UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ÁREA INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Escola de Engenharia de São Carlos
Instituto de Física de São Carlos
Instituto de Química de São Carlos

**DOSAGEM DE CONCRETO DE ELEVADO
DESEMPENHO PELO PROCESSO DA CALDA DE
CIMENTO**

Rosa Cristina Cecche Lintz

Dissertação apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da E.E.S.C., I.F.S.C. e I.Q.S.C., Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017230

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bento de Hanai

São Carlos
1997

Ciência e Engenharia de Materiais

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Instituto de Física de São Carlos

Instituto de Química de São Carlos

CAIXA POSTAL - 369

CEP 13560-970 - São Carlos/SP - Brasil

Tel/Fax: (016) 274-9285

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ROSA CRISTINA CECHE LINTZ APRESENTADA A ÁREA INTERUNIDADES EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA EESC-IFSC-IQSC, UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO, EM 30/09/1997.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. João Bento de Hanai (SET/EESC/USP)

Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti (FEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Libório (SAP/EESC/USP)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO DE ELEVADO DESEMPENHO.....	5
2.1 Materiais componentes.....	7
2.2.1 Agregados.....	7
2.2.2 Cimento.....	18
2.2.3 Sílica ativa.....	23
2.2.4 Superplastificante.....	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1 Materiais.....	53
3.1.1 Cimento.....	53
3.1.2 Agregados.....	55
3.1.4 Superplastificante.....	57
3.1.5 Sílica ativa.....	57
3.2 Processo de dosagem.....	58
3.2.1 Introdução.....	58
3.2.2 Descrição e comentários sobre o processo de dosagem.....	60

3.2.3 Descrição das formas.....	65
3.2.4 Preparação das caldas, argamassas e concretos.....	68
3.2.5 Medida do tempo de escoamento da calda.....	71
3.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	72
 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 76
4.1 Introdução.....	76
4.2 Concreto de referência (etapas a e b).....	78
4.3 Calda de referência (etapa c).....	79
4.4 Dosagem de superplastificante nas caldas do CED (etapa e).....	79
4.5 Dosagem de água nas caldas de CED (etapa f).....	81
4.6 Escolha das caldas do CED.....	88
4.6.1 Resistência à compressão das argamassas e concretos de elevado desempenho	89
4.6.2 Calibração da fórmula de Feret.....	97
 5 CONCLUSÕES.....	 109
5.1 Críticas e sugestões.....	112
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- Representação esquemática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto.....	6
FIGURA 2.2- Influência do tamanho do agregado e mineralogia sobre a resistência do concreto à compressão	16
FIGURA 2.3- Influência do tipo de agregado na microfissuração e no comportamento elástico do concreto	17
FIGURA 2.4- Influência do teor de C_3A do cimento e da origem da sílica ativa na relação a/c para uma mesma trabalhabilidade	20
FIGURA 2.5- Influência do teor de C_3A do cimento e da origem da sílica ativa na resistência das argamassas	21
FIGURA 2.6- Resistência à compressão dos CEDs versus consumo de cimento	22
FIGURA 2.7- Esquema da produção de silício	26
FIGURA 2.8- Reações químicas envolvidas na produção de silício	27
FIGURA 2.9- Situação da sílica ativa em relação aos demais materiais cimentícios	30
FIGURA 2.10- Distribuição de tamanhos de grãos de uma sílica ativa	31
FIGURA 2.11- Composição granulométrica dos diferentes tipos de sílica ativa	32
FIGURA 2.12- Quantidade de $Ca(OH)_2$ estimada em função do tempo de hidratação em pastas de cimento e de cimento + 10% de sílica ativa, a partir de termogramas	39
FIGURA 2.13- Teor de hidróxido de cálcio de pastas hidratadas com diferentes teores de sílica ativa	39
FIGURA 2.14- Correlação entre o teor de água não evaporável e grau de hidratação pela análise de raios X	40

FIGURA 2.15- A influência do tempo de adição do superplastificante na trabalhabilidade das pastas de cimento	47
FIGURA 2.16- Modelo de adsorção do ânion naftaleno na superfície do grão de sílica ativa.....	50
FIGURA 2.17- O efeito da dosagem de superplastificante na redução do teor de água do concreto	52
FIGURA 3.1- Ensaio pelo frasco de Chapmann	56
FIGURA 3.2- Funil empregado	66
FIGURA 3.3- Formas cúbicas para argamassa	67
FIGURA 3.4- Formas cúbicas para concreto	67
FIGURA 3.5- Introdução de materiais na argamassadeira	69
FIGURA 3.6- Materiais empregados na confecção dos CEDs.....	70
FIGURA 3.7- Materiais empregados na confecção dos CEDs	71
FIGURA 3.8- Conjunto béquer-funil	72
FIGURA 3.9- Fabricação dos CEDs	73
FIGURA 3.10- Fabricação dos CEDs	73
FIGURA 3.11- Moldagem dos corpos de prova de CEDs	74
FIGURA 3.12- Moldagem dos corpos de prova de CEDs	74
FIGURA 3.13- Ensaio de resistência à compressão das argamassas	75
FIGURA 3.14- Ensaio de resistência à compressão dos CEDs	75
FIGURA 4.1- Etapas do processo de dosagem	77
FIGURA 4.2- Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 0% sílica ativa	82
FIGURA 4.3- Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 5% sílica ativa	83

FIGURA 4.4-	Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 10%	
	sílica ativa	84
FIGURA 4.5-	Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 15%	
	sílica ativa	85
FIGURA 4.6-	Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 20%	
	sílica ativa	86
FIGURA 4.7-	Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 25%	
	sílica ativa	87
FIGURA 4.8-	Resistência à compressão dos CEDs (cimento A)	92
FIGURA 4.9-	Resistência à compressão dos CEDs (cimento B)	93
FIGURA 4.10-	Resistência à compressão dos CEDs (cimento C)	94
FIGURA 4.11-	Resistência à compressão dos CEDs (cimento D)	95
FIGURA 4.12-	Resistência à compressão dos CEDs (cimento E)	96
FIGURA 4.13-	Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais	99
FIGURA 4.14-	Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais	100
FIGURA 4.15-	Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais	101
FIGURA 4.16-	Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais	102
FIGURA 4.17-	Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais	103
FIGURA 4.18-	Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret	104
FIGURA 4.19-	Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret	105
FIGURA 4.20-	Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret	106
FIGURA 4.21-	Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret	107

FIGURA 4.22- Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret
.....108

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1- Propriedades mecânicas e físicas das rochas	8
TABELA 2.2- Propriedades do concreto endurecido	8
TABELA 2.3- Influência do agregado graúdo no concreto	13
TABELA 2.4- Composição do concreto de alta resistência	14
TABELA 2.5- Resultados de ensaios com CED	15
TABELA 2.6- Influência do teor de C_3A na trabalhabilidade de argamassas	19
TABELA 2.7- Composição química de sílicas ativas diversas quanto à origem e produção	28
TABELA 2.8- Produção estimada de sílica ativa	29
TABELA 2.9- Variação diária na composição química de 32 amostras	30
TABELA 2.10- Área específica dos diversos tipos de sílica ativa	33
TABELA 3.1- Caracterização física dos cimentos	54
TABELA 3.2- Caracterização química dos cimentos	54
TABELA 3.3- Massa específica dos agregados miúdos	55
TABELA 3.4- Massa específica e absorção dos agregados	57
TABELA 3.5- Características do superplastificante	57
TABELA 3.6- Análise química da sílica ativa	58
TABELA 3.7- Características físicas da sílica ativa	58
TABELA 4.1- Composição do “concreto de referência”	78
TABELA 4.2- Materiais componentes da “calda de referência”	79
TABELA 4.3- Condições de operação no preparo da calda com 0% de sílica ativa	82

TABELA 4.4- Composições resultantes das pastas com 0% de sílica ativa (etapa e)	82
TABELA 4.5- Condições de operação no preparo da calda com 5% de sílica ativa ..	83
TABELA 4.6- Composições resultantes das pastas com 5% de sílica ativa (etapa e)	83
TABELA 4.7- Condições de operação no preparo da calda com 10% de sílica ativa	84
TABELA 4.8- Composições resultantes das pastas com 10% de sílica ativa (etapa e)	84
TABELA 4.9- Condições de operação no preparo da calda com 15% de sílica ativa	85
TABELA 4.10- Composições resultantes das pastas com 15% de sílica ativa (etapa e)	85
TABELA 4.11- Condições de operação no preparo da calda com 20% de sílica ativa	86
TABELA 4.12- Composições resultantes das pastas com 20% de sílica ativa (etapa e).....	86
TABELA 4.13- Condições de operação no preparo da calda com 25% de sílica ativa	87
TABELA 4.14- Composições resultantes das pastas com 25% de sílica ativa (etapa e).....	87
TABELA 4.15- Composições resultantes das pastas dos CEDs	81
TABELA 4.16- Traço das argamassas de elevado desempenho para calibração da fórmula de Feret	90
TABELA 4.17- Traço dos CEDs para todos os tipos de cimentos citados	91
TABELA 4.18- Resistências à compressão dos CEDs (cimento A)	92

TABELA 4.19- Resistências à compressão dos CEDs (cimento B)	93
TABELA 4.20- Resistências à compressão dos CEDs (cimento C)	94
TABELA 4.21- Resistências à compressão dos CEDs (cimento D)	95
TABELA 4.22- Resistências à compressão dos CEDs (cimento E)	96
TABELA 4.23- Calibração da fórmula de Feret (cimento A)	99
TABELA 4.24- Calibração da fórmula de Feret (cimento B)	100
TABELA 4.25- Calibração da fórmula de Feret (cimento C)	101
TABELA 4.26- Calibração da fórmula de Feret (cimento D)	102
TABELA 4.27- Calibração da fórmula de Feret (cimento E)	103
TABELA 4.28- Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento A)	104
TABELA 4.29- Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento B)	105
TABELA 4.30- Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento C)	106
TABELA 4.31- Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento D)	107
TABELA 4.32- Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento E)	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/C -	Água/Cimento
ASTM -	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
CED-	Concreto de elevado desempenho
CPA HP-	Cimento Portland Artificial- Haute Performance
CPC-	Cimento Portland Comum
C/S-	CaO/SiO ₂
Ec -	Módulo de elasticidade
fcm-	Resistência média à compressão (MPa)
fc -	Resistência à compressão (MPa)
INT-	Instituto Nacional de Tecnologia
ISO-	International Standard Organization
ITERS-	Instituto de Tecnologia do Rio Grande do Sul
MEV-	Microscópio Eletrônico de Varredura
min-	Minutos
MF-	Derivados Sulfonados de Melamina
MS -	Sílica ativa
NF-	Derivados Sulfonados de Naftaleno
RILEM-	Reunion Internationale des Laboratories d'et de Recherches sur les Matériaux et les Structures
s-	Segundos
SP -	Superplastificante
S/C -	Sílica ativa / Cimento
SP-	Superplastificante
t-	Tempo
Y _c -	Massa Específica do Cimento

RESUMO

Nesta dissertação são apresentados um método de dosagem de concreto de elevado desempenho baseado na reologia da calda de cimento e os resultados de sua aplicação para alguns materiais brasileiros. O método baseia-se em dois modelos teóricos: modelo reológico que trata da viscosidade de uma suspensão de grãos polidispersados e fórmula empírica para previsão da resistência do concreto considerando a resistência da argamassa padrão. O método apresenta como vantagens a economia em mão de obra e materiais, uma vez que manipula somente caldas de cimento. Por outro lado, permite chegar a misturas de concreto auto-adensáveis quando frescos e de alta resistência quando endurecida. A aplicação do método aos materiais brasileiros é feita com algumas modificações em relação ao método original: corpos de prova de formato cúbico, cura térmica do concreto em água em ebulição, emprego de cimento Portland comum, etc. As principais conclusões resultantes desta aplicação são: precisão da fórmula de previsão da resistência do concreto, fixação do teor ótimo de superplastificante e de adição mineral, confirmação do teor ótimo de sílica ativa nos CEDs, eficácia da cura térmica em água em ebulição, eficiência do emprego de corpos de prova cúbico e diferente comportamento dos diversos materiais empregados.

ABSTRACT

In this dissertation are presented a mix method for high performance concrete based on rheology of cement pastes and on results of its application to some brazilian materials. The method is based on two theoretical models: a rheological model dealing with the viscosity of a polydispersed suspension and a empirical formula that allows the prediction of compressive strength considering the compressive strength of standard mortar. The method presents as advantage the economy of manual work and materials since just handles binding pastes. Otherwise it allows to obtain self-densified mistures when concrete is fresh strenght when concrete is hardened. The method application to brazilian materials is done with some changes in relation to its originality: cubic specimen, thermal curing of concrete in boiling water, use of common Portland cement, etc. The main conclusions drawn after this application are: accuracy of the prediction of concrete strenght by the extended formula, determination of the best percentage of mineral and chemical addition, ratification of the best percentage of condensed silica fume in high performance concrete mixtures, effectiveness of the thermal curing of concrete en boiling water, effectiveness in the use of cubic casting mould and different behavior for several materials applied in this research.

1. INTRODUÇÃO

Os tecnologistas do concreto de todo o mundo passaram a contar, a partir dos anos 70, com dois novos produtos capazes de trazer mudanças muito grandes na indústria do concreto até então, rotineira. Trata-se das adições minerais ultrafinas, como por exemplo, a sílica ativa e dos aditivos superplastificantes.

Antes desta época já se produzia concretos de alta resistência, a um custo muito elevado, empregando procedimentos não usuais, tais como prensagem do concreto fresco, centrifugação, etc., e mais tarde um pouco, com uso de resinas poliméricas.

Hoje em dia com o uso dos dois componentes citados acima consegue-se um acréscimo muito grande na compacidade dos compósitos de cimento, devido a diminuição da relação água/cimento e aos efeitos pozzolânicos e de filler da adição mineral. Essa baixa porosidade conseguida repercute não só nas propriedades mecânicas, como o módulo de deformação longitudinal, resistências e deformações de longo prazo, como também na durabilidade do produto, que é função direta de sua impermeabilidade. Assim, estes concretos, antes de serem denominados de alta resistência, são conhecidos como concretos de elevado desempenho (CEDs).

O uso do aditivo superplastificante, somente, permite uma redução de água nos concretos correntes, de 180 l/m³ a 130 - 140 l/m³ caracteristicamente, elevando a resistência à compressão, aos 28 dias, ao patamar de 70 - 80 MPa, quando se trabalha com cimento de alta resistência. Quanto ao uso da adição mineral, como a sílica ativa, sozinha sem o superplastificante, ela apresenta uma pequena melhora na resistência do concreto quando em baixo teor adicionado. Em compensação quando se emprega o aditivo e a adição, em teores otimizados, atinge-se o domínio de resistência dos concretos de elevado desempenho, isto é, de 80 a 120 MPa.

A outra vantagem em acrescentar o superplastificante e a adição mineral ultrafina às misturas de concreto está na trabalhabilidade obtida para o concreto fresco, que juntamente com a resistência mecânica se constituem nos fundamentos básicos da dosagem de concreto. Para consumos de concreto acima de 400 kg/m^3 , teor de adição mineral 10%, relação água/cimento na faixa 0,28 a 0,35 e teor de superplastificante de 1 a 2%, consegue-se misturas de concreto com abatimento acima de 200 mm, isto é, concretos auto-adensáveis.

Nesta dissertação apresenta-se um processo de dosagem de concretos de elevado desempenho desenvolvido do LCPC de Paris, a partir de 1985, pelo jovem engenheiro François de Larrard, como parte de sua tese de Doutorado. Em seguida é feita uma tentativa de aplicação deste processo de dosagem utilizando adaptações aos métodos de ensaio e materiais brasileiros.

Em um primeiro tempo o processo consiste em, uma vez conhecida a composição de um concreto de boa qualidade, dosar uma pasta com a mesma reologia daquela deste concreto, utilizando os teores otimizados dos dois novos componentes (adições minerais e superplastificantes) e, “reinjetar” esta nova pasta no esqueleto granulométrico do concreto em destaque. Com este procedimento, prevê o processo, garante-se a mesma trabalhabilidade do concreto que serviu de base para o concreto resultante, o concreto de elevado desempenho.

Numa segunda etapa a garantia da resistência à compressão do CED é proporcionada pela fórmula de Feret modificada. Esta extensão da Lei de Feret leva em conta o aumento da resistência causado pelas adições minerais, pela diminuição da relação água/cimento provocada pelo uso dos superplastificantes e, considera ainda, os tipos de cimento e de agregados graúdos empregados no concreto. Através de resultados experimentais obtidos com argamassas de mesma composição daquela de padrão ISO, feitas com cimentos de alta resistência (mínimo de 55 MPa) e, tornadas argamassas de elevado desempenho pela incorporação das adições minerais e superplastificantes selecionados, é feita uma reformulação na expressão de Feret. Assim, pela simples entrada na fórmula modificada, com os parâmetros relação a/c e relação sílica/cimento, em massa, obtém-se a resistência do CED resultante.

O campo de aplicação do processo de dosagem apresentado é limitado, por motivos óbvios, pela resistência do cimento (55 MPa), pela dimensão máxima característica do agregado graúdo (19 mm), pela relação água/cimento ($<0,35$). Por se tratar de um concreto auto-adensável, a mistura mais se assemelha a uma dispersão dos grãos de agregados numa matriz fluída que é a calda de cimento, ou melhor, calda de materiais cimentícios.

O processo de dosagem concebido por DE LARRARD, apresenta uma série de vantagens dentre as quais cumpre se destacar a economia de materiais e de mão de obra, uma vez que a maior parte dos ensaios são feitos com pequena quantidade de pasta. Outra vantagem o reduzido número de tentativas que se deve fazer para otimizar as quantidades dos ingredientes novos, ou seja, o superplastificante e as adições minerais. Os ensaios constantes das etapas do processo são também muito simples e de domínio de qualquer laboratório de materiais de construção: moldagem e ruptura de corpos de prova de concreto e argamassas, tempo de passagem de caldas de aglomerantes por um funil padronizado, etc. Uma outra vantagem importante do processo é que ao lado das exigências clássicas da dosagem, ou seja, resistência mecânica e trabalhabilidade, o concreto dosado por este processo apresenta as propriedades secundárias satisfatórias.

Na aplicação do processo de dosagem às condições brasileiras (materiais e ensaios) foram utilizadas adaptações de ensaios e de materiais. Assim, exemplificando, a argamassa padrão ISO foi substituída pela argamassa normal brasileira, os corpos de prova de argamassa e de concreto foram todos de formato cúbico e a cura dos mesmos foi feita em água em ebulição num procedimento também adaptado a norma brasileira. Uma das exigências do processo é que o cimento Portland tenha resistência à compressão acima de 55 MPa. Este quesito foi satisfeito empregando dois cimentos de alta resistência inicial (categoria de cimento rara na produção brasileira). Os agregados graúdos utilizados foram de quatro mineralogias diferentes o que conferiu ao trabalho mais abrangência, visto que são os agregados britados mais utilizados no Brasil.

O assunto desta dissertação é abordado em cinco capítulos, sendo que no capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica sobre materiais componentes do CED.

O capítulo 3 mostra as características dos materiais componentes do concreto empregados nesta dissertação e a justificativa para esta escolha. É feita também uma explanação dos métodos de ensaios utilizados para determinar os parâmetros de dosagem.

O capítulo 4 apresenta uma síntese dos resultados obtidos em ensaios de laboratório necessários para o desenvolvimento da dosagem. É apresentada também a discussão destes resultados que prepara para a extração das conclusões sobre o trabalho.

