primeiramente, em secar as amostras de caulim pulverizado, até a constância de massa, em estufa a 105°C. Em seguida, pesou-se 160g do rejeito seco que foram depositados em quatro cadinhos de alumina. Atingida a temperatura de ativação desejada, os cadinhos foram colocados na mufla onde permaneceram por 25 minutos. Transcorrido esse período de tempo, o rejeito foi retirado da mufla e resfriado naturalmente ao ar. A escolha pela calcinação em pequenas proporções foi devido à pequena capacidade da mufla, que poderia proporcionar uma queima heterogênea.

Optou-se pelo choque térmico, ao invés do aquecimento gradativo da temperatura ambiente até a específica, com vistas à otimização do tempo de produção da pozolana. Enquanto que a primeira metodologia necessitava de apenas 25 minutos para calcinar 160g, a outra requeria de 85 a 110 minutos, dependendo da temperatura final. O tempo de calcinação de 25 minutos foi estabelecido porque proporcionava ao material uma perda ao fogo semelhante a do procedimento de calcinação gradativa.

As amostras foram calcinadas nas temperaturas de 700°C, 800°C e 900°C. Após a calcinação, independente da temperatura, houve uma significativa aglomeração de suas partículas ( $\phi_{50\%} = 10\mu\text{m}$ ), produzindo um material de granulometria substancialmente superior a do rejeito “*in natura*” ( $\phi_{50\%} = 0.72\mu\text{m}$ ) (assunto discutido no item 5.1). Diante do ocorrido, a etapa de moagem, que inicialmente não constava do programa experimental, tornou-se necessária para que o metacaulim alcançasse o diâmetro médio de 1.5 $\mu\text{m}$  (valor utilizado nos trabalhos de CALDORENE et alii, 1994; CALDARONE e GRUBER, 1995; ENGELHARD CORPORATION, 1994; ZHANG e MALHOTRA, 1995). O tempo de



moagem necessário para obter essa granulometria, com um moinho de bolas de 60 rpm, foi de 60 minutos.

#### **4.1.2 Ensaio de determinação da atividade pozolânica.**

Realizou-se, após a calcinação e moagem das amostras, o ensaio que determina o índice de atividade pozolânica de uma adição mineral em argamassas de cimento Portland, conforme as prescrições da Norma Brasileira NBR 5752 (1992). Esse índice é definido pela relação entre as resistências à compressão de uma argamassa com 65% de cimento e 35% de pozolana (porcentagens em volume) e a de uma argamassa de cimento (de referência).

Foram misturados mecanicamente cinco traços de argamassa, sendo um de referência, um com sílica ativa e os outros três com o rejeito calcinado a 700°C, 800°C e 900°C, respectivamente. A inclusão da sílica ativa nessa etapa do trabalho teve como objetivo comparar preliminarmente o seu efeito aos das argilas calcinadas.

Segundo ZAMPIERI (1989), a opção pela utilização de cimento Portland, ao invés da cal, no ensaio de pozolanicidade é mais realista, embora os resultados sejam influenciados pelas características físicas e mineralógicas do cimento empregado, fato que dificulta a avaliação da qualidade potencial da pozolana. Entretanto, o método tem sido adequado para averiguar a compatibilidade da pozolana estudada com um determinado tipo de cimento. Nesse trabalho empregou-se o cimento Portland CP II F 32 (item 4.2.3.1).

Os resultados de resistência à compressão foram avaliados estatisticamente através da análise de variância e interpretados conjuntamente com as técnicas de difratometria de raio-x e análise termodiferencial das amostras das argilas calcinadas. O objetivo foi melhor interpretar os resultados mecânicos, correlacionando-os com o colapso da estrutura cristalina da caulinita e com as mudanças de fases que viessem a ocorrer com o aquecimento do material.

## 4.2 SEGUNDA ETAPA : AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÃO (METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM CONCRETO).

### 4.2.1 Planejamento dos ensaios

O propósito dessa etapa foi averiguar as diferenças entre as propriedades dos concretos de resistência normal e de alto desempenho com e sem adições de SA e MC.

Pelo fato de utilizar metodologias distintas, essa etapa foi dividida em duas partes: A primeira referente às misturas de concreto de referência e com adições de SA e a outra relacionada às misturas com MC. Os resultados de ambas as etapas foram comparados entre si.

A primeira parte foi mais ampla e envolveu um número maior de ensaios. Esse procedimento é justificado pelo fato da SA ser uma adição mineral largamente empregada na produção de CAD, enquanto o MC, proveniente do rejeito do processo de beneficiamento, encontrar-se em caráter experimental.

As variáveis de resposta (ou dependentes) avaliadas na primeira parte foram as seguintes:

- Resistência à compressão simples
- Taxa de absorção capilar de água
- Penetração acelerada de íons cloretos (ASTM 1202)

Nas misturas de concreto com adição de MC foram realizados somente os ensaios de resistência e de taxa de absorção capilar.

Em relação aos fatores que influenciam uma determinada propriedade (variáveis independentes ou controláveis), esses são inúmeros e interligados entre si, principalmente quando se trata de materiais de construção. Para analisar as propriedades dos concretos de referência e com SA, foram considerados nessa pesquisa como mais significativos os seguintes fatores controláveis:

- relação água/(cimento + sílica ativa): 0.39, 0.42, 0.47, 0.54 e 0.64. De acordo com a lei de ABRAMS (Abrams apud PETRUCCI, 1980), a resistência à compressão varia na razão inversa da relação água/cimento segundo uma expressão logarítmica. Isso significa que para relações água/cimento baixas, uma pequena redução no valor da relação a/c corresponderá a um incremento significativo na resistência à compressão. Entretanto, para relações água/cimento elevadas, essas reduções não acarretam em aumentos substanciais de resistência. Por essa razão, a diferença entre o valor de uma dada relação água/cimento e a subsequente, a partir de 0.39, é crescente, justamente para captar esse efeito. A faixa entre 0.39 e 0.64 abrange tanto as misturas de CAD como as de resistência normal. O valor inicial de 0.39, relativamente elevado para produção de CAD, é decorrente da baixa qualidade dos agregados empregados (assunto que será discutido no item 4.2.4).
- adições de SA: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%: Como foi visto no item 2.5.2, os teores de SA mais usuais encontram-se entre 7% e 10%. No caso desse trabalho, além das misturas de referência (0% SA), estabeleceu-se o intervalo de adição entre 5 e 20% para avaliar de modo mais abrangente o efeito dessa pozolana nas propriedades dos concretos com os materiais da região do Pará.

No estudo com MC, as relações água/(cimento + metacaulim) consideradas foram 0.39, 0.47 e 0.64 e o teor de adição foi fixado em 10%. A escolha desse percentual foi baseada nos trabalhos encontrados na literatura (CALDARONE et ali, 1994; 1995; ENGELHARD CORPORATION, 1994; ZHANG e MALHOTRA, 1995), nos quais foram empregadas adições de 5% e 10% de um metacaulim com características físicas e químicas semelhantes ao utilizado nessa pesquisa (metacaulim de alta reatividade). A Tabela 21 (capítulo 5) compara algumas características físicas e químicas de ambos os materiais.

A maioria dos trabalhos na área de tecnologia de concreto considera 03 (três) repetições para cada variável de resposta. Tomando esse critério como referência, o número de corpos-de-prova ensaiados seria de 243, sendo 225 para o estudo com as misturas de referência e com sílica ativa e 18 referente às com adição de MC. Essa quantidade inviabilizaria a execução dessa pesquisa dentro de um programa de mestrado, tanto por questões econômicas quanto pelo trabalho e tempo envolvidos.

Diante dessas dificuldades, empregou-se como alternativa a estratégia de fracionamento de projeto, que é descrito com maiores detalhes por MONTGOMERY (1986).

Segundo DAL MOLIN (1995), o método consiste em fazer observações (ou ensaios) em determinados pontos do espaço amostral, de modo que as informações mais relevantes possam ser obtidas. O projeto utilizado na pesquisa consiste de um fatorial fracionado somado a pontos axiais e centrais. Esses pontos, devidamente balanceados, permitem avaliar os efeitos produzidos nas variáveis de resposta pela mudança de nível dos fatores analisados (ou controláveis). Os pontos axiais e centrais, que formam uma espécie de estrela, possibilitam a identificação de interações entre os fatores. Os pontos do fatorial fracionado, que formam um cubo, captam a curvatura ou os efeitos de mais alta ordem (Figura 22).

Nessa pesquisa, o cubo e a estrela são formados por cinco pontos, sendo que cada ponto está relacionado a uma betonada, que por sua vez representa uma mistura de concreto correspondente a uma determinada combinação de fatores controláveis (a/c x teor de adição).

Em razão da maior amplitude do estudo, o fracionamento foi aplicado somente para as misturas de referência e com adição de SA. Com essa técnica foi possível reduzir de 225 para 60 o número total de corpos-de-prova. No projeto fracionado, para cada variável de resposta, foram moldados dois corpos-de-prova procedentes de betonadas distintas.

A execução das betonadas obedeceu a forma das figuras, ou seja, nos dois primeiros dias foram executadas as betonadas correspondentes aos pontos do cubo, e nos dois subsequentes, aos pontos da estrela, sendo moldada dessa maneira a primeira série de corpos-de-prova. Na semana posterior, o procedimento foi idêntico, moldando-se a segunda série de corpos-de-prova. A ordem de execução das betonadas foi aleatorizada, garantindo dessa maneira a minimização dos efeitos de variáveis que não possam ser controladas como a temperatura, umidade, operador, entre outras.

De posse dos dados, ajustou-se um modelo matemático que melhor representasse o comportamento de cada propriedade analisada. Esses modelos matemáticos foram calculados para valores de relações água/aglomerante e teores de adição de SA codificados. A Tabela 8 mostra a associação dos valores codificados aos reais.

Nos concretos com MC, o valor de uma variável de resposta foi calculado pela média dos resultados de quatro corpos-de-prova provenientes de uma mesma betonada. Esses valores individuais foram comparados com os valores previsto pelo modelo matemático correspondente às misturas de referência e com adição de 10% de SA. O total de corpos-de-

prova passou a ser de 24, sendo 12 por variável de resposta (resistência à compressão e taxa de absorção capilar).

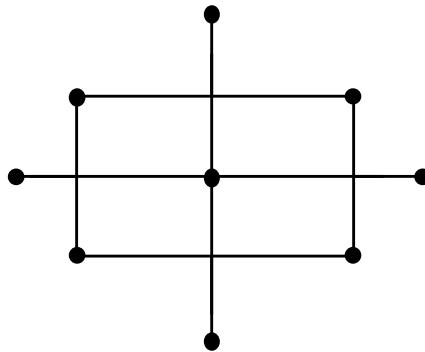


FIGURA 22 - Configuração do projeto fracionado.

TABELA 8 - Valores reais *versus* valores codificados das relações água/aglomerante e dos teores de adição de SA.

a/aglomerante	Real	0.39	0.42	0.47	0.54	0.64
	<b>Codificado</b>	<b>0.5</b>	<b>0.62</b>	<b>0.82</b>	<b>1.1</b>	<b>1.5</b>
adição SA (%)	Real	0	5	10	15	20
	<b>Codificado</b>	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>	<b>1.25</b>	<b>1.5</b>

A Tabela 9 resume o planejamento dos ensaios para cada propriedade. No projeto fracionado (concreto de referência e com adição de sílica ativa), as quadrículas com sombreamento representam as misturas efetivamente executadas, enquanto que as em branco, as que não foram rodadas, porém, determinadas pelo modelo matemático. A aleatorização das betonadas está representada na Tabela 10. A execução das betonadas com MC, correspondentes as três relações água/aglomerante estudadas (valores em negrito na Tabela 10), foi aleatorizada e realizada conjuntamente com as betonadas do projeto fracionado.

Pode-se observar na Tabela 9 que a princípio algumas misturas de referência, que são combinações das extremidades, não seriam executadas (quadrículas hachuradas). Com isso, não seria possível identificar se realmente o modelo captaria ou não as interações entre a relação água/aglomerante e o teor de adição através da comparação entre o valor observado e o previsto. Por causa disso, algumas dessas combinações das extremidades (relações água/cimento de 0.39 e 0.64 sem adição) foram executadas a título de comparação, entretanto, os seus resultados não foram inclusos na elaboração do modelo matemático por questões de metodologia do projeto fracionado.

TABELA 9 - Planejamento dos ensaios para cada propriedade.

	água/aglomerante	0.39	0.42	0.47	0.54	0.64
1º etapa	sem adição (referência)			XX		
	Sílica Ativa – 5%		XX		XX	
	Sílica Ativa – 10%	XX		XXXX		XX
	Sílica Ativa - 15%		XX		XX	
	Sílica Ativa - 20%			XX		
2º etapa	Metacaulim - 10%	YYYY	-	YYYY	-	YYYY

XX - Representa 02 exemplares de betonadas distintas.

YYYY - Representa 04 exemplares de uma mesma betonada.

TABELA 10 - Aleatorização da ordem de execução das betonadas.

Figura	Betonadas	Dia de execução
Cubo	54SA15(1); 42SA5(1); 47SA10(1)	28/7/97
	42SA15(1); 54SA5(1); <b>64MC10</b>	29/7/97
Estrela	39SA10(1); 47SA20(1); 47SA0(1)	30/7/97
	<b>47MC10</b> ; 47SA10(1); 64SA10(1)	31/7/97
Cubo	42SA5(2); <b>39MC10</b> ; 54SA15(2)	04/8/97
	47SA10(2); 42SA15(2); 54SA5(2)	05/8/97
Estrela	64SA10(2); 39SA10(2)	06/8/97
	47SA20(2); 47SA0(2); 47SA10(2)	07/8/97

Observações:

1. Os dois primeiros números representam a relação água/aglomerante(%) e o dois últimos, o teor de adição.
2. O número entre parênteses representa a betonada na qual foi moldado o cp.

## 4.2.2 Ensaio

### 4.2.2.1 Resistência à compressão simples

A execução desse ensaio obedeceu as prescrições das normas NBR 5738 (1994) e 5739 (1994), relativas às dimensões, moldagem e cura dos corpos-de-prova, assim como, equipamento e velocidade de carregamento para ruptura. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 95x190mm, curados em câmara úmida, sendo que nas primeiras vinte e quatro horas após a moldagem os mesmos foram mantidos nos moldes em condições laboratoriais (ao ar). Todos os exemplares foram ensaiados aos 28 dias de idade.

#### 4.2.2.2 Penetração acelerada de íons cloretos (ASTM C 1202)

O método é especificado pela ASTM C 1202 e consiste em colocar um corpo-de-prova cilíndrico, com 95mm de diâmetro e 50mm de espessura, entre duas meia-células de acrílico, sendo que uma contem solução de hidróxido de sódio (0.3N) e a outra solução de cloreto de sódio com 3% de concentração (em massa). O conjunto das meia-células de acrílico mais o corpo-de-prova constitui a célula de migração de cloretos. Entre as meias células é gerada uma diferença de potencial de 60V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. O ensaio tem duração de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos. O produto da corrente pelo tempo é a carga total que atravessa o corpo-de-prova. O resultado da carga total passante, em Coulombs, representa a maior ou menor resistência do concreto à penetração dos íons cloretos.

Como foi visto anteriormente, o teste foi desenvolvido para avaliar a *resistência à penetração de cloretos* do concreto de tabuleiros de pontes. O ensaio sofreu inúmeras críticas pelo fato da corrente elétrica registrada não corresponder somente a mobilidade dos íons cloretos, mas sim a de todos os íons presentes na solução dos poros. Alguns pesquisadores afirmam que o teste reflete a resistividade elétrica do concreto e se constitui no método acelerado mais indicado para avaliar a penetrabilidade do concreto de alto desempenho (GJORV e SAKAI, 1995; MEHTA, 1994; MONTEIRO apud KULAKOWSKI, 1994). Apesar das críticas, o método é largamente empregado na América do Norte para quantificar a penetração dos íons cloretos no concreto (MALHOTRA et ali, 1994).

Na pesquisa, três células eram ensaiadas simultaneamente por dia, sendo dispostas em paralelo de maneira que fossem submetidas à mesma tensão de 60V. A Figura 23 ilustra o esquema da disposição das células utilizado no ensaio.

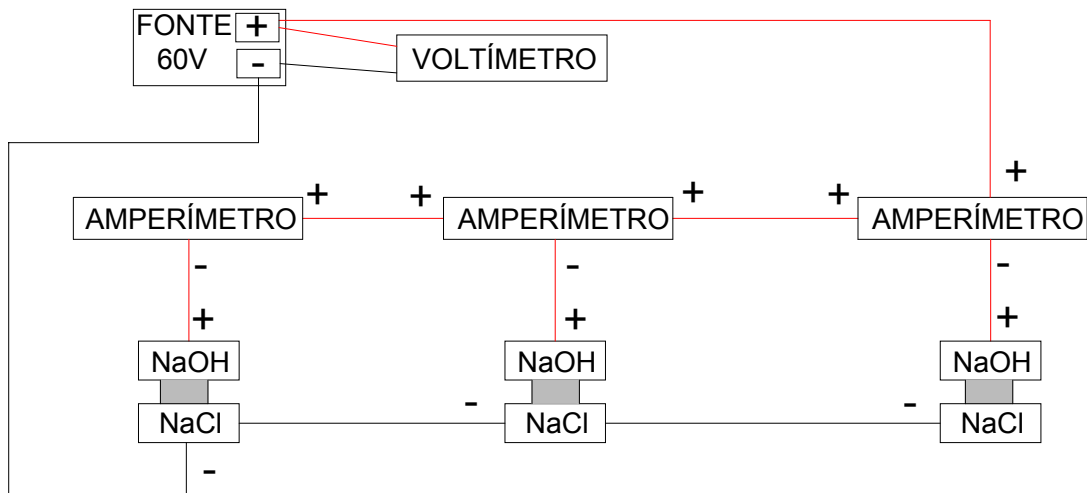


FIGURA 23 - Esquema gráfico da disposição das células em paralelo.

As amostras de concreto utilizadas no ensaio, cujas dimensões e forma estão de acordo com a norma ASTM C 1202 (1992), foram procedentes da parte central de corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 95x190mm. A cura destes corpos-de-prova foi inicialmente ao ar, durante 24 horas após a moldagem, em seguida, realizada em câmara úmida até o vigésimo quarto dia (item 4.2.5). A partir daí, os procedimentos obedeceram a seguinte seqüência:

- No 24º dia, o corpo-de-prova cilíndrico foi retirado da câmara úmida e serrado em três partes. Retirou-se a amostra central do corpo-de-prova que, em seguida, foi colocada na câmara úmida;
- No 25º dia, a amostra é retirada da câmara úmida para ter sua superfície lateral selada com resina epoxi;
- No 26º dia, a amostra é submetida ao vácuo por quatro horas, sendo que após decorrido três horas de vácuo, é submersa em água deaerada, permanecendo nessa condição por 19 horas;
- No 27º dia, a amostra é colada às meia-células com borracha de silicone.
- No 28º dia, o ensaio é realizado em câmara climatizada com temperatura de 23°C e umidade relativa de 65±5%.



#### 4.2.2.3 Taxa de absorção capilar

O ensaio foi proposto por S. KELHAM, em 1988, e tem por objetivo determinar os seguintes parâmetros:

- A massa de água requerida para saturar o concreto - *porosidade efetiva*.
- A velocidade unidimensional de absorção por sucção capilar - *taxa de absorção capilar*.

O ensaio mede a velocidade unidimensional de absorção por sucção capilar de uma amostra de concreto submersa em água. O procedimento consiste em monitorar, ao longo do tempo, o acréscimo de peso da amostra a medida que a mesma vai absorvendo água. O ensaio termina quando o peso se estabiliza ou a taxa de absorção se torna muito lenta, indicando que o concreto está efetivamente saturado a partir desse determinado instante (*“nick point”*) (Figura 5) (assunto discutido no item 2.5.3.2.3). Nos ensaios realizados por KELHAM (1988), o tempo de saturação variou entre 12 e 44 horas, dependendo da mistura e do tipo de cura que foi realizada.

Na metodologia desenvolvida por KELHAM (1988), a taxa de absorção capilar é determinada pela relação entre a espessura do corpo-de-prova e a raiz quadrada do tempo de saturação, e a porosidade efetiva pela razão entre o acréscimo de peso e o volume da amostra.

No presente trabalho, não se determinou a porosidade efetiva das misturas e as taxas de absorção capilar foram calculadas para as primeiras 25 horas e não quando ocorresse a estabilização do peso da amostra, como foi proposto pelo autor. As reduzidas taxas de absorção dos concretos analisados no experimento, fizeram com que essa condição fosse atingida somente após 10 dias de imersão na água. Além do que, não ficou caracterizado no gráfico  $i = S.t^{1/2}$  da grande maioria dos corpos-de-prova, a configuração de duas retas separadas pelo ponto de inflexão (*“nick point”*)\*, mas sim, de uma curvatura semelhante a uma parábola do segundo grau. Isso dificultou bastante a identificação do momento em que o corpo-de-prova fica efetivamente saturado. Por essa razão, não se adotou a metodologia de determinar a taxa de absorção em função da profundidade de penetração, pois não havia uma relação linear dessa com a raiz quadrada do tempo. No ANEXO B são mostrados os gráficos

---

\* Esse comportamento somente foi observado nos corpos-de-prova das misturas sem adição mineral.

da taxa de absorção em função da raiz quadrada do tempo de todos os corpos-de-prova avaliados no experimento.

As taxas de absorção capilar foram determinadas pela relação entre a quantidade de água absorvida por unidade de área ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2 = \text{mm}$ ) e a raiz quadrada de 25 horas de absorção. Nesse intervalo de tempo foram plotados, no mínimo, 10 pontos para cada corpo-de-prova e as retas foram traçadas segundo os critério de regressão linear simples (Método dos Mínimos Quadrados).

As amostras utilizadas no experimento realizado por KELHAM (1988) foram cilíndricas com 50mm de espessura e 150mm de diâmetro. Segundo o autor, os resultados obtidos nos ensaios independem do tamanho e da forma do corpo-de-prova. Nessa pesquisa foram empregadas amostras prismáticas de 100x100x50mm, provenientes do corte de corpos-de-prova cúbicos com 100 mm de aresta, curados durante as primeiras 24 horas ao ar e posteriormente em câmara úmida até o vigésimo oitavo dia (item 4.2.5).

O preparo das amostras para o teste inicia-se no vigésimo oitavo dia, quando os corpos-de-prova cúbicos são retirados da câmara úmida e serrados ao meio (apenas uma das partes é utilizada no ensaio). No mesmo dia, o amostra serrada é colocada numa estufa a 105°C até atingir a constância de massa, que dependendo do tipo de mistura, variou de 5 a 10 dias. Em seguida, realiza-se o resfriamento da amostra dentro de um dessecador por 24 horas. Após esse procedimento, suas superfícies laterais são seladas com resina epoxi e uma tampa de PVC com tubo de borracha acoplado é colada com borracha de silicone sobre a superfície superior (superfície serrada). Desse modo, quando for submersa na água, a superfície superior da amostra permanece seca e sujeita à pressão atmosférica, permitindo que o ar contido no interior do concreto escape para a atmosfera à medida que a água penetra por capilaridade pela superfície acabada de concreto junto às formas (superfície sujeita ao efeito parede).

A amostra submersa é suportada por uma malha de aço, que por sua vez transfere o peso aparente à uma balança com capacidade de 5kg. O ensaio foi realizado dentro de uma câmara climatizada com umidade relativa de  $65\pm 5\%$  e temperatura de 23°C, de modo que o efeito exercido pela temperatura na viscosidade da água, alterando o valor da taxa de absorção, fosse eliminado. O corpo-de-prova e o aparato do ensaio são mostrados nas Figuras 24 e 25.



FIGURA 24 - Corpo-de-prova prismático preparado para o ensaio de absorção.



FIGURA 25 - O aparato do ensaio de absorção.

### 4.2.3 Caracterização dos materiais

#### 4.2.3.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto CP II F 32 (NBR 11578, 1991) disponível comercialmente em Belém. Esse tipo de cimento é constituído por 90 a 94% de clínquer mais gipsita e de 6 a 10% de material carbonático. As características químicas, físicas e mecânicas desse cimento foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 11.

TABELA 11 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32.

<b>Características</b>	<b>Determinações</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Valores obtidos</b>
QUÍMICAS	Perda ao fogo	NBR 5743	4.52%
	Resíduo insolúvel	NBR 5744	1.38%
	Óxido de silício(SiO <sub>2</sub> )	NBR 5742	19.82%
	Óxido de alumínio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 5742	4.54%
	Óxido de Ferro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 5742	2.64%
	Óxido de Cálcio Total(CaO)	NBR 5742	59.80%
	Óxido de Magnésio (MgO)	NBR 5742	3.28%
	Óxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	NBR 5745	2.42%
	Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	NBR 5747	NF
	Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	NBR 5747	NF
	Óxido de Cálcio Livre(CaO)	NBR 5748	1.19%
	Composição Potencial	ASTM C 150	
	C <sub>3</sub> S		57.30%
	C <sub>2</sub> S		9.64%
	C <sub>3</sub> A		7.56%
C <sub>4</sub> AF		8.03%	
FÍSICAS	Massa específica	NBR 6474	3.16 kg/dm <sup>3</sup>
	Finura - peneira nº 200	NBR 11579	4.5%
	Área específica	NBR 7224	316m <sup>2</sup> /kg
	Tempo de pega inicial	NBR 11581	2h 15min
	Tempo de pega final	NBR 11581	3h 40min
MECÂNICAS	Resistência à compressão	NBR 7215	
	1dia		9.6 MPa
	3dias		19.9 MPa
	7dias		25.5 MPa
	28dias		32.6 MPa

NF -resultado não fornecido pelo fabricante

#### 4.2.3.2 Agregado graúdo

Os agregados naturais encontrados no mercado da Construção Civil em Belém são procedentes da região Nordeste do Estado do Pará, onde, praticamente, não há disponibilidade de agregados de boa qualidade para produção de concreto. Constituem-se de seixos extraídos

de jazidas de solo arenoso ou areno-argiloso, com partículas friáveis e/ou a presença de elevados teores de material pulverulento (argila e silte).

A utilização de pedra britada de granito, recomendada para a produção de CAD, tem seu uso bastante restrito na capital por causa do elevado custo de aquisição em relação a outros agregados disponíveis na região e também pelo fato da jazida se localizar a pouco mais de 200 km de Belém, no município de Tracuateua.

O agregado gráudo utilizado na pesquisa foi o seixo de cava, proveniente do município de Ourém, distante da capital aproximadamente 150 km (via rodoviária). SILVA et ali (1994) relatam que esse tipo de seixo, do ponto de vista mineralógico, consiste de um conglomerado com predominância de quartzo e chert, inserido numa matriz de solo arenoso, de coloração esbranquiçada a cinza esbranquiçada. A forma de suas partículas varia de esférica a aproximadamente esférica e, dependendo do ponto de extração, pode ser angulosa.

O processo de lavagem e classificação do seixo se inicia com a extração do solo (constituído por matéria orgânica, seixo e areia) através de pás-carregadeiras. O transporte do material da jazida até o local de beneficiamento é realizado por caçambas basculantes (Figura 26). No local de produção, o material é descarregado em silos e conduzido por esteiras até o peneirador vibratório. A separação do seixo em diferentes granulometrias é feita com aspersão de água (lavagem para remoção da matéria orgânica e dos grãos de areia). Após o peneiramento, os materiais retidos em cada peneira são removidos do equipamento por esteiras transportadoras e estocados nas proximidades do local (Figura 27). Os seixo são classificados, conforme a abertura das peneiras, em fino, médio e grosso (Figura 28).

O seixo empregado na pesquisa foi seco ao ar e empregado da maneira como é encontrado comercialmente: lavado e peneirado (granulometria média). Algumas características do agregado são apresentadas na Tabela 12, na qual se verifica que o agregado tem o diâmetro máximo característico de 19 mm e apresenta uma granulometria contínua com grande quantidade de material passante na peneira 4.8 mm, cerca de 19%. O teor de material pulverulento ( $\phi < 75\mu\text{m}$ ) é de aproximadamente 1%, podendo apresentar valores superiores.



FIGURA 26 - Extração do seixo nas jazidas.



FIGURA 27 - Peneiramento, lavagem e classificação do seixo.



FIGURA 28 - Classificação do seixo em três granulometrias : fina, média e grossa.

A elevada porcentagem de areia e de partículas finas é atribuída à lavagem ineficiente e à baixa resistência do seixo, que se desgasta no transporte, manuseio e durante a mistura. A NBR 7211 (1982) estipula que a abrasão “Los Angeles” de um agregado não deve ser superior a 50%. Para o CAD esse limite é bem inferior, alguns pesquisadores sugerem valores iguais ou inferiores a 15% (GUTIÉRREZ e CÁNOVAS, 1996). Entretanto, o seixo estudado apresentou um índice de abrasão de 61%, valor substancialmente superior ao indicado pela norma e pelos pesquisadores. A baixa resistência à abrasão afeta sensivelmente a trabalhabilidade da mistura, uma vez que a sua trituração modifica a distribuição

granulométrica e a área específica das partículas, aumentando a demanda de água para a mesma consistência.