O capítulo 5 traz as conclusões a respeito da aplicação do processo de dosagem aos materiais brasileiros, bem como, as críticas e sugestões para trabalhos futuros.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO DE ELEVADO DESEMPENHO

Com o crescente desenvolvimento da ciência dos materiais, constata-se serem as propriedades dos materiais determinadas por sua estrutura interna. Para materiais cerâmicos, observa-se que um aumento da sua resistência e durabilidade é conseguido pela diminuição da porosidade. Aplicando-se este conceito ao concreto comum, torna-se obrigatório conhecer, primeiramente, as fases que o compõem, para que se possa posteriormente modificá-lo em nível de microestrutura.

O concreto é um material composto, heterogêneo, que macroscopicamente é considerado bifásico, constituído por pasta de cimento e agregados. Examinando-o microscopicamente, observa-se a presença de uma terceira fase, a zona de transição, que envolve os agregados graúdos com espessura de 10 a 50 μm , e diferencia-se da matriz de pasta ou argamassa do sistema, por sua complexa composição estrutural. Estas três fases não estão homogeneamente distribuídas no sólido e, quanto às suas estruturas íntimas, mostram-se heterogêneas com uma série de vazios, microfissuras, e cristais desordenados cujos tamanhos e composições são diferentes, conforme figura 2.1 (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Com a intenção de se conseguir um concreto que tivesse maior durabilidade e resistência mecânica, procurou-se melhorar a qualidade e a interação das fases presentes do concreto convencional pela diminuição de sua porosidade. Seguindo esta proposta, duas medidas seriam necessárias: a redução da dosagem de água e o preenchimento dos vazios do concreto comum.

FIGURA 2.1 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Em busca deste novo concreto, de elevado desempenho, pesquisadores e tecnologistas do concreto, com auxílio dos engenheiros de materiais, vem conseguindo grande evolução nas propriedades mecânicas, e na durabilidade deste material.

Os redutores de água e os materiais pozolânicos foram os primeiros produtos que surgiram com a finalidade de reduzir respectivamente a relação a/c e a quantidade de vazios do concreto convencional. A ação conjunta do aditivo químico, o superplastificante por exemplo, e da adição mineral, a sílica ativa, no concreto comum é notável, transformando-os em CEDs.

O aditivo inibe temporariamente a atração mútua eletrostática entre os grãos de cimento da pasta, liberando a água que, por ventura, seria aprisionada nos interstícios destes grãos, promovendo-a no auxílio da trabalhabilidade. Uma vez cessado o efeito do superplastificante, os grãos de cimento tendem a se atrair, formando grumos, mas, desta vez, o lugar que seria ocupado pela água nos espaços entre os grãos passa a ser ocupado pelos grãos das adições minerais, que, por exemplo, no caso da sílica ativa, têm tamanho de 60 a 100 vezes menor que o grão de

cimento Portland. Ora, isto diminui sobremaneira a porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição entre a pasta e os agregados nos compósitos, transformando os concretos em superconcretos.

A intrusão dos grãos das adições minerais nos vazios da matriz de pasta e na interface agregado-pasta, normalmente contribui com dois efeitos para a implementação das propriedades dos compósitos: o efeito filler e a reação química com o hidróxido de cálcio, liberado pela hidratação do cimento. O efeito conhecido como reação pozolânica resulta da formação dos compostos fundamentais para a resistência do cimento, os silicatos de cálcio.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), além das vantagens técnicas oferecidas pela introdução da sílica ativa nos concretos de cimento Portland, “as adições minerais oferecem uma maneira fácil de conservar a matéria-prima utilizada na produção do cimento e as fontes de energia”. A conservação dos recursos naturais é uma questão ecológica. A energia para produzir a sílica ativa não acarreta custo adicional no concreto, já que é um subproduto industrial.

No caso de se utilizar a adição mineral como substituta de parte do cimento no concreto, tem-se uma proporcional redução de energia dispendida na produção do material cimentício. Sendo o cimento um produto que consome quantidades significativas de energia ao ser produzido, o uso das adições faz com que haja uma redução de custos e economia de energia.

2.1- MATERIAIS COMPONENTES

2.2.1- Agregados

Os agregados são um dos principais componentes formadores dos concretos de cimento Portland, ocupando aproximadamente 70% em volume do material. Eles eram considerados até há algum tempo quimicamente inertes. Ao serem empregados na fabricação de CEDs, observou-se grande influência destes agregados na composição dos concretos. Os agregados não mais se comportavam como materiais inertes de enchimento, mas passaram a ser um dos responsáveis pelo aumento das resistências mecânicas destes concretos.

Os agregados são hoje considerados os limitantes da resistência de concretos que possuem resistência à compressão maior que 80 MPa, ou seja, à medida que se eleva a resistência à compressão dos concretos, a influência dos agregados no desempenho do material passa a ser cada vez maior.

As características mais importantes dos agregados graúdos que estão relacionadas com a qualidade e a resistência à compressão dos concretos são:

- resistência à compressão;
- módulo de elasticidade;
- absorção de água;
- composição mineralógica;
- forma e textura das partículas;
- granulometria, máxima dimensão e módulo de finura.

Num estudo realizado por BAALBAKI et al (1991), referente à importância exercida pelo agregado graúdo nas propriedades elásticas dos CEDs, foram feitos concretos de mesma relação água/ material cimentício (= 0,27) e colocada quantidade de superplastificante ajustada para se obter abatimento ao redor de 200 mm. Pode-se, então, relacionar algumas das características apontadas acima, observando as tabelas 2.1 e 2.2 apresentadas abaixo:

TABELA 2.1 - Propriedades mecânicas e físicas das rochas (BAALBAKI et al, 1991).

	Calcário	Quartzito	Arenito
Resistência à compressão (MPa)	115 ± 7	87 ± 9	147 ± 6
Módulo de deformação longitudinal (GPa)	49 ± 2	42 ± 2	40 ± 2
Resistência à tração (MPa)	12 ± 1.2	4 ± 0.8	7.4 ± 1
Massa específica (g/cm ³)	2.79	2.66	2.56
Porosidade (%)	1.0	2.7	6.4

TABELA 2.2 - Propriedades do concreto endurecido (BAALBAKI et al, 1991).

	Calcário	Quartzito	renito
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	90,8	98	102
Módulo de deformação longitudinal aos 28 dias (GPa)	42	40	31

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos agregados, são propriedades inter-relacionadas e são influenciadas pela porosidade. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os poros dos agregados, além de variarem em tamanho, podem estar localizados dentro do sólido e/ou na superfície das partículas.

A pasta de cimento que apresenta grande viscosidade, ao entrar em contato com o agregado, não consegue preencher todos os poros que compõem o sólido, a não ser os mais superficiais e maiores. Já a água penetra com maior facilidade na partícula, alcançando poros mais profundos e de menor tamanho.

A medida da porosidade de um agregado pode ser feita pela quantidade de água absorvida pelo mesmo. Segundo ALMEIDA (1990), a grande capacidade de absorção de água de alguns agregados faz com que os poros funcionem como reservatórios, auxiliando na hidratação de concretos com relação a/c baixa.

A porosidade dos agregados pode também influir na resistência à compressão dos concretos, no momento em que ocorre a penetração da pasta de cimento nos poros existentes na superfície dos sólidos. Desta forma, a maior aderência entre as fases agregado e pasta refletirá uma maior resistência mecânica do material.

Para a produção de CEDs, que possuem as fases pasta de cimento e zona de transição fortalecidas, devem ser empregados agregados graúdos adequados, para que a fase agregado não signifique a parte “frágil” do conjunto. A resistência à compressão dos agregados deve, portanto, ser maior que a do concreto correspondente formado por ele. NEVILLE (1997) concorda com esta assertiva e complementa afirmando que “a tensão real nos pontos de contato das partículas individuais no interior do concreto pode exceder, em muito, a tensão nominal de compressão aplicada no concreto”. O mesmo autor sugere, ainda, que os agregados devem apresentar um valor médio de resistência à compressão próximo de 200 MPa.

Segundo as tabelas 2.1 e 2.2, confirma-se, como já foi citado, a interdependência existente entre algumas propriedades dos agregados, responsáveis pelo maior ou menor valor de resistência do concreto, e observa-se que:

- quanto maior a porosidade das rochas, menores seus módulos de elasticidade;
- a grande quantidade de poros nas rochas favorece a maior aderência causada pelo intertravamento do agregado com a pasta, resultando em altas resistências à compressão de concretos;

Estas duas abordagens explicam os motivos pelos quais o concreto contendo quartzito teve resistência à compressão maior que a do concreto feito com calcário.

Quanto à elasticidade dos agregados, pode-se verificar que nem sempre a maior resistência à compressão do concreto corresponde ao uso de agregados com maior módulo de elasticidade. O arenito, embora apresente valor de módulo elástico baixo comparado às outras rochas, o concreto formado por ele resultou na maior resistência à compressão.

É possível, então, analisar a influência do módulo de elasticidade dos agregados no desempenho dos concretos e confrontar as opiniões de alguns autores a respeito desta propriedade; enquanto uns defendem a idéia de que para a obtenção de altas resistências à compressão nos concretos são necessários agregados que possuam alto módulo elástico, outros afirmam que o módulo elástico dos agregados deve ser semelhante ao da pasta (ALMEIDA, 1990).

Quanto às outras características dos agregados graúdos, como forma, textura, granulometria, máxima dimensão e módulo de finura, pode-se dizer que estas afetam a resistência do concreto de maneira indireta, ou seja, elas interferem primeiramente na relação a/c da mistura, responsável pela qualidade da zona de transição e, em função deste fator a/c, é que se determina a resistência do concreto.

De uma maneira geral, materiais grossos apresentarão menor área superficial por unidade de volume envolvida pela pasta de cimento para uma dada relação a/c. Logo o emprego de agregados de maior dimensão nos concretos equivaleria à redução do consumo de cimento, componente mais caro do concreto usual, trazendo benefício econômico significativo ao conjunto (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Por outro lado, há outros aspectos que influem na escolha da

dimensão máxima dos agregados utilizados num concreto, e estes devem ser avaliados. Primeiramente, devem ser obedecidos os limites impostos pela norma para a dimensão máxima característica do agregado no concreto, e, posteriormente, se tratando de CEDs onde se tem baixo fator a/c, as partículas maiores tenderão a produzir maior espessura na interface agregado-pasta, diminuindo a resistência do concreto, devido à maior microfissuração e porosidade geradas na zona de transição. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

CORDON & GILLESPIE ¹ apud DUCATTI (1993) afirmam que, para concretos de baixa relação a/c e alto consumo de cimento, ocorre diminuição na resistência à compressão aos 28 dias, ao ser aumentado o diâmetro máximo dos agregados, ao passo que para concretos de médias e baixas resistências, esta propriedade não interfere significativamente na resistência à compressão dos concretos.

Vários autores, segundo ALMEIDA (1990), confirmam que em concretos com alta dosagem de cimento e baixa relação a/c, a obtenção das maiores resistências são obtidas com agregados de dimensão máxima variável entre 9,5 e 28 mm. MEHTA & MONTEIRO (1994) complementam que, para concretos de alta resistência, o tamanho máximo do agregado deve ser limitado a 19 mm. MEHTA & AITCIN ²apud Ducatti (1993), referem-se ao diâmetro ótimo máximo para os agregados usados em CEDs, devendo o mesmo girar em torno de 10 a 12 mm.

¹ CORDON, W. A.; GILLESPIE, H. A. (1963). *Variables in concrete aggregates and portland cement paste wich influence the strength of concrete*. Journal of the ACI, v. 60, n. 8, p. 1029-1051, aug. apud DUCATTI, V.A. (1993). *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. São Paulo. 292p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

² MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. (1990). *Microstrutural basis of selection of materials and mix proportions of high strength concrete*. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Detroit, U.S.A., 1990, proceedings, Detroit, ACI SP/121, p. 265-86 apud DUCATTI, V.A. (1993). *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. São Paulo. 292p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

No estudo sobre a influência do agregado graúdo no concreto de AITCIN & ALBINGER ³apud DUCATTI (1993), observa-se a influência do tamanho máximo dos agregados comparando os concretos C e D, conforme tabela 2.3. Ambos os tipos de concreto contém os mesmos agregados graúdos, embora estes apresentem dimensões máximas diferentes; no concreto C, verifica-se menor dimensão máxima e, portanto, espera-se que resultem maiores valores para as resistências à compressão e módulo de elasticidade, devido à menor espessura da zona de transição gerada pelo agregado de menor tamanho. Como informação adicional dada pelos autores do ensaio com relação à ruptura dos sólidos, temos que o concreto C rompeu-se transgranularmente e o concreto D, pelo arrancamento dos grãos de agregados da matriz de argamassa.

Analizando os concretos C e E, feitos com agregados de mesma composição mineralógica, o primeiro rolado e o segundo britado, observa-se a influência da forma e textura superficiais nos valores de resistências mecânicas dos concretos especialmente os de alta resistência, segundo NEVILLE (1997). Tal inter-relação entre estas 2 propriedades advém das forças de aderência entre os agregados e a pasta de cimento, que parecem ser mais intensas nos concretos compostos por agregados britados ou de textura áspera. Este efeito é mais pronunciado nas primeiras idades, devido à forte aderência mecânica na interface agregado-pasta. Nas idades mais avançadas, o desenvolvimento de uma forte aderência química entre as fases parece minimizar a diferença entre as resistências mecânicas de concretos feitos com agregados rolados e britados, conforme MEHTA & MONTEIRO (1994).

Conclui-se então, quanto às resistências mecânicas apresentadas pelos concretos C e E:

³ AITCIN, P. C.; ALBINGER, J. M. (1989). Les bétons à houtes performances. Expériences nord-américaine et française (Table Ronde). *Annales de L'Institut Technique Batiment et des Travaux Publics*, série: béton 263, n. 473, p. 150-89, mar. / avr. apud DUCATTI, V.A. (1993). *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. São Paulo. 292p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- aos 7 dias de idade, o concreto E mostra maior resistência que o concreto C, provavelmente devido à diferença de texturas superficiais de seus agregados, gerando maior aderência mecânica na interface do agregado britado que do rolado;
- na idade de 28 dias, a aderência química entre os agregados rolados e a pasta supera a dos concretos com agregados britados, resultando altas resistências à compressão e módulos elásticos.

Segundo os autores AITCIN & ALBINGER ⁽³⁾ apud DUCATTI (1993), para o concreto E foi necessário um tempo de vibração 4 vezes superior ao do concreto C, demonstrando o efeito da forma do agregado na consistência do concreto.

TABELA 2.3 - Influência do agregado graúdo no concreto AITCIN & ALBINGER ⁽³⁾ apud DUCATTI (1993).

CONCRETOS		A	B	C	D	E	F
Cimento ASTM I (kg / m ³)		500	500	513	513	513	513
Sílica ativa (kg / m ³)		42	42	43	43	43	43
Agregado Graúdo (kg / m ³)		diabásio	granito	seixo rolado	seixo rolado	seixo britado	diabásio
		10 mm	14 mm	10 mm	20 mm	10 mm	10 mm
		1130	1130	1080	1080	1080	1080
Agregado Miúdo (kg / m ³)		675	675	685	685	685	685
Água (kg / m ³)		150	150	120	120	120	120
Fluidificante (kg / m ³)		10,6	10,6	16,0	16,0	15,7	15,7
Água / Cimento		0,275	0,275	0,22	0,22	0,22	0,22
Abatimento (mm)		200	200	200	200	200	200
f _{cm} (MPa) 100x200 mm	1d	41,1	37,2	---	---	---	---
	2d	---	---	64,6	57,6	61,7	51,9
	7d	---	---	93,2	82,8	96,8	81,2
	28d	100,7	84,8	119,4	108,1	117,1	103,2
	91d	104,8	88,6	145*	126*	133,7*	121,6
Ec (GPa) 150x300 mm	7d	---	---	51,0	50,0	49,6	43,4
	28d	36,6	31,7	53,1	51,0	48,3	42,8
	56d	37,9	33,8	55,2	53,0	49,6	44,8

* corpos de prova com bases polidas

Considerando-se a natureza mineralógica dos agregados e observando-se o concreto A e B, feitos respectivamente com diabásio e granito (ambos com mesmo traço) nota-se que as resistências e módulos de elasticidade do concreto A superam em 18% e 15% aos do concreto B. Estes autores ainda atribuem tal disparidade aos valores mostrados, as falhas internas presentes na estrutura do granito, identificadas através de análise microscópica e perfeitamente observáveis a olho nu.

Um estudo à respeito da influência do tamanho do agregado e da mineralogia sobre a resistência à compressão do concreto, realizado por MEHTA & MONTEIRO (1994) na Universidade da Califórnia, em Berkley, consistiu no preparo de misturas de concreto com os seguintes consumos de materiais:

Cimento ASTM I (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregado graúdo britado (kg/m ³)	Areia quartzosa natural (kg/m ³)	Aditivo plastificante (l)
475	119	196	1038	590	1

Confirmou-se, então, através desta investigação, a melhora significativa da resistência final do concreto ao se substituir agregado arenito por calcário, como mostra a figura 2.2.

MEHTA & AITCIN (1990) investigaram o efeito da composição mineralógica do agregado graúdo nas resistências à compressão e propriedades elásticas de misturas de concreto de alta resistência. Foram realizadas 4 misturas iguais, com mesmo traço (tabela 2.4), embora utilizando agregados diferentes.

TABELA 2.4 - Composição do concreto de alta resistência (MEHTA & AITCIN, 1990).

Cimento ASTM I (kg/m ³)	MS (kg/m ³)	a/c (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	SP (l/m ³)
500	42	137,5	130	675	10,6

Os agregados escolhidos foram:

- seixo rolado, cujas partículas são arredondadas e de textura lisa;

- diabásio britado de textura rugosa e de granulação fina;
- granito britado de textura rugosa;
- calcário britado de textura rugosa;

As partículas dos agregados se mostraram limpas, rígidas e mineralogicamente uniformes, de tamanho máximo 10 mm, com exceção do granito, que teve dimensão máxima de 14 mm e apresentou em sua estrutura inclusões de um mineral mole, ou seja, a laumontita.

Os resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade, estão expressos na tabela 2.5:

Constatou-se, então, haver nos concretos contendo granito e seixo, menores valores para as resistências à compressão e módulos elásticos.

Um exame dos corpos de prova rompidos de concreto tanto com calcário como daquele com diabásio mostrou fraca evidência de perda de aderência com a pasta, observando-se, ao contrário, ocorrências freqüentes de fratura transgranular no concreto com granito e nos concretos com calcário ou com diabásio. Neste último, uma superfície de ruptura representou o mesmo plano de cisalhamento passando através da pasta e da partícula de agregado, contudo, isto não aconteceu no concreto com granito. Parece que a ruptura ocorreu mais cedo dentro das zonas mais fracas das partículas de agregado granito do que na zona de transição ou no restante da pasta de concreto.

Tabela 2.5 - Resultados de ensaios com CED (MEHTA & AITCIN, 1990).

Idade (dias)	Resistência à compressão(MPa)			
	diabásio	calcário	seixo rolado	granito
1	41,1	42,5	40,6	37,2
28	100,7	97,3	92,1	84,8
56	104,8	101,3	95,9	88,6

Idade (dias)	Módulo de deformação longitudinal (GPa)			
	diabásio	calcário	seixo rolado	granito
28	36,6	37,9	33,8	31,7
56	37,9	40,7	35,9	33,8

O concreto feito com seixo rolado apresentou predominantemente ruptura por arrancamento inteiro dos grãos, ou seja, o agregado mostrou-se forte e a zona de transição fraca. No granito, como já citado, o tipo de ruptura foi essencialmente transgranular, confirmando ser esta a rocha mais fraca, provavelmente devido à presença da laumontita.

Examinando as curvas tensão *versus* deformação, figura 2.3, os concretos com diabásio e calcário tiveram suas curvas de descarregamento tendendo a se fechar completamente, demonstrando pouca ou nenhuma deformação plástica, no intervalo elástico. Este comportamento indica uma total transferência de tensão para o agregado forte, através de uma zona de transição também forte. Uma possível interação química entre a calcita do agregado calcário e o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, favoreceu a boa aderência das misturas de concreto feitas com calcário. Para o seixo e o granito, a curva de histerese não se fechou totalmente, expressando uma deformação plástica irrecuperável na descarga, evidenciando a fraca ligação agregado-pasta nestes concretos.

FIGURA 2.2 - Influência do tamanho do agregado e mineralogia sobre a resistência do concreto à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

(a) LOOP DA HISTERESE DO CARREGAMENTO - DESCARREGAMENTO
(b) COMPORTAMENTO DA TENSÃO - DEFORMAÇÃO PARA RUPTURA

FIGURA 2.3 - Influência do tipo de agregado na microfissuração e no comportamento elástico do concreto (MEHTA & AITCIN, 1990).

2.2.2 - Cimento

Os cimentos Portland são formados pelo clínquer quase puro, ao qual podem ser adicionadas pequenas porcentagens de sulfato de cálcio ou gipsita, e eventualmente outros materiais como escória de alto forno ou adições minerais diversas, com a finalidade de fornecerem altas resistências mecânicas e maior durabilidade ao concreto.

Os cimentos Portland diferem entre si pelas suas composições químicas, ou seja, pelos teores aproximados dos 4 componentes principais formadores do clínquer (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Desta forma, as propriedades de um concreto estão diretamente relacionadas à escolha do tipo de cimento. A composição do clínquer, assim como o grau de moagem do cimento, também influenciam nas resistências iniciais e finais do concreto e na aderência da interface agregado-pasta.

Segundo DE LARRARD (1988), ao se moer finamente o clínquer, tem-se, para uma mesma dosagem de cimento, maior proporção de hidratos no concreto endurecido em relação aos anidros. Entretanto, esta proporção de hidratos é limitada pela quantidade de água disponível nos CEDs. A grande finura do cimento confere à pasta aglomerante maior compacidade e favorece o ganho de resistência nas primeiras idades. Por outro lado, surge o risco de uma pega instantânea na fase pasta, após a mistura dos componentes do concreto na betoneira. Um maior inconveniente atribuído à finura é a grande liberação de calor de hidratação, responsável pela geração de tensões térmicas e de fissuração das peças de concreto. Sugere, portanto, o citado autor, que se utilize para CEDs grãos de cimento com tamanho superior a 1 μm e superfície específica de Blaine da ordem de 3500 a 4000 cm^2/g .

Compostos como o C_3A e o C_3S contribuem para o desenvolvimento rápido da resistência nas primeiras idades, acompanhado de grande liberação de calor. O C_2S , cuja hidratação é mais lenta, contribui significativamente para o ganho de resistência final. Se para um determinado concreto é requerida alta resistência final, sem a necessidade de altas resistências iniciais, reduz-se o teor de C_3A , aumentando-se os teores de C_3S e de C_2S . Esta reação apresentará baixa liberação de calor de hidratação, pois o C_2S gera baixas quantidades de calor liberado, seguida pelo C_3S e

C₃A. Segundo o COMITÊ 225 da AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)⁴ apud FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINE / COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON (1990) existem, ainda, outros componentes do cimento como os álcalis, que em grandes quantidades colaboram para o desenvolvimento de alta resistência inicial e baixa resistência final.

DE LARRARD ainda demonstra a influência do C₃A no comportamento reológico do concreto fresco, principalmente quando se adiciona à mistura o aditivo superplastificante. Os primeiros hidratos formados durante os primeiros minutos de hidratação “consomem” todo o fluidificante da mistura, tornando a consistência menos fluida em pouco tempo. Na tabela 2.6, observa-se a influência que a quantidade de C₃A do cimento exerce sobre a relação a/c. Este efeito parece se acentuar ainda mais em misturas que contêm sílica ativa, onde maiores teores de C₃A pressupõem maior relação a/c, como mostra tabela 2.6.

TABELA 2.6 - Influência do teor de C₃A na trabalhabilidade de argamassas BUIL & MOREAU⁽⁵⁾ apud DE LARRARD (1988).

Argamassas	Areia Rilem	CIMENTO		SP (g)	MS (g)	A/C	LCL* (s)
		natureza	consumo				
21	1350 g	CPA HP C ₃ A ≈ 10,9%	450 g	13,5	—	0,314	19"
22	1350 g	CPA 55 C ₃ A ≈ 1,6%	450 g	13,5	—	0,290	18,5"
21'	1350 g	CPA HP C ₃ A ≈ 10,9%	450 g	13,5	90	0,30	>>15" consist. rija
22'	1350 g	CPA 55 C ₃ A ≈ 1,6%	450 g	13,5	90	0,25	16"

*LCL - aparelho para medida da trabalhabilidade do concreto.

⁴ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1985). Committee 225 - *Guide to the selection and use of hydraulic cements*. ACI Journal, nov-dec. apud FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINE (1990). Working group on high strength concrete. *State of the Art Report*. (CEB, Buletin d'Information n. 197). London.

Através de estudo realizado por BUIL ⁵ apud DUCATTI (1993), observou-se a relação existente entre o C₃A do cimento Portland e sílica ativa de diferentes origens.

Preparou-se argamassas e utilizou-se 6 sílica ativa de diferentes naturezas, sendo uma delas proveniente da fabricação da zircônia e as demais de ligas de silício, e dois tipos de cimento que se diferenciavam somente quanto aos teores de C₃A, um deles continha 2% de C₃A, o outro 12%.

O mesmo traço da argamassa foi seguido por todas as misturas, e ajustado o fator a/c para igual trabalhabilidade, segundo figura 2.4.

FIGURA 2.4 - Influência do teor de C₃A do cimento e da origem da sílica ativa na relação a/c para uma mesma trabalhabilidade. (BUIL ⁽⁶⁾ apud DUCATTI, 1993).

Concluiu-se que a argamassa formada pelo cimento que continha 2% de C₃A, independente da natureza da sílica ativa, apresentou considerável diminuição na relação a/c em relação às argamassas compostas pelo cimento com 12% de C₃A. Comparando-se, porém as 2 argamassas, ambas compostas pelas sílica ativa provenientes da produção de zircônia, e contendo a primeira cimento com 2% de C₃A

e, a segunda, cimento com 12% de C_3A , verificou-se menor diferença entre seus fatores a/c em relação às demais sílica ativa. Desta forma, a relação a/c depende tanto da composição química do cimento empregado como da sílica ativa, o que não acontece com as resistências à compressão aos 28 dias destas argamassas. De fato, observa-se na figura 2.5 valores aproximadamente iguais para as resistências, tanto das argamassas feitas com sílica ativa de diferentes origens como para cimentos com quaisquer teores de C_3A .

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DE ARGAMASSAS DA FIGURA ANTERIOR

FIGURA 2.5 - Influência do teor de C_3A do cimento e da origem da sílica ativa na resistência das argamassas (BUIL⁵ apud DUCATTI, 1993).

⁵ BUIL, M. (1990). Comportement physico-chimique du système ciment-fumées de silice. *Annales de L'Institut Technique Batiment et des Travaux Publics*, série: béton 271, n. 483, p.19-29, mai. apud DUCATTI, V.A. (1993). *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. São Paulo. 292p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Quanto às dosagens de cimento empregados em CEDs, a faixa mais indicada de valores está compreendida entre 350 e 550 kg/m³, segundo mostra a figura 2.6 (CANOVAS, 1988).

FIGURA 2.6 - Resistência à compressão dos CEDs *versus* consumo de cimento (CANOVAS, 1988)

Segundo ALMEIDA (1990), o uso de maiores quantidades de cimento Portland que aquelas indicadas acima em CEDs, implicam: na elevação da relação a/c, aumento de abatimento, elevação da temperatura do concreto, aumento da deformação causada pela retração e fluência, maior custo e maior sensibilidade à cura.

2.2.3 - Silica ativa

A) Introdução

Segundo a FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINE (FIP) (1988), em sua reportagem sobre o estado da arte, intitulada “Condensed Silica Fume Concrete”, a sílica ativa é um sub-produto industrial obtido a partir da redução do quartzo com carvão natural e adições de ferro, em fornos elétricos a arco na produção de silício metálico, ligas de ferro-silício e outros produtos de silício.

Em 1973, BACHE (1981) trabalhando no laboratório de concreto e cimento Portland, em Aalborg na Dinamarca, iniciou um estudo referente à incorporação da sílica ativa ao concreto com superplastificante. Baseando-se nos resultados obtidos de experiências anteriores, que consistiam no aumento da resistência dos materiais cerâmicos pela redução do tamanho das partículas de seus componentes, aplicou-se este conceito ao concreto. O experimento correspondeu à utilização de um cimento comum, juntamente com um outro cimento muito mais fino. Durante sua realização, BACHE passou a conhecer um produto mais fino que o cimento, a sílica ativa, que era resultante do processo de fabricação do ferro-silício e desperdiçado. BACHE resolveu, então, introduzir a sílica ativa, cujas partículas são duas ordens de grandeza menor que o cimento, nas misturas de concreto, em substituição ao cimento mais finamente moído. O resultado da combinação do cimento comum com a sílica ativa, aliado ao uso de superplastificante, dentro do concreto foi:

- maior empacotamento das partículas de sílica ativa com os grãos de cimento possibilitado pela grande finura da sílica ativa em comparação ao cimento.
- as partículas esféricas da sílica ativa, ao serem substituídas pelos grãos irregulares do cimento, conduziram a pastas mais densas;

- o problema do endurecimento rápido do concreto, que o cimento mais fino atribuía ao conjunto, foi solucionado pela sílica ativa que passou a substituí-lo, já que suas partículas são menos reativas que as do cimento.

B) Produção da sílica ativa

O silício metálico, o ferro-silício e as outras ligas envolvendo o silício são produzidas nos fornos de arco elétrico submerso. A figura 2.7, mostra a representação esquemática de uma usina de silício, com e sem sistema de recuperação de calor.

Dois detalhes de construção apresentam interesse do ponto de vista da coleta do fumo de silício expelido pela fornalha: o sistema recuperador de calor e a cúpula do forno, aberta ou fechada à entrada de ar, conforme RAU & AITCIN (1983). No processo de cúpula aberta, um grande volume de ar é infiltrado na parte superior do forno acima da carga, abaixando a temperatura dos gases quentes provenientes da zona de produção da liga na parte inferior do forno. Este abaixamento de temperatura (200 a 400 °C), deixa uma parcela de carvão sem se queimar no conduto de exaustão dos gases, produzindo uma sílica ativa de cor mais ou menos escura dependendo logicamente, da porcentagem de carvão. Há, no forno de cabeçote fechável e com sistema de recuperação de calor, menor aspiração do ar na zona superior do forno - próxima à superfície do carregamento, e os gases aí ascendentes, atingem temperatura de aproximadamente 800 °C, o que faz com que todo o pó de carvão presente seja queimado. A sílica ativa produzida neste tipo de forno tem a cor esbranquiçada ou cinza, muito clara, devido ao baixo teor de carvão.

A composição da carga de matéria-prima dependerá do que se pretende produzir. Para se obter o silício, a carga é composta de areia quartzosa e carvão, com cavacos de madeira que são adicionados para afogar o carregamento. A produção da liga Fe-Si tem a carga composta de areia quartzosa, carvão e material

rico em ferro (limalha, minérios, etc) e, eventualmente, madeira em menor proporção que no caso do silício. Para produzir as ligas Fe-Cr-Si e Si-Mn, adiciona-se à matéria-prima minério contendo cromo e manganês, respectivamente. A liga Ca-Si é produzida por redução da mistura de cal e areia quartzosa.

A figura 2.8 mostra esquematicamente o processo de produção de silício com as reações envolvidas. Toda fornalha deste tipo funciona como um arco elétrico submerso, isto é, os eletrodos são posicionados profundamente na carga do forno. A zona de reação que se forma abaixo dos eletrodos é coberta pelas camadas de matéria-prima que vão sofrendo aumento de temperatura à medida que vão descendo em direção ao fundo do forno. Este pré-aquecimento é devido ao calor liberado pelos próprios eletrodos e também resultante das reações químicas na parte inferior do forno. A carga atua como se fosse um filtro, limitando as perdas de material na forma de vapor. As partículas de sílica ativa parecem ser formadas pela oxidação e condensação do SiO gasoso, proveniente da zona de reação da fornalha, segundo RATH (1983).

Os gases de exaustão, quer no processo de forno aberto, quer no de forno fechado, incorporam à mistura partículas de mais variada composição química, densidade e tamanho de grãos. As principais fontes destas partículas são:

- finos provenientes das diversas matérias-primas que compõem a carga;
- impurezas das matérias-primas (K, Na, Mg, etc) e metais (Mn, Si, etc) vaporizados na região quente do forno, filtrados através da carga e não recuperados completamente nas partes superiores mais frias do carregamento. Parcelas destes materiais na forma de fumos e condensados são oxidados logo acima da superfície do material de alimentação do forno pelo ar infiltrado;
- partículas muito finas de SiO₂ provenientes da condensação e oxidação do vapor de SiO.

FIGURA 2.7 - Esquema da Produção de silício RAU & AITCIN (1983).

FIGURA 2.8 - Reações químicas envolvidas na produção de silício RATH (1983)

A operação de coleta da poeira torna-se particularmente problemática, quando esta se compõe de alto teor de SiO_2 e de grãos muito finos. É difícil de ser umedecida e, o que é pior, devido à sua alta resistividade elétrica, sua separação em precipitador eletrostático é praticamente impossível. Sendo assim, a coleta do pó é quase universalmente feita em filtros de tecido na forma de sacos. Estes filtros não toleram temperaturas acima de 250°C ; os gases, então, devem ser resfriados por esfriadores tubulares, esfriadores de evaporação e/ou uso de infiltração de ar frio.

As principais ligas produzidas neste tipo de forno são:

1- Ferrossilícicas com várias porcentagens de Si:

- FeSi50% com $43\% < \text{Si} < 50\%$ (quase que exclusivamente fabricada nos Estados Unidos),

- FeSi75% com $72\% < \text{Si} < 78\%$,
- FeSi90% com $87\% < \text{Si} < 96\%$,
- Si metálico, com 96% ou mais de Si,

2- Cálcio-Silício

3- Ferro-Cromo-Silício

4- Silício-Manganês (Manganês metálico com $15\% < \text{Si} < 25\%$)

Como existem diferentes ligas silícicas produzidas nos fornos deste tipo existirão, conseqüentemente diferentes tipos de sílica ativa na composição química (ver tabela 2.7), na cor no tamanho de grãos, na densidade, etc. Estas diferenças têm origem nos seguintes aspectos da produção:

- tipo de forno, de cúpula aberta ou fechada, com ou sem sistema recuperador de calor,
- presença de madeira e compostos metálicos na carga,
- composição química do quartzo e do carvão combustível.

TABELA 2.7 - Composição química de sílicas ativas diversas quanto à origem e produção (AITCIN et al, 1984).

Componentes	Porcentagem na sílica ativa						
	Tipo e origem das ligas						
	Si ¹	FeSi75 ²	FeSi75 ³	FeSi50 ⁴	FeCrSi ⁵	CaSi ²	SiMn ⁵
SiO ₂	94.0	89.0	90.0	83.0	83.0	53.70	25.0
Fe ₂ O ₃	0.03	0.60	2.90	2.50	1.00	0.70	1.80
Al ₂ O ₃	0.06	0.40	1.00	2.50	2.50	0.90	2.50
CaO	0.50	0.20	0.10	0.80	0.80	23.2	4.00
MgO	1.10	1.70	0.20	3.00	7.00	3.30	2.70
Na ₂ O	0.04	0.20	0.90	0.30	1.00	0.60	2.00
K ₂ O	0.05	1.20	1.30	2.00	1.80	2.40	8.50
S	1.00	1.40	0.60	1.80	1.60	3.70	2.50
C	0.20	---	0.10	---	---	---	2.50
MnO	---	0.60	---	0.20	0.20	---	3.60
P.F.	2.50	2.70	---	3.60	2.20	7.90	10.0

¹ SKW Canadá, Becancuor, Canadá

² SKW Trostberg, al. Ocidental

³ Vargon Alloys, Suécia (c/ rec. calor)

⁴ SKW Alloys, Calvert City, EUA

⁵ SKW Alloys, Niagara Falls, EUA

A produção estimada de sílica ativa por alguns países em 1987, segundo DUBROUS (1990) é mostrada na tabela 2.8, abaixo:

TABELA 2.8 - Produção estimada de sílica ativa. DUBROUS (1990).

Países	Quantidade total produzida de sílica ativa (t)
Noruega	130.000
Itália	12.000
França	35.000
Espanha	15.000
Alemanha	4.000
Iugoslávia	17.000
Suécia	7.000
América do Norte	100.000
América do Sul	35.000
África do Sul	22.000
Ásia	32.000

C)- Composição química e estrutura interna

A composição química da sílica ativa está diretamente relacionada à composição do carregamento e tipo de forno (com ou sem recuperador de calor), como mostra a tabela 2.7. Geralmente, a porcentagem de SiO_2 é muito alta, com exceção para as sílicas ativas originárias da fabricação das ligas Ca-Si e Si-Mn. Os teores de Al_2O_3 , CaO, MgO e dos alcalinos são baixos, com algumas exceções para alguns tipos de sílicas ativas, como as provenientes da produção das ligas Fe-Cr-Si, Ca-Si e Si-Mn. A perda ao fogo e o teor de carbono apresentam valores percentuais mais altos e maior variabilidade nestes teores, como se vê na tabela 2.7.

Os diferentes tipos de sílica ativa foram lançadas num diagrama de composição ternária, juntamente com os outros materiais usados na indústria da construção do cimento e concreto na figura 2.9. Nota-se, pois, que as sílicas ativas são muito diferentes dos outros materiais cimentícios.

Uma característica muito importante da produção é que uma determinada fornalha produz sílica ativa, tendo composição mais ou menos constante. AITCIN (1983), investigou esta uniformidade de composição química e sua influência nas propriedades do concreto feito com adição de sílica ativa. A tabela 2.9 apresenta a variabilidade na composição química da mistura de uma sílica ativa de Si e outra de FeSi75%, para 32 amostras diárias colhidas numa usina canadense. A composição química é estável devido ao fato de que a matéria-prima para a fabricação de ligas de silício tem que ser muito pura, uma vez que o processo de produção é sem escória.

TABELA 2.9 - Variação diária na composição química de 32 amostras (Aitcin, 1983).

Componentes (%)	Parâmetros Estatísticos			
	Média	D.Padrão	V.Máximo	V.Mínimo
SiO ₂	92.10	1.30	94.90	89.10
Al ₂ O ₃	0.25	0.12	0.70	0.16
Fe ₂ O ₃	0.79	0.70	3.10	0.22
Na ₂ O	0.17	0.04	0.10	1.11
K ₂ O	0.96	0.22	1.44	0.56
SO ₃	0.36	0.10	0.57	0.16
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	93.61	1.44	95.70	90.30

Fábrica SKW - Canadá

FIGURA 2.9 - Situação da sílica ativa em relação aos demais materiais cimentícios
RAU & AITCIN (1983).

D) Finura

A finura da sílica ativa pode ser avaliada através de sua granulometria, de sua área específica e do diâmetro médio de suas partículas microesféricas.

A distribuição de tamanho de grãos (granulometria) pode ser determinada pela dispersão de raios X ou por medidas diretas em fotos tiradas de amostras, observadas em microscópio eletrônico. Neste último caso, a amostra estudada deve ser antes dispersa num líquido orgânico, como por exemplo, a acetona. A figura 2.10 fornece um exemplo de uma curva de distribuição de tamanho de grãos, a partir da contagem das partículas observadas em microscópio eletrônico de varredura, de uma amostra de sílica ativa resultante da produção de silício metálico. (DASTOL, 1984).