Outra propriedade do agregado que afeta a consistência das misturas de concreto é a absorção. O seixo estudado apresenta uma absorção de 2.3%, valor relativamente elevado quando comparado com a de outros agregados normalmente empregados na produção de CAD (1%) (assunto abordado no item 2.4.2.1.1). Essas características dificultam a obtenção de misturas com relações água/cimento reduzidas, a menos que sejam empregados aditivos redutores de água, fato que eleva substancialmente o custo da mistura na região\*.

TABELA 12 - Características do seixo de Ourém.

Determinações	Valores obtidos			Método de ensaio
	Abertura da peneira ABNT (mm)	Porcentagem retida em massa		
Composição Granulométrica		Individual	Acumulada	NBR 7217
	25.0	0	0	
	19.0	1.7	1.7	
	12.5	27.7	29.4	
	9.5	21.3	50.7	
	4.8	30.7	81.4	
	2.4	11.9	93.3	
	1.2	3.6	96.9	
	0.6	1.8	98.7	
	0.3	0.7	99.4	
0.15	0.4	99.8		
< 0.15	0.4	100		
Teor de material pulverulento	0.8%			NBR 7219
DMC	19mm			NBR 7217
Mássa específica seca	2.49 kg/dm <sup>3</sup>			NBR 9937
Absorção	2.3%			NBR 9937
Abrasão "Los Angeles"	61%			NBR 6465

\* Os preços de aquisição médios dos aditivos superplastificante e plastificante em Belém são de R\$ 6.50/kg e R\$ 1.5/kg, respectivamente.

#### 4.2.3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo normalmente empregado em Belém é extremamente fino e proveniente de jazidas de areia quartzosa localizadas dentro de um raio de aproximadamente 80km de Belém. Essa região compreende os municípios de Castanhal, Vigia, Santo Antônio do Tauá e os distritos de Americano, Santa Bárbara, Mosqueiro e Vila do Apeú. A areia utilizada nessa pesquisa é oriunda da região do Apeú, cuja distância da jazida à Belém é de 69km. Algumas características dessa areia são mostradas na Tabela 13.

TABELA 13 - Características da areia estudada.

<b>Determinações</b>	<b>Valores obtidos</b>			<b>Método de ensaio</b>
Composição Granulométrica	Abertura da peneira	Porcentagem retida ( em massa)		NBR 7217
	ABNT (mm)	Individual	Acumulada	
	4.8	0.3	0.3	
	2.4	0.7	1.0	
	1.2	6.9	7.9	
	0.6	11.3	19.2	
	0.3	45.3	64.5	
	0.15	24.0	88.5	
< 0.15	11.6	100		
DMC	2.4 mm			NBR 7217
Módulo de finura	1.8			NBR 7217
Massa específica	2.63 kg/dm <sup>3</sup>			NBR 9776

#### 4.2.3.4 Sílica ativa

A SA empregada nos ensaios foi o subproduto de uma indústria de produção de silício-metálico localizada no município de Tucuruí (PA). As características físicas e a análise química da SA constam na Tabela 14. A análise química foi determinada pelas técnicas de fluorescência de raio-x e por espectrometria de absorção atômica, enquanto a área superficial específica por adsorção de nitrogênio e a massa específica segundo a NBR 7224 (1984). A distribuição granulométrica (Figura 34) e o diâmetro médio das partículas foram determinados através do granulômetro a laser.



TABELA 14 - Características físicas e químicas da sílica ativa.

Características	Determinações	Valores obtidos
Químicas	Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	91.00%
	Óxido de alumínio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.10%
	Óxido de ferro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.70%
	Óxido de Cálcio(CaO)	1.10%
	Óxido de Magnésio(MgO)	1.50%
	Óxido de Sódio(Na <sub>2</sub> O)	0.39%
	Óxido de Potássio(K <sub>2</sub> O)	0.44%
	Óxido de Fósforo(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.1%
	C (total)	0.50%
	Perda ao fogo	1.5 %
	Total	97.33 %
Físicas	Massa específica	2.20 kg/dm <sup>3</sup>
	Área superficial específica	13.86m <sup>2</sup> /g
	Diâmetro médio das partículas	0.5µm

#### 4.2.3.5 Rejeito do beneficiamento de caulim

O MC utilizado na pesquisa é proveniente da calcinação e moagem do rejeito descrito no item 3.5. As metodologias para determinar as características físicas e químicas desse material foram idênticas às empregadas para a sílica ativa. A distribuição granulométrica do rejeito “*in natura*” encontra-se na Figura 34 e as demais características físicas e a análise química estão apresentadas na Tabela 15.

A mineralogia do rejeito foi avaliada conjuntamente pela difratometria de raio-x e pela análise termodiferencial. O difratograma de raio-x foi interpretado com base nos dados do “Power Diffraction File”, elaborado pela JCPDS - International Centre for Diffraction Data. A interpretação do termograma foi baseada no trabalho de MACKENZIE (1970). As Figuras 29 e 30 mostram o difratograma de raio-x e a curva termodiferencial, respectivamente.

De acordo com os resultados dos ensaios físicos, o rejeito é uma argila extremamente fina ( $\phi_{50\%} = 0.72 \mu\text{m}$ ), com área superficial específica de 13.9 m<sup>2</sup>/g e massa específica de 2.60kg/dm<sup>3</sup>. O espectro de raio-x e o termograma da amostra do rejeito indicam que o

material é constituído basicamente por uma caulinita mal cristalizada\*, fato que é ratificado pela análise química, na qual se observa que a relação  $Al_2O_3/SiO_2$  determinada é muito próxima do valor teórico da caulinita (GRIM, 1963), dando indícios que o rejeito possui teores superiores a 90% de caulinita frente a porcentagem de aproximadamente 7 % de fases inertes como quartzo, hematita, anatásio, rutilo e muscovita\*\*. Essas características encontradas são semelhantes às descritas por FLORES (1998) e demonstram a grande potencialidade do material para o desenvolvimento de propriedades pozolânicas após ser calcinado.

TABELA 15 - Características físicas e químicas do rejeito.

Características	Determinações	Valores obtidos	Valores teóricos da cela unitária da caulinita (GRIM, 1963)
Químicas	Óxido de silício ( $SiO_2$ )	43.80%	46.54%
	Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	36.80%	39.50%
	Óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ )	2.70%	
	Óxido de Cálcio ( $CaO$ )	< 0.05%	
	Óxido de Magnésio ( $MgO$ )	< 0.10%	
	Óxido de Titânio ( $TiO_2$ )	2.00%	
	Óxido de Sódio ( $Na_2O$ )	0.06%	
	Óxido de Potássio ( $K_2O$ )	0.11%	
	Enxofre Total (S)	0.03%	
	Perda ao fogo	13.66%	
	Total	99.31%	
		$Al_2O_3 / SiO_2$	0.84
Físicas	Massa específica	2.60 kg/dm <sup>3</sup>	
	Área superficial específica	13.91m <sup>2</sup> /g	
	Diâmetro médio das partículas	0.72µm	

Os teores de ferro e titânio, na ordem de 5%, são responsáveis pela coloração rósea-claro do caulim, que ao ser calcinado em atmosfera oxidante, tende a apresentar uma coloração um pouco mais escura. Contudo, não a ponto de prejudicar uma possível

\* O rejeito apresenta, no intervalo  $2\theta$  de 20° a 25°, apenas uma raia de difração.

\*\* Todavia, para que esses resultados tenham maior precisão, torna-se necessária a determinação do teor de quartzo (sílica livre) através do ensaio de dissolução seletiva com ácido pirofosfórico (ABCP, 1988).

comercialização desse produto, uma vez que o cimento pozolânico com argila calcinada produzido pela Cimentos Tupi S.A., no ano de 1976, não foi bem aceito pelo mercado consumidor devido à sua coloração ligeiramente rosada (ZAMPIERI, 1989).

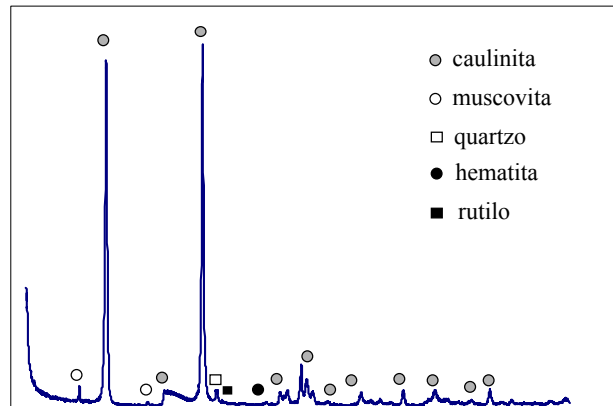


FIGURA 29 - Difratograma de raio-x da amostra do rejeito de caulim.

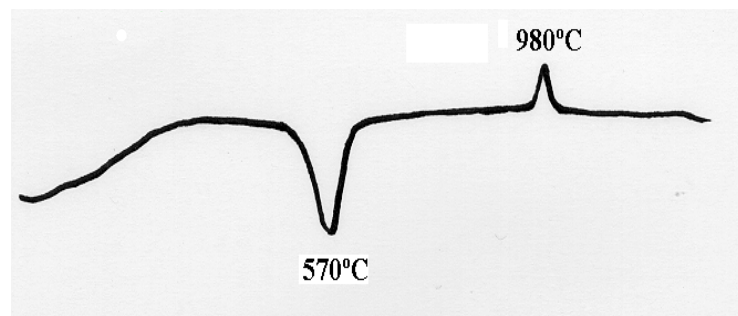


FIGURA 30 - Termograma da amostra do rejeito de caulim.

#### 4.2.3.6 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado foi o superplastificante de trimetil-melamina sulfonada condensada com formaldeído, contendo 39% de sólidos e densidade de  $1.12\text{g/cm}^3$ .

#### 4.2.4 Proporcionamento dos materiais

O proporcionamento dos materiais permitiu determinar a quantidade dos materiais empregados nas misturas do experimento e foi baseado no método de dosagem EPUSP/IPT (HELENE e TERZIAN, 1993). Nesse estudo preliminar foram empregadas misturas de concreto isentas de adição mineral, com e sem aditivo superplastificante.

A metodologia consistiu, primeiramente, em determinar para o traço de 1:5 (cimento : agregados secos), o teor de argamassa e a relação água/cimento necessária para obtenção de

um abatimento de  $70 \pm 10$  mm. Posteriormente, com o mesmo teor de argamassa do primeiro traço, foram executados mais três traços auxiliares (1:2, 1:3.5 e 1:6.5) com o intuito de determinar suas respectivas relações água/cimento para obtenção da mesma consistência do traço 1:5.

O teor de argamassa considerado adequado para proporcionar coesão e acabamento às misturas foi de 43%. Esse percentual reduzido é atribuído ao fato do seixo apresentar um teor elevado de material passante na peneira 4.8 mm, que ocasiona um aumento do volume de finos em relação ao volume total da mistura e, conseqüentemente, uma redução do teor de cimento. Na prática, o teor de argamassa real é superior ao calculado pela pesagem dos materiais secos e depende do tempo de mistura, do tipo de betoneira e da ordem de colocação dos materiais.

A dosagem com aditivo superplastificante foi realizada com o objetivo de alcançar relações água/cimento inferiores às obtidas na dosagem sem aditivo. O teor de argamassa e o abatimento do tronco de cone foram idênticos ao da dosagem sem aditivo, entretanto, os valores de  $1 : m$  (cimento : agregados secos) estudados foram 1:2.5, 1:3.5 e 1:4.5.

De posse dos dados, plotou-se as seguintes curvas de regressão: consumo de cimento por metro cúbico de concreto ( $C$ ) *versus* relação agregados secos/cimento em massa ( $m$ ) (Figura 31) e relação agregados secos/cimento em massa ( $m$ ) *versus* relação água/cimento ( $a/c$ ) para as dosagem com e sem aditivo (Figura 32).

Nas Figuras 31 e 32, observa-se que os valores de  $m$  correspondem a relações água/cimento superiores às normalmente empregadas nas misturas de concreto produzidas com agregados convencionais de boa qualidade. A baixa qualidade dos agregados disponíveis em Belém\* não permite que se obtenha valores muito reduzidos de relação água/cimento. Para os concretos produzidos com agregados utilizados em Porto Alegre, a relação água/materiais secos ( $A$ ) varia entre 7% e 8% (adensamento vibrado) (PETRUCCI, 1980). No presente trabalho, observou-se que o  $A$  das misturas produzidas com os agregados empregados em Belém é de aproximadamente 9%, para a faixa de  $m$  entre 3.5 e 6.5. SILVA et ali (1989) também constataram o mesmo valor de  $A$  para os concreto produzidos em Belém.

---

\* A elevada finura da areia e o excesso de finos no agregado graúdo secam em demasia o concreto no estado fresco

Por causa da maior demanda de água, provavelmente a durabilidade dos concretos produzidos com os agregados disponíveis em Belém tende a ser menor quando comparada com a das misturas com agregados convencionais, com boa resistência, limpos e são

O emprego de 0.5% de aditivo superplastificante (valor mínimo recomendado pelo fabricante) reduziu a quantidade de água da mistura em aproximadamente 10%, independente do traço estudado. Na dosagem com aditivo, os valores de  $m$  de 2.5, 3.5, 4.5 corresponderam às relações  $a/c$  de 0.35, 0.4 e 0.47, respectivamente, enquanto que na dosagem sem aditivo, os mesmos valores de  $m$  corresponderam às relações  $a/c$  de 0.39, 0.45 e 0.52, respectivamente (Figura 32).

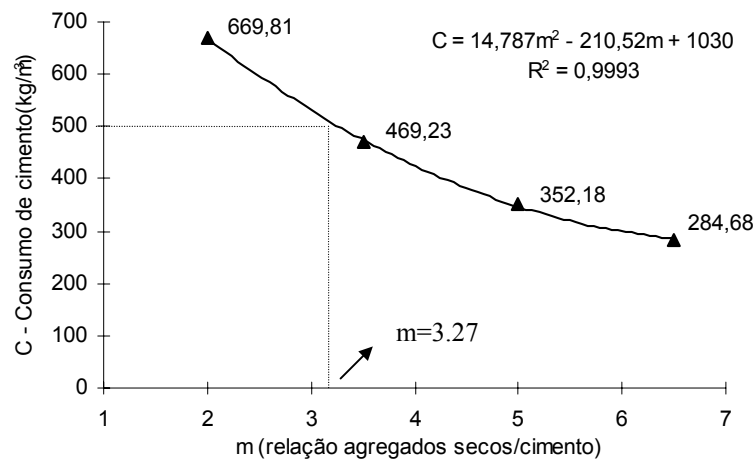


FIGURA 31 - Consumo de cimento (C) versus m para dosagem sem aditivo.

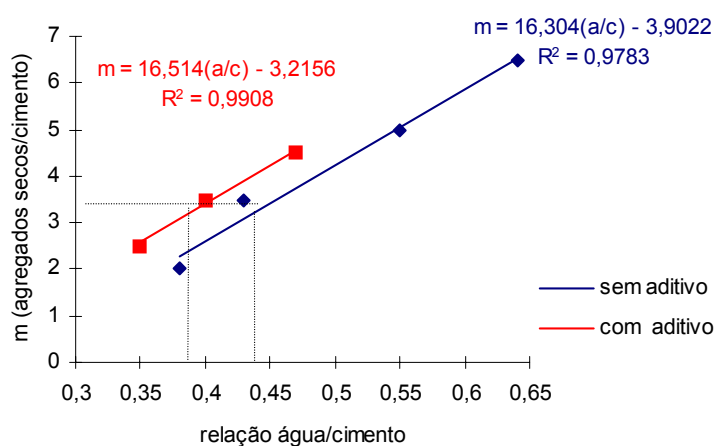


FIGURA 32 - Relação agregados secos/cimento em massa(m) versus relação a/c para dosagens com e sem aditivo.

Na execução das misturas de concreto do experimento, a sílica ativa e o metacaulim foram empregados como adição à massa de cimento. O abatimento do tronco de cone ficou

estipulado em  $70\pm 10$  mm ( o mesmo do estudo de dosagem) e o consumo de cimento limitado em  $500 \text{ kg/m}^3$ . Esse limite foi estabelecido com base nos trabalhos de laboratório e nas experiências de campo, para os quais, os tecnologistas normalmente limitam o teor máximo de material cimentício entre  $450 \text{ kg/m}^3$  e  $550 \text{ kg/m}^3$  (NEVILLE, 1997 e MEHTA e AICTIN, 1990).

De acordo com as Figuras 31 e 32, o consumo de  $500 \text{ kg/m}^3$  correspondeu ao  $m$  de 3.27 e às relações  $a/c$  de 0.39 e 0.44 para as dosagens com e sem aditivo, respectivamente. Por essa razão, adotou-se como limite inferior de relação  $a/c$  para as misturas do experimento, o valor de 0.39 (item 4.2.1). Para que uma determinada relação água/cimento estabelecida não fosse reduzida ou ultrapassada, estipulou-se a quantidade mínima de água e o teor máximo de aditivo superplastificante entre 1.5% e 1.8% (valores dependentes da relação água/aglomerante e do teor de adição). A composição das misturas utilizadas no experimento são mostradas na Tabela 16.

TABELA 16 - Composição das misturas de concreto.

A/ AGL*.	Teor de adição (%)	Quantidades ( $\text{kg/m}^3$ )						
		CP	AM	AG	SA ou MC	água	S.P.** ( $\text{l/m}^3$ )	
							SA	MC
0.39	10	505	409	1217	50.5	214	5.14	3.65
0.42	5	452	465	1216	22.6	197	2.06	-
	15	452	465	1216	67.8	216	4.32	-
0.47	0	448	470	1214	0	209	0	-
	10	448	470	1214	44.8	229	1.22	1.24
	20	448	470	1214	89.6	250	2.92	-
0.54	5	354	545	1189	17.7	199	0.71	-
	15	354	545	1189	53.1	218	0.81	-
0.64	10	286	641	1218	28.6	200	0.36	0.82

observações :

CP = cimento Portland

AM = agregado miúdo

AG = agregado graúdo

\* incluída a porcentagem de água do aditivo superplastificante

\*\* superplastificante a base de melamina

#### 4.2.5 Moldagem, cura e preparação dos corpos-de-prova

A mistura dos concretos do experimento foi realizada em betoneira de eixo inclinado e imprimada com argamassa de cimento e areia de traço 1:2.

A colocação dos materiais foi idêntica para todas as misturas e feita com a betoneira em movimento, obedecendo a seguinte ordem:

- 100% do seixo mais 30% da água;
- 100% do cimento mais 100% da sílica ativa ou metacaulim;
- 70% da água mais aditivo (0.3% a 0.6%, caso fosse necessário);
- 100% da areia;
- aditivo complementar, no máximo entre 1.5% e 1.8% (nos casos em que o abatimento desejado não fosse alcançado).

Decorrido o período de mistura de 5 minutos, a consistência do concreto no estado fresco foi avaliada pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1992).

Na primeira parte do estudo (misturas de referência e com adição de SA), para cada betonada foram moldados três corpos-de-prova, sendo 02 (dois) cilíndricos em forma metálica de 95x190mm (resistência à compressão e penetração de cloretos) e 01 (um) prismático em forma de madeira de 100x100x100mm (taxa de absorção capilar). No estudo com metacaulim, foram moldados 08 (oito) corpos-de-prova por betonada, sendo quatro cilíndricos (resistência à compressão) e quatro prismáticos (taxa de absorção capilar), cujas dimensões foram as mesmas empregadas na etapa anterior.

O adensamento foi executado através de vibrador e realizado em duas camadas para os corpos-de-prova cilíndricos e apenas em uma camada para os prismáticos.

A cura de todos os corpos-de-prova foi realizada inicialmente ao ar, durante as primeiras 24 após a moldagem. Logo após, foram retirados das formas e colocados em câmara úmida com umidade relativa superior a 95% e temperatura de  $21\pm 2^{\circ}\text{C}$  por um período de 27 dias (corpos-de-prova dos ensaios de resistência à compressão e de absorção capilar) e 24 dias (corpos-de-prova do ensaio de penetração de cloretos). A cura dessas últimas amostras, a partir do vigésimo quarto dia, segue procedimento distinto descrito no item 4.2.2.2.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O programa experimental, conforme foi visto no capítulo 4, foi dividido em duas etapas: determinação da temperatura ótima de calcinação do rejeito e avaliação comparativa de desempenho entre os concretos de alto desempenho e os convencionais produzidos na região metropolitana de Belém. Nesse capítulo serão apresentados os resultados de ambas as etapas assim como a discussão dos mesmos, utilizando *ferramentas* estatísticas.

### 5.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA ÓTIMA DE CALCINAÇÃO DO REJEITO.

#### 5.1.1 Características física, química e mineralógicas do rejeito calcinado a diferentes temperaturas

A Tabela 17 mostra a influência da temperatura de calcinação sobre algumas características físicas e químicas do rejeito.

TABELA 17 - Características do rejeito “*in natura*” e calcinado em diversas temperaturas.

Características	rejeito “ <i>in natura</i> ”	Temperatura de calcinação		
		700°C	800°C	900°C
massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2.60	2.54	2.57	2.59
área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	13.91	14.95*	15.14*	14.86*
$\phi_{\text{médio}}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.5 a 0.7	1.30*	1.46*	1.7*
perda ao fogo (%)	13.66	4.8**	2.24**	0.61**

\* metacaulim submetido a moagem por 1 hora em moinho de bolas de 60 rpm.

\*\* perda ao fogo residual.

A calcinação provocou uma substancial alteração na granulometria do rejeito. O material “*in natura*” apresenta o diâmetro médio na faixa de 0.5 a 0.7 $\mu\text{m}$ , entretanto, após a ativação térmica nas condições descritas no item 4.1.1, o diâmetro passou a ser de aproximadamente 10 $\mu\text{m}$ , independente da temperatura estudada. Fato semelhante foi



observado em vários relatos da literatura (assunto discutido no item 3.3.3). No trabalho de FLORES (1998), pode-se observar que grande parte das partículas do mesmo rejeito calcinado a 650°C apresentaram diâmetro maior que 1µm. (Figura 33)

A causa dessa excessiva aglomeração não ficou bem explicada, todavia, é possível que determinados procedimentos de calcinação ocasionem um princípio de sinterização. Segundo MIELENS et ali (1950), as alterações na área superficial específica e na finura dos argilominerais quando calcinados, são atribuídas à destruição ou à sinterização de suas partículas. Contudo, são necessários estudos mais aprofundados para investigar as causas desse fenômeno. SALVADOR (1995) explica que o fenômeno de aglomeração ocorre quando se empregam processos de ativação térmica que utilizam fornos rotativos ou leitos fluidizados que requerem horas ou, no mínimo, alguns minutos para efetivar a desidroxilação das argilas. Os produtos desses processos de calcinação geralmente necessitam ser moídos para apresentarem atividade pozolânica satisfatória, conforme foi visto no item 3.3.3.

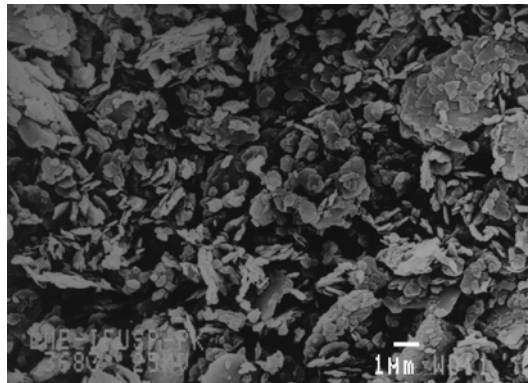


FIGURA 33 - Microscopia eletrônica de varredura do rejeito calcinado a 650°C (FLORES, 1998).

Pelo fato do rejeito ser uma caulinita extremamente fina, com diâmetro médio muito menor do que das argilas citadas na literatura, acreditava-se que o processo de produção do metacaulim envolveria apenas a etapa de calcinação. Entretanto, com a aglomeração excessiva das partículas, tornou-se necessária a realização da moagem de todas as amostras até a granulometria especificada ( $\phi_{\text{médio}} \cong 1.5\mu\text{m}$ ). A área superficial específica do MC após a moagem ficou em torno de 15 m<sup>2</sup>/g (para todas as temperaturas estudadas), semelhante à da SA e a do rejeito “*in natura*”. A Figura 34 apresenta as curvas granulométricas da SA, do rejeito “*in natura*” e do MC após a moagem.

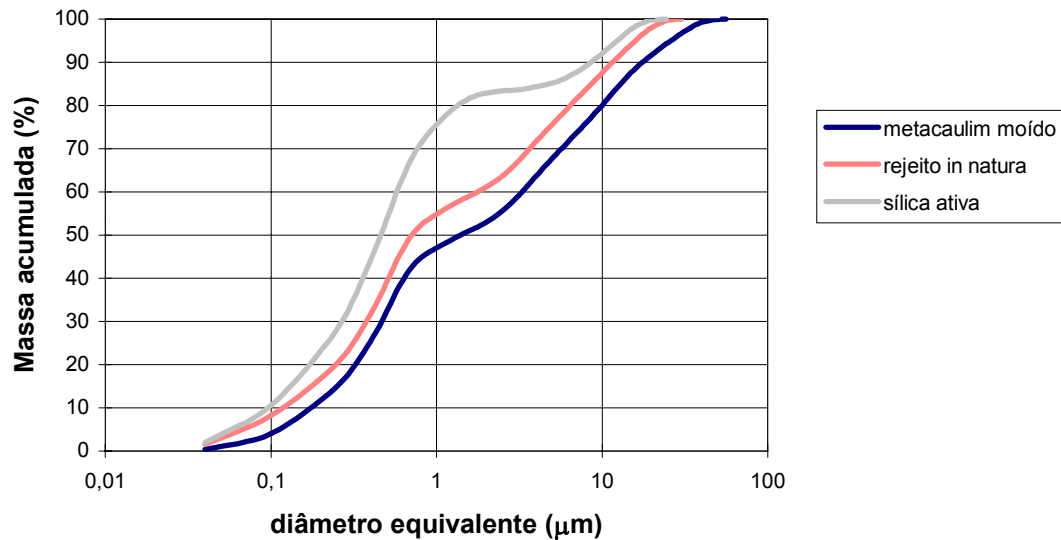


FIGURA 34 - Comparação da distribuição granulométrica acumulada das partículas da sílica ativa, do metacaulim moído e do rejeito *in natura*.

Com a elevação da temperatura de calcinação, houve um aumento na massa específica do rejeito (Tabela 17). Esse fenômeno também foi constatado por SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986) e por MIELENS et alii (1950). De acordo com alguns pesquisadores (REIKE e MAUVE, HARMOM e PARMELEE apud BRIDSON et alii, 1985), o acréscimo da temperatura de calcinação em fornos rotativos faz com que a massa específica da caulinita inicialmente decresça, atingindo um ponto mínimo a partir do qual, torna a crescer, podendo eventualmente, exceder o valor inicial do argilomineral.

Na Figura 35 são mostradas as curvas de ATD do rejeito calcinado a 700°C, 800°C e 900°C. A argila, quando bem calcinada, não deve apresentar o pico endotérmico entre 500°C e 560°C, que corresponde à transformação da caulinita existente em metacaulinita; entretanto, deve revelar o pico exotérmico em torno de 950°C, relativo à nucleação da mulita a partir da metacaulinita existente (SCANDIUZZI & ANDRIOLO, 1986; SOUZA SANTOS, 1992.). As amostras do rejeito calcinadas, tanto a 800°C quanto a 900°C, atenderam a essas condições.

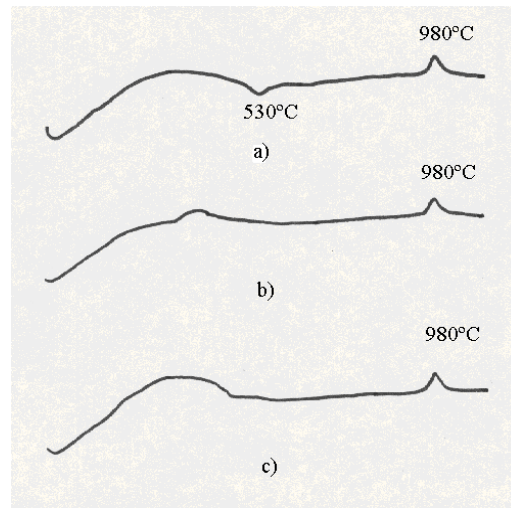


FIGURA 35 - ATD do rejeito calcinado em diversas temperaturas:

a) 700°C, b) 800°C, c) 900°C.

As Figuras 36 a 38 exibem os padrões difratométricos de raio-x do rejeito calcinado a 700°C, 800°C e 900°C. As amostras calcinadas em todas as temperaturas apresentam uma expressiva “banda de amorfização” com relação ao difratograma do rejeito “*in natura*” (Figura 29), comprovando o caráter amorfo da metacaulinita. No difratograma do rejeito calcinado a 900°C, constata-se a ausência de raias de difração correspondentes à caulinita, indicando que nessa temperatura ocorreu o maior grau de desidroxilação da argila, fato que é corroborado pela análise da perda ao fogo residual (Tabela 17).