FIGURA 2.10 - Distribuição de tamanhos de grãos de uma sílica ativa (DASTOL, 1984).

A figura 2.11 mostra as granulometrias dos diversos tipos de sílica ativa. Os diferentes processos de produção ou as diferentes condições de fornalhas em um determinado processo fornecerão diferentes tamanhos de partículas. Tais variações nos diâmetros das partículas explicam as diferenças nos valores da área específica, determinados pelo método de adsorção de nitrogênio (ver tabela 2.10). Isto também explica o porquê da quantidade de água de amassamento, que tem que ser adicionada para manter uma certa mobilidade (flow), ou abatimento (slump),

quando se usa a sílica ativa em argamassas e concretos, pode variar de uma sílica ativa para outra.

FIGURA 2.11 - Composição granulométrica dos diferentes tipos de sílica ativa.

(RAU & AITCIN, 1983)

A área específica da sílica ativa não pode ser determinada pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine), ao contrário, deve ser medida pelo método de adsorção de nitrogênio (BET- Braunauer, Emmett e Teller) (NEBESAR & CARETTE, 1981). Segundo os dados colhidos por AITCIN (1983), em numerosos trabalhos publicados, a área específica da sílica ativa varia entre 13.000 a 23.000 m²/kg medida pelo método de adsorção de nitrogênio. Os cimentos comuns e as cinzas volantes apresentam, como resultados para este mesmo método de ensaio, de 1.000 a 1.500 m²/kg.

Devido à forma esférica das partículas de sílica ativa, existe uma relação teórica simples entre o diâmetro médio delas e a área específica. Estes dois parâmetros se relacionam pela seguinte expressão:

$$D_m = 6 / (A \cdot \gamma_s)$$

onde D_m é o diâmetro médio em μm , A é a área específica em m^2/g e γ_s é a massa específica da sílica ativa em kg/m^3 . Usando esta fórmula para calcular o diâmetro médio das partículas, encontra-se mais ou menos $0,13 \mu m$, que está bem de acordo com o valor medido em observações ao microscópio eletrônico.

A tabela 2.10 mostra a área estimada, a área específica medida e o diâmetro médio das partículas para os diversos tipos de sílica ativa.

As partículas de sílica ativa recolhidas no sistema coletor de poeira não estão soltas, mas formam aglomerados de microesferas, que H. Kolderup citado em AITCIN (1983), descreve da seguinte maneira: “as partículas coletadas nos filtros continham algumas partículas esféricas elementares soltas, na faixa de diâmetro de $0,01$ a $0,3 \mu m$. A maioria destas partículas básicas, no entanto, estavam coaguladas em várias formas de aglomerados com diâmetros variando de $0,02$ a $2,0 \mu m$ ”.

Tabela 2.10 - Área específica dos diversos tipos de sílica ativa (RAU & AITCIN, 1983)

Sílica ativa	Área específica estimada (m^2/kg)	Área específica adsorção N_2 (m^2/kg)	Diâmetro médio (μm)
Si	20.000	18.500	0,18
FeCrSi	16.000	---	0,18
FeSi 50%	15.000	---	0,21
FeSi 75% (SRC)	13.000	---	0,23
FeSi 75%	13.000	15.000	0,26

Segundo DASTOL (1984), através de pesquisas, chegou-se à conclusão de que estes aglomerados são provavelmente de duas categorias, primários e secundários. Os aglomerados secundários ou “moles”, são mantidos por força de atração do tipo Van der Waals, forças estas que predominam no pó seco, e que podem ser superadas quando o pó é disperso num líquido, usando uma quantidade razoável de energia no ato da mistura e um agente dispersante conveniente.

Os aglomerados primários ou “duros” podem ser definidos como aqueles aglomerados residuais que sobram após a superação das forças de atração citadas anteriormente. Estes aglomerados parecem ser mantidos coesos por um outro mecanismo, provavelmente o das pontes de ligação entre materiais. Os aglomerados primários são muito menores que os secundários (valores típicos de 0,2 a 0,3 µm), e podem, posteriormente, ser divididos em subgrupos, de acordo com a forma. DASTOL acredita que a granulometria e as variações nos tamanhos destes aglomerados de partículas podem ser refletidas em nível macroscópico nas variações de certas propriedades, como por exemplo, a alta resistência do concreto.

E) Massa específica

A massa específica da sílica ativa mais comum - as provenientes da produção de Si metálico e da liga FeSi75% - é igual àquela da sílica amorfa que consta dos livros de ciência dos materiais, isto é, cerca de 2,20 kg/l, conforme FESIL KS (1980) e ELKEM A/S (1981). Dependendo da composição química da sílica ativa, a massa específica das partículas alcança valores tão altos como os que são dados, a seguir, em AITCIN (1983):

Origem	Massa específica (kg/l)
Si	2,23
FeSi50%	2,30
FeCrSi	2,42
SiMn	3,13
FeSi75%	2,21
FeSi75% (S.R.C.)	2,33
CaSi	2,55

A massa unitária da sílica ativa solta, sem nenhum tratamento, é muito baixa, variando entre 150 e 250 kg/m³. Portanto, um container que carrega 35 toneladas de cimento Portland comum transportará somente de 7 a 9 toneladas de sílica ativa não transformada. A massa unitária compactada citada em FESIL KS

(1980) e ELKEM A/S (1981), situa-se entre os valores 400 a 600 kg/m³, sendo que os boletins técnicos citados acima não esclarecem qual o processo de compactação da sílica ativa; apenas dizem que transformam as partículas em pequenos aglomerados sem o uso de agentes aglomerantes ou outros aditivos quaisquer.

F) Tratamento da sílica ativa

A extrema finura das partículas de sílica ativa e a grande dificuldade encontrada para ensacá-la, têm sido os maiores responsáveis pelo seu limitado uso na indústria do cimento e do concreto. Todavia, desenvolveram-se diferentes processos para contornar este problema, transformando a sílica ativa num produto mais fácil de ser manipulado. São eles:

Micropelotização

Através deste tratamento, a massa unitária no estado solto pode atingir cerca de 500 kg/m³. As partículas elementares da sílica ativa são transformadas em micropelotas. Este processo consiste em aerar o material durante dias e é muito lento.

Pasta fluida

A sílica ativa pode ser misturada com igual quantidade, em massa, de água formando uma pasta fluida com massa específica variando entre 1,30 e 1,40 kg/l. (FESIL KS, 1980; ELKEM A/S, 1981).

Um metro cúbico de pasta (slurry) na concentração 50/50 por cento, contém por volta de 700 kg de sílica ativa. Esta forma de trabalhar com a sílica ativa elimina o problema da formação de nuvem de pó, facilitando o seu bombeamento para o interior dos veículos de transporte, mas apresenta, como desvantagens, o fato de se transportar a metade da tonelagem em água e também o problema de congelamento em clima frio.

Pelotização

A sílica ativa pode ser pelotizada passando-se através de discos ou tambores de pelotização. Este processo, porém é, às vezes, dificultado e gera grande

quantidade de poeira. Na forma de pelotas, a sílica ativa pode ser transportada a granel e, segundo ELKEM A/S (1981), sua massa específica é de 900 a 1200 kg/m³. RAU & AITCIN (1983), desenvolveram na Universidade de Sherbrooke (Canadá) um processo de aglomeração da sílica ativa, ou na forma de um pó friável - com distribuição granulométrica similar a uma areia fina (módulo de finura $\approx 1,90$), ou na forma de grãos resistentes e muitos duros que lembram a pedra britada miúda. Quando, por qualquer razão, não existir mercado imediato para a sílica ativa aglomerada pelo processo acima, ela poderá ser transformada em grãos que, de acordo com os criadores do processo, podem ser transportados sem problemas, em caminhões abertos cobertos com encerados, e estocados em montes sem criar qualquer poluição ou contaminação do ar. Podem até ser armazenados em água por muito tempo, sem que comecem a desagregar.

Densificação

A sílica ativa densificada é o nome pelo qual é conhecida a sílica ativa que passou pelo processo desenvolvido na Universidade de Sherbrooke. Esta transformação faz com que a sílica ativa densificada adquira massa unitária a solto, por volta de 400 a 600 kg/m³. Segundo POPOVIC et al (1986), o valor da superfície específica da sílica ativa densificada é de aproximadamente a metade do valor da sílica ativa original, porque os grãos originais de diâmetro aproximadamente 0,5 μm , são aglomerados em “cachos” maiores de 5 a 15 μm de diâmetro.

G) Reatividade pozolânica

Generalidades

Pozolanas são definidas como materiais que reagem com a cal na presença de água numa primeira fase, e em seguida, formam compostos com

propriedades aglomerantes, conforme se vê em MASSAZZA ⁶apud REGOURD (1974).

A sílica ativa é um material pozolânico, segundo já constataram vários pesquisadores (HJORTH, 1984). A quantidade de cal fixada pela sílica ativa tem sido detectada por difração de raios X, análise termodiferencial ou análise química. A segunda parte do processo pozolânico, que é a formação de compostos hidratados com propriedades aglomerantes, pode ser relacionado à resistência mecânica e ao desenvolvimento da microestrutura, observada ao microscópio eletrônico de varredura.

Fixação da cal

NELSON & YOUNG (1977) adicionaram sílica coloidal e silicatos a pastas de C_3S e de cimento Portland, a fim de avaliar a atividade pozolânica. Atestaram que estas adições atuam como pozolanas muito reativas e a reação pozolânica é evidente, logo no primeiro dia de cura úmida. Constataram que sílicas amorfas são mais reativas do que silicatos

TRAETTEBERG (1978), investigou a atividade pozolânica de sílicas ativas - de composições químicas diversas e nas formas não compactadas e pelletizadas, juntamente com silicato tricálcico (C_3S) e com cimento Portland e na forma de pó e de clínquer moído, sem adição de gesso. Neste trabalho, além da análise termo-diferencial (ATD), TRAETTEBERG lançou mão de um método de ensaio norueguês cujo princípio está de acordo com o do método acelerado de Fratini, ou seja, a atividade pozolânica é avaliada por comparação da quantidade de $Ca(OH)_2$ na solução de cimento hidratado com a quantidade de $Ca(OH)_2$, necessária para a saturação de uma solução de mesma alcalinidade. Constatou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos com o emprego do método acima e a ATD. As pastas que continham a sílica ativa em teores mais baixos ($\approx 10\%$), nas formas compactadas e pelletizadas moídas não alcançaram o requisito mínimo de reatividade exigido pelo método norueguês, talvez por problema de área específica. Já a sílica

⁶ MASSAZZA, F. (1974). Chemistry of Pozzolan Additions and Mixed Cements. In: VI th CONGR. CHEM. CEM. MOSCOW apud Condensed silica fume. *Les Editions de L'Universite de Sherbrooke*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 52p.

ativa em pó mostrou um importante grau de atividade pozolânico na hidratação do cimento. A reação ocorreu principalmente no período de 7 a 14 dias após a mistura, como mostra a figura 2.12, que fornece uma estimativa da quantidade de Ca(OH)_2 consumida com o tempo de hidratação baseada em resultado de ATD.

Com a finalidade de comparar os resultados e, conseqüentemente, a adequabilidade de métodos comumente usados para caracterizar a intensidade da reação das pastas de cimento, SELLEVOLD et al (1982) mediram a quantidade de água não evaporável, o teor de Ca(OH)_2 consumido (por ATD) e acompanharam o andamento da hidratação (por raios X) em pastas de cimento contendo teor variado de sílica ativa. Para facilitar a determinação do teor da quantidade de cimento anidro pelo método de raios X, usou-se um cimento Portland branco com teor de alita (C_3S), próximo de 80%, o que, em nossa opinião, limita muito as conclusões tiradas. As principais conclusões extraídas destes experimentos foram:

- a) Para os materiais usados, a reação pozolânica é mais ativa entre 2 e 14 dias a uma temperatura de 20°C. O teor de Ca(OH)_2 para pastas maduras decresce quase linearmente com o aumento de teor de sílica ativa, conforme mostra a figura 2.13. A grosso modo, pode-se dizer que uma quantidade de sílica ativa correspondente a mais ou menos 24% do peso do cimento é suficiente para consumir todo o hidróxido de cálcio.
- b) A quantidade de água não evaporável por grama de cimento (independente do teor de sílica na pasta), é proporcional ao grau de hidratação do cimento determinado pela análise de raios X (figura 2.14). Isto implica que não acontece nenhuma troca de água durante a reação pozolânica.
- c) A presença da sílica ativa ou de um filler inerte (no caso CaCO_3 com partículas menores que 0,1 μm) acelera a hidratação do cimento. Para um mesmo teor, em volume, o efeito das duas adições é aproximadamente o mesmo.
- d) As medidas de porosidade à água e densidade indicam que a reação pozolânica é acompanhada de uma “retração química”. A grandeza desta retração é avaliada como a metade da que acontece quando da hidratação do cimento.

FIGURA 2.12 - Quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estimada em função do tempo de hidratação em pastas de cimento e de cimento + 10% de sílica ativa, a partir de termogramas (TRAETTEBERG, 1978).

FIGURA 2.13 - Teor de hidróxido de cálcio de pastas hidratadas com diferentes teores de sílica ativa (SELLEVOLD et al, 1982).

FIGURA 2.14 - Correlação entre o teor de água não evaporável e grau de hidratação pela análise de raios X. (SELLEVOLD et al, 1982)

Baseando-se no mecanismo pelo qual as microesferas de sílica ativa em uma solução de Ca(OH)_2 primeiro formam uma “fase de gel”, em seguida se aglomeram e reagem com Ca(OH)_2 para formar C-S-H, e que esta reação é muito mais rápida à temperatura de 38 °C, GRUTZECK et al (1982) propuseram um modelo de hidratação para explicar o mecanismo de reação da sílica ativa proveniente das ligas Fe-Si, usadas como aditivo em compostos do cimento. Os pesquisadores concluíram que o modelo parece explicar a microestrutura observada, bem como os fenômenos de ganho de resistência, densidade e redução do Ca(OH)_2 livre; entretanto, ao invés de reagir muito rapidamente como as suspensões mais diluídas observadas anteriormente, as pastas mostraram um processo lento, mesmo em temperaturas de 27

a 90°C, talvez devido à escassez de água, presença de superplastificante e baixa taxa de liberação do Ca(OH)_2 pelas partículas em hidratação.

A reatividade da sílica ativa foi comparada com a de outras pozolanas em pastas e argamassas em cura normal e acelerada. (REGOURD, 1983). Os resultados de análise de raios X para as pastas curadas durante 5 dias a 50°C foram os seguintes:

Aglomerantes	CA(OH)_2 remanescente (% do cimento, massa)	Relação a/c
CPC Puro	15%	0,30
CPC+30% rocha vulcânica (400m ² /kg)	9%	0,30
CPC+30% cinza volante (250m ² /kg)	9%	0,30
CPC+30% sílica natural (700m ² /kg)	7%	0,30
CPC+30% sílica ativa (20m ² /kg)	0%	0,40

A quantidade de cal fixada pelas mesmas pozolanas foi determinada por difração de raios X em argamassas ISO, curadas a 80°C durante 40 horas e a mesma ordem acima foi notada. Quanto à resistência à compressão, estas argamassas apresentaram as mesmas daquelas curadas a 20°C por longo período. REGOURD comparou, também, a reatividade pozolânica com sílica ativa de várias origens, constatando a seguinte ordem decrescente de reatividade:

- 1- Sílica ativa proveniente de Si metálico;
- 2- Sílica ativa proveniente de FeSi;
- 3- Sílica ativa proveniente de FeCrSi;
- 4- Sílica ativa proveniente de CaSi.

As reações de hidratação de misturas de cimento Portland comum (CPC) com sílicas ativas foram comparadas por CHENG & FELDMAN (1985 b), através da estimativa de consumo de Ca(OH)_2 e calorimetria por transmissão, e em idades avançadas também pelo consumo de Ca(OH)_2 , com quantidades de água não

evaporável. Comparando alguns destes resultados com os correspondentes obtidos com argamassa CHENG & FELDMAN (1985 a) concluíram que a sílica ativa acelera as reações de hidratação no CPC, fornecendo pontos de nucleação para o Ca(OH)_2 , em minutos após as reações terem começado e ainda de acordo com SELLEVOLD et al (1982) e MELAND (1983), também reagindo com os íons de Ca^{++} . Outra conclusão dos referidos autores é que o grau de hidratação das argamassas com sílica ativa difere do das pastas, possivelmente devido à presença de areia nas argamassas, que atuam como um depósito de Ca(OH)_2 , perfeitamente cristalizada, aliada à baixa permeabilidade da fase pasta da argamassa.

Através de um método seletivo de dissolução, usando-se uma solução aquosa de ácido pícrico e metanol, LI et al (1985) mediram as quantidades de sílica ativa e cinza volante, que permaneceram sem reagir em misturas de hidróxido de cálcio e com cimento comum, a 38°C . Logo no primeiro dia de hidratação, 50% e 29% da sílica ativa reagiram com o cimento e com a cal, respectivamente, contra 4% a 0% da cinza; ao final de 90 dias, estes percentuais subiram para 75% e 80% para a sílica e 35% a 80% para a cinza.

Produtos da reação pozolânica

Através das avaliações de quantidade de Ca(OH)_2 gasta na relação com SiO_2 e da solubilidade da fração de sílica nas pastas de solução concentrada de HCl, TRAETTEBERG (1978) estimou a reação molar CaO/SiO_2 (relação C/S, daqui para a frente) igual a 1,1, o que classifica o silicato de cálcio hidratado formado como CSH (I). TRAETTEBERG também constatou que o conteúdo de álcalis no cimento solúvel em água tem um efeito vantajoso, ao estabelecer ligação química à sílica vítrea pozolânica nos primeiros dias de hidratação.

BUCK & BURKES (1980) estudaram a composição e a microestrutura de pastas de hidróxido de cálcio e sílica ativa curadas a 38°C por difração de raios X e no microscópio eletrônico de varredura (MEV), num programa de pesquisa que envolvia a caracterização de uma determinada sílica ativa norte-americana. A combinação desta sílica com diversos teores de Ca(OH)_2 e água, conduziu à formação de CSH(I) aos 7 dias de hidratação. Este CSH(I), de acordo

com os autores, mostrou-se muito mais cristalino que o CSH encontrado em pastas de cimentos hidratados em temperaturas normais. O mesmo tipo de CSH cristalino, embora detectado por difração de raios X, não foi encontrado por REGOURD (1983) em argamassas de cimento e sílica ativa. De acordo com a análise de “micro prova eletrônica”, REGOURD achou a relação C/S do CSH igual a 0,9 para argamassas de cimento e sílica ativa, curadas termicamente (40 horas a 80°C) e 1,8 para argamassas de CPC, também curadas nas mesmas condições. Além disso, o CSH da argamassa com sílica ativa continha mais álcalis (1,3% de K₂O) do que o do correspondente ao CPC (0,5%). REGOURD (1983) constatou também que, quanto mais alto o teor de sílica ativa no compósito, mais baixa era a relação C/S.

REGOURD et al (1983) constataram que a relação C/S é sistematicamente mais baixa na presença de sílica ativa, pela diminuição de CaO, ao analisar o CSH em contato com os grãos de clínquer do cimento Portland em cimentos mistos. No cimento com 30% de escória granulada, a relação C/S caiu de 1,55 para 1,20, ao se trocar 5% de escória por sílica ativa; no cimento com 30% de escória cristalizada C/S = 1,70 (comum no CSH do cimento Portland) caiu para 1,43 com a troca; e, no cimento com 30% de cinza volante, esta relação caiu de 1,50 para 1,28. As mais baixas relações C/S (1,20 e 1,28) correspondem à ação simultânea das misturas escóricas hidráulica/sílica ativa e cinza volante/sílica ativa, ativados pela liberação dos íons de cálcio pela hidratação do cimento.