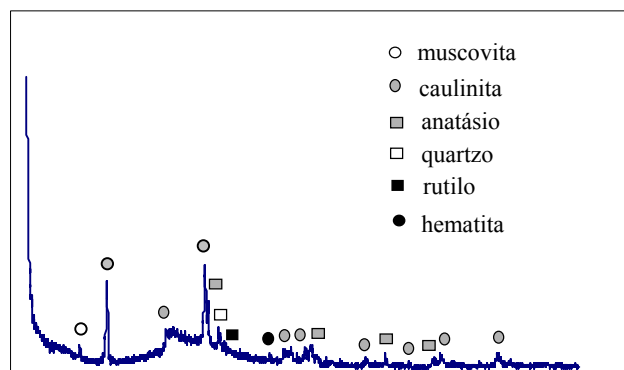


FIGURA 36 - Difratograma do rejeito calcinado a 700°C.

A identificação de raias correspondentes a outros minerais ficou facilitada nos difratogramas das amostras calcinadas, nos quais podem ser vistos que o rejeito é constituído por teores menos expressivos de fases pozolanicamente inertes como quartzo, hematita, anatásio, rutilo e muscovita, conforme foi determinado no item 4.2.3.5.

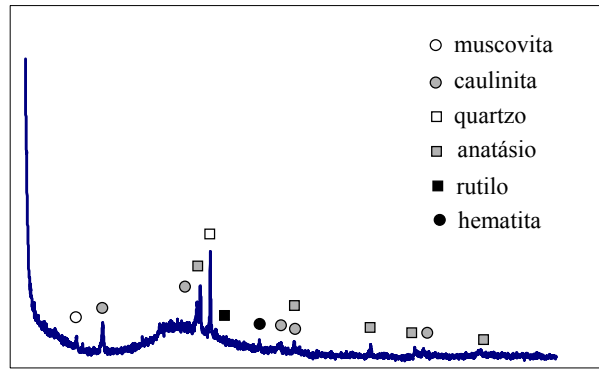


FIGURA 37 - Difratograma do rejeito calcinado a 800°C.

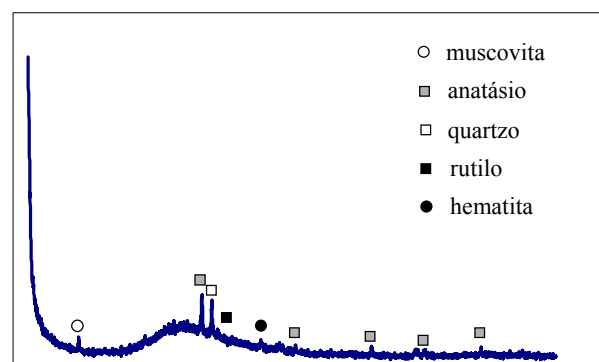


FIGURA 38 - Difratograma do rejeito calcinado a 900°C.

### 5.1.2 - Ensaio de Atividade Pozolânica com Cimento Portland (NBR 5752)

Os resultados do ensaio de determinação da atividade pozolânica com cimento Portland CP II F 32 são mostrados na Tabela 18 e na Figura 39.

As porcentagens de água requerida pelas argamassas com MC e SA foram de 129% e 132%, respectivamente, sendo significativamente superiores à exigida pela argamassa de referência. A extrema finura dessas adições minerais fez com que a quantidade de água dessas argamassas (necessária para obtenção de uma determinada consistência) ultrapassasse os limites de 115% (para argila calcinada) e 110 % (para as demais pozolanas) prescritos pela norma brasileira NBR 12653 (1992). A excessiva demanda de água dessas argamassas demonstra que o uso do MC em misturas de concretos, assim como o da SA, está vinculado ao emprego de aditivos plastificantes e superplastificantes.

TABELA 18 - Resultados do ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland composto CP II F 32.

Argamassa	Água requerida* (%)	Consistência padrão (225±5 mm)	Relação água/aglomerante.	Índice de Atividade Pozolânica com CII F aos 28 dias (%)
MC7	129.64	223.95	0.69	101.23
MC8	129.12	228.7	0.68	102.68
MC9	129.18	229.4	0.68	67.61
SA	132.30	223.5	0.73	103.63
CP	100.00	227.2	0.49	100.00

\* em relação à argamassa de referência.

MC7 = argamassa cimento + metacaulim produzido a 700°C

MC8 = argamassa cimento + metacaulim produzido a 800°C

MC9 = argamassa cimento + metacaulim produzido a 900°C

SA = argamassa cimento + sílica ativa

CP = argamassa de referência

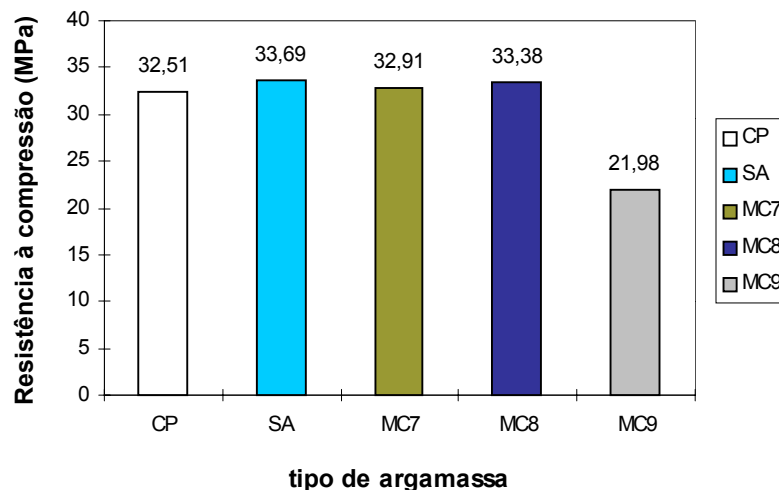


FIGURA 39 - Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas moldadas no ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland composto CP II F 32.

O ensaio demonstra que o rejeito calcinado a 700°C e a 800°C possui maior reatividade, uma vez que as argamassas produzidas com esses materiais apresentaram índices de atividade pozolânica similares ao da sílica ativa e superiores a 100%, valor bastante acima do mínimo de 75% estabelecido pela NBR 12653 (1992). Quando o rejeito é calcinado a 900°C, a reatividade do MC reduz substancialmente, a ponto do índice de atividade pozolânica da argamassa ser inferior ao mínimo exigido pela norma (68%). Embora não seja detectado pelo espectro de raio-x (Figura 38), é possível que nessa temperatura ocorra o início da recristalização da fase amorfa, gerando uma pozolana com compostos cristalinos estáveis e, portanto, menos reativa.

O intervalo de temperatura ótimo observado nessa pesquisa (entre 700°C e 800°C) apresentou boa concordância com a literatura e com o sugerido pela norma indiana IS 1344 (1968) (assunto abordado no item 3.3.3). Tanto que o MC produzido nessas duas temperaturas, mostrou-se tão reativo quanto a SA, apesar da relação água/aglomerante das misturas não serem as mesmas. Embora a comparação direta entre os índice de atividade pozolânica de diferentes normas não seja válida por causa das prescrições distintas de composição e consistência das argamassas (MALHOTRA e MEHTA, 1996), vale ressaltar os resultados do trabalho de HE et al (1995), no qual uma argamassa com caulim calcinado a 650°C apresentou um índice de atividade pozolânica 8% superior a de uma argamassa com SA.

Para validar estatisticamente as conclusões anteriormente citadas, foi efetuada uma análise de variância (ANOVA) com os dados obtidos no experimento. O objetivo foi avaliar o efeito da temperatura de calcinação sobre a atividade pozolânica, verificando a influência dos 5 tipos de misturas (de referência, com SA e com rejeito calcinado a 700°, 800° e 900°C).

Os resultados da ANOVA (Tabela 19) demonstram que o tipo de mistura se mostrou significativo para a resistência à compressão. Para identificar qual a temperatura que proporciona diferença significativa (temperatura ótima de calcinação), foi realizado um estudo de comparação múltipla de médias com os dados obtidos na análise de variância e que é mostrado na Tabela 20.

TABELA 19 - Análise de variância \*

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F calc</b>	<b>F<sub>0.05</sub></b>	<b>Significância</b>
Tipo de mistura	290.60	4	72.65	18.87	3.84	DS**
Erro	30.82	8	3.85	-	-	-
Total	321.42	12				

\* Nível de significância: 5%

\*\* Diferença significativa

Os resultados da comparação múltipla de médias indicam que as reatividades do MC produzido tanto a 700°C como a 800°C não diferem de modo significativo entre si, assim como em relação à da SA. Todavia, destes com caulim calcinado a 900°C, há diferenças significativas de atividade pozolânica, ratificando que a temperatura ótima de calcinação do rejeito se encontra entre 700°C e 800°C.

Na etapa final desse trabalho, optou-se pelo emprego do MC produzido a 800°C por ser um material melhor calcinado e praticamente isento de fases cristalinas, como pode ser constatado no termograma e nos difratogramas de raio-x (Figuras 35 a 38).

TABELA 20 - Comparação múltipla de médias.

<b>Diferença de Tensão (valores em módulo)</b>	<b>Valor obtido (MPa)</b>	<b>Limite de Decisão</b>	<b>Significância</b>
fmc9 - fmc8	11.40	3.65	DS*
fmc9 - fmc7	11.40	3.65	DS*
fmc8 - fmc7	0.47	3.65	DNS**
fmc8 - fsa	0.31	3.65	DNS**
fmc7 - fsa	0.31	3.65	DNS**

Observações:

fmc9 = resistência média da argamassa de cimento + metacaulim calcinado a 900°C

fmc8 = resistência média da argamassa de cimento + metacaulim calcinado a 800°C

fmc7 = resistência média da argamassa de cimento + metacaulim calcinado a 700°C

fsa = resistência média da argamassa de cimento + sílica ativa

\* DS = diferença significativa - Valor obtido > Limite de decisão

\*\*DNS = diferença não significativa - Valor obtido < Limite de decisão

A Tabela 21 mostra algumas características do MC produzido da calcinação (800°C) e moagem do rejeito, comparando-as com as do MCAR utilizado na produção de CAD (CALDARONE et ali, 1994; 1995; ZHANG e MALHOTRA, 1995; ENGELHARD CORPORATION, 1994) e também com certos requisitos para argila calcinada das normas americana (ASTM - C 618) e indiana (IS 1344). As características físicas e químicas do MC empregado na pesquisa não somente atendem as prescrições da normas, como são muito semelhantes as do MCAR. Esse fato, associado ao elevado índice de atividade pozolânica, demonstram que o rejeito do beneficiamento de caulim, após a calcinação sob determinadas condições, constitui-se numa adição mineral de alta reatividade assim como a SA e a cinza de casca de arroz.

É louvável lembrar que as conclusões obtidas neste item não necessariamente se reproduzirão no caso de produção industrial, tendo amplitude restrita à amostra coletada, ao tempo e às condições de calcinação adotados no experimento. KIHARA e SHUKUZAWA (1982) citam o exemplo de uma situação em que a temperatura ótima de calcinação obtida nos ensaios de laboratório diferia da temperatura necessária para transformar toda a caulinita em metacaulinita em escala industrial.

TABELA 21 - Comparação entre as características físicas e químicas do rejeito calcinado e do metacaulim de alta reatividade

Determinações	Rejeito Calcinado e Moído	MCAR	prescrições IS 1344	prescrições ASTM 618
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 93%	> 95%	> 70%	> 70%
SiO <sub>2</sub>	50.58%	52 %	> 40%	-
diâmetro médio	1.46µm	1.5µm	-	-
partículas > 45 µm	0.5%	-	< 12%	< 34%
área superficial específica	15.14 m <sup>2</sup> /g*	16.5 m <sup>2</sup> /g*	≥ 3200 cm <sup>2</sup> /g **	-

\* adsorção de nitrogênio

\*\* superfície específica Blaine

## 5.2 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÕES MINERAIS

### 5.2.1 - Propriedades das Misturas de Concreto no Estado Fresco

A Tabela 22 apresenta as dosagens de aditivo superplastificante utilizadas nas misturas do experimento e os seus respectivos abatimentos. Em razão da baixa qualidade dos agregados, esperava-se empregar em determinadas misturas, dosagens de superplastificante entre 1.5% e 1.8% sobre o peso de cimento (item 4.2.4); entretanto, a porcentagem máxima utilizada foi de 1.14% para o concreto com 10% de SA e relação água/aglomerante de 0.39. Nas misturas com relações água/aglomerante elevadas, mesmo com adição de SA ou MC, os teores de aditivo necessários para alcançar o abatimento desejado foram inferiores a 0.5%. Esse fato demonstra que ao invés de se utilizar dosagens reduzidas de superplastificante, é preferível o emprego de porcentagens elevadas de plastificante (teor máximo permitido pelo fabricante), que além do menor custo de aquisição, não apresenta problemas de incompatibilidade com determinados tipos de cimento, principalmente em regiões com altas temperaturas como a Amazônia.

Os concretos com adições minerais exigiram maiores dosagens de superplastificante do que o de referência para o mesmo abatimento, em razão da maior quantidade de partículas finas (relação água/aglomerante de 0.47). Nas misturas com relação água/aglomerante de 0.39, o concreto com adição de MC requereu 29% a menos de superplastificante que a mistura com SA para o mesmo abatimento, possivelmente, em função da maior finura da SA. Resultado semelhante foi encontrado por CALDARONE et ali (1994) com o MCAR. Os pesquisadores, utilizando as pozolanas como adição à massa de cimento em misturas com



relação água/aglomerante de 0.4, constataram que os concretos com MCAR requereram de 25 a 35% a menos de aditivo superplastificante que os concretos com SA para a mesma consistência. ZHANG e MALHOTRA (1995) não observaram, para a mesma relação água/aglomerante, diferenças no consumo de superplastificante entre as misturas com essas pozolanas quando as mesmas foram empregadas como substituição de parte do cimento.

TABELA 22 - Teor de aditivo superplastificante e abatimento das misturas de concreto do experimento.

Água/aglomerante *	Teor de adição (%)	SP (l/m <sup>3</sup> )		SP (%)***		Abatimento (mm)	
		SA**	MC	SA**	MC	SA**	MC
0.39	10	5.14	3.65	1.14	0.81	70	65
0.42	5	2.06	-	0.51		70	
	15	4.32	-	1.07		60	
0.47	0	-	-	0		65	
	10	1.22	1.24	0.30	0.31	75	60
	20	2.92	-	0.73		60	
0.54	5	0.71	-	0.23		75	
	15	0.81	-	0.26		65	
0.64	10	0.36	0.82	0.14	0.32	65	55

Observações:

SP - superplastificante a base de melamina

\* incluída a porcentagem de água do aditivo superplastificante.

\*\* valor médio obtido de duas misturas (betonadas distintas)

\*\*\* % - porcentagem da massa de aditivo sobre a massa de cimento

Nas misturas com relação água/aglomerante de 0.47, praticamente não houve diferença de consumo de aditivo entre os concretos com MC e SA para a mesma consistência, apesar da granulometria do MC ser dez vezes superior à da SA. Nos concretos com relação água/aglomerante de 0.64, a adição de SA requereu apenas 40% do superplastificante utilizado no concreto com MC. De acordo com RODRIGUES (1984), a pasta de cimento (cimento + água) é que exerce a função de *agente lubrificante* entre as partículas dos agregados. Com base nessa afirmação, possivelmente a grande quantidade de água presente na pasta dessas misturas, em relação ao volume de finos do cimento, pode ter feito com que a extrema finura da SA não prejudicasse a fluidez, pelo contrário, a forma esférica de suas partículas, em comparação à forma angular do metacaulim, facilitou o rolamento dos grãos de cimento e, conseqüentemente, dos agregados.

Quanto à estabilidade da mistura, as adições de SA e MC proporcionaram maior coesão, facilidade de acabamento e reduziram substancialmente a exsudação. Nos concretos

com MC, a exsudação foi um pouco mais acentuada do que nas misturas com SA, possivelmente em função da menor finura do MC.

### 5.2.2 - Resistência à compressão simples

A resistência máxima obtida no estudo de dosagem foi de 42.8 MPa para uma relação água/cimento de 0.38. Para relações inferiores, não houve acréscimo de resistência à compressão, mas sim uma estabilização desta, indicando que o limite máximo de resistência do agregado fora atingido (Figura 40).

Devido à baixa resistência desse agregado, nas misturas sem aditivo superplastificante são necessários consumos de cimento impraticáveis, na ordem de 600 a 700 kg/m<sup>3</sup>, para que se alcance a resistência limite desse concreto (40 MPa). De acordo com a Figuras 31, 32 e 40, com apenas 0.5% de superplastificante é possível obter a resistência limite do concreto com esse agregado, reduzindo em 10% o consumo de cimento. Com base nesses resultados, torna-se mais adequado empregar altas dosagens de aditivo plastificante ao invés de teores reduzidos de superplastificante pelas razões expostas no item anterior. Portanto, nas situações práticas em que se requeira estruturas de concreto com  $f_{ck} \geq 30$  MPa (consumo de cimento superior a 500 kg/m<sup>3</sup>), é imprescindível, para as misturas com esse tipo de seixo, o uso de aditivos redutores de água.

Os valores de resistência à compressão aos 28 dias obtidos com as misturas de concretos do experimento são mostrados na Tabela 23. As curvas que representam o comportamento da resistência para os concretos de referência e com adições de sílica ativa são apresentadas na Figura 41.

O modelo matemático que origina as curvas é definido pela regressão múltipla da equação 3, sendo estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95%. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 87% é estatisticamente forte e demonstra que 87% da variabilidade da resistência à compressão é explicada pela relação água/aglomerante e pelo teor de adição, conforme pode ser visto na figura 41, na qual as curvas previstas pelo modelo estão muito próximas dos valores obtidos no ensaio de compressão simples. No ANEXO C são apresentados os valores obtidos no ensaio de compressão simples e os previstos pelo modelo matemático.

$$f_{c28} = 37.2024 + 16.3768*(1/ac) - 13.7013*(1/sa) - 6.88491*(sa/ac) \quad (\text{eq. 3})$$

sendo:

$f_{c28}$  = resistência à compressão simples aos 28 dias de idade, em MPa;

$a/c$  = valor codificado da relação água/aglomerante (Tabela 8);

$sa$  = valor codificado do teor de adição de sílica ativa (Tabela 8).

Assim como ocorreu no estudo de dosagem, a resistência máxima alcançada no experimento foi um pouco superior a 40 MPa para misturas com relação água/aglomerante próximas de 0.4, ratificando que o limite do agregado fora alcançado. A incorporação de SA proporcionou um aumento de resistência, principalmente nos concretos com menor consumo de cimento, ou seja, para relações água/aglomerante elevadas. Por exemplo, no caso das misturas com relação água/aglomerante de 0.64 e consumo de cimento de  $286 \text{ kg/m}^3$ , segundo o modelo, os teores de 5%, 10%, 15% e 20% de SA elevaram a resistência, em relação às dos concretos de referência, em 43%, 60%, 71% e 74%, respectivamente. Resultado semelhante foi observado por PISTILLI et al (1984), que obtiveram 50% de ganho de resistência aos 28 dias para uma mistura com consumo de cimento de  $237 \text{ kg/m}^3$ , relação água/aglomerante de 0.72 e adição de 10% de SA.

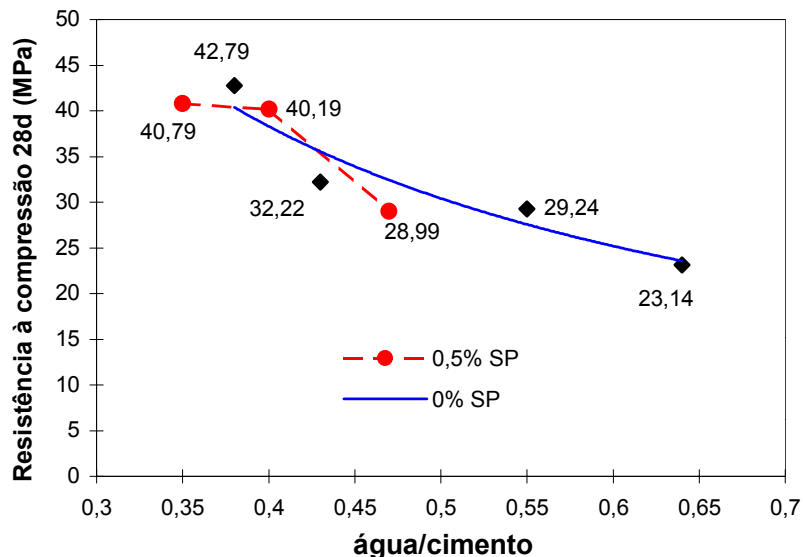


FIGURA 40 - Resultados de resistências à compressão aos 28 dias do estudo de dosagem.

Os aumentos substanciais podem ser atribuídos, principalmente, à ação química da SA. A quantidade excedente de água de amassamento, em relação ao volume de aglomerante, nas misturas com relação água/aglomerante elevada, favorece a ocorrência da reação

pozolânica porque um grande número de íons entra em solução antes da saturação. Além do que, exerce um papel importante na reologia do concreto fresco, fazendo com que o efeito negativo do excesso de finos sobre a trabalhabilidade fosse reduzido, a ponto de proporcionar que misturas com teores elevados de SA, como 15% e 20%, apresentassem as maiores resistências (Figura 41).

TABELA 23 - Resistência à compressão das misturas de concreto (MPa).

água/aglom.	0.39	0.42	0.47	0.54	0.64
SA- (%)					
0 (referência)	<b>37.6 / 36.0</b>		22.40 / 21.60		<b>18.40 / 20.00</b>
5		40.80 / 33.60		29.19 / 29.99	
10	36.8 / 39.6	–	34.40 / 36.00 34.80 / 38.00	–	29.20 / 29.20
15		40.39 / 44.79	–	33.59 / 31.99	
20			33.59 / 35.99		
<b>MC</b>	41.60 / 41.60		36.40 / 39.60		28.40 / 29.20
<b>10%</b>	38.00 / 39.60		30.80 / 38.00		27.20 / 25.60

Observações:

1. Os resultados dos concretos com sílica ativa foram obtidos de corpos-de-prova de betonadas distintas.
2. Os resultados dos concretos com metacaulim foram obtidos de corpos-de-prova da mesma betonada.
3. Os valores em negrito não foram incluídos no ajuste do modelo matemático.

A medida que se reduz a relação água/aglomerante, o efeito da SA passa a ser menos significativo. Nas misturas com relações água/aglomerante próximas a 0.4, não houve diferenças de resistência entre os concretos de referência e com SA. É provável que devido à baixa resistência do seixo, a redução da relação água/aglomerante, associada ao melhor empacotamento das partículas dos agregados proporcionado pela sua granulometria contínua, foram suficientes para produzir uma matriz de cimento com resistência superior à do agregado graúdo sem que houvesse a necessidade do uso da SA. Essa afirmação pode ser constatada pela ruptura frágil dos corpos-de-prova dos concreto sem adição. A forma da fratura foi vertical e atravessou tanto a matriz quanto o agregado.

Com relação aos concretos com MC, a resistência à compressão dessas misturas foi similar à dos concretos com SA para todas as relações água/aglomerante estudadas (Figura 42), indicando que o material é uma pozolana tão reativa quanto a SA e seu uso pode ser viabilizado para produção de CAD. A elevada área superficial específica dessa adição e o elevado teor da fase ativa (caulinita) são responsáveis pela sua alta atividade pozolânica. O fato de ser extremamente fino e não possuir estrutura cristalina, leva a crer que apresente os mesmos mecanismos de ação da SA.

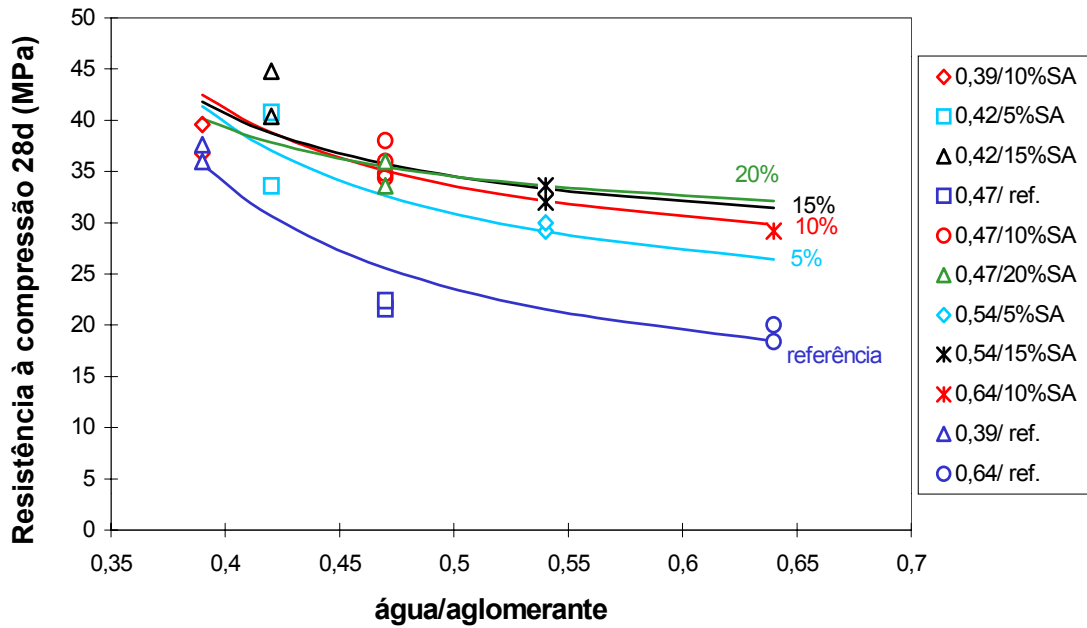


FIGURA 41 - Curvas de comportamento da resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adição de SA.

CALDARONE et ali (1994, 1995) obtiveram resistências à compressão, aos 28 dias, na ordem de 60 MPa para concretos com adição de 10% de MCAR. ZHANG e MALHOTRA (1995) encontraram resistências um pouco acima de 40 MPa para misturas de concreto com substituição de 10% de cimento por MCAR.

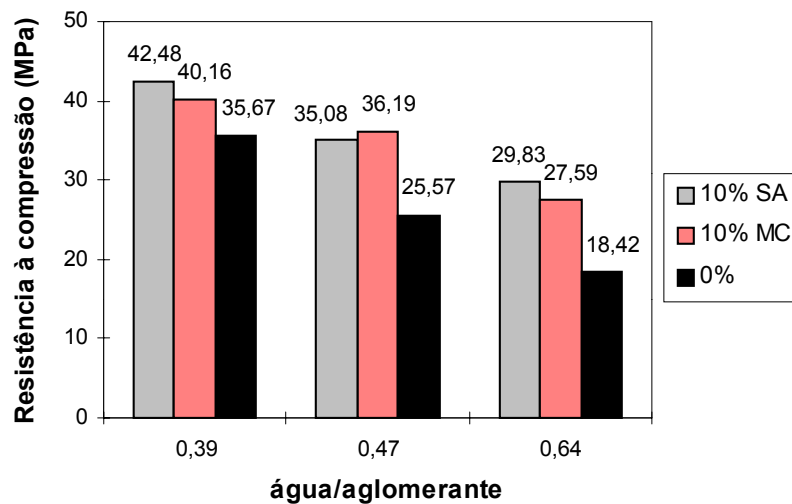


FIGURA 42 - Resistência à compressão dos concretos de referência e com adições de SA MC.

### 5.2.3 - Taxa de absorção capilar

Os resultados da taxa de absorção de água obtidos no ensaio de absorção capilar são mostrados na Tabela 24. As curvas que representam o comportamento da taxa de absorção capilar das misturas de referência e com adições de sílica ativa são apresentadas na figura 43.

O modelo matemático que origina as curvas é definido pela regressão múltipla da equação 4, sendo estatisticamente significativo para um nível de confiança de 90%. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 83% é estatisticamente forte e significa que o modelo explica 83% da variabilidade dos resultados da taxa de absorção capilar. Este fato que pode ser constatado pela comparação entre as curvas previstas pelo modelo e os resultados obtidos no ensaio de absorção (figura 44). No ANEXO C são apresentados os valores previstos pelo modelo matemático, os observados no ensaio de absorção e as diferenças percentuais entre ambos.

$$S = 0.639081 + 0.202819*(1/sa^2) - 0.0804161*(1/ac) \quad (\text{eq. 4})$$

sendo:

S = taxa de absorção capilar para 25 horas de absorção, em  $\text{mm.h}^{-0.5}$ ;

a/c = valor codificado da relação água/aglomerante (Tabela 8);

sa = valor codificado do teor de adição de sílica ativa (Tabela 8).

TABELA 24 - Taxa de absorção capilar (25 horas) das misturas de concreto ( $\text{mm.h}^{-0.5}$ ).

água/aglomerante	<b>0.39</b>	<b>0.42</b>	<b>0.47</b>	<b>0.54</b>	<b>0.64</b>
sílica ativa - (%)					
0 (referência)	<b>1.12</b> <b>1.25</b>		1.36 1.40		<b>1.11</b> <b>1.14</b>
5		0.82 0.85		0.80 0.82	
10	0.64 0.78		0.69 / 0.87 * / 0.61		0.90 0.74
15		0.52 0.69		0.91 0.62	
20			0.69 0.57		
<b>metacaulim</b> <b>10%</b>	0.74 / 0.71 0.78 / 0.70		0.84 / 0.83 * / 0.982		0.94 / 0.97 * / 0.99

Observações:

- Os resultados dos concretos com sílica ativa são de corpos-de-prova de betonadas distintas.
  - Os resultados dos concretos com metacaulim são de corpos-de-prova da mesma betonada.
  - Os valores em negrito não foram incluídos no ajuste do modelo
- \* corpo-de-prova que apresentou vazamento.

De acordo com o modelo, a redução da relação água/aglomerante praticamente não alterou as taxas de absorção capilar das misturas com e sem adição. No entanto, com a incorporação da SA houve uma queda substancial na taxa de absorção em relação às misturas sem adição. Teores de 5%, 10%, 15% e 20%, independente da relação água/aglomerante, reduziram a taxa de absorção em 33%, 45%, 51% e 53%, respectivamente. A interação entre as variáveis controláveis (relação água/aglomerante e teor de adição) não foi significativa, ou seja, o efeito da adição de SA sobre a taxa de absorção capilar do concreto não é afetado pela relação água/aglomerante como no caso da resistência à compressão. Na Figura 6 também se observa que a interação entre a adição de SA e a relação água/aglomerante não foi muito acentuada (SMEPLASS apud GJORV, 1994).

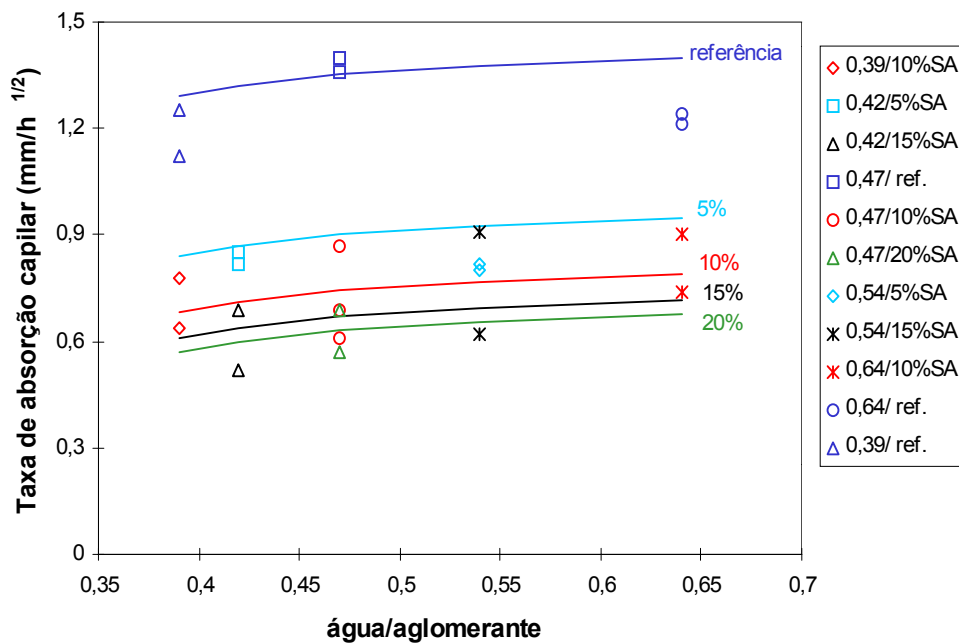


FIGURA 43 - Curvas de comportamento da taxa de absorção capilar em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adição de sílica ativa.

A pouca influência da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção capilar foi causada, provavelmente, pela granulometria contínua do seixo. É possível que as partículas mais finas do seixo (que vão de 4,8 mm até diâmetros menores 75 $\mu$ m) tenham proporcionado um melhor empacotamento, reduzindo o volume de vazios da fração volumétrica dos agregados, principalmente para as misturas com relações água/aglomerante elevadas. Desse modo, a argamassa fica mais densa e homogênea, com a presença de poros com menor diâmetro e menos intercomunicáveis.

Com relação a significativa redução da taxa de absorção capilar com a incorporação de sílica ativa, pode-se supor que é consequência da formação de uma estrutura de poros mais refinada e descontínua, ocasionada pela finura e esfericidade de suas partículas como também pela sua alta reatividade pozolânica com o CH (assunto abordado no item 2.3).

Os resultados demonstram que o uso da SA é imprescindível quando o objetivo for a obtenção de concretos com menor permeabilidade à água e, conseqüentemente, mais resistentes à corrosão e à penetração de íons agressivos. Por exemplo, uma mistura de concreto com relação água/aglomerante de 0.64, consumo de cimento de 286 kg/m<sup>3</sup> e adição de 5% de SA, apresentou uma taxa de absorção capilar 26% inferior que à do concreto sem adição, com relação água/aglomerante de 0.39 e consumo de cimento de 505 kg/m<sup>3</sup>.

Com relação ao MC, as taxas de absorção capilar dos concretos com adição de 10% foram significativamente inferiores as dos concretos de referência e ligeiramente superiores às das misturas com SA, para todas as relações água/aglomerante estudadas (Figura 44). Diversos autores afirmam que a incorporação do metacaulim em pastas e argamassas de cimento Portland proporciona a formação de uma estrutura de poros de tamanhos menores (AMBROISE et ali, 1994; KHATIB e WILD, 1996; BREDY et ali, 1989). No experimento, a adição do MC nas misturas de concreto possivelmente ocasionou esse fenômeno, reduzindo desse modo a penetração de água por absorção capilar. Esses resultados demonstram as potencialidades do emprego do MC, produzido a partir do rejeito do beneficiamento do caulim, na produção de concretos com baixa permeabilidade. O melhor desempenho dos concretos com SA pode ser consequência da maior finura dessa pozolana, que proporcionou um efeito mais pronunciado do que o MC no refinamento do tamanho dos poros.

As taxas de absorção capilar desse estudo foram comparadas com as dos concretos produzidos com agregados de boa qualidade provenientes da região sul do país (brita basáltica) (STOLFO, 1998) (Figura 45). O aglomerante empregado no referido trabalho foi o cimento Portland de alta resistência inicial CP V ARI (NBR 5733/1991), cuja resistência aos 28 dias é superior à do cimento empregado nessa pesquisa (item 4.2.3.1).



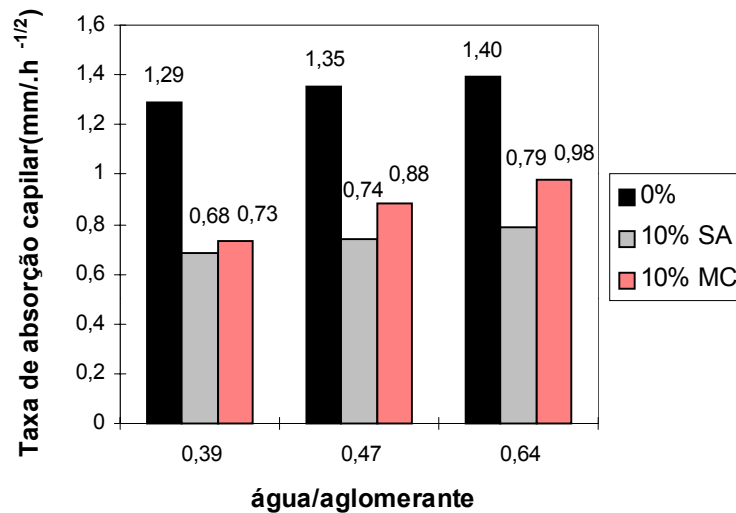


FIGURA 44 - Taxa de absorção capilar dos concretos de referência e com adições de SA e MC.

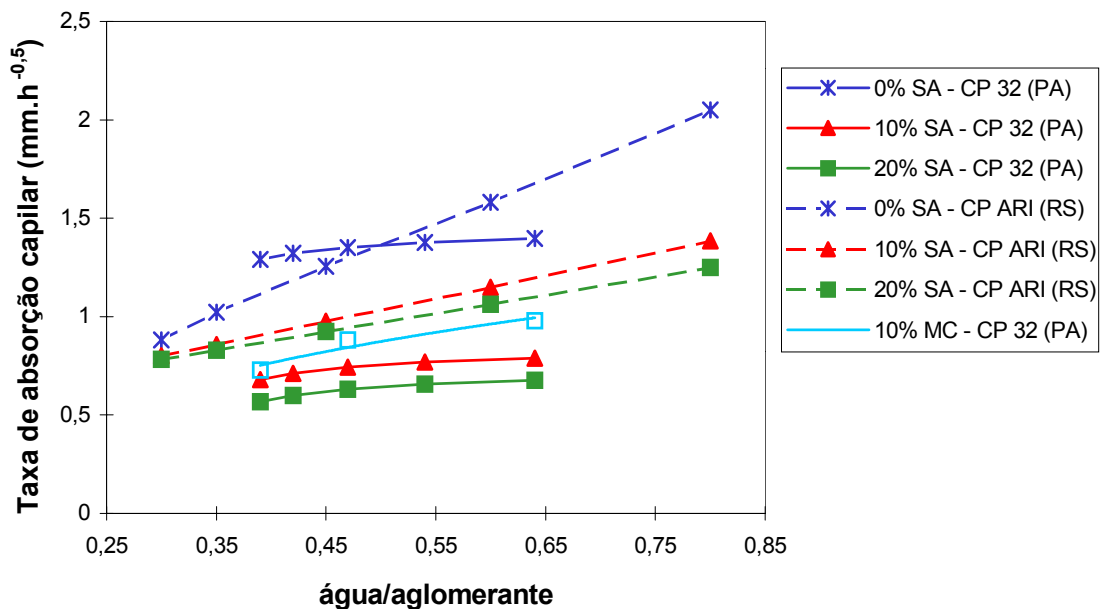


FIGURA 45 - Comparação entre as taxas de absorção capilar dos concretos produzidos com seixo do Estado do Pará e com brita basáltica do Rio Grande do Sul.

Ao contrário do que se esperava, os concretos produzidos com seixo apresentaram desempenho similar e, em alguns casos, superior aos dos concretos com brita. Nas misturas de referência, a taxa de absorção dos concretos com brita é menor somente para relações água/aglomerante inferiores a 0,5, nas quais possivelmente prevaleceu o efeito da microestrutura mais densa produzida pelo cimento de maior resistência. No caso das misturas com relações água/aglomerante superiores a 0,5, assim como para os concretos com adição de 10% (SA e MC) e 20% de SA, as taxa de absorção dos concretos com seixo foram inferiores a dos concretos com brita (Figura 45). É provável que a melhor distribuição granulométrica do

seixo em relação à da brita, associada ao efeito da adição de SA, tenham proporcionado maior densidade de empacotamento das partículas, contribuindo de forma mais efetiva para a redução do volume de vazios do que o cimento de maior resistência.

#### 5.2.4 - Penetração acelerada de íons cloretos

Os valores da carga elétrica total passante das misturas de referência e com adição de SA são mostrados na Tabela 25. As curvas que representam o comportamento da penetração de cloretos dessas misturas são apresentadas na Figura 46.

TABELA 25 - Carga total passante das misturas de concreto (Coulombs).

<b>água/aglomerante</b>	<b>0.39</b>	<b>0.42</b>	<b>0.47</b>	<b>0.54</b>	<b>0.64</b>
<b>sílica ativa - (%)</b>					
0 (referência)			5971.50 6364.80		<b>6908.4</b> <b>6530.4</b>
5		1286.42 2309.04		2113.34 1900.42	
10	447.88 635.00		952.38 / 861.26 792.77 / 743.82		1112.96 1292.64
15		346.23 667.91		862.25 482.74	
20			321.31 328.14		

Observação:

Todos os valores foram obtidos de betonadas distintas.

Os valores em negrito não foram incluídos no ajuste do modelo.

O modelo matemático que origina essas curvas é definido pela regressão múltipla da equação 5, sendo estatisticamente significativo para um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) do modelo foi de 99%, apesar de alguns valores individuais diferirem muito entre si (Tabela 25). Esse valor é extremamente representativo e significa que 99% dos valores de carga elétrica total passante podem ser previstos pelo modelo. Dentre as variáveis de resposta estudadas, esse modelo foi o que melhor se adequou como pode ser visto na comparação entre os valores previstos e os observados na Figura 47 e no ANEXO C.

O fato da variabilidade de alguns resultados ter sido elevada não prejudicou a representatividade do modelo, porque todos os resultados obtidos apresentaram uma similaridade de comportamento quanto à variação dos fatores controláveis, sendo bastante coerentes com o esperado.

$$C = 1704.33 - 4367.51*(1/sa) + 3094.12*(1/sa^2) + 471.202*(ac/sa) \quad (\text{eq. 5})$$

sendo:

C = Carga elétrica total passante, em Coulombs;

a/c = valor codificado da relação água/aglomerante (Tabela 8);

sa = valor codificado do teor de adição de sílica ativa (Tabela 8).

Do mesmo modo como ocorre para a taxa de absorção, a penetração de cloretos não sofre influência expressiva da relação água/aglomerante, mas sim da adição de SA (Figura 46). Enquanto a redução da relação água/aglomerante, de 0.64 para 0.39, diminui a carga total passante em apenas 13.94% para os concretos sem SA; a adição de 5% dessa pozolana proporciona reduções, em relação às misturas de referência, na ordem de 66% a 70%, dependendo da relação água/aglomerante estudada. Quando os teores de adição são maiores (10%, 15% e 20%), os decréscimo na penetração de cloretos são ainda mais elevados, variando de 83% a 94% para relações água/aglomerante entre 0.64 e 0.39, respectivamente. LAPLANTE e BILODEAU (1989) observaram um comportamento um pouco diferenciado dos resultados dessa pesquisa. Os autores constataram que a densificação da matriz de cimento não é atribuída somente à adição de sílica ativa, mas também a redução da relação água/aglomerante.

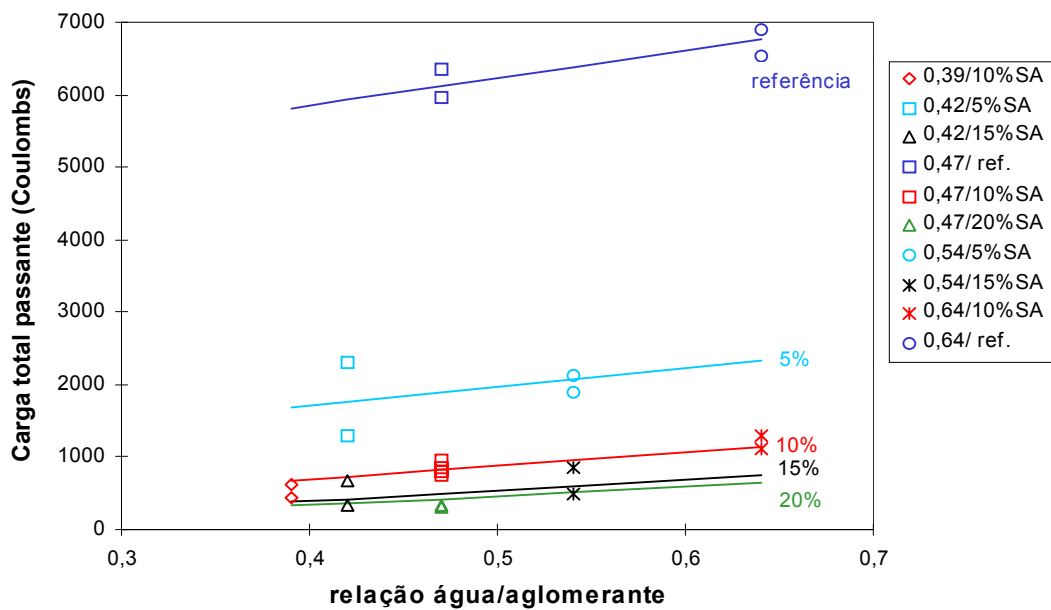


FIGURA 46 - Curvas de comportamento da carga total passante em função da relação água/aglomerante para concretos de referência e com adições de sílica ativa.

As causas desse comportamento, assim como no ensaio de absorção, estão relacionadas à formação de uma matriz mais densa e homogênea, com menor quantidade de poros interconectados. Nas misturas sem adição, a redução da influência da relação água/aglomerante pode estar associada à granulometria contínua do seixo, enquanto que nos concretos com adição mineral, o brusco decréscimo da permeabilidade possivelmente está relacionado aos efeitos filler e pozolânico da sílica ativa.

Quando o objetivo for produzir misturas de concreto resistentes à penetração de cloretos, o emprego da sílica ativa é indispensável. A tabela proposta por WHITTING (1981) (Tabela 4) indica que a obtenção de concretos com baixa permeabilidade aos cloretos (carga total passante entre 1000 C e 2000 C) é possível com relações água/cimento inferiores a 0.4. Todavia, a adição de sílica ativa permite alcançar esses níveis de permeabilidade utilizando relações água/aglomerante bastante superiores à indicada. Na Figura 47, constata-se que para a relação água/aglomerante de 0.64, teores de adição de 6% a 12% foram suficientes para obtenção de concretos com carga total passante entre 1000C e 2000C.

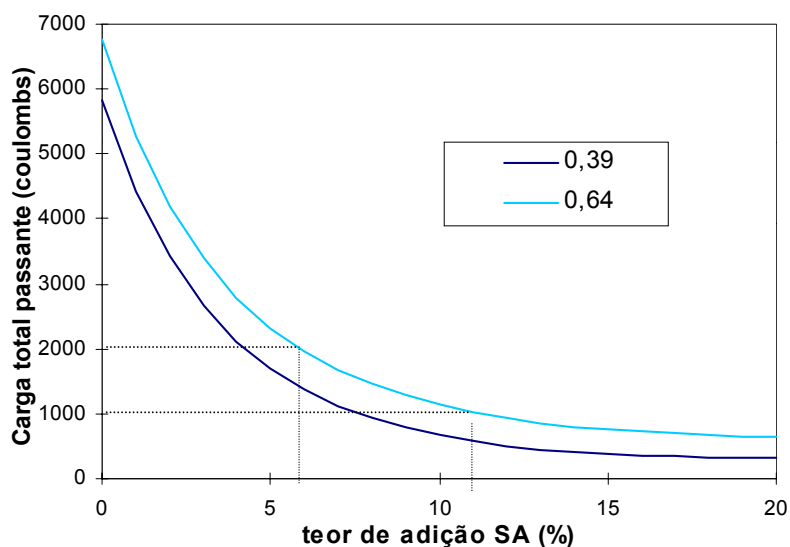


FIGURA 47 - Carga total passante *versus* teor de adição de sílica ativa.

A penetração de cloretos dos concretos produzidos com os materiais disponíveis em Belém foi comparada com a das misturas com agregados de boa qualidade provenientes da região sul do país (brita basáltica) (STOLFO, 1998). Para as misturas sem adição de SA, a carga passante nos concretos com brita é menor para todas relações água/aglomerante estudadas. O efeito da microestrutura mais densa produzida pelo cimento de maior resistência pode ter sido o fator responsável por esse comportamento. No entanto, para misturas com

adição de 10% e 20% de SA, a penetração de cloretos dos concretos com o seixo foi inferior à dos concretos com agregados normais (Figura 48). Na presença da sílica ativa, a maior compacidade proporcionada pela melhor distribuição granulométrica do seixo, em relação à da brita, prevaleceu sobre a maior reatividade do cimento.

O fato da menor permeabilidade dos concretos com seixo em relação aos produzidos com brita ser atribuído à melhor distribuição granulométrica do agregado, pode também ser constatado pela declividade das retas que representam o comportamento da taxa de absorção e da carga total passante (Figuras 45 e 48). Nos concretos com seixo, praticamente para todas as misturas, com e sem adição mineral, as taxas de absorção e a carga total passante apresentaram comportamento similar (paralelismo). Enquanto que para os concretos com brita, a declividade das retas diminui à medida que se aumenta o teor de SA. Isto significa que a adição de SA, nas misturas com brita, reduz o efeito da relação água/aglomerante, desempenhando a mesma função que a granulometria contínua do seixo exerce nas misturas com esse agregado. Em outras palavras, nos concretos com brita, a sílica ativa ocasionou uma maior compacidade da matriz de cimento, que foi proporcionada nas misturas com seixo pela melhor distribuição granulométrica desse agregado.

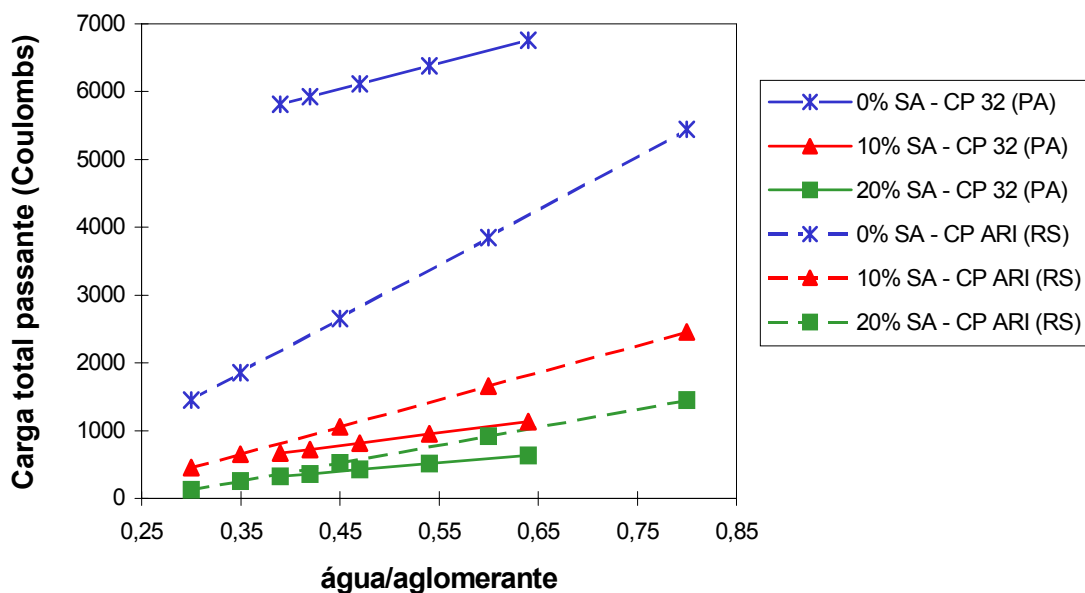


FIGURA 48 - Comparação entre a carga elétrica total passante nos concretos produzidos com seixo (Pará) e com brita basáltica (RS).

As Figuras 41, 43 e 46 mostram que a adição de SA, de modo geral, é muito mais eficiente para a redução da permeabilidade do que para o aumento de resistência à

compressão. Este comportamento está condizente com a afirmação de KHAYAT e AICTIN (1993), na qual os fatores de eficiência da sílica ativa relacionados à permeabilidade, normalmente são superiores aos obtidos para as propriedades mecânicas.

As observações expostas até então mostram que há uma similaridade de comportamento entre a carga elétrica passante e a taxa de absorção de água. Essa semelhança é atribuída ao fato de ambas serem variáveis de resposta dependentes da permeabilidade do material, propriedade que influencia os fenômenos de transporte de gases, água e agentes agressivos. A Figura 49 demonstra que, além de uma boa correlação entre a carga elétrica passante e a taxa de absorção capilar ( $r^2 = 0,77$ ), existe uma relação direta entre as variáveis, ou seja, ambas apresentam a mesma tendência de comportamento.

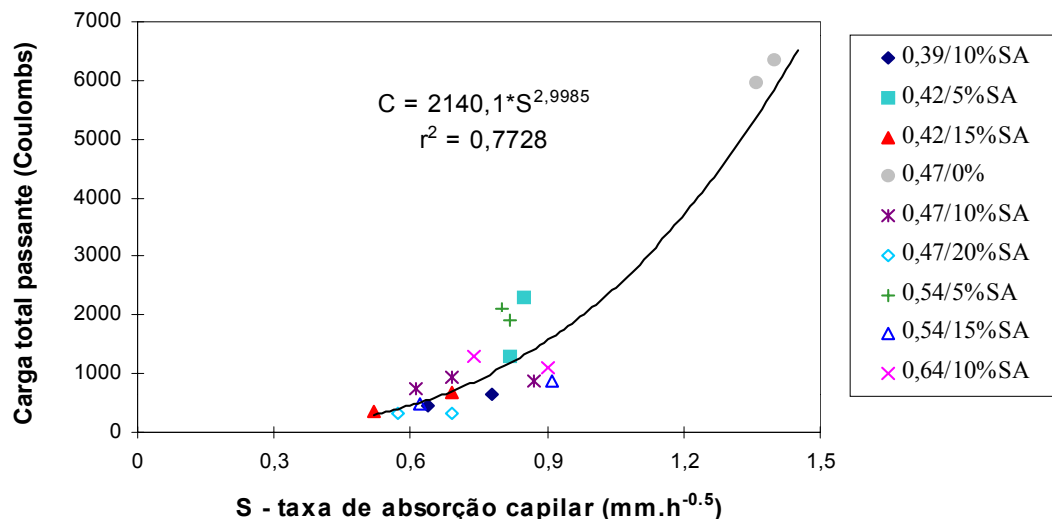


FIGURA 49 - Relação entre a carga total passante e a taxa de absorção capilar.

Os resultados do ensaio de absorção e de penetração de cloretos demonstram que é possível produzir misturas de concreto com os materiais disponíveis na região metropolitana de Belém, com durabilidade bastante superior às empregadas atualmente e semelhantes à do restante do país, através do uso de adições minerais extremamente reativas como a sílica ativa e o metacaulim.

### 5.2.5 - Correlação entre resistência à compressão e os demais parâmetros

A resistência à compressão, até bem pouco tempo, era a propriedade do concreto mais valorizada pelos engenheiros e tecnólogos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A preferência se deve à facilidade com que o ensaio de resistência é executado quando comparado a outros

relacionados à durabilidade (GOPALAN, 1996). Por essa razão é interessante que se correlacione valores de resistência, obtidos nos ensaios de compressão simples, com outros parâmetros importantes, de modo que se possa prever um determinado comportamento através da resistência à compressão.

Baseado nessas afirmações, plotou-se, com os dados obtidos nesse trabalho, gráficos que relacionam resistência à compressão à taxa de absorção capilar e à carga total passante (Figuras 50 e 51). Essas correlações fornecem ao meio técnico informações sobre o comportamento da permeabilidade dos concretos produzidos com os materiais locais, à medida que se eleva a resistência dos mesmos.

As Figuras 50 e 51 mostram que não houveram fortes correlações estatísticas da resistência à compressão com a taxa de absorção ( $r^2 = 62\%$ ) e com a penetração de cloretos ( $r^2 = 58\%$ ). Entretanto, como era previsto, esses parâmetros foram significativamente reduzidos com o aumento da resistência, principalmente nas misturas com adição de SA, cujas causas já foram discutidas nos itens anteriores.

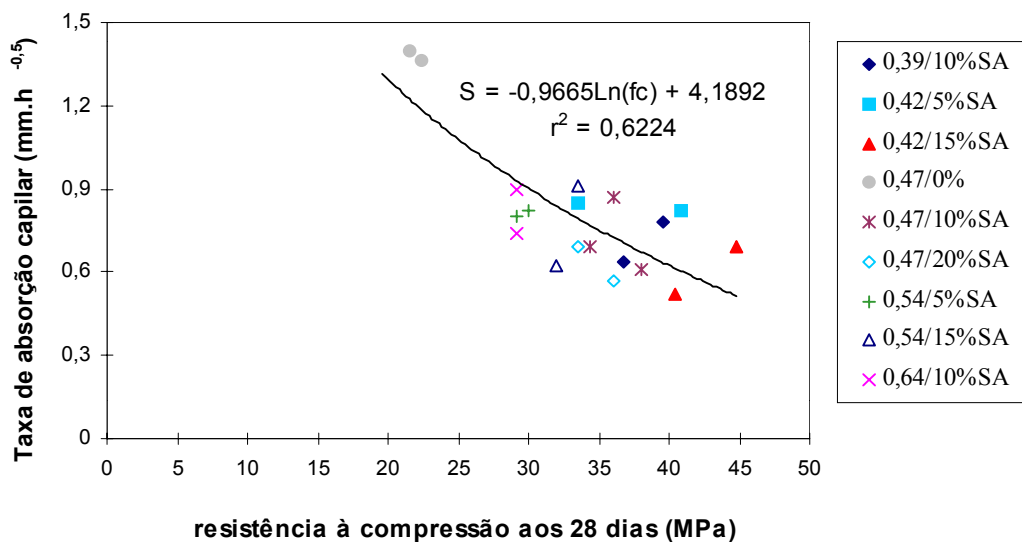


FIGURA 50 - Relação entre a taxa de absorção de água e a resistência à compressão.

O aumento da resistência de 19 MPa para 45 MPa ocasionou o decréscimo na taxa de absorção de água de aproximadamente 62%. O mesmo acréscimo de resistência acarretou em uma redução substancial na carga total passante de 95%. Esses resultados demonstram que a penetração acelerada de íons cloretos (difusão acelerada) foi o mecanismo de transporte que

sofreu maior influência com a incorporação de sílica ativa e com a granulometria contínua do seixo do que a absorção capilar.