2.2.4 - Superplastificante

Dentre os aditivos, os mais largamente empregados nos CED são os plastificantes ou superplastificantes, aos quais daremos ênfase neste dissertação e que, ao serem adicionados a misturas possibilitam:

- o aumento da fluidez;

- a diminuição da relação a/c, mantendo a mesma trabalhabilidade e promovendo o aumento da resistência à compressão e durabilidade do material;
- a redução da porcentagem de cimento sem necessidade de alterar a quantidade de água de amassamento do sistema, conforme CHIOCCHIO & PAIOLINI (1995)

Segundo DUCATTI (1993), os primeiros aditivos redutores de água que surgiram eram provenientes de compostos orgânicos de composição química complexa e tinham por finalidade a defloculação de grãos de cimento e a diminuição do fator a/c do concreto. Embora estes aditivos conseguissem reduzir de 8% a 10% a quantidade de água de amassamento, sem modificar a trabalhabilidade, suas moléculas de pequeno comprimento não eram capazes de envolver totalmente os grãos de cimento, sendo ineficientes como agentes dispersantes e redutores de água.

A necessidade de um produto que pudesse suprir as deficiências notadas anteriormente fez com que fossem desenvolvidos os lignossulfonatos, cujas moléculas lineares possuem maior comprimento, atribuindo ao sistema boa capacidade de dispersão e possibilitando uma maior redução da relação a/c na faixa de 10% a 15%.

Embora estes dois aditivos tenham sido utilizados durante muitos anos nos concretos correntes, contribuindo para o abaixamento da relação a/c, foram observados alguns inconvenientes no emprego de lignossulfonatos e de compostos orgânicos nos concretos, como: retardamento de pega e incorporação de ar. Nos anos 70 aparecem novos produtos obtidos através da polimerização por condensação do formaldeído com o naftaleno sulfonado ou com a melamina sulfonada, chamados superplastificantes, que possibilitaram sua adição em altas dosagens ao concreto, podendo reduzir até 30% o fator a/c, sem acarretar os efeitos secundários atribuídos ao concreto pelos dois outros redutores de água. (DUCATTI, 1993).

A) Ação dos redutores de água no concreto

Os plastificantes e superplastificantes influenciam tanto as características do concreto no estado fresco como endurecido.

As partículas de cimento, com cargas eletrostáticas, ao entrarem em contato com a água, tendem a formar flocos, aprisionando parte da água de amassamento da mistura e dificultando sua hidratação. Adicionando-se plastificantes ou superplastificantes ao conjunto, ocorre a adsorção de suas moléculas nas partículas sólidas do sistema, ocasionando a neutralização das cargas elétricas dos grãos de cimento, promovendo a maior dispersão entre essas partículas e aumentando a superfície específica do cimento exposta à hidratação. As moléculas de água passam a rodear as partículas de cimento envolvidas pelo aditivo, apresentando tensão superficial consideravelmente menor, e aumentada capacidade de dispersão pelos sólidos, colaborando para a maior fluidez do sistema. (LAHALIH, 1988).

Segundo CHIOCCHIO & PAOLINI (1985), “o efeito fluidificante dos superplastificante depende de vários fatores, como a natureza e concentração do aditivo, composição e temperatura da mistura fresca, procedimento de mistura e tempo de adição do polímero”. Esta confirmação provém de um ensaio realizado pelos autores, com pastas de cimento que continham diferentes superplastificantes. Uma delas era composta por derivados sulfonados do naftaleno (NF) e a outra por derivados sulfonados da melamina (MF).

Observou-se a influência do tempo de adição do aditivo ao misturador, numa variação de 0 a 10 minutos, em algumas propriedades das pastas de cimento como: trabalhabilidade, grau de hidratação, adsorção do aditivo, análise do tamanho das partículas.

- Verificando-se a **trabalhabilidade**, segundo a figura 2.15 para o instante igual a zero ou adição imediata, que corresponde ao tempo de introdução do superplastificante previamente misturado com a água no misturador, constatou-se que:

- durante os primeiros 4 minutos, a pasta que continha MF apresentou um valor menor de abatimento comparado ao encontrado pela pasta feita com NF, significando que, neste intervalo de tempo, o superplastificante à base de NF atribuiu maior fluidez e melhor trabalhabilidade à mistura;

- na faixa de tempo 4 até 30 minutos, constatou-se o contrário, de forma que a pasta contendo MF passou a ter maior trabalhabilidade.

Comprovou-se portanto que, ao se introduzir o aditivo no misturador após 2 minutos já iniciada a operação de mistura, os valores de abatimento das pastas de cimento, independente da natureza do aditivo que as compunham, foram os maiores apresentados, refletindo em melhor trabalhabilidade. A este tempo ideal de ingresso do superplastificante à mistura, deu-se o nome de “tempo ótimo de adição”.

- Quanto à velocidade de **adsorção**, a adição imediata do aditivo ao misturador levou a maiores valores de adsorção deste ao cimento, quando comparado ao emprego do aditivo no “tempo ótimo de adição”. Segundo a natureza do aditivo, para ambos os tempos de adição, as pastas contendo MF apresentaram maior adsorção que pastas com NF.

- O grau de hidratação das pastas com superplastificantes foi maior para aquele em que o aditivo foi introduzido no instante igual a zero. As pastas de cimento com ou sem superplastificantes, após 2 minutos de mistura, passaram por um “período de dormência”, em que o grau de hidratação do cimento pareceu se estabilizar.

- Quanto à análise do tamanho das partículas, o superplastificante independente de sua natureza e do tempo de adição ao conjunto, reduziu significativamente a agregação das partículas de cimento quando este foi misturado com a água.

FIGURA 2.15 - A influência do tempo de adição do superplastificante na trabalhabilidade das pastas de cimento. (CHIOCCHIO & PAOLINI, 1985).

Conclui-se que o tempo de adição do polímero ao misturador tem influência direta sobre a velocidade de adsorção do polímero e a velocidade de hidratação das pastas de cimento, as quais determinam a fluidez e a trabalhabilidade do sistema. No tempo de adição imediata, em que o superplastificante previamente misturado a água é introduzido na argamassadeira, observa-se a seguinte seqüência de efeitos:

- a rápida formação de uma película, composta pela molécula do polímero e/ou pelo produto da reação entre o aditivo e os constituintes do cimento hidratado, ao redor das partículas de cimento e/ou seus produtos hidratados;

- diminuição da velocidade de hidratação do cimento, devido à rápida adsorção do polímero ao cimento;

- redução do efeito dispersivo passados alguns minutos da adição do aditivo à mistura, devido ao envolvimento das moléculas de aditivo pelos produtos resultantes da hidratação do cimento. A grande diminuição da ação do superplastificante no conjunto;

- diminuição da fluidez da pasta antes do início da “período inativo de hidratação”. Este período corresponde à estabilização da velocidade de hidratação do cimento, após ela ter atingido um valor máximo.

Entretanto ao se adicionar o superplastificante ao misturador após 2 minutos do início da mistura, tem-se sucessivamente:

- a desfloculação das partículas de cimento;

- a porcentagem de molécula de aditivo adsorvida ao cimento, é menor que à adição imediata;

- a ausência do “efeito de envolvimento” do aditivo, causado pelos produtos que se formam pela reação entre o cimento e a água, de modo que o superplastificante “permanece completamente ativo na dispersão das partículas de cimento”;

- a adição tardia (2 minutos) coincide com o início do período inativo, de forma que não tem nenhuma influência na velocidade de hidratação do cimento.

Pode-se detectar, então, o momento em que se inicia o “período de dormência” das pastas sem superplastificantes, o qual dependerá da composição do cimento, temperatura e procedimento de mistura adotado, e adicionando-se o aditivo instantes antes deste estágio, consegue-se maior fluidez e melhor trabalhabilidade ao sistema (CHIOCCIO & PAOLINI, 1985).

Outros autores ainda, como ANDERSEN & ROY (1987), estudaram a adsorção dos superplastificantes aos cimentos através dos resultados obtidos pelos métodos zeta potencial e absorção ultravioleta. Foram testados aditivos de diferentes naturezas, como:

- polímero de naftaleno sulfonado com peso molecular é 15 g/mol;
- polímero de melamina sulfonada, cujo peso molecular é 19,5 g/mol;
- polímero de poliestireno cujo peso molecular é 70 g/mol.

Observou-se a influência do peso molecular dos superplastificantes nas suas capacidades de dispersão e adsorção nas partículas de cimento da mistura e concluiu-se que ocorre:

- o aumento da adsorção do polímero ao cimento medido pelo método de absorção ultravioleta, conforme há diminuição do peso molecular e da capacidade de dispersão do superplastificante;

- a diminuição nos valores de zeta potencial negativos, de acordo com a redução do peso molecular;

Dessa forma, o polímero de naftaleno cujo peso molecular é menor, apresenta maior adsorção, menor capacidade de dispersão, e menor valor de zeta potencial negativo. Já o polímero de poliestireno de grande peso molecular apresenta grande zeta potencial negativo, menor adsorção e alta capacidade de dispersão.

B) A atuação conjunta sílica ativa - superplastificante

A eficiência dos superplastificantes tem sido sugerida por BUIL et al (1986), através do estudo sobre a ação do superplastificante tanto nos grãos de cimento como nas partículas de sílica ativa. Nos primeiros instantes da mistura, ambos os sólidos se encontram mergulhados no concreto, numa solução básica, com certa porcentagem de íons de cálcio liberados pelo cimento. A tendência da sílica ativa é reagir com o cátion cálcio e se coagular, colaborando para o endurecimento rápido do concreto. A adição de superplastificantes à mistura, neste caso o naftaleno sulfonado, impede este processo através da adsorção do ânion orgânico do aditivo à superfície da sílica ativa por intermédio do íon cálcio, segundo a figura 2.16:

FIGURA 2.16 - Modelo de adsorção do ânion naftaleno na superfície do grão de sílica ativa (BUIL et al, 1986).

As adições minerais como a sílica ativa, material que possui grande finura, ao serem introduzidas nos concretos, requerem o aumento da quantidade de água de amassamento para manter dada trabalhabilidade. No entanto, esta elevação do fator a/c , é nociva ao material, causando redução de suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Com o objetivo de manter ou elevar a resistência à compressão destes concretos, são então utilizados os superplastificantes que reduzirem a relação a/c para uma mesma consistência do concreto.

LAHALIH et al (1988), estudaram a demanda de água de concretos com superplastificantes e verificaram que, teoricamente, os concretos comuns necessitariam de relação $a/c = 0,27$ para hidratar todo o cimento presente na mistura. Adicionando-se sílica ativa ao concreto, resultaria num aumento deste fator e, conseqüentemente, na modificação da viscosidade do sistema, gerando uma matriz estrutural menos homogênea. Porém, quando esta redução da demanda de água é compensada pela adição de superplastificantes, a consistência da mistura é mantida e as resistências aumentadas. Dessa forma, para a fabricação de CEDs, é imprescindível o uso conjunto de sílica ativa e aditivo.

Estes mesmos autores ainda compararam os valores de resistências alcançados por um concreto de referência (sem superplastificante) e concretos com 3% de superplastificantes e obtiveram:

- aumento de 20% a 25% na resistência à tração em concretos com superplastificantes;
- aumento na faixa de 5% a 8% na resistência à flexão em concretos com superplastificantes;
- aumento de 40% a 50% na resistência à compressão, aos 28 dias, em concretos com superplastificantes;
- aumento de 12% a 13% no módulo de elasticidade para concretos com superplastificantes;
- aumento em aproximadamente 50% no módulo de fluência para concretos com superplastificantes.

A figura 2.17 sugere que, embora o emprego de aditivo no concreto seja fundamental para a obtenção de um material com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade, a crescente dosagem de superplastificante não significa proporcional aumento na fluidez, maior dispersão do polímero e melhor trabalhabilidade do sistema, indicando haver uma porcentagem ideal de aditivo a ser usado, que se chama “teor ótimo” de superplastificante.

A morfologia da matriz da pasta de aglomerante pode ser entendida pelo estudo realizado por outros autores, como ALMEIDA (1990), ao pesquisarem os efeitos dos superplastificantes na zona de transição de concretos que continham ou não sílica ativa, constatando que:

- os aditivos, ao permitirem o abaixamento do fator a/c do concreto, contribuem para a redução da porosidade total do sistema e, conseqüentemente, para a diminuição do tamanho e quantidade de cristais de hidróxido de cálcio presentes na zona de transição;

- a sílica ativa agirá acentuando este efeito de “refinamento do tamanho dos poros”, densificando a pasta e colaborando para uma menor ocorrência de cristais de hidróxido de cálcio preferencialmente orientados.

FIGURA 2.17 - O efeito da dosagem de superplastificante na redução do teor de água do concreto (LAHALIH et al, 1988).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais

Procurou-se, ao longo de todo este estudo, utilizar na execução das caldas, argamassas e concretos de elevado desempenho, materiais de que o mercado local dispõe com facilidade e que são usualmente empregados em obras de construção civil. Todos os materiais empregados cumprem as especificações da norma brasileira e foram utilizados nas mesmas condições em que são empregados nas obras correntes.

3.1.1 - Cimento

Foram escolhidos 5 tipos diferentes de cimento Portland, sendo:

- 3 diferentes marcas comerciais (A,B e C) de cimento Portland composto com escória, sigla CP II E, classe 32, de acordo com a NBR-11578;
- 2 diferentes marcas comerciais (D e E) de cimento Portland de alta resistência inicial, sigla CP V-ARI, conforme NBR-05735.

A seleção dos cimentos ARI se deve à exigência de resistência à compressão aos 28 dias (55 MPa) pelo processo de dosagem. Quanto aos demais cimentos a idéia é saber até que resistência do CED pode ser alcançada com o emprego desta categoria de cimento. Entre nós existem poucos cimentos de alta resistência, ou seja, que alcancem 55 MPa aos 28 dias.

As caracterizações física e química dos cimentos Portland foram enviadas pelos seus fabricantes durante o desenvolvimento deste trabalho e se encontram respectivamente nas tabelas 3.1 e 3.2.

TABELA 3.1 - Caracterização física dos cimentos.

Características Físicas	Cimentos				
	A	B	C	D	E
Sigla	CP II E 32	CP II E 32	CP II E 32	CP V ARI	CP V ARI
Tempo de pega início (h)	3:15	2:51	2:26	2:08	2:25
fim (h)	4:05	4:10	3:13	3:14	3:35
Finura peneira 200 (%)	5,0	3,6	0,4	0,2	1,1
área esp.(m²/kg)	307	328	427	446	448
Resistência à Compressão (MPa)					
1 dia	-	-	-	28	26
3 dias	17	22	22	43	39
7 dias	23	29	31	47	43
28 dias	33	39	41	56	51
Expansibilidade à frio (mm)	0	-	-	-	0
à quente (mm)	0	0,5	-	0,4	0

TABELA 3.2 - Caracterização química dos cimentos.

Características Químicas	Cimentos				
	A	B	C	D	E
Perda ao fogo (%)	5,58	4,86	4,65	2,84	2,25
Resíduo insolúvel (%)	0,82	0,6	0,48	0,37	0,37
(SiO ₂)	21,22	21,82	21,55	19,29	-
(Al ₂ O ₃)	5,44	5,94	6,33	4,97	-
(Fe ₂ O ₃)	2,48	2,88	2,35	3,10	-
(CaO)	56,18	60,23	60,36	64,76	-
(MgO)	4,31	1,02	1,86	0,55	1,24
(SO ₃)	2,60	1,83	1,41	2,81	3,11
(CO ₂)	5,99	4,96	4,09	2,21	-

Composição química potencial	Cimentos				
	A	B	C	D	E
C ₃ S	-	43,30	-	58,80	63,90
C ₂ S	-	9,50	-	9,60	8,07
C ₃ A	-	6,00	-	7,50	6,31
C ₄ AF	-	7,00	-	9,10	9,65

3.1.2 - Agregados

A) Agregados miúdos

Neste trabalho foram utilizados 3 tipos de areia natural, cujas características são enumeradas abaixo:

- a) areia quartzosa natural, de granulometria média, proveniente da região de Campinas;
- b) areia normal brasileira, proveniente do Rio Tietê; composta de quatro tamanhos de grãos: 0,15 a 0,30 mm, 0,30 a 0,60 mm, 0,60 a 1,2 mm e de 1,2 a 2,4 mm;
- c) areia artificial proveniente dos agregados britados: granito, calcário, basalto e diabásio.

Realizou-se ensaio com a areia quartzosa para determinação da massa específica por meio do frasco de Chapman, conforme NBR 09776 e pode ser visto na tabela 3.3 e figura 3.1.

TABELA 3.3 - Massa específica dos agregados miúdos (NBR 09776)

Agregados miúdos	Massa específica (kg/dm ³)
areia quartzosa natural	2,61
basalto	2,67
diabásio	2,93
calcário	2,83
granito	2,63

FIGURA 3.1 - Ensaio pelo frasco de Chapman

B) Agregados graúdos

Empregou-se 4 agregados de naturezas diferentes, todos britados, em três faixas granulométricas cada (0,15 - 4,8 mm), (4,8 - 12,5 mm), (12,5 - 19,0 mm):

- 1) Granito, proveniente da região de Campinas;
- 2) Calcário, proveniente do estado do Paraná;
- 3) Basalto, proveniente da região de São Carlos;
- 4) Diabásio, proveniente da região de Limeira;

Para se determinar a massa específica e a absorção para os agregados graúdos (para partículas maiores que 4,8 mm) utilizou-se o método da balança hidrostática, segundo NBR 09937. Os resultados constam na tabela 3.4.

TABELA 3.4 - Massa específica e absorção dos agregados.

Agregados graúdos	Massa específica aparente seca (kg/dm ³)	Absorção (%)	Porosidade (%)
basalto (4,8 - 12,5)mm	2,82	2,05	5,85
basalto (12,5 - 19,0)mm	2,92	1,15	3,33
calcário (4,8 - 12,5)mm	2,80	0,50	1,29
calcário (12,5 - 19,0)mm	2,82	0,40	1,82
diabásio (4,8 - 12,5)mm	2,96	0,70	2,12
diabásio (12,5 - 19,0)mm	3,00	0,45	1,44
granito (4,8 - 12,5)mm	2,61	0,60	1,50
granito (12,5 - 19,0)mm	2,62	0,35	1,26

3.1.3 - Água

A água empregada nos concretos, argamassas e caldas era potável e proveniente da rede de abastecimento da cidade de Campinas.

3.1.4 - Superplastificante

Empregou-se um aditivo químico redutor de água, do tipo superplastificante, na forma de solução aquosa a 20% de um copolímero de melamina sulfonada e formaldeído, cujas características fornecidas pelo fabricante encontram-se na tabela 3.5.

TABELA 3.5 - Características do superplastificante.

	Aditivo
Base química	resina melamina - formaldeído
Densidade (g/ml)	1,13
Valor pH	9
Sólidos (%)	20

3.1.5 - Sílica ativa

O aditivo mineral empregado nesta pesquisa foi a sílica ativa, um pó finamente pulverizado, de tom cinza claro, com formato de partícula esférica, apresentando-se como uma sílica ativa amorfa (SiO₂), com baixo grau de

cristalização. É um produto decorrente do processo de fabricação de silício metálico, e caracterizado pelo fabricante, segundo tabelas 3.6 e 3.7.

TABELA 3.6 - Análise química da sílica ativa.

Determinações (%)	Sílica ativa
Perda ao fogo	2,30
Sílica (SiO_2)	95,10
Alumina (Al_2O_3)	0,09
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	0,10
Óxido de cálcio (CaO)	0,24
Óxido de magnésio (MgO)	0,43
Óxido de potássio (K_2O)	0,93
Óxido de sódio (Na_2O)	0,23

TABELA 3.7 - Características físicas da sílica ativa.