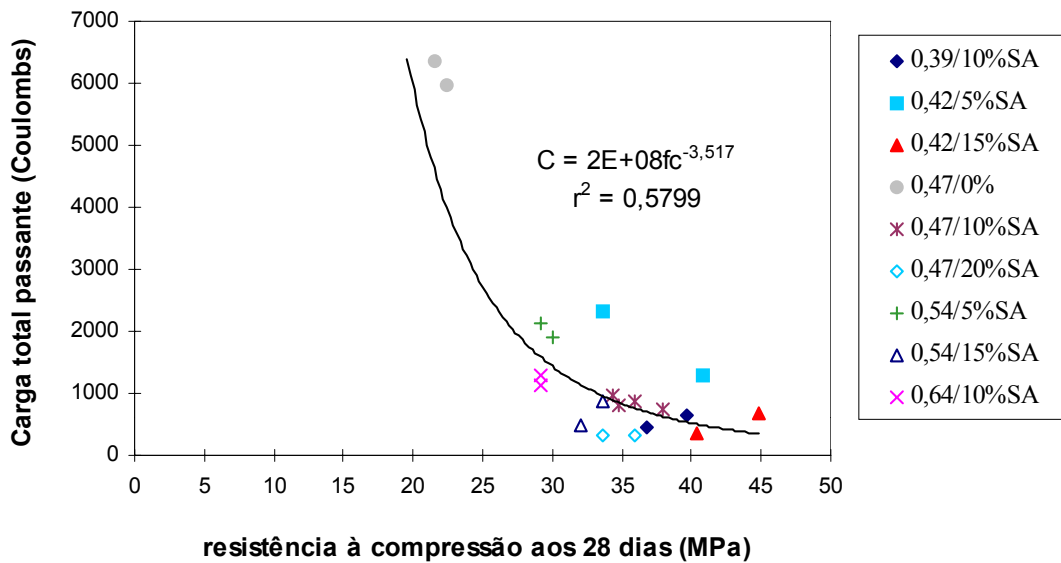


FIGURA 51 - Relação entre a carga total passante e a resistência à compressão.

### 5.3 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO EMPREGO DE MISTURAS DE CONCRETO COM E SEM ADIÇÕES MINERAIS

O estudo da viabilidade econômica do emprego de misturas de concreto com e sem adições minerais ficou restrito apenas à sílica ativa, uma vez que o metacaulim produzido a partir do rejeito do beneficiamento do caulim se encontra em caráter experimental, fato que dificultou muito o estabelecimento de um provável preço de comercialização. A sílica ativa, pelo contrário, já é disponível comercialmente em alguns locais do país, o que permitiu prever com maior exatidão o seu preço de aquisição na região metropolitana de Belém\*.

O cálculo do custo de produção de  $1m^3$  de concreto, levando-se em conta apenas o custo dos materiais, foi baseado na equação 6 e realizado de acordo com os preços médios de aquisição da região metropolitana de Belém. No ANEXO D são apresentados os custos de aquisição por kilo de todos os materiais empregados nas misturas do experimento assim como o custo de produção por metro cúbico das mesmas.

\* O preço de aquisição da SA em Belém foi estimado em R\$ 0.4/kg, valor sugerido por técnicos da empresa que realiza a captação, ensacagem e comercialização do produto no país.



$$C = c * \$c + sa * \$as + a * \$a + s * \$s + c * a / c * \$\text{água} \quad (\text{eq. 6})$$

Sendo:

$C$  = custo do concreto por  $m^3$ , em R\$;

$\$c$  = custo por kilo de cimento; em R\$;

$\$sa$  = custo por kilo de sílica ativa; em R\$;

$\$a$  = custo por kilo de areia; em R\$;

$\$s$  = custo por kilo de seixo; em R\$;

$\$\text{água}$  = custo por litro de água potável; em R\$;

$a/c$  = relação água/aglomerante da mistura;

$c, sa, a, s$  = quantidades de cimento, sílica ativa, areia e seixo empregadas por metro cúbico de concreto.

Na Figura 52 são mostradas as diferenças de custo de produção das misturas com e sem sílica ativa para uma determinada resistência. A produção do concreto com adição de SA (5%, 10% e 15%) é vantajosa, do ponto de vista econômico, até 36 MPa. Para resistências superiores, o concreto sem adição se torna mais viável devido à baixa resistência do seixo, que não permite o maior aproveitamento das potencialidades da SA (assunto discutido no item 5.2.2). Para resistências inferiores, o emprego da SA permite uma diminuição no custo de produção das misturas devido à considerável redução no consumo de cimento para uma mesma resistência. Essa redução será tanto maior quanto maior for a relação água/aglomerante e a adição de SA\*. As diferenças de custo entre as misturas com e sem diversos teores de adição de SA poderiam ser ainda mais elevadas, caso fossem empregadas no estudo altas dosagens de aditivo plastificante ao invés de reduzidos teores de superplastificante (assunto discutido nos itens 5.2.1 e 5.2.2).

No caso do emprego em peças sujeitas a esforços de compressão ou flexo-compressão, como por exemplo em colunas de edifícios altos, o uso de um concreto com  $f_{ck}$  de 30MPa\*\*, em vez do convencional de 15MPa (utilizado na grande maioria das edificações da região), não seria compensador do ponto de vista econômico, visto que a relação de custo de produção entre o C30 e o C15 é de 1.45, enquanto a de resistência é de apenas 2. Essa diferença certamente não acarretaria em vantagem, uma vez que a redução no volume de formas, de aço e na carga das fundações não seria suficiente para superar o custo da produção do material,

---

\* Até um limite mínimo admissível de consumo de cimento por metro cúbico.

além do que depende de critérios relacionados à estabilidade global da estrutura. Nessa análise não estão sendo considerados aspectos relacionados à durabilidade do concreto.

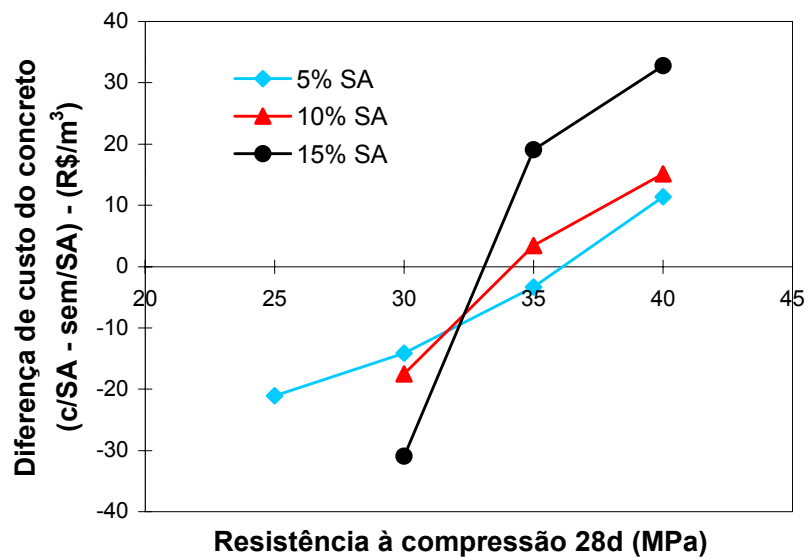


FIGURA 52 - Diferença de custo de produção das misturas com e sem sílica ativa *versus* resistência à compressão aos 28 dias.

Com relação à durabilidade, a adição de SA permite uma significativa redução na permeabilidade dos concretos produzidos com esse tipo de seixo, tanto com relação à absorção capilar quanto à penetração de cloretos (Figuras 43 e 46). Essa característica, dependendo da taxa de absorção e/ou da carga total passante exigidas, pode proporcionar uma considerável diminuição no custo de produção do concreto por causa da redução no consumo de cimento. Por exemplo, enquanto uma mistura sem adição, com relação água/cimento de 0.39 e 505 kg/m<sup>3</sup> de consumo de cimento, custa R\$ 104.38 e apresenta uma taxa de absorção de 1.29 mm/h<sup>0.5</sup> e carga elétrica total passante de 5816 C; uma mistura com relação água/aglomerante de 0.64, consumo de cimento de 286 kg/m<sup>3</sup> (quase metade da anterior) e 5% de SA (15 kg/m<sup>3</sup>), possui um custo de produção de R\$ 68.88 e apresenta uma taxa de absorção capilar de 0.95 mm/h<sup>0.5</sup> e carga elétrica passante de 2324 C. Em termos percentuais, a mistura com adição representa uma redução de custos de 34% e uma diminuição na penetração de água e de cloretos na ordem de 26% e 60%, respectivamente.

A Figura 41 e os valores apresentados no ANEXO D mostram que a produção de um concreto com SA, para uma determinada resistência (até aproximadamente 36 Mpa), necessita

\*\* Mistura produzida sem adição mineral, visto que  $f_c$  mínimo necessário seria de 36.6MPa (Figura 52).

de uma relação água/aglomerante superior a de uma mistura sem SA. Por exemplo, para a produção do concreto com  $f_{ck}$  de 15MPa (sem adição mineral), na condição A de preparo da NBR 12655 (1996), exige uma relação água/cimento de aproximadamente 0.54. Para misturas com 5% de adição de SA, a relação água/aglomerante adequada para produzir a mesma resistência característica seria de 0.64. O uso deste procedimento normalmente seria inadequado, não devido à resistência, pois a mesma estaria atendida, mas sim do ponto de vista da durabilidade (resistência à penetração de fluidos), visto que a relação água/aglomerante seria bastante elevada. Entretanto, de acordo com as figuras 43 e 46, a adição de SA nos concreto com esse tipo de seixo, permite que sejam produzidas, mesmo com relações água/aglomerante elevadas, misturas com desempenho, em termos de durabilidade, significativamente superior ao das misturas sem adição mineral, com resistências convencionais ( $f_{ck}$  entre 15 e 20MPa) e a um *menor custo de produção* (Figura 52).

O uso de adições minerais altamente reativas, como a sílica ativa, em concretos produzidos com o seixo de Ourém, com moderado consumo de cimento, ou seja, relação água/aglomerante igual ou superior a 0.6, seria o primeiro passo para a melhoria da qualidade das estruturas de concreto em Belém, uma vez que não proporcionaria resistências elevadas\*, mas aumentaria substancialmente a durabilidade das mesmas a um baixo custo de produção.

---

\* É um aspecto positivo, pelo menos inicialmente, pois não iria de encontro ao pensamento dos projetistas locais em não especificar resistências maiores que 18 MPa, em virtude do receio de não se alcançá-las, tanto em centrais quanto nas obras.

## 6 - CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas nesse capítulo não devem ser tomadas como absolutas para a região, pois foram obtidas para um determinado grupo de materiais, sob condições laboratoriais de execução e de cura. É necessário que novas pesquisas sejam efetuadas, levando em consideração outros aspectos que não foram abordados nessa pesquisa, de modo a complementar o conhecimento sobre o comportamento das estruturas de concreto produzidas com materiais locais frente às condições ambientais da região amazônica.

A partir dos resultados dessa pesquisa experimental pode-se chegar às seguintes conclusões:

### 6.1 COM RELAÇÃO AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DO REJEITO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO CAULIM “IN NATURA” E CALCINADO.

- O rejeito do processo de beneficiamento de caulim é extremamente fino ( $\phi_{\text{médio}} = 0.5\mu\text{m}$  a  $0.7\mu\text{m}$ ) e constituído basicamente por caulinita mal cristalizada (fase ativa para a atividade pozolânica), com a presença de pequenos teores de fases inertes como quartzo, titânio (anatásio e rutilo), ferro (hematita) e mica (muscovita). Essas características fazem desse material, uma excelente matéria-prima para produção do metacaulim de alta reatividade.
- A calcinação, independente da temperatura, alterou substancialmente a granulometria do rejeito, aumentando o seu diâmetro médio de  $0.7\mu\text{m}$ , no estado natural, para  $10\mu\text{m}$ , quando calcinado. As causas da excessiva aglomeração não ficaram bem esclarecidas, entretanto, é possível que o processo de calcinação utilizado nessa pesquisa tenha ocasionado um princípio de sinterização. Por essa razão, o rejeito calcinado foi moído até atingir um diâmetro médio de aproximadamente  $1.5\mu\text{m}$ .

- Todas as temperaturas de calcinação estudadas (700°C, 800°C e 900°C) produziram uma metacaulinita com expressivo grau de desordem cristalina, amorfa à difração de raio-x.

## 6.2 COM RELAÇÃO À ATIVIDADE POZOLÂNICA DO METACULIM COM CIMENTO PORTLAND.

- A demanda de água das argamassas produzidas com adições de metacaulim e sílica ativa foram significativamente superiores à de referência, na ordem de 129% e 132%, respectivamente, ultrapassando os limite de 115% (argila calcinada) e 110% (demais pozolanas) estipulados pela norma NBR 12653. O fato demonstra que devido à sua extrema finura, o uso do metacaulim em misturas de concreto está vinculado ao emprego de aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes).
- As temperaturas de 700°C e 800°C foram as que produziram as pozolanas de maior reatividade. Essa faixa de temperatura apresenta boa concordância com a maioria dos trabalhos publicados sobre argila calcinada e com o intervalo sugerido pela norma indiana IS 1344 de 1968 (entre 700°C e 800°C). As argamassas com rejeito calcinado nessas temperaturas alcançaram elevados índices de atividade pozolânica, 101.23% e 102.68%, respectivamente. Os índices são similares ao obtido com a argamassa de sílica ativa (103.63 %) e bastante superior ao mínimo de 75% prescrito pela norma NBR 12653.
- O metacaulim obtido a 900°C apresentou uma reatividade bastante reduzida com cimento Portland. O índice de atividade pozolânica da argamassa foi de 68%, ficando muito aquém do mínimo exigido pela norma citada anteriormente, dando indícios que a calcinação do rejeito nessa temperatura inicia a recristalização da fase amorfa e, conseqüentemente, a formação de compostos cristalinos menos reativos.

### 6.3 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

- Os concretos com adição mineral, por causa da maior quantidade de partículas finas, requereram dosagens maiores de superplastificante do que a mistura de referência para a relação água/aglomerante de 0.47.
- Para as misturas com relação água/aglomerante de 0.39, o concreto com 10% de metacaulim utilizou 29% a menos de superplastificante que o concreto com sílica ativa. Nessa relação água/aglomerante, em razão da pequena disponibilidade de água para a consistência, a menor finura do metacaulim proporcionou um efeito menos prejudicial ao abatimento do concreto fresco que a sílica ativa.
- Nos concretos com relação água/aglomerante média e elevada, apesar do metacaulim possuir uma granulometria dez vezes superior à da sílica ativa, não foram empregadas para o mesmo abatimento dosagens inferiores de aditivo superplastificante nos concretos com essa adição. Pelo contrário, para a relação água/aglomerante de 0.64, a sílica ativa exigiu 40% a menos do teor de superplastificante utilizado com o metacaulim. Possivelmente, a grande quantidade de água de amassamento dessas misturas fez com que o efeito positivo da forma esférica da sílica ativa na redução do atrito entre os grãos de cimento, em comparação a forma angular do metacaulim, fosse preponderante sobre o efeito *negativo* da sua finura na consistência.
- Ambas as adições minerais proporcionaram às misturas de concreto maior coesão, facilidade de acabamento e redução da exsudação. Nas misturas com sílica ativa, praticamente não se observou a exsudação, enquanto que no concreto com metacaulim ainda houve a ocorrência desse fenômeno, embora de forma bastante reduzida.

### 6.4 COM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

- A resistência máxima do concreto produzido com o seixo proveniente da região de Ourém, independente da utilização ou não de adição mineral, foi de aproximadamente 43 MPa para uma relação água/aglomerante em torno de 0.4. Para relações inferiores,

não houve acréscimo na resistência, indicando que o limite máximo de resistência desse agregado foi alcançado.

- Por causa da baixa resistência do seixo de Ourém, que não requer relações água/aglomerante extremamente reduzidas para alcançar sua resistência limite ( $a/c \cong 0.4$ ), empregou-se dosagens de superplastificante muito aquém do máximo esperado. Portanto, para se obter a mesma consistência ou a mesma redução no consumo de cimento, é preferível utilizar altas dosagens de aditivo plastificante em vez de teores reduzidos de superplastificante, tanto por questões técnicas quanto econômicas.
- As adições de sílica ativa nas misturas com relação água/aglomerante elevada aumentaram significativamente a resistência à compressão em relação a dos concretos de referência. No entanto, a medida que se reduz a relação água/aglomerante, as diferenças entre os concretos de referência e com sílica ativa vão diminuindo a ponto de se igualarem. A causa da forte interação entre os efeitos dessas variáveis é atribuída à baixa resistência do seixo, que associada à redução da relação água/aglomerante e ao melhor empacotamento dos grãos do agregado proporcionado pela sua granulometria contínua, foram suficientes para produzir uma matriz de cimento com resistência superior a do agregado sem que houvesse a necessidade do uso de sílica ativa. Por essa razão, é vantajoso, do ponto de vista econômico, produzir concretos com adição de 5%, 10% e 15% de sílica ativa somente até 36 MPa.

#### 6.5 COM RELAÇÃO À TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E À PENETRAÇÃO ACELERADA DE ÍONS CLORETOS

- A carga elétrica total passante e a taxa de absorção capilar, pelo fato de serem variáveis dependentes da permeabilidade do concreto, apresentaram uma similaridade de comportamento (relação direta) e uma correlação estatística forte ( $r^2=0.77$ ).
- A relação água/aglomerante, independente do teor de adição, não influencia de modo significativo a taxa de absorção capilar e a penetração de cloretos dos concreto produzidos com esse tipo de seixo. A incorporação de sílica ativa é que reduz

substancialmente a permeabilidade à água e aos cloretos, possibilitando que concretos com moderado consumo de cimento apresentassem uma taxa de penetração, tanto de água quanto de cloretos, menor que a de misturas com elevado consumo de cimento sem adição. Essa característica permite que se obtenha, há um menor custo de produção, concretos com *baixa permeabilidade* e maior *resistividade elétrica*.

- A interação entre os efeitos da relação água/aglomerante e da adição de sílica ativa não foi significativa porque a influência da relação água/aglomerante é minimizada pelo melhor empacotamento proporcionado pela granulometria contínua do agregado, principalmente para misturas com relação água/aglomerante elevada.
- Incrementos de resistência de 19 MPa para 45 MPa, em condições de cura úmida, proporcionaram às misturas de concreto com seixo reduções significativas na taxa de absorção capilar e na carga total passante, em torno de 62% e 95%, respectivamente. A penetração de cloretos sofreu maior influência com a redução da permeabilidade do que a taxa de absorção capilar.
- Para misturas com adição de 10% e 20% de pozolanas (sílica ativa ou metacaulim), os concretos com seixo apresentaram, para todas as relações água/aglomerante observadas, taxa de absorção de água e carga elétrica total passante inferiores a dos concretos produzidos com cimento de maior resistência e brita basáltica da região sul do país. O efeito da melhor distribuição granulométrica do seixo, possivelmente foi preponderante sobre a maior resistência do cimento na formação de uma matriz mais densa com sistema de poros descontínuos.
- Nos concretos produzidos com os materiais disponíveis na região metropolitana de Belém, a incorporação de adições minerais altamente reativas permite que se obtenha misturas com durabilidade bastante superior às empregadas atualmente e semelhantes à do restante do país. No caso da sílica ativa ser adicionada a concretos com moderado consumo de cimento ou relação água/aglomerante elevada, possibilita, em relação as misturas sem adição, a produção de concretos de resistências convencionais (entre



15MPa e 20MPa), mas com desempenho substancialmente superior em termos de durabilidade e viáveis economicamente.

#### 6.6 COM RELAÇÃO AO DESEMPENHO DOS CONCRETOS COM METACAULIM

- Os concretos com adição de metacaulim apresentaram desempenho significativamente superior aos dos concretos de referência nos ensaios de compressão simples e de absorção de água. Em comparação com os concreto com sílica ativa, os resultados de resistência à compressão foram similares e as taxas de absorção capilar foram ligeiramente superiores.
- Apesar da limitação da pesquisa, pode-se afirmar que o rejeito, quando calcinado entre 700°C e 800°C, é um material extremamente reativo e provavelmente possa ser empregado na produção de concretos de alto desempenho. Torna-se necessário apenas otimizar o processo de calcinação para que não ocorra a aglomeração excessiva das partículas, de modo a eliminar ou reduzir a etapa de moagem do processo de produção da pozolana, uma vez que o rejeito “*in natura*” já é extremamente fino ( $\phi_{50\%} = 0.71\mu\text{m}$ ).

#### 6.7 COM RELAÇÃO AO PROJETO FRACIONADO

- Os modelos ajustados para as variáveis de resposta estudadas foram estatisticamente significativos para um nível de no mínimo 90%. Os coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 87% (resistência à compressão), 83% (taxa de absorção capilar) e 99% (carga elétrica total passante) indicam que a variabilidade das propriedades pode ser explicada de maneira satisfatória pelos modelos matemáticos.
- A configuração do projeto fracionado adotado na pesquisa, ou seja, sem a execução de pontos das extremidades (algumas misturas de referência e com 20% de adição), captou a ocorrência ou não das interações entre o teor de adição e a relação água /aglomerante nas variáveis de resposta estudadas no experimento. Entretanto, quando forem avaliadas propriedades, cujo comportamento seja completamente desconhecido, é aconselhável

que se adote configurações de fracionamento de projeto que permitam que a interação entre as variáveis consideradas seja efetivamente observada nos ensaios.

## 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Estado do Pará apresenta uma grande diversidade de produtos de transformação e de minérios, que por sua vez geram rejeitos e subprodutos dos processos de produção e extração que poderiam ser largamente empregados pela indústria da Construção Civil e, em particular, de produção de concreto. Entretanto, o conhecimento dessas potencialidades por parte do meio técnico local ainda permanece incipiente ou praticamente inexistente. Esse desinteresse sempre fez parte da cultura técnica regional, um exemplo disso é o reduzido número de trabalhos científicos voltados para a melhoria da qualidade das construções locais, principalmente aqueles relacionados a *técnicas construtivas adequadas à região, gestão da qualidade na construção civil e tecnologia de produção de concretos e argamassas com materiais locais*.

A presente situação é um contra-senso, justamente numa região onde há escassez de recursos para investimentos, a indústria da construção civil de modo geral não é racionalizada. Esse fato repercute na qualidade das obras, que têm-se mostrado ineficazes sob o ponto de vista da *durabilidade*, apresentando problemas de deterioração em curtos períodos de uso.

No que tange à produção de concreto, pode-se afirmar que tradicionalmente é empregado tanto em Belém como nos demais municípios do estado, concretos de baixa qualidade. Na grande maioria dos projetos estruturais e nos pedidos às centrais dosadoras, a resistência característica especificada ou solicitada é de 15 MPa. As explicações para o quadro atual é a inexistência de informações sobre o comportamento do concreto obtido com os materiais locais. Isso desperta nos projetistas uma incerteza sobre a qualidade do concreto, tanto em obra quanto nas centrais, fazendo com que os mesmos especifiquem resistências inferiores, que possam ser facilmente alcançadas sem qualquer critério ou esmero na produção.

Diante desse panorama, sugere-se, dentro da linha de pesquisa voltada para tecnologia de concreto, a realização de estudos que tenham os seguintes objetivos:

- Investigar a obtenção de alta resistência utilizando outros tipos de agregados, como por exemplo o seixo de cava proveniente do município de São Miguel do Guamá (150 km da capital), a brita de granito oriunda do município de Tracuateua (230 km de Belém) ou o seixo de rio da região centro-sul do estado.
- Determinar o módulo de deformação dos concretos produzidos com os agregados graúdos disponíveis na região.
- Avaliar a influência da carbonatação na corrosão das armaduras dos concretos produzidos com e sem incorporação de sílica ativa e metacaulim.
- Investigar outros procedimentos de calcinação e temperaturas menores de ativação térmica do rejeito do beneficiamento de caulim.
- Investigar a influência de diversos teores de metacaulim na produção de concretos de alta resistência, como também sobre outros aspectos relacionados à durabilidade e à estabilidade dimensional.
- Avaliação de métodos de dosagem que sejam mais adequados aos materiais disponíveis no estado.
- Analisar a viabilidade técnica e econômica de produção de concretos de resistência convencionais ( $f_c$  entre 15 MPa e 20 MPa), com reduzidos consumos de cimento ( $< 250 \text{ kg/m}^3$ ) e adição de sílica ativa e metacaulim.
- Investigar a influência do tipo de cura e da elevada temperatura da região nas propriedades do concreto produzido com os materiais locais.

- Catalogar e caracterizar os rejeitos e subprodutos das diversas indústrias metalúrgicas e de mineração localizadas no estado, que possam vir a ser utilizados como materiais de construção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AICTIN, P.C. **Condensed silica fume**. University of Sherbrooke, Quebec, Canada, 1983.
2. AICTIN, P.C. From gigapascals to nanometers : E.GARTNER Ed., **Proc. Engineering Foundation Conf., The Engineering Foundation**, p. 105-130, 1989.
3. AICTIN, P.C.; LAPLANTE, P. The development of high performance concrete in North America. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p 412-420.
4. AICTIN, P.C.; NEVILLE, A. High Performance concrete demystified. **Concrete International**, v.15, n.1, p.21-26, Jan. 1993.
5. AICTIN, P.C.; PIEGON, M. Performance of condensed silica fume concrete used in pavements and sidewalks. **Durability of Building Materials**, n.3, p.353-368, 1986.
6. AICTIN, P.C.; SARKAR, S.L. Long-term durability of silica fume concretes exposed to severe environmental conditions. In: P.K. MEHTA SYMPOSIUM ON DURABILITY OF CONCRETE, 1994, Nice, France. **Proceedings....** Nice: P.C. AICTIN, K.H. KHAYAT, P.J.M. MONTEIRO, 1994, p.263-290.
7. ALMEIDA, I.R. **Betões de alta resistência e durabilidade - composição e características**. Lisboa, 1990. 740p. Tese de doutorado. Universidade Técnica de Lisboa.
8. ALMEIDA, I.R. Superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos. **Téchne**, São Paulo, 24, p.30-33, set./out., 1996.
9. ALMEIDA, R. Fumo de sílica e concreto: uma união resistente. **Revista do Ibracon**, São Paulo, n.11, p.8-13, dez. 1994.
10. AMARAL FILHO, E.M. Concreto de Alta Resistência (1ª parte). **Revista do Ibracon**, São Paulo, n.4, abr-mai-jun, 1992.
11. AMBROISE, J.; MURAT, M.; PÉRA, J. Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV - Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p.83-88, 1985a.
12. AMBROISE, J.; MURAT, M.; PÉRA, J. Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. V - Extension of the research and general conclusions. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p.261-268, 1985b.
13. AMBROISE, J.; MURAT, M.; PÉRA, J. Investigations on synthetic binders obtained by middle-temperature thermal dissociation of clay minerals. **Silicates Industrielles**, vol.51, n.7/8, p. 99-107, 1986.
14. AMBROISE, J.; MARTIN-CALLE, S.; PÉRA, J. Pozzolanic behavior of thermally activated kaolin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings....** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 731-748 (ACI Special Publication, 132).

15. AMBROISE, J. MAXIMILIEN, S.; PÉRA, J. Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**, v.1, n.4, p.161-168, 1994.
16. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard method of test for rapid determination of the chloride permeability of concrete**, AASHTO T-277-83, Washington D.C., 1986.
17. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 226. Silica fume in concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.84, n.2, p158-166, mar-april 1987.
18. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 234. Abstract of: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, may, 1996.
19. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R. State-of-the-art report on high-strength concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, 1991, part 1. 48p.
20. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete: ASTM C 618, 3p. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1991.
21. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: ASTM C 1202, 6p. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1992.
22. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Silica fume for use in hydraulic cement concrete and mortar: ASTM C 1240. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1993.
23. ANDRADE, C. A. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v.23, p.724-742, 1993.
24. ANDRIOLO, F.R. **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução**. São Paulo: PINI, 1984.
25. ANDRIOLO, F.R.; DE VASCONCELOS, G.R.L.; GAMA, H.R. Use of roller compacted concrete in Brazil. **Concrete International**, v. 6, n.5, may 1984.
26. ARIIZUMI, A. Formation of hydrated gehlenite through the reaction of clay minerals and lime. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5, 1968, Tokyo. **Proceedings**..... Tokyo, 1968, v.2, p.II 138-147.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - Departamento de Química. Influência da sílica livre no processo de fabricação do cimento Portland e sua determinação quantitativa. In: REUNIÃO de Técnicos da Indústria do Cimento, 38, São Paulo, agosto, 1988.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles"** : NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984.
29. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto** : NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

30. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica** : NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação do teor de material pulverulento** : NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman** : NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
33. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo** : NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.
34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Análise química de cimento Portland - Processos de arbitragem para determinação de dióxidos de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio** : NBR 57428. Rio de Janeiro, 1976.
35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Análise química de cimento Portland - Processos de arbitragem para determinação de dióxidos de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio** : NBR 5742. Rio de Janeiro, 1976.
36. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e Massa específica. Método de Ensaio** : NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto endurecidos - Determinação de absorção de água por capilaridade. Método de Ensaio** : NBR 9779. Rio de Janeiro, 1995.
38. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação de perda ao fogo** : NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel** : NBR 5744. Rio de Janeiro, 1989.
40. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação de anidrido sulfúrico** : NBR 5745. Rio de Janeiro, 1989.
41. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama** : NBR 5747. Rio de Janeiro, 1989.
42. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre** : NBR 5748. Rio de Janeiro, 1976.
43. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica** : NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.



44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica** : NBR 7224. Rio de Janeiro, 1984.
45. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão** : NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.
46. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira número 200** : NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991.
47. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação dos tempos de carga** : NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991.
48. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto**: NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.
49. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - procedimento**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.
50. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone** : NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.
51. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto para fins estruturais - classificação por grupos de resistência**: NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.
52. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Preparo, controle e recebimento de concreto** : NBR 12655. Rio de Janeiro, 1996.
53. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
54. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com Cimento Portland - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento** : NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.
55. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Especificação** : NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.
56. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Silica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland. Especificações** : NBR 13956. Rio de Janeiro, 1997.
57. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Silica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland. Métodos de Ensaio** : NBR 13957. Rio de Janeiro, 1997.
58. BAALBAKI, W.; BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O., AICTIN, P.C. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.88, n.5, p.499-503, sep./oct. 1991.

59. BANTHIA, N.; YAN, C. Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.5, 657-662, 1996.
60. BATRAKOV, V.G.; KAPRIELOV, S.S; SHEINFELD, A.V. Influence of different types of silica fume having varying silica content on the microstructure and properties of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 943-963 (ACI Special Publication, 132).
61. BATTAGIN, A.F. Características das escórias e pozolanas adicionadas aos cimentos Portland brasileiros. In : **Curso de aperfeiçoamento de tecnologia do concreto**, 4., ABCP, 1987, São Paulo, p.1-55.
62. BENTUR, A.; GOLDMAN, A.; COHEN, M.D. The contribution of the transition zone to the strength of high quality silica fume concretes. Bonding in Cementitious Composites. In: S. MINDESS; S.P. SHAH (eds). **Materials Research Society Symposium Proceedings**, Pittsburgh, 1988, v. 114, p.97-103.
63. BENTZ, D.P.; STUTZMAN, P.E. Evolution of porosity and calcium hydroxide in laboratory concretes containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v.24, n.6, 1044-1050, 1994.
64. BERKE, N.S.; DALLAIRE, M.P.; HICKS, M.C. Plactical, mechanical, corrosion, and chemical resistance properties of silica fume (microsilica) concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 1125-1149 (ACI Special Publication, 132).
65. BREDY, P.; CHABANNET, M.; PÉRA, J. Microestrutura and porosity of metakaolin blended cements. In: **Materials Research Society Symposium Proceedings**, 1989, v. 136, p.275-279.
66. BRIDSON, D.; DAVIES, T.W.; HARRISON, P. Properties of flash-calcined kaolinite. **Clays and Clay Minerals**, v.33, n.3, p.258-260, 1985.
67. BRISTOW, C.M. World Kaolin: genesis, exploitation and application. **Industrial Minerals**, jul., p.45-59, 1987
68. BROCHERIEUX, J.-M. High performance concrete in tunnel linings. In : In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p 347-364.
69. BUCHER, H.R.E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30, 1988, Rio de Janeiro. **Anais.....** São Paulo: IBRACON, 1988. v.2, p. 609-625.
70. CABRERA, J.G.; CLAISSE, P.A. Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. **Cement and Concrete Research**, v.12, p. 157-161, 1990.

71. CADORET, G.; RICHARD, P. Full scale use of high performance concrete in building and public works. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p 379-411.
72. CALDARONE, M.A., GRUBER, K.A.; BURG, R.G. High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture. **Concrete International**, vol. 16, n.11, p.37-40, 1994.
73. CALDARONE, M.A., GRUBER, K.A. High-reactivity metakaolin - a mineral admixture for high-performance concrete. In: CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 1995, Sapporo, Japan. **Proceedings.....** London: eds K.SAKAI, N.BANTHIA, and O.E. GJORV, E & FN SPON, 1995, 2. v.1, p. 1015-1024.
74. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Concrete Materials and Methods of Concrete Construction**. A23.1-M94, Toronto, Canada, 1994.
75. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Supplementary Cementing Materials**. CAN/CSA-A23.5-M92, Rexdale, Ontario, 1992.
76. CARETTE, G.G.; MALHOTRA, V.M. Long-term strength development of silica fume concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 1019-1044 (ACI Special Publication, 132).
77. CARINO, N.J. Nondestructive test methods for penetrability of concrete and assessment of steel reinforcement. In: SEMINAR ON DURABILITY OF CONCRETE, 1996, Florianópolis, Brasil. **Proceedings.....** Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, 2v, v.2.
78. CARMONA FILHO, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil; Estudo Estatístico. In: **Jornadas en Español y Português sobre Estructuras y Materiales**. Madri, 1988. Colloquia 88. Madri, CEDEX, IET, mayo 1988. p.325-348.
79. **CARRASQUILLO, 1985 DISSERTAÇÃO DO**
80. CASTRO SOBRINHO, J.F. **Pozolanas como material de construção: sua fabricação artificial em Urubupungá**. São Paulo: Centrais Elétricas, 1970.
81. CHORINSKY, E.G.F. **Repair systems for high-strength concrete**. Chemotechnik Abstatt GmbH, W. Germany, 1990.
82. COLACO, J.P. 75 - Story texas Commerce Plaza, Houston - the use of high-strength concrete. In: HIGH-STRENGTH CONCRETE. **Proceedings.....** Detroit : American Concrete Institute, 1985. p.1-8, (ACI Special Publication, 87).
83. COLEMAN, N.J.; PAGE, C.L. Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.1, p.147-154, 1997.

84. COLLEPARDI, M. Superplasticizers and air entraining agents : state of the art and future needs. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Papers.....** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.399-416, (ACI Special Publication, 144).
85. COOK, D.J. Calcined clay, shale and other soils. In: SWAMY, R.N (ed.). **Cement Replacement Materials**. (Concrete technology and design; v.3), London, Surrey University Press, 1986. Cap.2, p.40-72.
86. CORBIOLI, N. A ponte do Rio Maranhão. **Téchne**, São Paulo, PINI, n.29, p.24-27, jul/ago 1997.
87. COSTAZ, J.-L. High performance concrete in nuclear power plants. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p. 365-378.
88. CURSO DE TECNOLOGIA DE ADITIVOS, São Paulo, IPT, 1983, 2v.
89. DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica**. São Paulo, 1995. 286p. Tese de doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
90. DAVIES, T.W. Density reduction of kaolinite by flash heating. *Chemical Engineering Research and Design*, v.63, n.2, p.82-88, 1985.
91. de LARRARD, F.; ITHURRALDE, G.; ACKER, P.; CHAWEL, D. High performance concrete for a nuclear containment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, California. **Proceedings.....** Detroit : American Concrete Institute, 1990. (ACI Special Publication, 121).
92. de SILVA, P.S.; GLASSER, F.P. Hydration of cements based on metakaolin chemistry. **Advances in Cement Research**. v.3, n.12, p. 166-177, 1990.
93. de SILVA, P.S.; GLASSER, F.P. Phase relation in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration. **Cement and Concrete Research**. v.23, p. 627-639, 1993.
94. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**, 1996.
95. DETWEILER, R.J.; MEHTA, P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behaviour of concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.86, n.6, p. 609-614, nov-dec, 1989.
96. DETWEILER, R.J.; KJELLEN, K.; GJORV, O. Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.88, n.1, p.19-24, 1991.
97. DETWEILER, R.J.; FAPOHUNDA, C.; NATALE, J. Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concretes cured at elevated temperatures. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.91, n.1, p.63-66, 1994.

- 98.DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN, Y.N. Near surface characteristics and durability of concrete: an initial appraisal. **Magazine of Concrete Research**, v.38, n. 134, p.54-56, 1986.
- 99.DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN, Y.N. Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. **Magazine of Concrete Research**, v.39, n. 141, p.183-195, 1987.
- 100.DRAKE, K.D. High strength in Seattle. In: HIGH-STRENGTH CONCRETE. **Proceedings**.....Detroit : American Concrete Institute, 1985. p.21-34, (ACI Special Publication, 87).
- 101.DRON, R. Experimental and theoretical study of the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 6, 1974, Moscow. **Proceedings**..... Moscow, 1974, v.5, p.245-253.
- 102.ENGELHARD CORPORATION. A ready-mix field study of high performance concrete using Metamax (formerly known as M-90-339) high reactivity metakaolin (HRM). Inselin, New Jersey, 1994.
- 103.FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE / COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **High strength concrete-state of the art report**. London: Chameleon press, 1990. 61p. 9SR 90/1 - Bulletin d'Information, 197).
- 104.FLORES, S.M.P. **Aproveitamento do rejeito de caulim na produção de alumina para cerâmica e sílica de baixa granulometria**. Belém, 1998. Tese de Doutorado (em desenvolvimento). Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará.
- 105.FORREST, J.A. Burnt clay pozzolanas. In: MEETING ON SMALL-SCALE MANUFACTURE OF CEMENT MATERIALS, 1974. **Proceedings**..... London: Intermed Technol. Publ., 1975, p.53-59.
- 106.GAGNÉ, R.; CHAGNON, D.; PARIZEAU, R. O uso de concreto de alto desempenho em instalações agropecuárias (Tradução: eng<sup>a</sup> Zuleica Alves Neves Marciano). **Revista do Ibracon**, São Paulo, n.14, p. 15-21, ago/set 1996.
- 107.GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Effect of aggregate type on the behavior of high strength concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais**..... Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, p. 52-60.
- 108.GITAHY, H.S. **O problema dos agregados para os concretos da barragem de Jupia**. São Paulo: publicação n. 672, IPT, 1963.
- 109.GJORV, O. Durability of concrete containing condensed silica fume. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 1., 1983, Montebello, Canada. **Proceedings**..... Detroit: American Concrete Institute, 1983. v.2, p. 695-708 (ACI Special Publication, 79).

- 110.GJORV, O. Properties of silica fume. In: INTERNATIONAL WORKSHOPS ON THE USE OF FLY ASH, SLAG, SILICA FUME AND OTHER SILICEOUS MATERIALS IN CONCRETE, 1988, Australia. **Proceedings**.....Australia, 1988. p. 230-251.
- 111.GJORV, O. ; MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Effect fo condensed silica fume on the steel-concrete bond. **ACI Materials Journal**, v.87, p.573, 1990.
- 112.GJORV, O. High-strength concrete. In: V.M. MALHOTRA (ed.). **Advances in concrete technology**, second edition, Ottawa, Canada: CANMET, 1994a, p. 19-82.
- 113.GJORV, O. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: V.MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Papers**..... Detroit: American Concrete Institute, 1994b. p.545-576, (ACI Special Publication, 144).
- 114.GJORV, O.; SAKAI, K. Testing of chloride diffusivity for concrete. In: CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 1995, Sapporo, Japan. **Proceedings**..... London: eds K.SAKAI, N.BANTHIA, and O.E. GJORV, E & FN SPON, 1995, 2. v.1, p. 655-666.
- 115.GJORV, O. Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment. In: ODD E. GJORV SYMPOSIUM ON CONCRETE FOR MARINE STRUCTURES, 1996, New Brunswick, Canada. **Papers**..... New Brunswick : CANMET/ACI, 1996a. P.259-279.
- 116.GJORV, O. Concrete performance criteria based on migration testing. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais**..... Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996b, p. 425-432.
- 117.GOLDMAN, A.; BENTUR, A. Bond effects in high-strength silica fume concretes. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.86, n.5, p. 440-447, 1989.
- 118.GONÇALVES, J.R.A.; ALMEIDA, I.R.; SHEHATA, L.C.D. Influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto de alta resistência. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 36, 1994, Porto Alegre. **Anais**..... São Paulo: IBRACON, 1994, v.1, p.339-352.
- 119.GOPALAN, M.K. Sorptivity of fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.8, p.1189-1197, 1996.
- 120.GRIM, R. E. Propriedades de argilas. **Cerâmica**, v.9, n.35, 1963.
- 121.GUPTA, S.; RAO, A.V.P. Production of clay pozzolana by fluidized bed technique. **Trans. Indian Ceramic Society**, n.37, p.165-171, 1978.
- 122.GUTIÉRREZ, P.A.; CÁNOVAS, M.F. High-Performance Concrete : Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning. **ACI Materials Journal**, Detroit, vol. 93, n.3, pp.233-241, 1996.

- 123.HALL, C. Water absorption of mortars and concretes : a review. **Magazine of Concrete Research**, v.41, n.147, p.51-61, 1989.
- 124.HE, C.; OBSBAECK, B.; MAKOVICKY, E. Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.8, p.1691-1702, 1995.
- 125.HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 126.HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993.
- 127.HELLAND, S. High strength concrete used in highway pavements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley, California. **Proceedings**..... Detroit : American Concrete Institute, 1990. (ACI Special Publication, 121).
- 128.HO, D.W.S.; HINCZAK, I.; CONROY, J.J.; LEWIS, R.K. Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 2., 1986, Madrid, Spain. **Proceedings**..... Detroit: American Concrete Institute, 1986. v.2, p. 1463-1473 (ACI Special Publication, 91).
- 129.HOSHINO, M. Difference of the W/C ratio, porosity and microscopical aspect between the upper boundary paste and the lower boundary paste of the aggregate in concrete. **Materials and Structures - RILEM**, v. 21, n.125, p. 336-340, 1988.
- 130.HOWARD, N.L.; LEATHAM, D.M. The production and delivery of high-strength concrete. **Concrete International**, v. 11, n.4, p. 26-30, april 1989.
- 131.INDIAN STANDARDS INSTITUTION (IS). **Specification for burnt clay pozzolan**. IS 1344, New Delhi, 1968.
- 132.ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 133.JAHREN, P. Use of silica fume in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 1., 1983, Montebello, Canada. **Proceedings**..... Detroit: American Concrete Institute, 1983. v.2, p. 625-642 (ACI Special Publication, 79).
- 134.KHATIB, J.M.; WILD, S. Pore distribution of metakaolin paste. **Cement and Concrete Research**, v.26,n. 10, p.1545-1553, 1996.
- 135.KELHAM, S. A water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.40, n.143, p. 106-110, Jun 1988.

- 136.KENDAL, A. Brazil: dacing to a new tune. **Industrial Minerals**, n. 350, november, p.21-38, 1996.
- 137.KHAYAT, K.H.; AICTIN, P.C. Silica fume in concrete - an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p. 835-872 (ACI Special Publication, 132).
- 138.KIHARA, Y; SHUKUZAWA, J.K. Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. **Cerâmica**, v.28, n.145, p. 15-24, 1982.
- 139.KOSTUC, J.A., WALTERS, G.V.; JONES, T.R. High performance concretes incorporating metakaolin: a review. In:INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE 2000, 1993, Dundee. **Proceedings....** Dundee: University of Dundee, 1993, v.2, p.1799-1811.
- 140.KROPP, J.; HILSDORF, H.K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L-O. Transport mechanisms and definitions. In: J. KROPP, H. HILSDORF. **Performance criteria for concrete durability - RILEM REPORT 12**, London : E & FN SPON, 1995, p. 4-14.
- 141.KULAKOWSKI, M.P. **Argamassa com adição de microsilica para reparos estruturais : estudo da penetração de cloretos**. Porto Alegre, 1994, 129p. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 142.LEA, F.M. The chemistry of pozzolans. In: **Proceedings Symposium on the chemistry of cement**, Stockholm, 1938.
- 143.LEA, F.M. **The chemistry of cement and concretes**. 3<sup>a</sup> ed. London: Edward Arnold, 1970.
- 144.LOUGH BROUGH, R. Kaolin producer more upmarket. **Industrial Minerals**, october, p. 51-69, 1993.
- 145.MAAGE, M.; SELLEVOLD, E.J. Effect of microsilica on the durability of concrete structures. **Concrete International**, v.9, n.12, p. 39-43, 1987.
- 146.MACKENZIE, R.C. **Differential thermal analysis**. London: Academic Press. 2v., 1970.
- 147.MALE, P. Properties of microsilica concrete. **Concrete**, London, v.23, n.8, p. 31-34, sept. 1989.
- 148.MALHOTRA, V.M; CARETTE, G.G. Silica fume concrete - Properties, applications, and limitations. **Concrete International**, v.5, n.5, p. 40-46, 1983.
- 149.MALHOTRA, V.M. Fly-ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: a review. **Concrete International**, april, p. 23-28, 1993.



- 150.MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. Role of silica fume in concrete: a review. In: V.M. MALHOTRA (ed.). **Advances in concrete technology**, second edition, Ottawa, Canada: CANMET, 1994, p. 915-990.
- 151.MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Ottawa : Advanced Concrete Technology Program, CANMET, 1996, 191p.
- 152.MALIER, Y. The French National Project 'New Ways for Concrete' - objectives and methodology. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p 329-332.
- 153.MANNING, D.A.C. **Introduction to Industrial Minerals**, Cambridge: CHAPMAN & HALL, 1995.
- 154.MASSAZZA, F.; COSTA, U. Aspetti dell'attività pozzolanica e proprietà dei cement pozzolanici. **Il Cemento**, Roma, n.3, 1979.
- 155.MEHTA, P.K. Condensed silica fume. In: SWAMY, R.N (ed.). **Cement Replacement Materials**. (Concrete technology and design; v.3), London, Surrey University Press, 1986. Cap.5, p.134-170.
- 156.MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete. Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.1, p. 1-44 (ACI Special Publication, 114).
- 157.MEHTA, P.K. Concrete technology at the crossroads - Problems and opportunities. In: V.MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Papers.....** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.1-32, (ACI Special Publication, 144).
- 158.MEHTA, P.K. High-performance concrete technology for the future. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais.....** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, p. 1-14.
- 159.MEHTA, P.K.; GJORV, O. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume, **Cement and Concrete Research**, v.12, n.5, p.587-595, 1982.
- 160.MEHTA, P.K.; AICTIN, P.C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v.12, n.2, p. 70-78, winter, 1990.
- 161.MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto : estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : PINI, 1994.
- 162.MEINHOLD, R.H.; SALVADOR, S.; DAVIES, T.W.; SLADE, C.T. A comparison of the kinetics of flash calcination of kaolinite in different calciners. **Chemical Engineering Research and Design**, v.72, part. A, p.105-113, 1994.

- 163.MIELENS, R.C.; WITTE, L.P.; GLANTZ, O.J. Effect of calcination on natural pozzolans. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concrete. **Papers....** Philadelphia, p.43-92, 1950, (STP 99).
- 164.MONTEIRO, P.J.M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Berkeley, California, 1985. 153p. Tese de doutorado - University of California, Berkeley.
- 165.MONTEIRO, P.J.M. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração**. São Paulo, 1993. 138p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 166.MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Ettringite formation on the aggregate-cement paste interface. **Cement and Concrete Research**, v.15, n.2, p378-380, 1985.
- 167.MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. The transition zone between aggregate and type K expansive cement, **Cement and Concrete Research**, v.16, p.111, 1986a.
- 168.MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Improvement of the aggregate-cement paste transition zone by grain refinement of hydration products. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8, 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings.....** Rio de Janeiro, 1986b, v.3, p.433-437.
- 169.MONTGOMERY, D.C.**Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- 170.MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I - Preliminary investigation on metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p.259-266, 1983a.
- 171.MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. II - Influence of mineralogical properties of the raw-kaolinite on the reactivity of metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p.511-518, 1983b.
- 172.MURAT, M.; COMEL, C. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. III - Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p.631-637, 1983.
- 173.NAGATANI, S. Mineral admixtures in concrete : State of the art and trends. In: V.MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Papers.....** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.447-482, (ACI Special Publication, 144).
- 174.NEVILLE, A. Concrete in the year 2000. High-strength concrete. In: V.M. MALHOTRA (ed.). **Advances in concrete technology**, second edition, Ottawa, Canada: CANMET, 1994, p. 83-124.
- 175.NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2ªed, São Paulo : PINI, 1997.
- 176.NORWEGIAN STANDARD. **Design of concrete structures**: NS 3473. Oslo, 1989.

177. ORIOL, M.; PÉRA, J. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.2, p. 265-270, 1995.
178. PAGE, K.M. Pumping high strength concrete on world's tallest concrete building. **Concrete International**, v. 12, n.1, p. 26-28, jan. 1990.
179. PAPADAKIS, M.; VENUAT, M. Empleo en los cementos y hormogones. In : **Fabrication, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento**. Barcelona, Técnicos Asociados, 1968, p.170-171.
180. PAULA LEITE, A.R.C.A.; SAAD, M.N.A.; OLIVEIRA, P.J.R. Comportamento estrutural do reparo com concreto de elevado desempenho no vertedouro da Usina hidrelétrica Ilha Solteira. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais.....** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, p. 133-141.
181. PERRATON, D.; AICTIN, P.C.; CHARLES-GIBERGUES. Permeability, as seen by the researcher. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete - from material to structure**, London, E & F Spon, 1992. p 252-277.
182. PETERMAN, M.B.; CARRASQUILLO, R.L. **Production of high-strength concrete**. Austin: University of Texas, 1986. 278p.
183. PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre : Globo, 1980.
184. PISTILLI, M.F.; WINTERSTEEN, R.; CECHNER, R. The uniformity and influence of silica fume source on the properties of portland cement concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, Philadelphia, v.6, n.2, p. 120-124, 1984.
185. PLANTE, R.; BILODEAU, A. Rapid chloride ion permeability test: data on concretes incorporating supplementary cementing materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings.....** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.1, p. 625-643 (ACI Special Publication, 114).
186. RAMACHANDRAN, V.S. Adsorption and hydration behavior of tricalcium aluminate - water and tricalcium aluminate - gypsum - water systems in the presence of superplasticizers. **Journal of The American Concrete Institute**. v.80, n.3, p.235-241, may-jun 1983.
187. RAMACHANDRAN, V.S.; MALHOTRA, V.M. Superplasticizers. In: RAMACHANDRAN, V.S. (ed.). **Concrete admixtures handbook : properties, science, and technology**. Park Ridge, Noyes, 1984. Cap.4, p.211-268.
188. RAMACHANDRAN, V.S. Recent progress in the development of chemical admixtures. In: V.M. MALHOTRA (ed.). **Advances in concrete technology**, second edition, Ottawa, Canada: CANMET, 1994, p. 785-838.

- 189.ROCHA, S. Desempenho medido na prática. **Téchne**, São Paulo, PINI, n.29, p.14-22, julho, 1997.
- 190.RODRIGUES, P.P.F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo, ABCP (ET-67), 1984.
- 191.ROGALLA, E.A.; KRAUSS, P.D.; McDONALD, D.B. Reducing transverse cracking in new concrete bridge decks. **Concrete Construction**, sept., pp.735-738, 1995.
- 192.RUAS, A.P. de L. Produção de pozolana artificial. In: **Reunião de Técnicos da indústria do cimento**, 25<sup>a</sup>, ABCP, São Paulo, 1972.
- 193.SAAD, M., ANDRADE, W.P.; PAULON, V.A. Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay. **Concrete International**, jul., p. 59-65, 1982.
- 194.SAAD MORSY, M.; EL-ENEIN, S.A.; HANNA, G.B. Microstructure and hydration characteristics of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay. **Cement and Concrete Research**, vol.27, n.9, p. 1307-1312, 1997.
- 195.SALVADOR, S. Pozzolanic properties of flash-calcined kaolinite: a comparative study with soak-calcined products. **Cement and Concrete Research**, vol.25, n.1, p. 102-112, 1995.
- 196.SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLLO, F.R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo : PINI, 1986.
- 197.SELLEVOLD, E.J. The function of condensed silica fume in high strength concrete. In: SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, Stavanger, Norway. **Proceedings**..... Trondheim: Tapir, 1987. p.39-49.
- 198.SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. Condensed silica fume microsilica in concrete : a world review. In: MALHOTRA, V.M. (ed.). **Supplementary cementing materials for concrete**. Ottawa, CANMET, 1987. Cap.3, p. 167-243.
- 199.SERRA, G. A pedra artificial. **Téchne**, São Paulo, PINI, n.28, p.12-16, mai-jun 1997.
- 200.SLADE, R.C.T; DAVIES, T.W.; ATAKÜL, H.; HOOPER, R.M. Flash calcines of kaolinite: effect of process variables on physical characteristics. **Journal of Materials Science**, v.27, p. 2490-2500, 1992.
- 201.SILVA, C.A.; NASCIMENTO, M.C.H.; COSTA, T.C.D. **Estágio de Campo III – Ourém (Pará)**. Belém, 1994. 116p. Relatório final – Departamento de Geologia, Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará.
- 202.SILVA, D.L.; REBELLO, F.K.; SOUZA, R.L.S. Cálculo de Padiolas de Agregados. Belém, 1989. 11p. Departamento de Estruturas, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará.
- 203.SILVA FILHO, A.F. Emprego de concreto de alto desempenho na Bahia - um relato histórico: início - estágio atual - perspectivas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF

- CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais.....** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, p. 118-125.
- 204.SILVA, E.F. Concreto de alto desempenho : aplicação pioneira em Brasília-Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais.....** Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996, p. 94-105.
- 205.SILVA, P.F.A. **Concreto projetado para túneis**. São Paulo : PINI, 1997.
- 206.SMITH, G.J.; RAD, F.N. Economic advantages of high strength concrete in columns. **Concrete International**, v. 11, n.4, p. 37-43, april 1989.
- 207.SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 3v.
- 208.SPENCE, R.J.S. Lime and surkhi manufacture in India. In: In: MEETING ON SMALL-SCALE MANUFACTURE OF CEMENT MATERIALS, 1974. **Proceedings.....** London: Intermed Technol. Publ., 1975, p.137-146.
- 209.STOLFO, R.M. **Movimentos de agentes agressivos em concretos com sílica ativa**. Porto Alegre, 1998. Dissertação de Mestrado(em desenvolvimento) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 210.TANG, L.; NILSSON, L.O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.89, n.1, p. 49-53, 1992.
- 211.WHITING, D. Rapid measurement of the chloride permeability of concrete. **Public Roads**, v.45, n.3, p. 101-112, 1981.
- 212.WILD, S.; SABIR, B.B.; KHATIB, J.M. Factors influencing strength development of concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.7, p.1567-1580, 1995.
- 213.WILD, S., KHATIB, J.M.; JONES. A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, vol.26, n.10, p.1537-1544, 1996.
- 214.WILD, S., KHATIB, J.M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, vol.27, n.1, p.137-146, 1997.
- 215.WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica**. Porto Alegre, 1991. 145p. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

216. YAMATO, T.; SOEDA, M.; EMOTO, Y. Effects of condensed silica fume on the corrosion of steel in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings**..... Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.1, p. 549-567 (ACI Special Publication, 132).
217. YOGENDRAN, V.; LANGAN, B.W.; HAQUE, M.N.; WARD, M.A. Silica fume in high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.84, n.2, p. 124-129, 1987.
218. ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. São Paulo, 1989. 191p. Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.
219. ZHANG, M.; GJORV, O. Effect of silica fume on cement hydration in low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 800-808, 1991.
220. ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol.25, n.8, p. 1713-1725, 1995.