Determinações	Sílica ativa
Finura (m^2/kg)	19000
Valor pH	8,47
Densidade (kg/dm^3)	0,40
Umidade (%)	0,67
Massa específica (kg/m^3)	2220
Diâmetro médio da partícula (μm)	0,35

3.2 - Processo de dosagem

3.2.1 - Introdução

A dosagem de concretos de elevado desempenho (CED) é uma tarefa um pouco mais complexa do que aquela executada com o concreto tradicional. Embora o CED utilize os mesmos materiais componentes do concreto comum, em sua formulação entram até quatro constituintes suplementares: adições minerais finas, adições ultrafinas, aditivos superplastificantes e, eventualmente, aditivos retardadores de pega.

Nesta dissertação, apresenta-se a aplicação de um processo de dosagem do CED concebido por DE LARRARD, chefe da Seção de Dosagem e

Reologia do Concreto para Obras de Arte do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) de Paris, empregando os materiais e tecnologia de ensaios brasileiros. O processo é uma adaptação do método do LCPC criado por Baron e Lesage para concretos comuns, na dosagem de CED. Segundo DE LARRARD (1992), DE LARRARD & PUCH (1989), DE LARRARD (1988b) ele baseia-se em duas ferramentas semi-empíricas:

a) na previsão da resistência do concreto pela fórmula de Feret *modificada*, que utiliza um número limitado de parâmetros: relação a/c em massa, relação (adição mineral/cimento) em massa e resistência à compressão normal do cimento.

Segundo este método, a resistência do CED, composto por materiais rigorosamente selecionados, é controlada principalmente pela natureza e proporção da pasta aglomerante. Variando-se as proporções de um mesmo componente do concreto em questão, tem-se diferentes valores de resistência dados pela fórmula de Feret. Observa-se claramente os efeitos filler e pozolânico resultantes do abaixamento da quantidade de água de amassamento e a contribuição da relação sílica ativa/cimento.

Sob o ponto de vista econômico, os componentes mais caros do concreto encontram-se dentro da pasta de forma que se procura dosar o concreto de modo que, minimizando-se o volume da pasta aglomerante e mantendo-se uma trabalhabilidade adequada para a sua moldagem, se tenha o menor custo possível sem prejudicar as propriedades mecânicas do material.

b) no modelo reológico do concreto fresco de Farris (BUIL et al 1987; DE LARRARD, 1992).

Segundo o modelo relatado por Farris, a trabalhabilidade de um concreto fresco, cuja granulometria é mantida fixa, depende apenas da concentração e da fluidez da pasta aglomerante.

Desta forma, o processo trata de isolar a fração volumétrica de pasta para determinar os teores ótimos dos componentes nela (adição mineral, superplastificantes, água), que confirmam a máxima resistência e durabilidade e resultem num concreto fresco com certa viscosidade e boa trabalhabilidade.

Pelo que foi exposto acima, depreende-se que o processo de dosagem considera separadamente as fases aglomerante e agregado do concreto. Ele busca otimizar a composição da pasta, através da variação na proporção dos ingredientes, para se alcançar viscosidade (modelo de Farris) e resistência (modelo de Feret) adequadas. Depois esta pasta de composição otimizada é reinjetada no esqueleto granulométrico, composto de grãos sadios, e de compacidade ótima determinada por um processo qualquer de dosagem de concreto tradicional.

3.2.2 - Descrição e comentários sobre o processo de dosagem

Etapa a - Escolha de um concreto regional.

O passo inicial do processo é a escolha de um traço para uma mistura de concreto denominada “*concreto regional*”, feito com os materiais locais, de reconhecida qualidade pelo uso, podendo ser, por exemplo, o concreto empregado na construção de obras de arte.

DE LARRARD (1992), DE LARRARD & PUCH (1989), DE LARRARD (1988b) sugerem que se empregue o método do LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), de autoria de Baron e Lessage, para se obter a máxima compacidade com os grãos dos agregados. No Brasil, alcança-se este objetivo lançando-se mão de um dos processos de dosagem do concreto, ou do INT ou do ITERS (PETRUCCI, 1978).

Etapa b- Fixação do traço do concreto de referência.

Conhecida a granulometria do “*concreto regional*”, utiliza-se esta composição granulométrica na fabricação de um CED, que empregue um cimento que tenha resistência à compressão mínima de 55 MPa, e que tenha consumo de cimento entre 400 a 450 kg /m³ de concreto, valor este apropriado à dimensão máxima

característica do agregado, de 20 a 25 mm. Esta quantidade de cimento usada conduz à compacidade ótima do concreto, portanto, a uma maior contribuição dos agregados para a resistência. Caso se utilizem agregados com dimensão máxima característica menor que 25 mm, aumenta-se o consumo de cimento. (DE LARRARD & TONDAT, 1993).

Adiciona-se o superplastificante à mistura na base de 1,5 % da massa do cimento, em teor de sólidos do aditivo, naturalmente, dependendo da sua composição química e da sua concentração na solução.

Determina-se a quantidade de água na mistura por tentativas, até que o abatimento do concreto atinja cerca de 200 mm.

Fixa-se, assim, o traço deste CED chamando-o de “*concreto de referência*”, ainda sem as adições minerais, de resistência à compressão muito mais elevada do que a do “*concreto regional*” devido à drástica diminuição da relação água/cimento causada pelo superplastificante.

Etapa c- Calda de referência

Prepara-se uma “*calda de referência*” com a mesma composição da pasta do “*concreto de referência*” da etapa anterior, subtraindo-se dela a água absorvida pelos agregados. Esta absorção, estimada entre 10 e 20 l/m³ de concreto para os agregados correntes, segundo DE LARRARD & PUCH (1989), resulta numa variação de 0,025 a 0,050 na relação água/cimento num concreto de consumo médio de 400 kg/m³ de cimento. Corresponde igualmente a um teor médio de absorção de 0,65% por parte de agregados de naturezas diversas, percentual perfeitamente condizente com o medido para as britas utilizadas nesta investigação e nas de PEREIRA NETO (1994); GIOCCIO & ZERBINO (1996).

DE LARRARD & PUCH (1989) sugerem um pré-umedecimento dos agregados graúdos, horas antes do seu emprego no concreto, para levar em conta essa cota de água subtraída à água de amassamento.

Mede-se o tempo de escoamento da calda de cimento pelo cone de Marsch, tomando-se o cuidado de se fixar o diâmetro do tubo de saída do funil e a

quantidade de calda ensaiada para que o tempo de escoamento fique entre 5 e 15 segundos. Estes valores ficam, normalmente, entre 10 e 12,5 mm e 200 ml de calda, respectivamente. Neste trabalho, fixa-se um diâmetro de 10 mm para o tubo e um volume de 200 ml para a pasta. Registra-se este último como o “*tempo de escoamento de referência*”. Daqui para frente, dosam-se as caldas para se chegar a este resultado que traduz a viscosidade adequada.

Etapa d- Composição mineral das caldas dos CEDs

Selecionar de antemão a composição de m caldas, dentre as quais se escolherá aquela que será a pasta do CED pesquisado. O sistema aglomerantes-aditivos-adições minerais deve ser estudado. Um excelente trabalho sobre a compatibilidade entre cimentos, adições e superplastificantes de diversas marcas, procedências e composições químicas poderá ser encontrado em PENTALLA (1986). Na seleção de materiais, os seguintes pontos auxiliarão na escolha:

- composição química do cimento (em igualdade de resistência mecânica, o cimento que tiver menor teor de C_3A é, freqüentemente o melhor, segundo DE LARRARD (1988a);

- escalonar o teor de sílica ativa de 5 em 5 %. O teor ótimo, segundo a literatura internacional, está entre 5 e 10% mas, em DE LARRARD (1988b), DE LARRARD (1987) prova-se que, para a máxima compacidade da mistura binária cimento mais sílica ativa, a proporção em volume é uma parte de sílica ativa para três partes de cimento, o que conduz à proporção da mistura em massa para 23 % de sílica ativa e 77 % de cimento.

Etapa e- Dosagem de superplastificante nas caldas dos CEDs

Buscar, por tentativas, para cada composição das misturas secas das caldas da etapa anterior, a dosagem de água que, na presença de um teor de 0,3 a 0,5 % do superplastificante (porcentagem de aditivo em pó em relação à massa dos aglomerantes), forneça uma viscosidade da calda correspondente a aproximadamente 20 segundos de tempo de escoamento no cone de Marsch. Determinada esta dosagem de água, ela será fixada e, por tentativas novamente, sempre com a elaboração de

novas caldas a cada determinação, buscar-se-á a quantidade de saturação do superplastificante, através da adição de teores crescentes de aditivo.

Lança-se em gráfico o tempo de escoamento da calda pelo funil contra a relação entre massas do superplastificante e do cimento. A curva obtida passa por um mínimo e depois aumenta ligeiramente para as dosagens mais fortes de aditivo, tornando-se novamente mais viscosa.

A *dosagem de saturação*, isto é, o teor de superplastificante mais baixo, segundo o qual o tempo de escoamento é mínimo, é fixado para a sequência dos ensaios.

Etapa f- Dosagem de água nas caldas dos CEDs.

Determinada a dosagem de superplastificante na etapa anterior, fixa-se esta quantidade nas pastas e trata-se de determinar agora, por tentativas, a quantidade de água que confira à calda o “*tempo de escoamento de referência*” da etapa *c*. As várias caldas obtidas são comparáveis, sob o ponto de vista de que elas permitiriam realizar CEDs com mesmo volume de pasta e mesma trabalhabilidade. Nesta altura da dosagem, já foram determinados os teores ótimos de superplastificante (*teor de saturação* na etapa *e*) e dosagem de água que conduz ao “*tempo de escoamento de referência*” nesta etapa.

Etapa g- Dosagem do aditivo retardador de pega.

Mede-se a variação do tempo de escoamento de cada calda durante o tempo previsto correspondente às operações de transporte e lançamento do concreto, isto é, de uma a duas horas. Se o tempo de escoamento aumenta significativamente, torna-se necessário o uso de retardadores de pega, utilizando-se a dosagem apenas o necessário para estabilizar o tempo de escoamento.

Etapa h- Escolha da calda do CED.

Com as *m* composições das caldas dosadas pode-se calcular as composições teóricas das *m* misturas de CEDs, os quais terão o mesmo volume de pasta do “*concreto de referência*” da etapa *b*. À quantidade de água de cada pasta deverá ser acrescentada uma parcela menor devido à absorção dos agregados (já

citada). A melhor combinação aglomerantes/superplastificantes é aquela para a qual a relação água/cimento obtida é a mais baixa.

A lei de Feret permite, então, fazer uma avaliação da resistência à compressão e a seleção do traço da calda dentre os otimizados.

Etapa i- Verificação das propriedades do CED dosado.

Compõe-se, com a calda selecionada na etapa anterior, um CED de granulometria e volume de pasta do “concreto de referência”. Testa-se este CED quanto à trabalhabilidade e à resistência mecânica para ver se ele alcança as propriedades visadas. Se não as alcançar, volta-se à etapa *h* e retoma-se o processo.

Extensão da fórmula de Feret

Um dos objetivos mais visados pelos tecnologistas de concreto é estabelecer uma fórmula empírica que forneça a previsão da resistência de concretos, a partir da resistência de argamassas.

De Larrard propõe modificações na tradicional fórmula de Feret para estimar a resistência dos CEDs feitos com sílica ativa e/ou cinza volante (DE LARRARD, 1992; DE LARRARD & PUCH, 1989; DE LARRARD, 1988a; DE LARRARD, 1995). No Brasil, constata-se esta tentativa em RODRIGUES (1984) e HELENE (1987) trabalhando com concretos correntes.

A fórmula de Feret modificada, proposta por De Larrard, toma o seguinte aspecto :

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a/c}{1 + \varphi(s/c)} \right]^2}$$

f_c = resistência à compressão do corpo de prova cilíndrico 15x30 cm de concreto, aos 28 dias

a, c, s = são as massas de água, cimento e sílica ativa por m^3 de concreto

K_g = parâmetro que depende do tipo de agregado e do tipo de cimento

R_c = resistência à compressão do cimento aos 28 dias na forma de argamassa padrão ISO

γ_c = massa específica do cimento

$\phi(s/c)$ = função do tipo $A[1-B.\exp(-C(s/c))]$, ajustada aos resultados experimentais, que leva em conta a influência do teor de sílica ativa na resistência dos concretos e argamassas.

Obtém-se uma previsão da resistência à compressão do concreto f_c entrando com as relações água/cimento (a/c) e sílica ativa/cimento (s/c) na fórmula acima, desde que o cimento e os agregados componentes do concreto sejam da mesma natureza daqueles que foram utilizados na calibração da fórmula.

Na aplicação deste processo de dosagem aqui apresentada, utilizam-se corpos de prova cúbicos para a medida da resistência à compressão dos concretos e argamassas.

Emprega-se a areia normal brasileira na elaboração da argamassa que servirá para calibrar a equação de Feret.

Procede-se à cura acelerada de todos os corpos de prova, em água em ebulição, baseando-se na norma brasileira NBR-08045 e na publicação de SEKI et al. (1985).

Segundo DE LARRARD (1992), para relações água/cimento abaixo de 0,40, a precisão da fórmula é de 5 MPa, em valores absolutos. Este resultado foi obtido neste trabalho, apesar da metodologia de ensaio diferente aplicada: formato e dimensões dos corpos de prova, tipo de cura, diferentes tipos de agregados, etc.

3.2.3 - Descrição das formas

a) Cone de Marsch

O funil empregado (figura 3.2) especialmente para a utilização neste ensaio, foi fabricado com chapa de aço galvanizada, soldada, com as seguintes dimensões:

- diâmetro maior igual a 155 mm;

- diâmetro menor igual a 10 mm;
- altura do tronco de cone igual a 290 mm.

Estas dimensões perfazem a capacidade do funil em 1,5 litros. O diâmetro do tubo de saída do funil é de 10 mm e o seu comprimento 60 mm.. Tem-se um béquer graduado cuja, capacidade de volume é superior ao volume escorrido pelo funil.

FIGURA 3.2 - Funil empregado

b) Formas cúbicas para argamassas e concretos

Os moldes das formas cúbicas para argamassa, de aresta 5 cm, empregados nesta dissertação foram fabricados obedecendo as dimensões das normas da ASTM. Eles foram construídos em latão fundido, posteriormente usinados, segundo mostra figura 3.3.

Os moldes das formas cúbicas para concreto, de aresta 7,5 cm, foram especialmente fabricados para a realização deste trabalho, considerando a possibilidade da execução da cura térmica de água em ebulição, a dispensa de capeamento no ensaio de compressão e o aumento da precisão na medida da

resistência. Eles foram construídos com chapas de aço de 10 mm, usinados, e montados com encaixes e parafusos sendo mostrados na figura 3.4.

FIGURA 3.3 - Formas cúbicas para argamassa.

FIGURA 3.4 - Formas cúbicas para concreto.

3.2.4 - Preparação das caldas, argamassas e concretos

a) Caldas de cimento sem sílica ativa

Ordem de colocação dos materiais na argamassadeira:

- introduzir na argamassadeira toda a água previamente misturada com o superplastificante, vide figura 3.5;
- adicionar lentamente à mistura, a toda a quantidade de cimento;
- após introduzir todo o cimento, acionar o cronômetro e aguardar 30 s;
- ligar o misturador na velocidade baixa durante 30 s.;
- parar a mistura durante 120 s., sendo que durante os primeiros 15 s. devem ser raspadas com uma espátula a parede interna da argamassadeira e sua pá, de modo a juntar toda a pasta no fundo da cuba;
- ligar a argamassadeira na velocidade alta durante 60 s.

b) Caldas de cimento com sílica ativa, segundo DE LARRARD & PUCH (1989).

- colocar na argamassadeira a sílica ativa com 50 % de sua massa em água;
- misturar em velocidade alta durante 3 minutos;
- acrescentar o resto da água com um terço do superplastificante;
- misturar à mão durante 3 minutos;
- acrescentar os outros aglomerantes (cimentos mais os finos diversos, se for o caso);
- misturar 1 minuto em velocidade baixa e mais 1 minuto em velocidade alta;
- juntar os dois terços restantes de superplastificante;
- misturar mais 2 minutos em velocidade alta.

FIGURA 3.5 - Introdução de materiais na argamassadeira.

c) Argamassas

- introduzir, inicialmente, na argamassadeira toda a quantidade de água previamente misturada ao superplastificante;
- adicionar a sílica ativa, ligar a argamassadeira na velocidade baixa e aguardar 15 s.;
- adicionar o cimento e deixar na velocidade baixa durante 30 s.;
- sem paralisar a operação da mistura, colocar a areia (as quatro frações de areia normal pré-misturadas);
- mudar a velocidade para alta, misturando durante 30 s.;
- após este tempo, desligar a argamassadeira durante 1 min. e 30 s.;
- nos primeiros 15 s., retirar com auxílio da espátula a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá, colocando-a no interior da cuba;
- durante o tempo restante, a mistura fica em repouso na cuba coberta com pano limpo e úmido;

- ligar a argamassadeira na velocidade alta por mais 1 min..

d) Concretos

- introduzir primeiramente os agregados graúdos nas granulometrias 4,8/12,5 e 12,5/19, previamente misturados;
- colocar toda a água;
- ligar a betoneira durante 1 min.;
- adicionar o cimento e a sílica ativa, que devem estar misturados, sem paralisar a mistura;
- misturar por 1 min.;
- adicionar à mistura todo o superplastificante;
- juntar toda a areia previamente misturada com todo o agregado graúdo de granulometria 0,15/4,8 mm.

Alguns materiais empregados na execução dos CEDs podem ser vistos nas figuras 3.6 e 3.7.

FIGURA 3.6 - Materiais empregados na confecção dos CEDs.

FIGURA 3.7 - Materiais empregados na confecção dos CEDs.

3.2.5- Medida do tempo de escoamento da calda

Descrição do ensaio de escoamento da pasta de aglomerante, pelo cone de Marsch:

- montar o conjunto béquer-funil, como mostra a figura 3.8;
- introduzir a calda de aglomerante no cone de Marsch;
- medir o tempo de escoamento da calda com um cronômetro, de 200 em 200 ml;

O resultado é a média dos valores obtidos para o tempo de escoamento, de cada 200 ml da calda, pelo funil.

FIGURA 3.8 - Conjunto béquer-funil.

3.2.6 - Moldagem e cura dos corpos de prova

Moldagem

A moldagem dos corpos de prova de argamassa é feita imediatamente após o amassamento e com maior rapidez possível, e segue os passos abaixo:

- colocar a argamassa na forma com o auxílio da espátula, em quatro camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com soquete normal, homogeneamente distribuídos;
- terminar esta operação com a rasadura do topo dos corpos de prova, por meio da régua que o operador faz deslizar sobre as bordas da forma em direção normal à régua.

Os corpos de prova de concreto são compactados sobre a mesa vibratória, sendo as formas preenchidas com a mesa em funcionamento. Nas figuras 3.9 a 3.12 pode-se observar o CED sendo preparado.

Cura

Após a moldagem os corpos de prova, ainda nos moldes, são colocados em câmara úmida, onde permanecem durante 24 horas. Após este período, os corpos de prova de argamassas e de concretos são removidos das formas e colocados em água em ebulição por três horas e meia, segundo NBR 08045. Retirados da cura térmica, os corpos de prova são ensaiados, depois de uma hora, conforme figuras 3.13 e 3.14.

FIGURA 3.9 - Fabricação dos CEDs.

FIGURA 3.10 - Fabricação dos CEDs.

FIGURA 3.11 - Moldagem dos corpos de prova de CEDs.

FIGURA 3.12 - Moldagem dos corpos de prova de CEDs.

FIGURA 3.13 - Ensaio de resistência à compressão das argamassas.

FIGURA 3.14 - Ensaio de resistência à compressão dos CEDs.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Introdução

Com a finalidade de proporcionar maior conforto ao leitor a figura 4.1 fornece um fluxograma do processo de dosagem que deve ser consultado pelo mesmo, para melhor se situar, ao examinar os resultados apresentados.

Como já foi dito anteriormente o processo de dosagem é abrangente, ou seja, ele supõe que se selecione e empregue os materiais componentes dentre as várias opções disponíveis. No caso desta dissertação, ele será aplicado para as combinações de 5 tipos de cimentos com 4 agregados graúdos de naturezas diferentes e apenas uma adição mineral ultrafina, que é a sílica ativa.

Uma das exigências do processo de dosagem para se obter um CED é que o cimento empregado tenha uma resistência à compressão mínima, aos 28 dias, de 55 MPa. Dos 5 cimentos empregados nesta investigação, apenas dois deles, de alta resistência inicial, alcançam este patamar de resistência. Os demais, cimentos da classe CP II E 32 das normas brasileiras, não ultrapassam os 40 MPa, mas, mesmo assim foram testados no intento de se conseguir concretos de elevado desempenho.

Os resultados apresentados nos itens 4.4 e 4.5 (dosagem de SP nas caldas de CED e dosagem de água nas caldas do CED) foram obtidos empregando nos ensaios correspondentes o cimento A. Estes mesmos resultados foram utilizados posteriormente com os outros quatro cimentos.

FIGURA 4.1 - Etapas do processo de dosagem.

4.2 - Concreto de referência (etapas a e b)

O objetivo do processo é partir de concreto de boa qualidade, “concreto regional”, por exemplo, o concreto da estrutura de uma obra de arte, feito com materiais locais, chegar a um CED, de consistência fluída e de resistência à compressão entre 50 e 100 MPa.

No nosso estudo, o traço do “concreto regional” foi obtido lançando-se mão do processo de dosagem ITERS, apresentado em PETRUCCI (1987), de domínio dos tecnologistas do concreto.

Aproveitando a composição granulométrica do “concreto regional”, adiciona-se a ela um consumo de cimento de mais ou menos 400 a 450 kg de cimento e teor de superplastificante para conferir à mistura um abatimento próximo a 200 mm, para se chegar ao “concreto de referência” da tabela 4.1.

TABELA 4. 1 - Composição do “concreto de referência”.

MATERIAIS	traço (massa)	kg/m ³
cimento	1,00	440
sílica ativa	-	-
areia natural	0,85	374
brita (0,15/4,8)mm	0,85	374
brita (4,8/12,5)mm	0,97	420
brita (12,5/19)mm	1,93	849
água	0,33	145,2
superplastificante (pó)	0,015	6,6
volume de pasta	28,9 %	288,54 l

4.3 - Calda de referência (etapa c)

Na tabela 4.2 tem-se a composição da pasta ou “*calda de referência*” extraída do “*concreto de referência*”. Desta mistura, subtrai-se a parcela de água absorvida pelos agregados do concreto correspondendo a aproximadamente 30 l/m³ de concreto.

Prepara-se a “*calda de referência*” segundo procedimento descrito no capítulo 3, utilizando-se um volume de 1,5 litros de pasta. Mede-se pelo cone de Marsch, o tempo de escoamento de 200 ml desta pasta. Este tempo medido, no caso, igual a 13 segundos, será considerado como *tempo de escoamento de referência*. Esta medida foi executada num ambiente com as seguintes condições: temperatura da sala de 21 a 25 °C e umidade relativa de 57 a 72 %.

TABELA 4.2 - Materiais componentes da “*calda de referência*”.

Materiais Componentes	massa (g)	traço
cimento A	3000	1,00
sílica ativa	-	-
superplastificante (pó)	45	0,015
água	810	0,27

4.4 - Dosagem de superplastificante nas caldas do CED (etapa e)

A dosagem do teor de superplastificante é calculada como o teor de sólidos do aditivo na solução em relação à massa de cimento.

São preparadas as pastas aglomerantes com crescente porcentagem de sílica ativa, obedecendo aos seguintes passos:

1) Prepara-se, primeiramente, uma calda com 0,3% de superplastificante (teor sugerido por De Larrard), e quantidade de água a determinar por tentativas, até que o tempo de escoamento atinja mais ou menos 20 segundos;

2) Com o teor de água fixado conforme item 1, faz-se agora caldas com teores crescentes de superplastificantes e mede-se os tempos de escoamento objetivando chegar à *dosagem de saturação* do superplastificante na calda;

3) Lança-se em gráfico os tempos de escoamento medidos anteriormente *versus* relação superplastificante/mistura aglomerante (em massa);

As tabelas 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, apresentam os resultados obtidos conforme o item 2 acima descrito. As tabelas 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 mostram as condições do ambiente quando se dá a realização deste experimento. As figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 apresentam os gráficos que relacionam os tempos de escoamento contra relação superplastificante/ mistura aglomerante, conforme o item 3 acima. Nestas figuras estão indicadas as *dosagens de saturação* do superplastificante, que correspondem ao teor de SP, a partir do qual o tempo de escoamento permanece constante. Aumentando-se a relação superplastificante/ cimento, constata-se um aumento na viscosidade da calda, o que é traduzido por um aumento do tempo de escoamento na curva.

Estas curvas são características do sistema cimento / sílica ativa / superplastificante empregado. Caso se deseje utilizar outra mistura aglomerante, os valores destas figuras deverão servir de base para dosagem de novas caldas, evitando-se, assim, um grande número de tentativas.

4.5 - Dosagem de água nas caldas de CED (etapa f)

Nesta etapa determina-se a quantidade “ótima” de água para as pastas aglomerantes trabalhadas da etapa anterior. Fixa-se os teores da superplastificantes que correspondem à dosagem de saturação, conforme as figuras 4.2 a 4.7 da etapa anterior para cada calda de cimento:

sílica ativa/cimento (kg/kg)	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
superplastificante/cimento (%)	1,5	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0

Prepara-se novas caldas com estes teores de superplastificante e quantidade de água a determinar, por tentativas, até se chegar a um tempo de escoamento próximo daquele da “calda de referência”, da etapa c, ou seja 13 segundos. Os resultados destas determinações estão na tabela 4.15.

TABELA 4.15 - Composições resultantes das pastas dos CEDs.

MATERIAIS	TRAÇO (massa)					
sílica ativa	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
superplastificante (pó)	0,015	0,015	0,015	0,02	0,025	0,03
água	0,27	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31
tempo de escoamento (s)	13	12	12	13	12	12

TABELA 4.3: Condições de operação no preparo da calda com 0% de sílica ativa

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	19°C	22°C	56%	63%

TABELA 4.4 - Composições resultantes das pastas com 0% de sílica ativa (etapa e).

matérias	traços (em massa)										
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
silica ativa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SP	0,003	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	0,0175	0,02	0,025	0,035	0,05
a/c	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285
t (segundos)	22	8	9	5	5	5	6	6	5	5	7

FIGURA 4.2 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 0% sílica ativa.

TABELA 4.5 - Condições de operação no preparo da calda com 5% de sílica ativa

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	18°C	22°C	54%	76%

TABELA 4.6 - Composições resultantes das pastas com 5% de sílica ativa (etapa e).

materiais	traços (em massa)										
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
silica ativa	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
SP	0,003	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	0,0175	0,02	0,025	0,035	0,05
a/c	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275
t (segundos)	17	10	9	8	10	10	13	13	10	12	13

FIGURA 4.3 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 5% sílica ativa.

TABELA 4.7 Condições de operação no preparo da calda com 10% de sílica ativa:

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	21°C	23°C	51%	73%

TABELA 4.8-Composições resultantes das pastas com 10% de sílica ativa (etapa e).

materiais	traços (em massa)										
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
cimento A	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
silica ativa	0,003	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	0,0175	0,02	0,025	0,035	0,05
SP	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348
a/c	20	4	3	4	4	4	6	6	5	7	7

FIGURA 4.4 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 10% sílica ativa.

TABELA 4.9 Condições de operação no preparo da calda com 15% de sílica ativa:

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	20°C	23°C	64%	71%

TABELA 4.10 - Composições resultantes das pastas com 15% de sílica ativa (etapa e).

materiais	traços (em massa)											
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sílica ativa	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
SP	0,003	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	0,0175	0,02	0,025	0,035	0,05	
a/c	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	
t(segundos)	15	2	3	2	1	2	2	3	3	2	3

FIGURA 4.5 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 15% sílica ativa.

TABELA 4.11 Condições de operação no preparo da calda com 20% de sílica ativa:

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	20°C	24°C	69%	71%

TABELA 4.12 - Composições resultantes das pastas com 20% de sílica ativa (etapa e)

componentes	traços (em massa)							
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
silica ativa	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
SP	0,003	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,035	0,05
a/c	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
t (segundos)	15	4	4	5	4	3	3	3

FIGURA 4.6 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 20% sílica ativa.

TABELA 4.13 Condições de operação no preparo da calda com 25% de sílica ativa:

condições de operação				
temperatura da água e dos materiais	temperatura da sala		umidade relativa do ar	
	mínima	máxima	mínima	máxima
20 ± 3°C	21°C	25°C	57%	72%

TABELA 4.14 - Composições resultantes das pastas com 25% de sílica ativa (etapa e)

materiais	traços (em massa)							
cimento A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sílica ativa	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
SP	0,003	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,035	0,05
a/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
t (segundos)	18	4	2	3	5	3	2	2

FIGURA 4.7 - Dosagem de saturação de superplastificante na calda com 25% de sílica ativa.

4.6 - Escolha das caldas do CED

A tabela 4.15 apresenta as composições ótimas resultante da caldas do CED feitas com o cimento tipo A. Sendo assim, para os cimentos B, C, D e E foram adotadas as mesmas composições ótimas das caldas com cimento A, ou seja, da tabela 4.15.

A tabela 4.16 apresenta os traços, em massa, das argamassas de elevado desempenho, cujas composições derivam da argamassa padrão brasileira (1:3, $a/c = 0.48$, areia normal com 4 frações de tamanhos de grãos), da mesma forma que as argamassas empregadas por DE LARRARD foram adaptadas da argamassa ISO (1:3, $a/c = 0.50$, areia RILEM). Estas argamassas são transformadas em argamassas de alto desempenho pelo emprego nelas dos parâmetros das caldas de CED da tabela 4.15. Não esquecer de adicionar à relação água/cimento, a mesma parcela de água devido à absorção dos agregados do concreto, de tal modo então, que as argamassas de elevado desempenho terão as mesmas relações a/c que os CEDs.

A tabela 4.17 fornece as composições resultantes dos CEDs que são usados na verificação da precisão da calibragem da fórmula modificada de Feret. As misturas conservam a mesma composição granulométrica e o mesmo volume de pastas do “concreto de referência”(etapa b). Quanto aos teores de superplastificante e de sílica ativa, e à relação água/cimento são os mesmos parâmetros das caldas dosadas na etapa f (tabela 4.15), somente que a relação a/c foi corrigida pelo acréscimo da parcela de água que é absorvida pelos agregados.

A escolha das caldas de CED a que se refere o item 4.6 diz respeito a escolha da composição da calda, dentre as várias opções disponíveis (resultantes das combinações dos vários cimentos, adições minerais ultrafinas e tipos de superplastificantes empregados na dosagem). No caso desta pesquisa, dispõe-se de 5 cimentos diferentes, uma adição ultrafina e um superplastificante, o que reduz substancialmente as opções de combinações para a dosagem das caldas.

4.6.1 - Resistência à compressão das argamassas e concretos de elevado desempenho

As tabelas 4.18 a 4.22 fornecem os resultados de resistência à compressão das argamassas e concretos de elevado desempenho feitos com areia normal, com os 5 tipos de cimento (A, B, C, D, e E) e com 4 tipos de agregados graúdos (granito, diabásio, basalto e calcário). Cada um dos resultados nestas tabelas representam a média de 6 resultados de ensaio de compressão de corpos de prova cúbico (5,0cm) para a argamassa e cúbico (7,5 cm)para os CED.

A justificativa para a escolha do formato cúbico, tanto para a argamassa como para o concreto, foi pelo fato de ser possível dispensar o capeamento dos corpos de prova. Esta tarefa é aborrecida e toma tempo, principalmente considerando-se uma pesquisa como esta, com grande número de corpos de prova. As dimensões das espécimes também são justificadas considerando a capacidade de carga das máquinas do laboratório, a facilidade de manipulação e a economia de trabalhar com pouco material, a maior precisão dos resultados obtidos, a exequibilidade da cura em água em ebulição e também , a esperança de que a reação pozolânica ocorresse em sua plenitude, ou seja, consumindo toda a portlandita liberada na hidratação do cimento, realizando assim todo o potencial dos compósitos em termos de resistência mecânica e de desempenho de uma maneira global.

As figuras 4.8 a 4.12 apresentam os mesmos valores das resistências à compressão das argamassas e concretos, das tabelas citadas acima, lançadas em gráficos contra os teores de sílica ativa, levando em conta todos os materiais empregados.

Antecipando-se ao item 4.6.2, constata-se ao observar as curvas das figuras 4.8 a 4.12, ao contrário do que afirma o autor deste processo de dosagem (DE LARRARD, 1988), que as resistências dos CED ensaiadas, com algumas exceções, não acompanham as resistências das argamassas de elevado desempenho a medida que aumenta o teor de sílica ativa. Ora, de acordo com o que dispõe o processo de dosagem as resistências dos CED deveriam coincidir com as das argamassas ou, pelo

menos, desviar de ± 5 MPa, conforme DE LARRARD (1988). Nos resultados apresentados nas citadas figuras, apenas o concreto feito com calcário obedece esta premissa e, por outro lado, surpreendentemente, o concreto feito com basalto é o que fornece os mais baixos resultados e, por conseguinte, o que mais se afasta da curva da argamassa. Este fato carece de investigação mais aprofundada e, em conjunto com a influência de parâmetros externos exercida sobre a preparação e ruptura dos corpos de prova, pode-se à primeira vista enveredar por pistas, tais como, a sensibilidade dos agregados graúdos à temperatura da cura térmica manifestada através do seu coeficiente de dilatação térmica, possibilidade de reação química acelerada entre componentes do cimento e o agregado (formação de carboaluminato de cálcio, por exemplo nos agregados calcários) fortalecendo a zona de transição etc.

Um outro fato a ser registrado, ao se examinar as referidas figuras, é que o acréscimo de resistência das argamassas e concretos acima do teor, de mais ou menos, 10% de sílica ativa, é muito menor do que o aumento da resistência alcançado até os 10%, não compensando economicamente, talvez, valores de adição acima deste patamar. Isto vem de encontro ao que apregoa a literatura internacional de que o teor ótimo de sílica ativa num CED é de 10% em relação à massa de cimento, não compensando economicamente ultrapassar esse limite.

TABELA 4.16 - Traço das argamassas de elevado desempenho para calibração da fórmula de Feret.

Argamassas	1	2	3	4	5	6
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sílica ativa	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
areia normal	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
superplastificante (pó)	0,015	0,015	0,015	0,02	0,025	0,030
água	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30

TABELA 4.17 - Traço dos CEDs para todos os tipos de cimentos citados.

	SÍLICA ATIVA (%)					
CONCRETOS	0	5	10	15	20	25
sílica ativa (kg/m³)	0	21,9	42,3	62,1	80,0	96,75
cimento A (kg/m³)	440	438	423	414	400	387
areia quartzosa (kg/m³)	374	374	374	374	374	374
areia (0,15/4,8 mm) (kg/m³)	374	374	374	374	374	374
brita (4,8/12,5 mm) (kg/m³)	426	426	426	426	426	426
brita (12,5/19 mm) (kg/m³)	849	849	849	849	849	849
superplastificante (kg/m³) (pó)	6,6	6,6	6,3	8,3	10,0	11,6
água (kg/m³)	145,2	135,8	131,1	124,2	120,0	116,1

TABELA 4.18 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento A).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO*						
(MPa)						
teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20	25
argamassa	52	77	93	104	106	117
concreto (basalto)	52	63	68	77	78	82
concreto (calcário)	41	68	84	96	99	105
concreto (granito)	49	68	82	93	102	98

* cura térmica acelerada, em água em ebulição.

FIGURA 4.8 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento A).

TABELA 4.19 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento B).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *						
(MPa)						
teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20	25
argamassa	43	69	90	95	108	112
concreto (basalto)	56	73	77	80	83	87
concreto (calcário)	50	75	88	97	103	101
concreto (diabásio)	41	64	76	88	88	110
concreto (granito)	53	65	80	90	87	89

* cura térmica acelerada, em água em ebulição.

FIGURA 4.9 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento B).

TABELA 4.20 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento C).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *						
(MPa)						
teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20	25
argamassa	52	80	92	108	118	125
concreto (basalto)	52	61	65	72	78	83
concreto (calcário)	54	83	93	102	107	111
concreto (granito)	55	78	92	103	106	113

* cura térmica acelerada, em água em ebulição.

FIGURA 4.10 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento C).

TABELA 4.21 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento D).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *						
(MPa)						
teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20	25
argamassa	79	99	110	112	114	116
concreto (basalto)	68	82	89	97	99	102
concreto (calcário)	76	99	107	113	114	115
concreto (granito)	75	89	100	105	109	103

* cura térmica acelerada, em água em ebulição.

FIGURA 4.11 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento D).

TABELA 4.22 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento E).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *						
(MPa)						
teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20	25
argamassa	81	99	113	119	127	129
concreto (basalto)	65	85	89	89	90	96
concreto (calcário)	60	82	101	98	99	102
concreto (diabásio)	59	69	75	80	78	81
concreto (granito)	63	78	83	83	94	88

* cura térmica acelerada, em água em ebulição.

FIGURA 4.12 - Resistências à compressão dos CEDs (cimento E).

4.6.2 - Calibração da fórmula de Feret:

Consegue-se a calibração da fórmula de Feret empregando-se os resultados de resistência à compressão das argamassas-padrão dosadas com teores crescentes de sílica ativa de 0 a 25 %, através da equação:

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a/c}{1 + \varphi(s/c)} \right]^2}$$

A constante K_1 ($K_1 = K_g R_c$) é o resultado obtido, utilizando-se a fórmula acima para a resistência à compressão da argamassa-padrão, sem sílica ativa, ($\varphi(s/c) = 0$). Segundo DE LARRARD (1992), quando se empregar a fórmula de Feret para a previsão da resistência dos CEDs, K_1 pode se fazer igual ao produto $K_g R_c$ onde K_g é uma constante que depende do agregado utilizado e R_c é a resistência do cimento, aos 28 dias, medida na forma de argamassa padrão ISO.

Uma vez determinado K_1 calcula-se, pela mesma fórmula, os pontos experimentais resultantes $\varphi(s/c)$ para os teores de sílica ativa (tabelas 4.23 a 4.27).

As figuras 4.13 a 4.17 mostram as curvas ajustadas aos pontos experimentais $[\varphi(s/c); s/c]$ obtidos respectivamente com os cimentos A, B, C, D, E.

$$\phi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

Esta curva mostra o efeito majorador da adição da sílica ativa na resistência dos compósitos. Pela simples observação da curva $\phi(s/c)$ constata-se aquilo que as publicações internacionais já vêm afirmando há tempo : o teor ideal de sílica ativa no CED deve ser de, no máximo, 10 % da massa do cimento. Embora a curva mostre que a resistência do CED continue crescendo ao ultrapassar o limite de 10 % de sílica ativa , o aumento da resistência é muito menos acentuado e, talvez, não compense economicamente o uso de sílica ativa acima deste teor, como já citado.