## **ANEXO A**

Apresentação da composição e dos resultados de resistência das argamassas utilizadas no ensaio de determinação da atividade pozolânica com cimento Portland composto CP II F 32

### ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II F 32 (NBR 5752/1992)

Mistura	Quantidade de materiais	Consistência (mm)				Resistência (MPa)	
		$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 1 - \phi 2$	$(\phi 1 + \phi 2) / 2$	valor individual	valor médio
MC7	metacaulim = 88.96g cimento = 202.8g areia = 936g água = 199.9g	225 mm	222.9	2.1	223.95	cp 1 = 33.93 cp 2 = 34.51 cp 3 = 30.27	32.91
MC8	metacaulim = 89.66g cimento = 202.8g areia = 936g água = 199.1g	228.8	226.7	2.1	228.7	cp 1 = <b>21.29</b> cp 2 = 35.16 cp 3 = 31.59	33.38
MC9	metacaulim = 90.36g cimento = 202.8g areia = 936g água = 199.2g	233.3	225.4	7.9	229.4	cp 1 = 23.13 cp 2 = 20.28 cp 3 = 22.52	21.98
SA	sílica ativa = 75.45g cimento = 202.8g areia = 936g água = 204g	227	220.2	7.2	223.6	cp 1 = 32.71 cp 2 = 33.53 cp 3 = 34.85	33.69
REF.	cimento = 312g areia = 936g água = 154.1g	227.2	227.2	0	227.2	cp 1 = <b>24.76</b> cp 2 = 34.34 cp 3 = 30.68	32.51

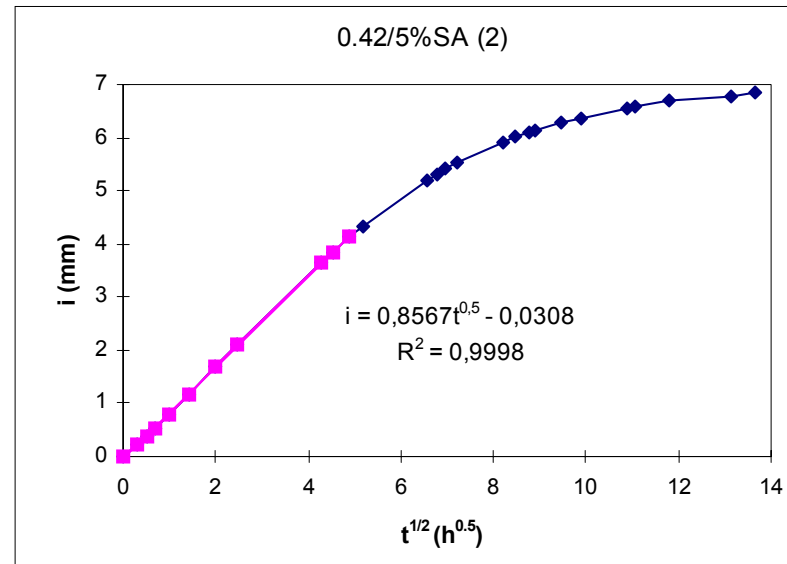
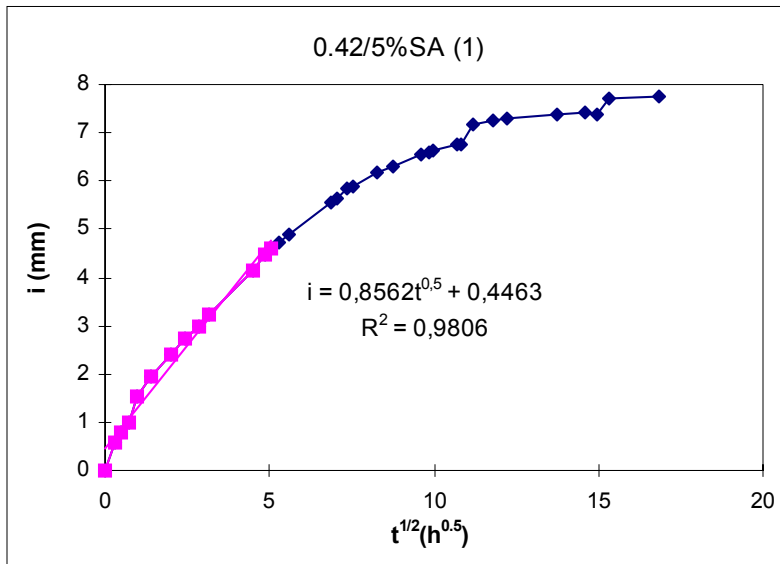
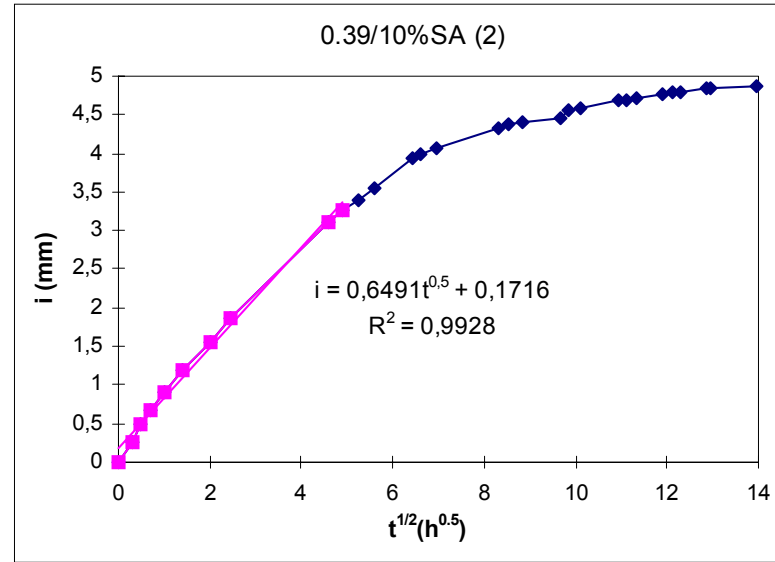
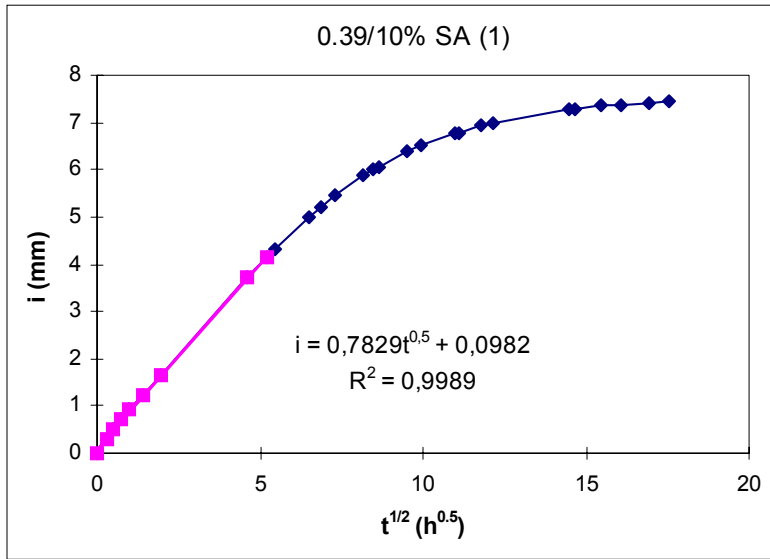
1. MC7 representa argamassa de cimento, areia normal e metacaulim calcinado a 700°C.
2. MC8 representa argamassa de cimento, areia normal e metacaulim calcinado a 800°C.
3. MC9 representa argamassa de cimento, areia normal e metacaulim calcinado a 900°C.
4. SA representa argamassa de cimento, areia normal e sílica ativa.
5.  $\phi 1$  representa a primeira medida de escoamento da mesa de Graff.
6.  $\phi 2$  representa a segunda medida de escoamento da mesa de Graff
7. valores em negrito foram excluídos porque foram considerados valores espúrios ( $> 3 \times$  desvio padrão)

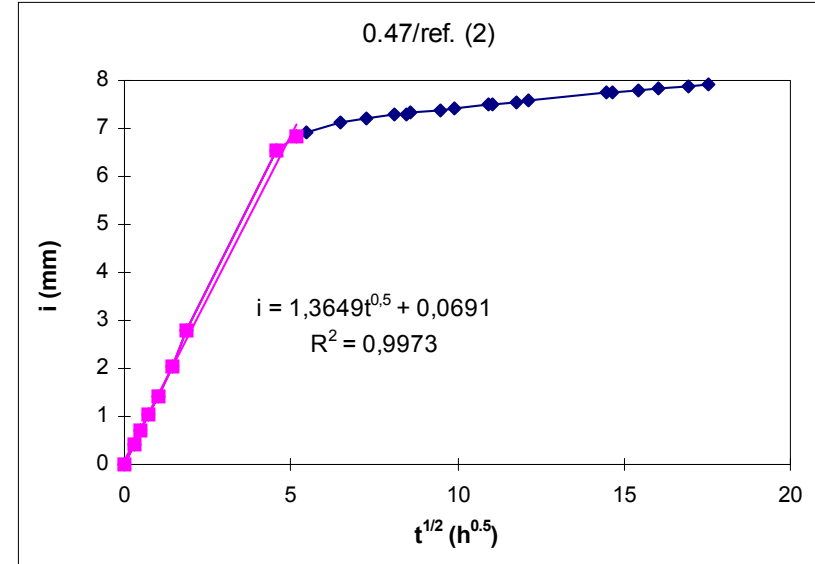
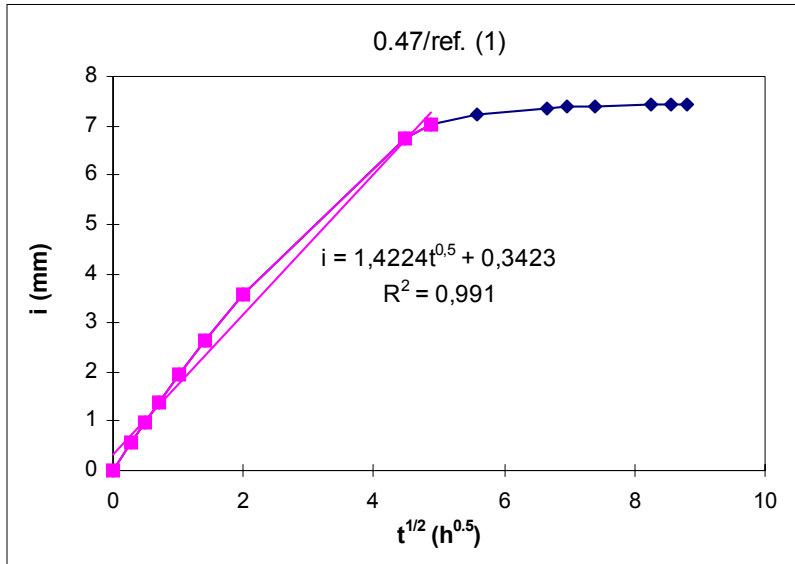
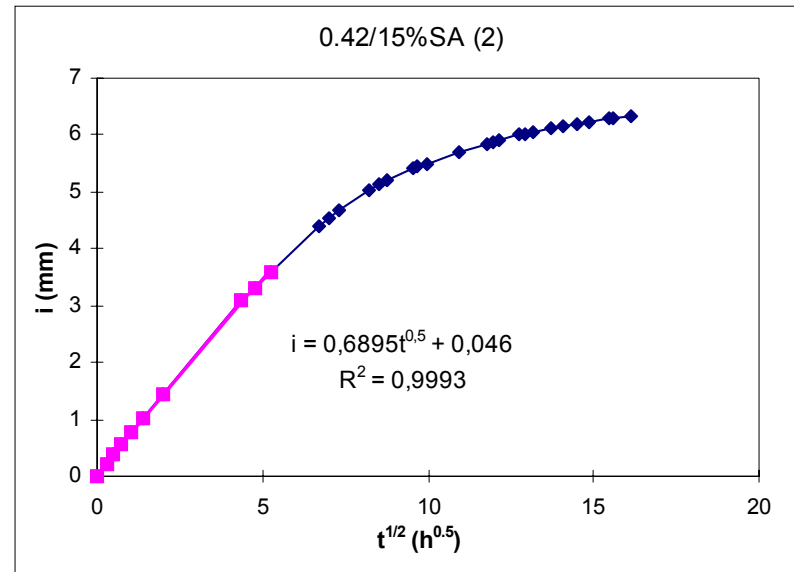
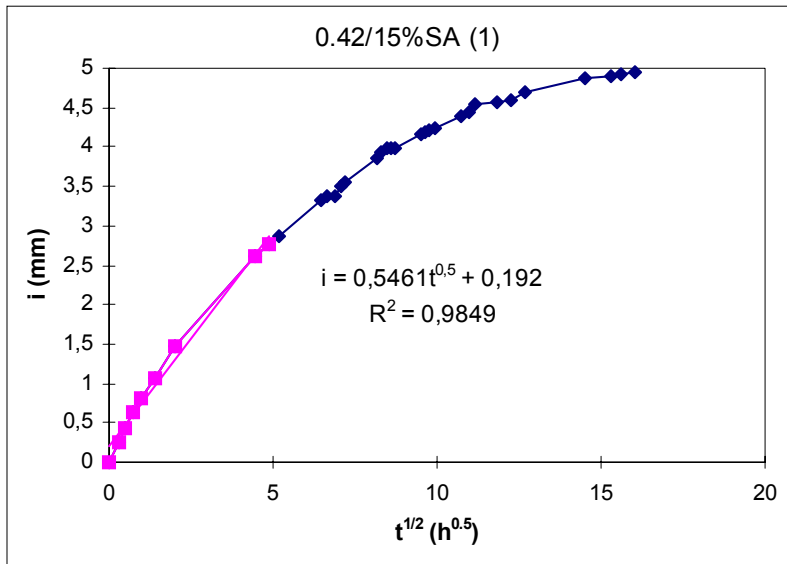


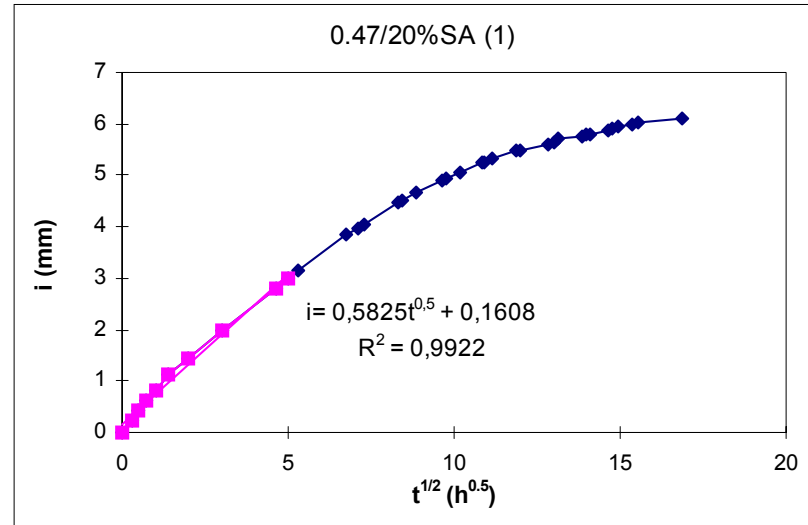
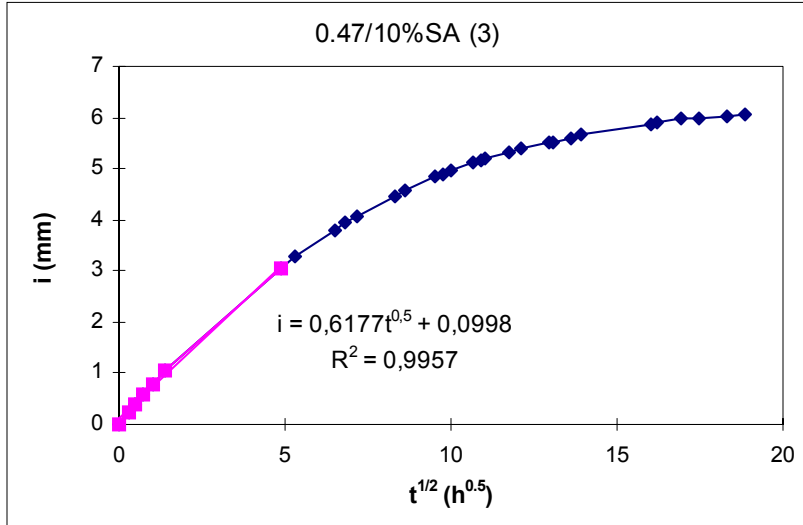
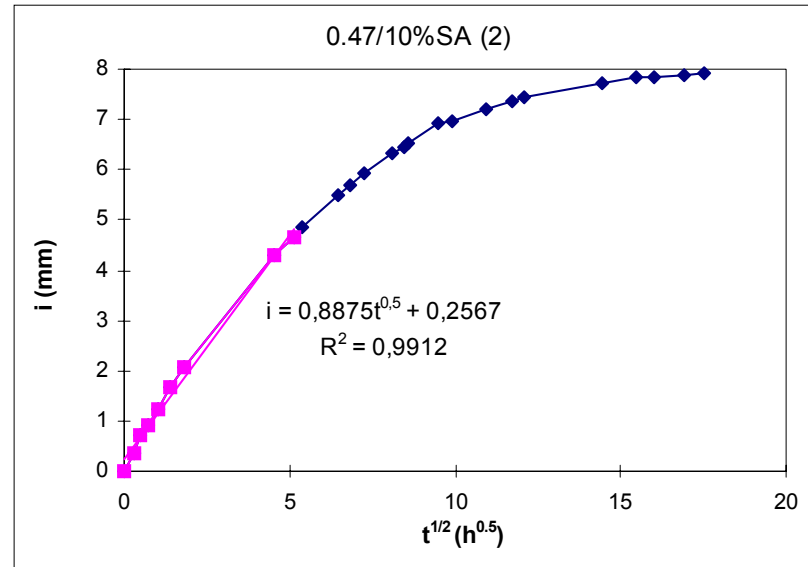
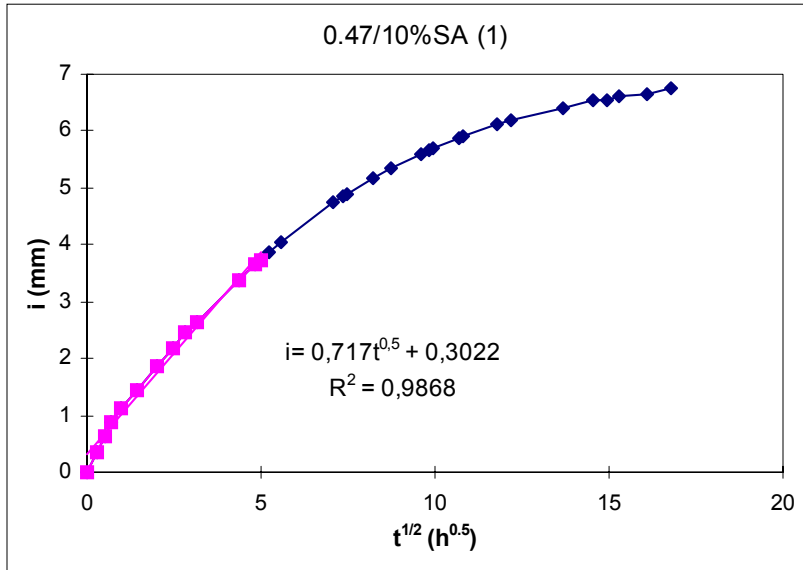


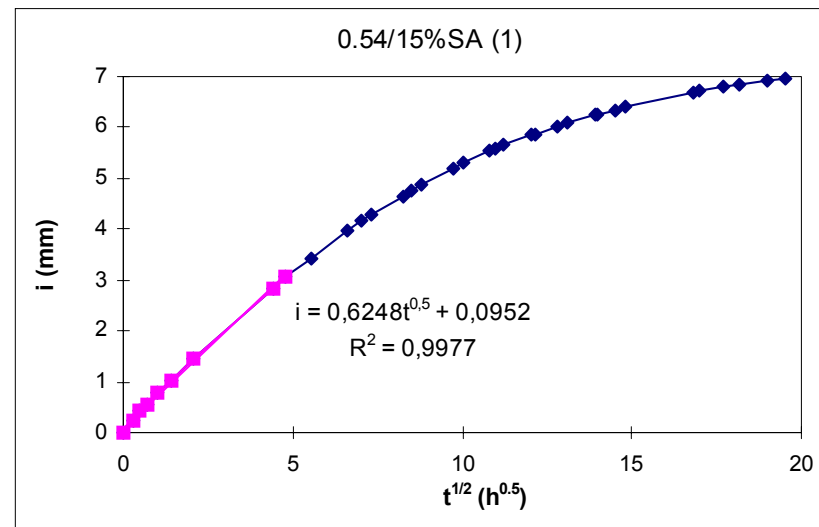
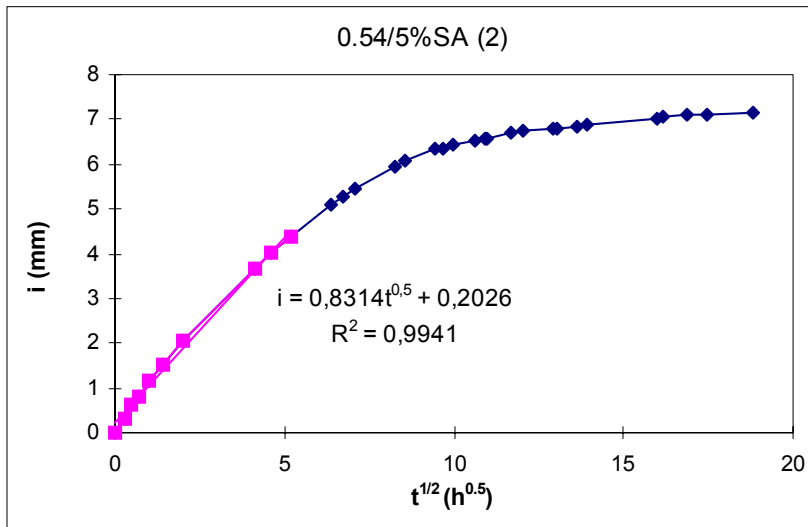
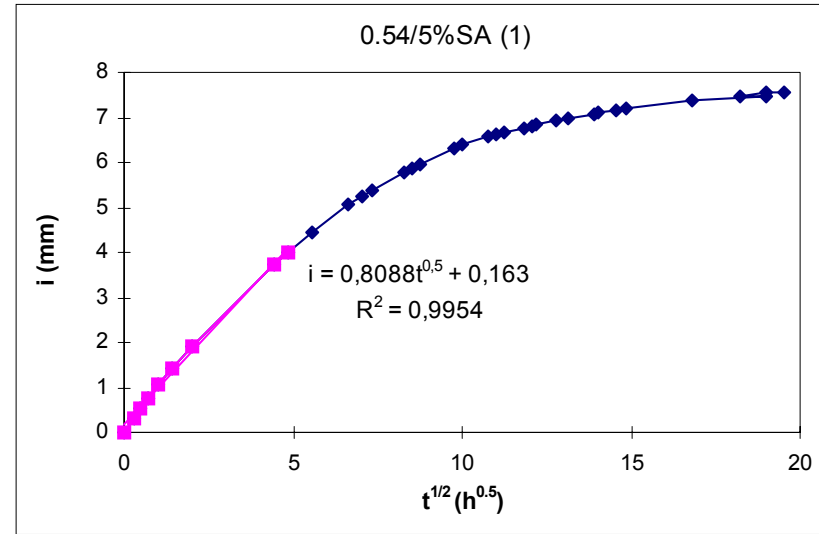
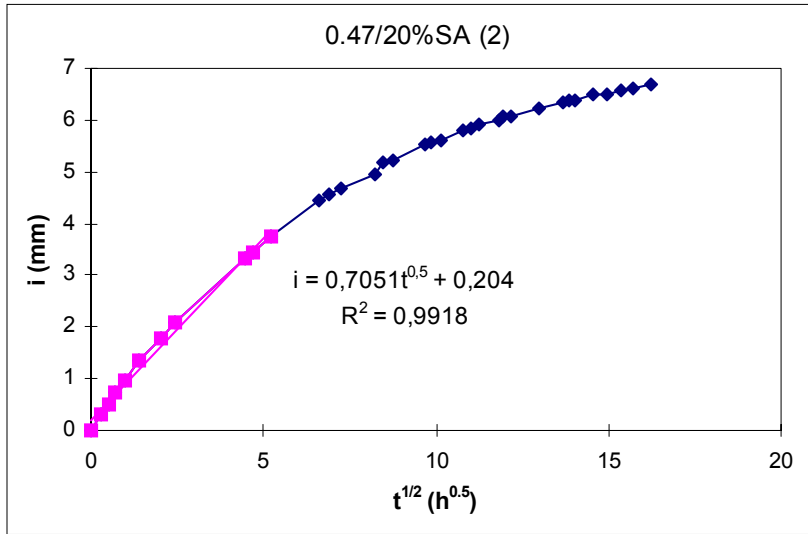
**ANEXO B**

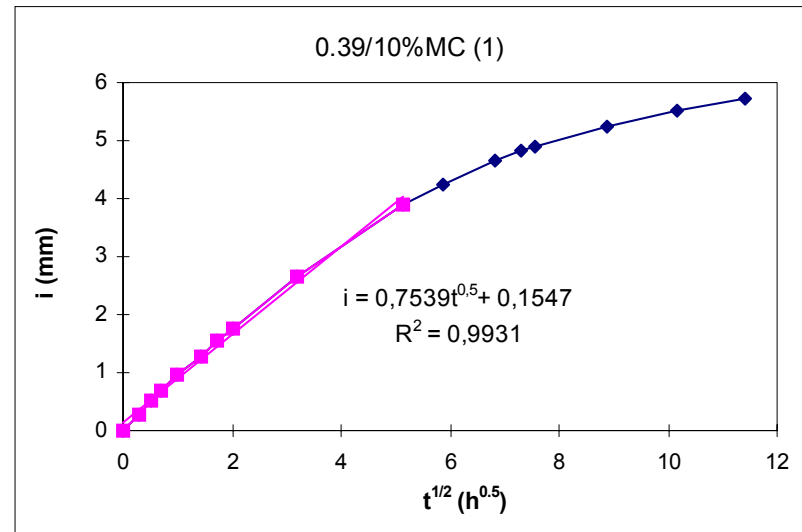
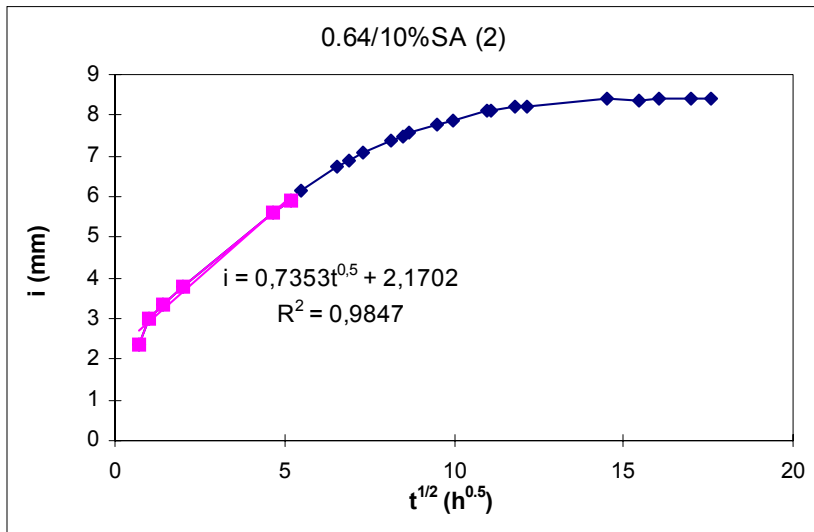
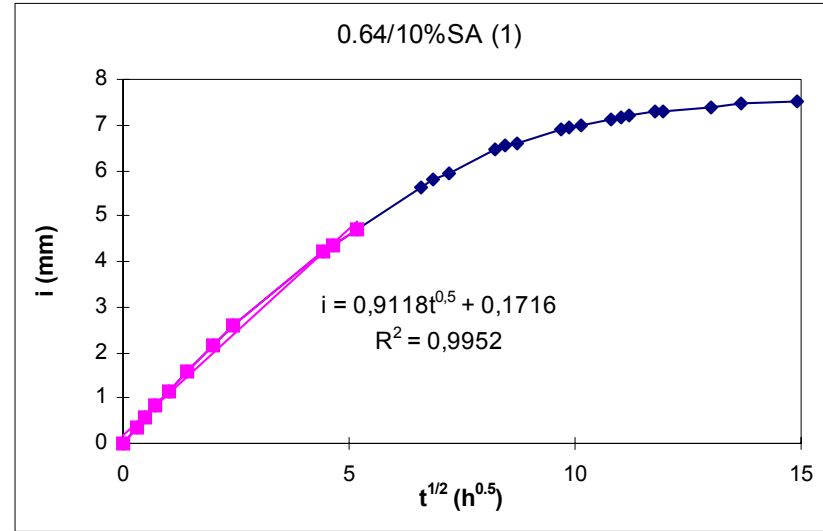
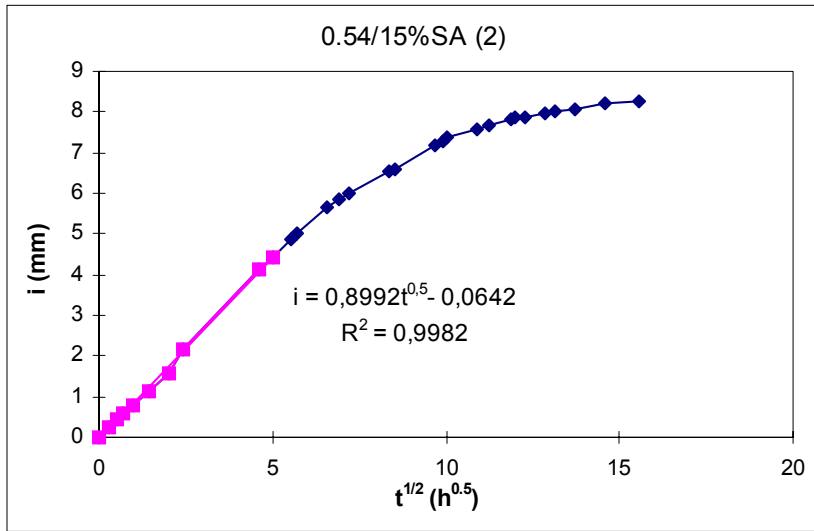
Gráficos de  $i$  versus  $t^{0.5}$  dos corpos-de-prova das misturas de concreto avaliadas no experimento

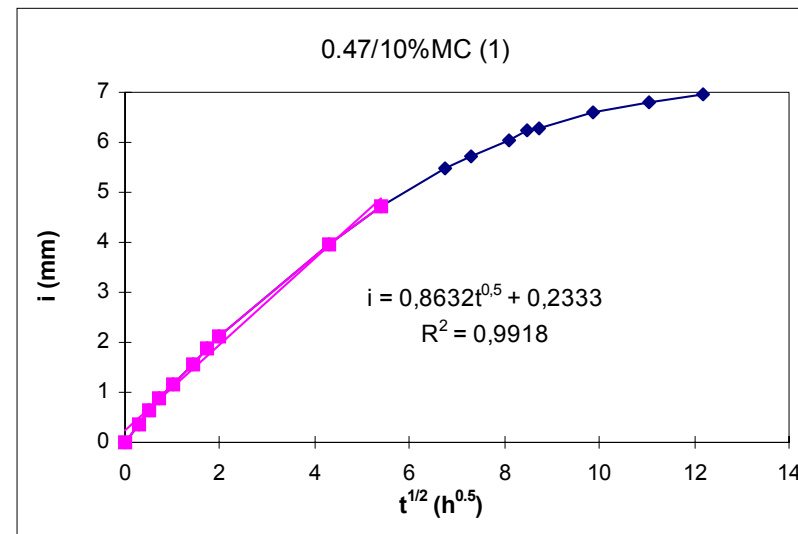
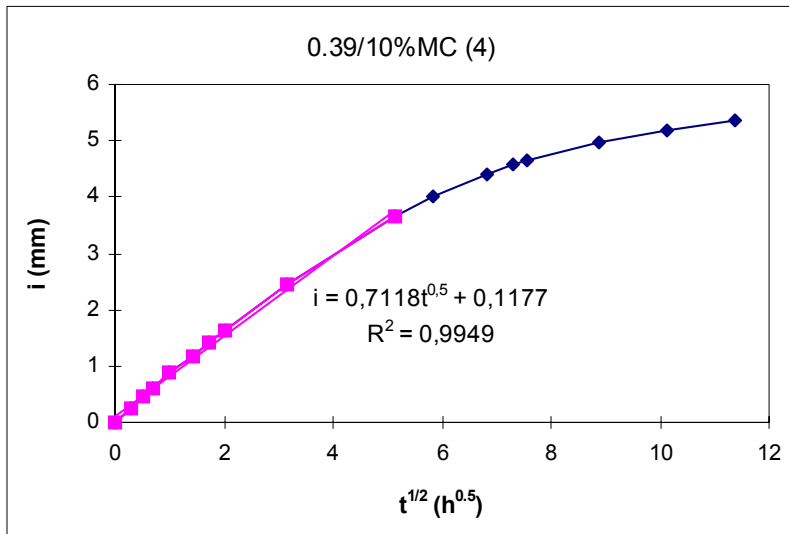
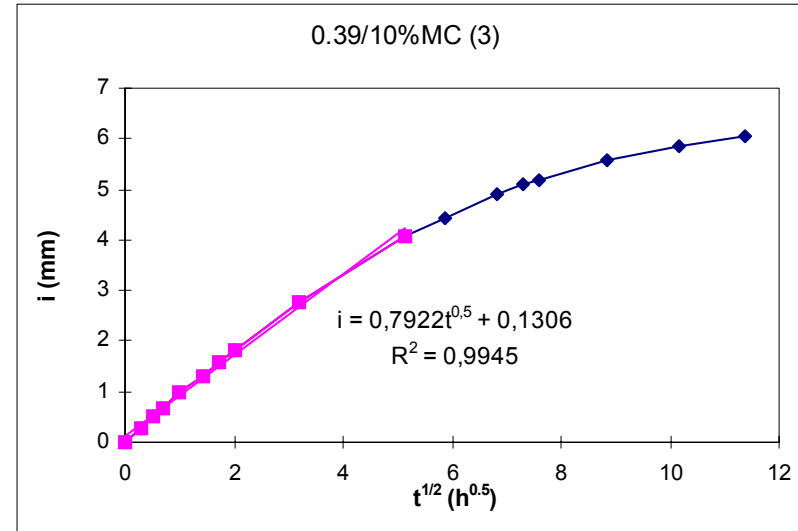
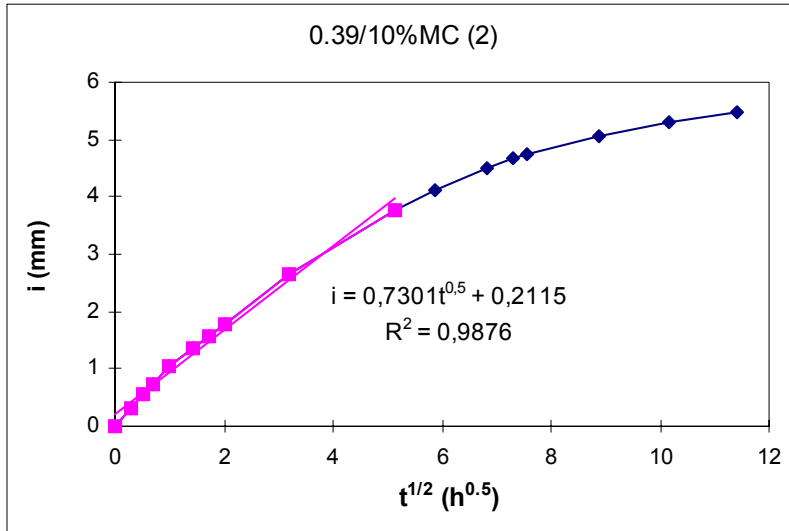




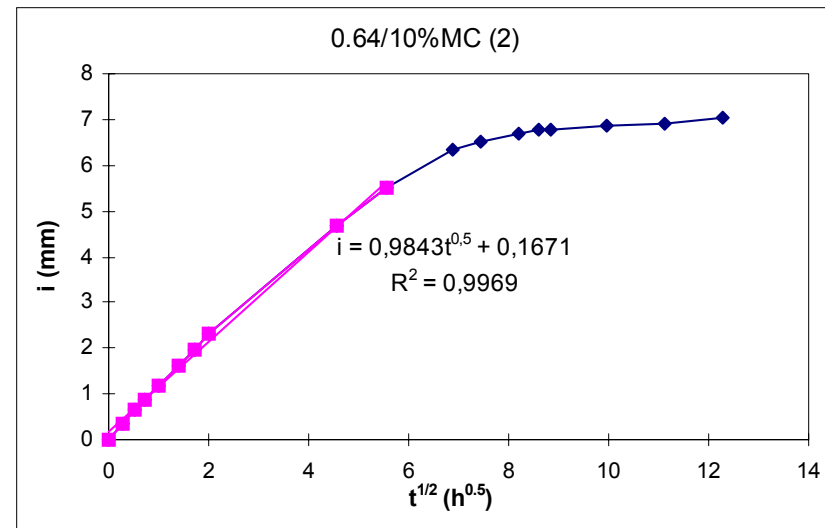
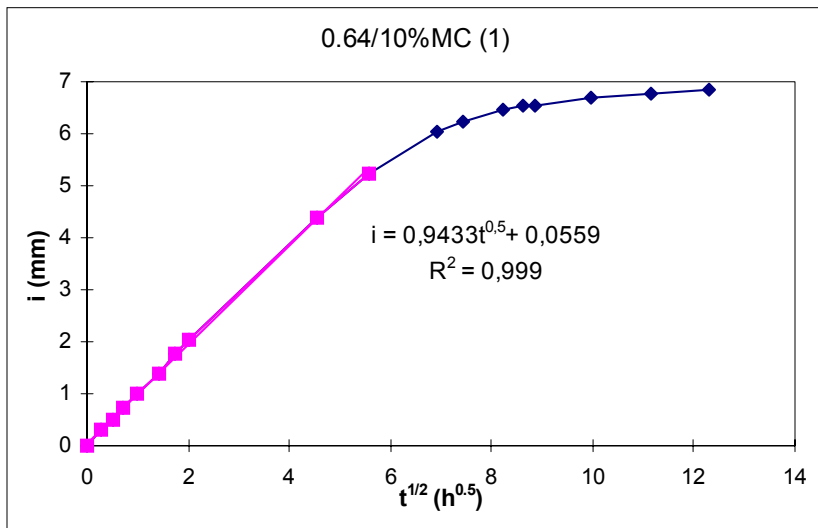
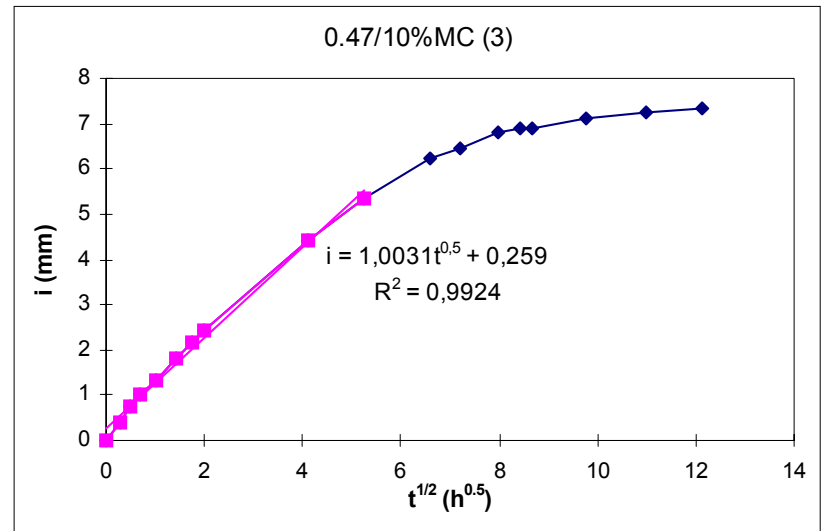
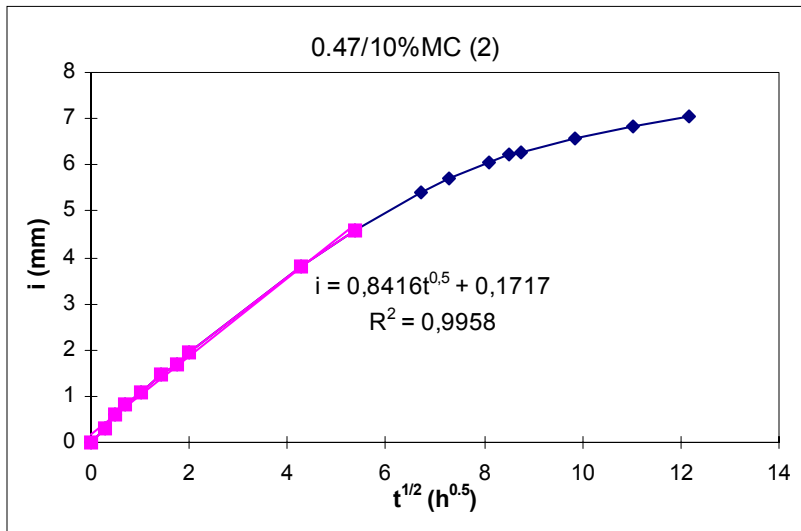


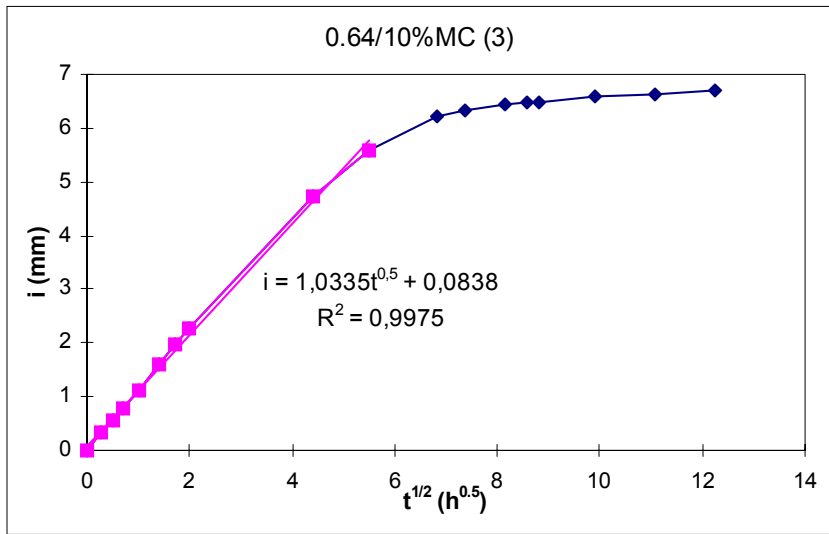












## **ANEXO C**

Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios e os previstos pelos modelo matemáticos

## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 28 DIAS

a/agl. real	a/agl. codificado	SA real	SA codificado	fc modelo	fc real	Diferença (%)
0,39	0,5	0	0,5	<b>35,67</b>	36,8	3,07
0,42	0,62	0	0,5	<b>30,66</b>		
0,47	0,82	0	0,5	<b>25,57</b>	22	-16,24
0,54	1,1	0	0,5	<b>21,56</b>		
0,64	1,5	0	0,5	<b>18,42</b>	19,2	4,05

a/agl. real	a/agl. codificado	SA real	SA codificado	fc modelo	fc real	Diferença (%)
0,39	0,5	5	0,75	<b>41,36</b>		
0,42	0,62	5	0,75	<b>37,02</b>	37,2	0,48
0,47	0,82	5	0,75	<b>32,61</b>		
0,54	1,1	5	0,75	<b>29,13</b>	29,6	1,60
0,64	1,5	5	0,75	<b>26,41</b>		

a/agl. real	a/agl. codificado	SA real	SA codificado	fc modelo	fc real	Diferença (%)
0,39	0,5	10	1	<b>42,48</b>	38,2	-11,22
0,42	0,62	10	1	<b>38,81</b>		
0,47	0,82	10	1	<b>35,08</b>	35,8	2,02
0,54	1,1	10	1	<b>32,13</b>		
0,64	1,5	10	1	<b>29,83</b>	29,2	-2,15

a/agl. real	a/agl. codificado	SA real	SA codificado	fc modelo	fc real	Diferença (%)
0,39	0,5	15	1,25	<b>41,78</b>		
0,42	0,62	15	1,25	<b>38,77</b>	42,6	8,98
0,47	0,82	15	1,25	<b>35,72</b>		
0,54	1,1	15	1,25	<b>33,31</b>	32,8	-1,54
0,64	1,5	15	1,25	<b>31,42</b>		

a/agl. real	a/agl. codificado	SA real	SA codificado	fc modelo	fc real	Diferença (%)
0,39	0,5	20	1,5	<b>40,17</b>		
0,42	0,62	20	1,5	<b>37,83</b>		
0,47	0,82	20	1,5	<b>35,45</b>	34,8	-1,86
0,54	1,1	20	1,5	<b>33,57</b>		
0,64	1,5	20	1,5	<b>32,10</b>		

Observações:

a/agl. real = relação água/aglomerante real

a/agl. codificado = relação água/aglomerante codificada, (Tabela 8)

SA real = teor de adição SA real, em porcentagem

SA codificado = teor de adição SA codificado, (Tabela 8)

fc modelo = resistência à compressão (28d) prevista pelo modelo, em MPa

fc real\* = resistência à compressão (28d) determinada no ensaio, em MPa

Diferença (%) =  $(1 - fc \text{ modelo} / fc \text{ real}) * 100$

\* valor médio

### TAXA DE ABSORÇÃO CAPILAR (MMH<sup>-0,50</sup>)

a/agl. real	a/agl.codificado	SA <sub>real</sub>	SA <sub>codificado</sub>	S <sub>modelo</sub>	S <sub>real</sub>	Diferença (%)
0,39	0,5	0	0,5	<b>1,29</b>	1,19	-8,36
0,42	0,62	0	0,5	<b>1,32</b>		
0,47	0,82	0	0,5	<b>1,35</b>	1,38	2,01
0,54	1,1	0	0,5	<b>1,38</b>		
0,64	1,5	0	0,5	<b>1,40</b>	1,13	-23,61

a/agl. real	a/agl.codificado	SA <sub>real</sub>	SA <sub>codificado</sub>	S <sub>modelo</sub>	S <sub>real</sub>	Diferença (%)
0,39	0,5	5	0,75	<b>0,84</b>		
0,42	0,62	5	0,75	<b>0,87</b>	0,84	-3,56
0,47	0,82	5	0,75	<b>0,90</b>		
0,54	1,1	5	0,75	<b>0,93</b>	0,81	-14,39
0,64	1,5	5	0,75	<b>0,95</b>		

a/agl. real	a/agl.codificado	SA <sub>real</sub>	SA <sub>codificado</sub>	S <sub>modelo</sub>	S <sub>real</sub>	Diferença (%)
0,39	0,5	10	1	<b>0,68</b>	0,71	4,07
0,42	0,62	10	1	<b>0,71</b>		
0,47	0,82	10	1	<b>0,74</b>	0,72	-3,31
0,54	1,1	10	1	<b>0,77</b>		
0,64	1,5	10	1	<b>0,79</b>	0,82	3,87

a/agl. real	a/agl.codificado	SA <sub>real</sub>	SA <sub>codificado</sub>	S <sub>modelo</sub>	S <sub>real</sub>	Diferença (%)
0,39	0,5	15	1,25	<b>0,61</b>		
0,42	0,62	15	1,25	<b>0,64</b>	0,61	-4,78
0,47	0,82	15	1,25	<b>0,67</b>		
0,54	1,1	15	1,25	<b>0,70</b>	0,77	9,64
0,64	1,5	15	1,25	<b>0,72</b>		

a/agl. real	a/agl.codificado	SA <sub>real</sub>	SA <sub>codificado</sub>	S <sub>modelo</sub>	S <sub>real</sub>	Diferença (%)
0,39	0,5	20	1,5	<b>0,57</b>		
0,42	0,62	20	1,5	<b>0,60</b>		
0,47	0,82	20	1,5	<b>0,63</b>	0,63	0,00
0,54	1,1	20	1,5	<b>0,66</b>		
0,64	1,5	20	1,5	<b>0,68</b>		

Observações:

a/agl. real = relação água/aglomerante real

a/agl.codificado = relação água/aglomerante codificada, (Tabela 8)

SA<sub>real</sub> = teor de adição SA real, em porcentagem

SA<sub>codificado</sub> = teor de adição SA codificado, (Tabela 8)

S<sub>modelo</sub> = taxa de absorção capilar prevista pelo modelo, em mm/h 0,5

S<sub>real</sub> = taxa de absorção capilar determinada no ensaio, em mm/h 0,5

Diferença (%) =  $(1 - S_{\text{modelo}} / S_{\text{real}}) * 100$

\* valor médio

### CARGA ELÉTRICA TOTAL PASSANTE

a/agl. real	a/agl.codificado	SA real	SA codificado	C modelo	C real	Diferença (%)
0,39	0,5	0	0,5	<b>5816,99</b>		
0,42	0,62	0	0,5	<b>5930,08</b>		
0,47	0,82	0	0,5	<b>6118,56</b>	6168,15	0,80
0,54	1,1	0	0,5	<b>6382,43</b>		
0,64	1,5	0	0,5	<b>6759,40</b>	6719,4	-0,60

a/agl. real	a/agl.codificado	SA real	SA codificado	C modelo	C real	Diferença (%)
0,39	0,5	5	0,75	<b>1695,78</b>		
0,42	0,62	5	0,75	<b>1771,17</b>	1797,73	1,48
0,47	0,82	5	0,75	<b>1896,82</b>		
0,54	1,1	5	0,75	<b>2072,74</b>	2006,88	-3,28
0,64	1,5	5	0,75	<b>2324,05</b>		

a/agl. real	a/agl.codificado	SA real	SA codificado	C modelo	C real	Diferença (%)
0,39	0,5	10	1	<b>666,54</b>	541,44	-23,11
0,42	0,62	10	1	<b>723,09</b>		
0,47	0,82	10	1	<b>817,33</b>	837,56	2,42
0,54	1,1	10	1	<b>949,26</b>		
0,64	1,5	10	1	<b>1137,74</b>	1202,8	5,41

a/agl. real	a/agl.codificado	SA real	SA codificado	C modelo	C real	Diferença (%)
0,39	0,5	15	1,25	<b>379,04</b>		
0,42	0,62	15	1,25	<b>424,27</b>	507,07	16,33
0,47	0,82	15	1,25	<b>499,67</b>		
0,54	1,1	15	1,25	<b>605,22</b>	672,5	10,00
0,64	1,5	15	1,25	<b>756,00</b>		
a/agl. real	a/agl.codificado	SA real	SA codificado	C modelo	C real	Diferença (%)
0,39	0,5	20	1,5	<b>324,89</b>		
0,42	0,62	20	1,5	<b>362,58</b>		
0,47	0,82	20	1,5	<b>425,41</b>	324,73	-31,00
0,54	1,1	20	1,5	<b>513,37</b>		
0,64	1,5	20	1,5	<b>639,02</b>		

Observações:

a/agl. real = relação água/aglomerante real

a/agl.codificado = relação água/aglomerante codificada, (Tabela 8)

SA real = teor de adição SA real, em porcentagem

SA codificado = teor de adição SA codificado, (Tabela 8)

C modelo = carga elétrica total passante prevista pelo modelo, em Coulomb

C real\* = carga elétrica total passante determinada no ensaio, em Coulomb

Diferença (%) =  $(1 - C \text{ modelo} / C \text{ real}) * 100$

\* valor médio

**ANEXO D**

Planilha de custo de produção das misturas de concreto produzidas com os materiais de construção disponíveis na área metropolitana de Belém

### 1. CUSTO DOS MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM (tonelada)

Cimento R\$ 130,00 / ton.

Areia R\$ 10,00 / ton.

Seixo R\$ 15,00 / ton.

Sílica ativa R\$ 400,00 / ton.

Adit. S.P. R\$ 6.500,00 / ton.

\* O custo da água potável não foi considerado no preço total do concreto

### 2. RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE PARA AS RESISTÊNCIAS ESPECIFICADAS ( $f_{c28}$ )

$f_{c28}$	(%) S.A	a/c codificado	a/c real	$f_{c28}$	(%) S.A	a/c codificado	a/c real
25MPa	0	0,85	<b>0,48</b>	35MPa	0	0,513	<b>0,39</b>
	5	1,84	<b>0,73</b>		5	0,697	<b>0,44</b>
30MPa	0	0,64	<b>0,43</b>		10	0,825	<b>0,47</b>
	5	1,013	<b>0,52</b>		15	0,886	<b>0,49</b>
	10	1,46	<b>0,63</b>		20	0,87	<b>0,48</b>
	15	2,06	<b>0,78</b>		40MPa	0	0,428
			5	0,532		<b>0,4</b>	
			10	0,575		<b>0,41</b>	
			15	0,564		<b>0,41</b>	
			20	0,506		<b>0,39</b>	



**3. CUSTO DAS MISTURAS DE CONCRETO POR M<sub>3</sub>**

Mistura	f <sub>c28</sub>	cimento (kg)	areia (kg)	seixo (kg)	S.A (kg)	adit S.P. (kg)	Custo (R\$)
0,48/0	25	431,63	482,22	1211,39	0	0	79,10495
0,73/5		227	652,06	1165,54	11,36	0	58,0577
0,43/0	30	435,27	479,12	1212,1	0	2,18	93,7278
0,52/5		376,31	525,94	1196	18,8155	0	79,6459
0,63/10		289,01	626,81	1214	28,901	0,4	76,2098
0,78/15		205,08	660,43	1147,31	30,762	0	62,77915
0,39/0	35	504,88	412,33	1215,84	0	2,52	104,3753
0,44/5		419,89	492	1208,78	20,9945	2,307	101,0307
0,47/10		447,43	468,5	1214,14	44,743	1,366	107,8392
0,49/15		416,62	494,66	1207,98	62,493	3,27	123,4791
0,48/20		431,63	482,22	1219,65	86,326	3,27	135,01425
0,37/0	40	544,53	367,38	1208,8	0	2,725	110,3072
0,40/5		486,27	431,66	1216,8	24,3135	4,03	121,7041
0,41/10		467,95	449,61	1216,3	46,795	3,56	125,4321
0,41/15		467,95	449,61	1216,3	70,1925	4,83	143,0461
0,39/20		504,88	412,33	1215,84	100,976	7,58	177,6557

\* As quantidades de aditivo SP foram determinadas por interpolação

**ANEXO E**

Resultados da carga elétrica total passante dos corpos-de-prova das misturas utilizadas no experimento

Mistura	I <sub>0</sub>	I <sub>30</sub>	I <sub>60</sub>	I <sub>90</sub>	I <sub>120</sub>	I <sub>150</sub>	I <sub>180</sub>	I <sub>210</sub>	I <sub>240</sub>	I <sub>270</sub>	I <sub>300</sub>	I <sub>330</sub>	I <sub>360</sub>	Carga passante (coulombs)
<b>0,39/10%SA</b>	<b>18,88</b>	<b>19,25</b>	<b>19,7</b>	<b>20,1</b>	<b>20,41</b>	<b>20,67</b>	<b>20,99</b>	<b>21,22</b>	<b>21,37</b>	<b>21,47</b>	<b>21,65</b>	<b>21,7</b>	<b>21,7</b>	<b>447,876</b>
0,39/10%SA	32,34	30,99	30,52	29,91	29,43	29,17	29,17	28,9	28,6	28,68	28,5	28,16	28,04	633,996
<b>0,42/5%SA</b>	<b>66,52</b>	<b>62,35</b>	<b>60,04</b>	<b>58,81</b>	<b>59,34</b>	<b>58,7</b>	<b>58,81</b>	<b>58,87</b>	<b>59</b>	<b>59,04</b>	<b>58,82</b>	<b>58,48</b>	<b>58,32</b>	<b>1286,424</b>
0,42/5%SA	118,6	112,53	109,53	108,73	107,81	107,59	106,62	106,2	105,35	104,23	103,17	101,6	100,28	2309,04
<b>0,42/15%SA</b>	<b>14,71</b>	<b>15,06</b>	<b>15,35</b>	<b>15,63</b>	<b>15,89</b>	<b>16,14</b>	<b>16,23</b>	<b>16,37</b>	<b>16,47</b>	<b>16,51</b>	<b>16,56</b>	<b>16,55</b>	<b>16,47</b>	<b>346,23</b>
0,42/15%SA	31,42	31,79	32	32,04	31,9	31,52	31,08	30,72	30,39	29,95	29,75	29,52	29,38	667,908
<b>0,47/ref</b>	<b>272</b>	<b>261</b>	<b>264</b>	<b>269</b>	<b>275</b>	<b>277</b>	<b>281</b>	<b>284</b>	<b>283</b>	<b>283</b>	<b>283</b>	<b>282</b>	<b>279</b>	<b>5971,5</b>
0,47/ref.	306	293	290	294	297	296	297	297	295	293	293	292	292	6364,8
<b>0,47/10%SA</b>	<b>45,38</b>	<b>43,97</b>	<b>43,69</b>	<b>43,68</b>	<b>43,86</b>	<b>44,14</b>	<b>44,3</b>	<b>44,4</b>	<b>44,31</b>	<b>44,31</b>	<b>44,14</b>	<b>43,86</b>	<b>43,5</b>	<b>952,38</b>
0,47/10%SA	37,31	38,73	39,27	39,64	39,84	40,12	40,36	40,48	40,41	40,33	40,36	40,22	40,13	861,264
<b>0,47/10%SA</b>	<b>37,89</b>	<b>37,89</b>	<b>37,82</b>	<b>37,33</b>	<b>37,11</b>	<b>36,82</b>	<b>36,81</b>	<b>36,55</b>	<b>36,32</b>	<b>36,07</b>	<b>35,77</b>	<b>35,39</b>	<b>35,21</b>	<b>792,774</b>
0,47/10%SA	37,8	35,06	35,2	34,63	34,42	34,51	34,66	34,16	34,12	34	33,86	33,21	33,01	743,823
<b>0,47/20%SA</b>	<b>14,13</b>	<b>14,61</b>	<b>14,86</b>	<b>15,02</b>	<b>15,08</b>	<b>15,06</b>	<b>15,09</b>	<b>15,06</b>	<b>14,95</b>	<b>14,87</b>	<b>14,84</b>	<b>14,71</b>	<b>14,58</b>	<b>321,309</b>
0,47/20%SA	14,68	14,55	14,78	15,04	15,19	15,26	15,36	5,42	15,39	15,47	15,43	15,39	15,36	310,14
<b>0,54/5%SA</b>	<b>118,56</b>	<b>106,69</b>	<b>101,59</b>	<b>101,39</b>	<b>100,74</b>	<b>99,19</b>	<b>98,86</b>	<b>98,04</b>	<b>93,8</b>	<b>92,23</b>	<b>90,8</b>	<b>88,34</b>	<b>86,25</b>	<b>2113,335</b>
0,54/5%SA	102,67	90,02	88,75	87,55	87,64	88,19	88,74	87,4	87,49	86,78	86,06	84,25	83,17	1900,422
<b>0,54/15%SA</b>	<b>39,08</b>	<b>40,21</b>	<b>40,65</b>	<b>40,38</b>	<b>40,45</b>	<b>40,66</b>	<b>40,46</b>	<b>40,13</b>	<b>39,82</b>	<b>39,54</b>	<b>39,22</b>	<b>38,74</b>	<b>38,45</b>	<b>862,245</b>
0,54/15%SA	22,91	23,06	23,2	23,21	23,14	22,9	22,83	22,02	21,97	21,62	21,44	21,01	20,67	482,742
<b>0,64/ref.</b>	<b>340</b>	<b>311</b>	<b>319</b>	<b>324</b>	<b>328</b>	<b>328</b>	<b>329</b>	<b>321</b>	<b>320</b>	<b>316</b>	<b>313</b>	<b>307</b>	<b>304</b>	<b>6908,4</b>
0,64/ref.	315	300	312	317	319	319	316	303	297	290	284	276	275	6530,4
<b>0,64/10%SA</b>	<b>50,05</b>	<b>51,16</b>	<b>51,53</b>	<b>51,57</b>	<b>51,76</b>	<b>51,67</b>	<b>51,79</b>	<b>51,72</b>	<b>51,58</b>	<b>51,51</b>	<b>51,84</b>	<b>51,54</b>	<b>51,23</b>	<b>1112,958</b>
0,64/10%SA	64,25	63,13	62,41	62,03	61,65	60,88	60,54	60,46	58,27	57,27	56,71	55,43	54,45	1292,634

Observações:

1. Os valores de corrente elétrica estão miliamperes
2. I<sub>0</sub> representa a medida de corrente imediatamente após a aplicação da voltagem
3. I<sub>t</sub> representa a medida de corrente após t minutos de aplicação da voltagem