Calibrada a fórmula de Feret modificada para os cimentos A, B, C, D, E, areia normal, superplastificante brasileiros, aplica-se agora esta fórmula na precisão da resistência dos CEDs fabricados com basalto, calcário, diabásio e granito.

As tabelas 4.28 a 4.32, expressam os valores de resistência à compressão para os CEDs dados pela fórmula de Feret modificada, segundo os valores de resistência fornecidas pelas argamassas. Nas figuras 4.18 a 4.22, podem-se comparar as resistências previstas, segundo DE LARRARD, com as resistências reais medidas para os CEDs feitos com agregados basalto, diabásio, calcário, granito e areia quartzosa.

TABELA 4.23 - Calibração da fórmula de Feret (cimento A).

argamassas	1	2	3	4	5	6
s/c	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fcm (MPa)	52	77	93	104	106	117
ϕ (s/c)	0,00	0,44	0,86	1,13	1,20	1,63

Valor de K_1 calculado = 216,30 MPa

Cálculo de ϕ (s/c) para as argamassas, utilizando-se os valores da tabela 4.23, segundo De Larrard:

$$\phi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

FIGURA 4.13 - Ajustamento da curva ϕ (s/c) por pontos experimentais.

TABELA 4.24 - Calibração da fórmula de Feret (cimento B).

argamassas	1	2	3	4	5	6
s/c	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fcm (MPa)	43	69	90	95	108	112
φ (s/c)	0,00	0,60	1,38	1,54	2,29	2,58

Valor de K₁ calculado = 178,86 MPa

Cálculo de φ (s/c) para as argamassas, utilizando-se os valores da tabela 1, segundo De Larrard:

$$\varphi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

FIGURA 4.14 - Ajustamento da curva φ (s/c) por pontos experimentais.

TABELA 4.25 - Calibração da fórmula de Feret (cimento C).

argamassas	1	2	3	4	5	6
s/c	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fcm (MPa)	52	80	92	108	118	125
φ (s/c)	0,00	0,51	0,83	1,28	1,67	1,99

Valor de K₁ calculado = 216,30 MPa

Cálculo de φ (s/c) para as argamassas, utilizando-se os valores da tabela 1, segundo De Larrard:

$$\varphi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

FIGURA 4.15 - Ajustamento da curva φ (s/c) por pontos experimentais.

TABELA 4.26 - Calibração da fórmula de Feret(cimento D).

argamassas	1	2	3	4	5	6
s/c	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fcm (MPa)	79	99	110	112	114	116
φ (s/c)	0,00	0,18	0,34	0,32	0,35	0,38

Valor de K₁ calculado = 328,60 MPa

Cálculo de φ (s/c) para as argamassas, utilizando-se os valores da tabela 1, segundo De Larrard:

$$\varphi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

FIGURA 4.16 - Ajustamento da curva φ (s/c) por pontos experimentais.

TABELA 4.27 - Calibração da fórmula de Feret (cimento E).

argamassas	1	2	3	4	5	6
s/c	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fcm (MPa)	81	99	113	119	127	129
φ (s/c)	0,00	0,15	0,34	0,38	0,50	0,53

Valor de K₁ calculado = 336,93 MPa

Cálculo de φ (s/c) para as argamassas, utilizando-se os valores da tabela 1, segundo De Larrard:

$$\varphi(s/c) = \frac{\gamma_c(a/c)}{\sqrt{K_1/f_c} - 1} - 1$$

FIGURA 4.17 - Ajustamento da curva φ (s/c) por pontos experimentais.

TABELA 4.28 - Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento A).

argamassas	1	2	3	4	5	6
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fc (MPa)	52	78	91	101	106	109

Rc = 33 MPa

φ = 1,63 [1-exp.(-7 s/c)]

K1 = 216,30 MPa

γc = 3,15 kg/dm³

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a / c}{1 + \phi(s / c)} \right]^2}$$

$$K_1 = K_g.R_c$$

$$216,30 = K_g.33$$

$$K_g = 6,55$$

FIGURA 4.18 - Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret.

TABELA 4.29 - Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento B).

argamassas	1	2	3	4	5	6
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fc (MPa)	43	81	95	103	107	109

$R_c = 39,1 \text{ MPa}$

$\varphi = 2,58 [1 - \exp.(-10 \text{ s/c})]$

$K_1 = 178,86 \text{ MPa}$

$\gamma_c = 3,15 \text{ kg/dm}^3$

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a / c}{1 + \varphi(s / c)} \right]^2}$$
$$K_1 = K_g R_c$$
$$178,86 = K_g . 39,1$$
$$K_g = 4,57$$

FIGURA 4.19 - Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret.

TABELA 4.30 - Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento C).

argamassas	1	2	3	4	5	6
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fc (MPa)	52	85	100	111	116	119

$R_c = 48,20 \text{ MPa}$

$\varphi = 1,995 [1 - \exp.(-8 \text{ s/c})]$

$K_1 = 216,30 \text{ MPa}$

$\gamma_c = 3,15 \text{ kg/dm}^3$

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a / c}{1 + \varphi(s / c)} \right]^2}$$

$K_1 = K_g R_c$

$216,30 = K_g.48,20$

$K_g = 4,48$

FIGURA 4.20 - Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret.

TABELA 4.31 - Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento D).

argamassas	1	2	3	4	5	6
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fc (MPa)	79	97	104	111	113	114

$R_c = 56,30 \text{ MPa}$

$\varphi = 0,383 [1-\exp.(-12 \text{ s/c})]$

$K_1 = 328,60 \text{ MPa}$

$\gamma_c = 3,15 \text{ kg/dm}^3$

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a / c}{1 + \varphi(s / c)} \right]^2}$$

$K_1 = K_g.R_c$

$328,60 = K_g 56,30$

$K_g = 5,83$

FIGURA 4.21 - Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret.

TABELA 4.32 - Resistência prevista por Feret para os CEDs (cimento E).

argamassas	1	2	3	4	5	6
a/c	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
fc (MPa)	81	106	116	124	126	127

Rc = 51,70 MPa

φ = 0,534 [1-exp.(-13 s/c)]

K1 = 336,93 MPa

γc = 3,15 kg/dm³

$$f_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + \gamma_c \frac{a / c}{1 + \varphi(s / c)}\right]^2}$$
$$K_1 = K_g R_c$$
$$336,93 = K_g.51,70$$
$$K_g = 6,52$$

FIGURA 4.22 - Previsão da resistência à compressão dos CEDs pela fórmula de Feret.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos e a discussão apresentados no capítulo 4 pode-se afirmar que o principal objetivo dessa dissertação foi alcançado, qual seja, apresentar um processo de dosagem de concreto de alto desempenho e aplicá-lo às condições brasileiras.

Embora os CEDs tenham em suas composições 3 a 4 ingredientes a mais que os concretos correntes, o processo de dosagem apresentado lida com pequenas qualidades de materiais, na forma de caldas mistas de cimento, diminuindo sobremaneira o número de misturas de concreto a executar. Ao lado disso, o processo fornece um bom grau de precisão na obtenção da resistência do CED.

Como objetivos isolados alcançados, com êxito, pela realização deste trabalho pode-se citar:

a) Teor ótimo de sílica ativa

Confirmação do teor de 10% como sendo o teor ótimo de sílica ativa na composição dos concretos e argamassas de elevado desempenho que utilizam cimentos CP V ARI. Isto pode ser claramente constatado observando-se, por exemplo, o gráfico da figura 4.17, que mostra a variação do fator majorador ϕ da resistência na fórmula de Feret. Acima de 10% de adição, o valor deste fator tende a ficar constante, cessando seu efeito na resistência, mesmo aumentando o teor de sílica ativa.

Tendência para o teor ótimo de sílica ativa de 15% em concretos e argamassas de elevado desempenho dosados com cimentos do tipo CP II E 32, conforme figura 4.14.

b) Teor ótimo de superplastificante

Os resultados obtidos com os materiais empregados (capítulo 3) fornecem valores que deverão auxiliar os procedimentos de dosagem, servindo como dados iniciais para qualquer exercício de dosagem que se empreenda, visando obter um CED.

c) Curva de calibração entre resistências de argamassas e concretos de elevado desempenho

Um dos resultados mais perseguidos pelos pesquisadores de concreto, (ver, por exemplo, HELENE (1987), (RODRIGUES (1984), DE LARRARD (1988), DE LARRARD (1995) e outros), é o estabelecimento de lei empírica relacionando as resistências dos argamassas aos concretos. O processo apresentado estabelece uma relação quase precisa entre as resistências destes materiais de alto desempenho, que dependem da resistência à compressão do cimento e da natureza do agregado graúdo, salvas as hipóteses de que se trabalha com relações água/cimento menores que 0,4 e concretos com agregados de dimensão máxima característica igual ou menor que 19 mm, condições estas que são as ideais para os CED.

d) Diferença de desempenho dos agregados

Um dos fatos registrados e que deve merecer investigação em nível microscópico é a diferença nas resistências à compressão dos CED, curados em água em ebulição, e feitos com agregados de naturezas mineralógicas diversas.

e) Aspecto do concreto fresco

Devido ao pouco consumo de areia na dosagem do CED, o que se vê quando da preparação de mistura de concreto, é uma dispersão dos grãos dos agregados graúdos, untados de uma pasta viscosa, num meio viscoso, característica muito diferente, visual e reologicamente falando, dos concretos correntes aos quais já

se está acostumado. A baixa porcentagem de argamassa no traço, faz com que durante a medida do abatimento, os grãos escorreguem uns sobre os outros, desagregando o formato original tronco-cônico para fornecer uma leitura do ensaio acima de 200 mm.

f) Eficácia na cura térmica

A cura térmica feita em água em ebulição, parece ter atingido plenamente os objetivos visados: rapidez na aquisição de resistência mecânica, realização do potencial pozolânico de mistura aglomerante a curto prazo, exequibilidade do procedimento de ensaio e confiabilidade nos resultados obtidos.

Os corpos de prova foram moldados num dia, desmoldados 24 horas depois e submetidos à cura em seguida. Logo após a cura térmica foram ensaiados após um período de esfriamento. O fato do CED ser de baixa porosidade deve ter contribuído para que a água aprisionada nos poros do interior do corpo de prova permanecesse nas condições ideais de cura, ou seja, pressão do vapor d'água nos capilares acima de 80% da sua pressão de saturação.

g) Eficiência dos materiais empregados

Uma conclusão a ser registrada é a eficiência dos materiais empregados destacando-se aquela do cimento. Três dos cinco cimentos empregados, mesmo sendo cimentos comuns, com resistência máxima de 40 MPa, propiciaram a fabricação de CED de resistência 100 MPa contrariando a hipótese básica do processo original de dosagem que pede por cimento de resistência superior a 55 MPa. O mesmo pode-se dizer das argamassas, que na forma de corpos de prova cúbicos de 5 cm de aresta, fornecem resultados superiores aos da norma francesa, que utiliza as extremidades dos corpos de prova prismáticas rompidos por flexão para fazer o ensaio de compressão.

h) Eficiência dos moldes cúbicos

Tanto para os concretos como para as argamassas foram fabricados formas metálicas. As usadas para as argamassas seguiram o padrão ASTM e as usadas nos concretos foram também adaptadas aos padrões ASTM. Pela dispersão dos resultados obtidos (coeficiente de variação inferior a 5%) conclui-se pela qualidade das formas e correção na condução dos ensaios.

5.1- Críticas e Sugestões

Concluído este trabalho convém que se registre algumas críticas às condições sob as quais foram conduzidos os experimentos.

O funil utilizado na medida do tempo de escoamento das caldas, de “construção caseira”, feita com chapa galvanizada talvez tenha interferido nas determinações pelo atrito principalmente nos pontos de solda. Uma providência a ser tomada no futuro poderá ser experimentar usar o mesmo funil, mas de vidro.

Outro ponto a ser criticado é a eficiência da betoneira empregada. Aliás, esta é uma crítica freqüente encontrada nas publicações brasileiras sobre o concreto de elevado desempenho. A pouca quantidade de material misturado, aliada a ineficiência da betoneira de eixo inclinado conspira contra uma mistura perfeita de um traço de concreto teoricamente correto.

Outro fato que influenciou sobre os resultados nesta pesquisa foi seguramente a troca de operadores técnicos de laboratório a cada mistura de concreto feita.

Como sugestão temos que em artigo publicado recentemente, quando esta dissertação já estava na fase final, DE LARRARD et al (1996) propõem uma modificação no processo de dosagem que consiste em considerar a fração fina da areia (grãos menores que 2 mm) como parte integrante da calda aglomerante. Esta modificação resultou da dificuldade em se registrar a dosagem de saturação do superplastificante pelo procedimento original do método, como se constatou na realização da parte experimental deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN P. C. (1983). Condensed silica fume. *Les Editions de L'Universite de Sherbrooke*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 52 p.

AITCIN P. C., PINSONNEAULT P., ROY D. M. (1984). Physical and chemical characterization of condensed silica fume. *Bul. of the Am. Ceram. Soc.*, v. 63, n. 12, pp. 1487-1491.

ALMEIDA, I.R. (1990). *Betões de alta resistência e durabilidade. Composição e características*. Lisboa. 740p. Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa.

ANDERSEN, P. J.; ROY, D. M. (1987). The effects of adsorption superplasticizers on the surface of cement. *Cement and Concrete Research*, v.17, n.5, p. 805-13.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR 07682 - Calda de cimento para injeção. Determinação do índice de fluidez*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR 08045 - Determinação da resistência acelerada à compressão. Método da água em ebulição*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). *NBR 09776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 09937 - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). *NBR 11578 - Cimento portland composto*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). *NBR 05735 - Cimento portland de alto forno*. Rio de Janeiro.

BAALBAKI, W.; BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; AITCIN, P.C. (1991). Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 5, p. 499-503, sept.-oct.

BACHE H.H.(1981). Densified cement / ultra fine particle-based materials. In: THE SECOND INTERNACIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, Ottawa, 1981. Canadá. 36 p.

BUCK A. D.; BURKES J. P. (1980). Characterization and reactivity of silica fume. In: THE 3RD. INT. CONF. ON CEM. MICROSCOPY, HOUSTON, 1990. Proceedings. I.C.M.A., Duncanville, Texas.

BUIL, M.; WITIER, P.; DE LARRARD, F.; DETREZ, M.; PAILLÈRE, A. M (1986). Physicochemical mechanism of the action of the naphthalene sulfonate based superplasticizers on silica fume concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, Detroit. Proceedings. *ACI-SP/91*, 2v, p. 959-971.

BUIL M., PAILLÈRE A. M., HAMON J. P. (1987). Application d'un modèle de viscosité des suspensions concentrées polydispersées à la formulation des coulis d'injection à base de liants hydrauliques. In: INTERNATIONAL RILEM CONGRESS, Versailles. Proceedings. v. 1, p. 349-356.

CANOVAS, M. F. (1988). Hormigones de alta resistência. *Cemento-Hormigon*, n. 658, p. 855-868, sept.

CHENG-YI & FELDMAN R. F. (1985 a), Influence of silica fume on the microstructural development in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 15, n. 2, pp. 285-294, mar.

CHENG-YI & FELDMAN R. F. (1985 b). Hydration reactions in portland cement-silica fumeblends. *Cement and Concrete Research*, v. 15, n. 4, pp. 585-592, jul.

CHIOCCHIO G.; PAOLINI A.E. (1985). Optimum time for adding superplasticizers to portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n.5, p. 901-8.

DASTOL M. (1984). Production and Properties of ELKEM Microsilica. / Apresentado ao 1 st. Seminar ELKEM Microsilica Technology, São Paulo, 1984/

DE LARRARD F., BUIL M. (1987). Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil. *Materials and Structure*, n. 20, p. 117 - 126.

DE LARRARD F. (1988 a). Particules ultrafines pour l'élaboration des bétons à très hautes performances. *Annales de L'Institut Technique Batiment et des Travaux Publics*, série: béton 256, n. 466, p. 41-52, jui. / aou.

DE LARRARD, F. (1988 b). *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*. Publiée par LCPC, Paris, n. 149, 340 p. /Rapports de Recherche/

DE LARRARD F.; PUCH, C. (1989). Formulation des bétons à hautes performances - La méthode des coulis. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, n. 161. p. 75-83, mai-juin.

DE LARRARD, F. (1992). A mix performance method for high performance concrete. In: *High performance concrete: from material to structure*. Ed. Yves Malier, E & FN Spon. p. 48- 62.

DE LARRARD F., TON DAT P. (1993). Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton. *Materials and Structure*, n. 26, p. 505-516.

DE LARRARD, F. (1995). La résistance en compression des bétons de structure aux cendres volantes. *Materials and Structure*, n. 28, p. 459-463.

DE LARRARD F., BOSC F., CATHERINE C., DEFLORENCE F. (1996). La nouvelle méthode de coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances. *Bull. de Liason des Lab. des P. et Ch.*, n. 202, p. 61-69, mar-avr.

DUBROUS F. (1990). Formation et propriétés de la fumée de silice. *Annales de L'Institut Technique Batiment et des Travaux Publics*, série: béton 271, n. 483, p. 3-11, mai.

DUCATTI, V.A. (1993). *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. São Paulo. 292p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ELKEM A/S (1981). *Spesialinformasjon om ELKEM Silica I Betong*. Oslo, Norway /Technical Bulletin/

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINE (1988). Working group on Condensed Silica Fume in Concrete. *State of art report*. London. Thomas Telford..

FESIL KS (1980). *FESIL-SILICA: A new additive for the improvement of concrete quality*. Oslo, Norway /Technical Bulletin/

GIACCIO G., ZERBINO R. (1996). Effect of the aggregate type on the behavior of high strength concrete. In : INT. CONG. ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE

-PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Florianópolis, Brazil, 1996, p. 52 - 60, jun.

GRUTZECK M. W., ROY D. M., WOLFE-CONFER D. (1982). Mechanism of hydration of portland cement composites containing ferrosilicon dust. In: THE 4TH, INT. CONF. ON CEM. MICROSCOPY, Las Vegas, ICMA. Proceedings. Duncanville, Texas.

HELENE P. R. L. (1987). *Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle de concretos de cimento portland*. 278p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

HJORTH L. (1984). Microsilica in concrete. / Apresentado ao 1st. Seminar ELKEM Microsilica Technology, S. Paulo, 1984/

LAHALIH S. M.; ABSI-HALABI M.; ALI A. M. (1988). Effect of polymerization conditions of sulfonated-melamine formaldehyde superplasticizers on concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 18, n. 4, p. 513-31.

LI SHIQUN, ROY D. M., KUMAR A. (1985). Quantitative determination of pozzolanas in hydrated systems of cement or Ca(OH)_2 with fly ash or silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 15, pp. 1079-1086.

MELAND I. (1983), Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, Detroit. Proceedings. *ACI-SP/79*, 2v, p. 665-675

MEHTA P. K., AITCIN P. C. (1990). Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 2, p. 103-107, march-april .

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

NEBESAR B.; CARETTE G. C. (1981). Variations in the chemical composition, specific surface area, fineness and pozzolanic activity of a condensed silica fume. *Cem. Concr. and Aggr.*, v. 8, n. 1, pp. 42-45, summer.

NELSON J. A.; YOUNG J. F. (1977). Additions of colloidal silicas and silicates to portland cement pastes. *Cement and Concrete Research.*, v. 7, n. 3, p. 277-282.

NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. 2.ed. São Paulo, Pini.

PENTALLA, V. (1986). Compatibility of binder and superplasticizer in high strength concretes. *Nordic Concrete Research*, n. 5, p. 117-128.

PEREIRA NETO P. M. (1994). *O efeito do agregado em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microssilica*. São Paulo. /Relatório Científico FAPESP 94/0611-7/

PETRUCCI, E. G. R. (1978). *Concreto de cimento portland*. 5.ed. Porto Alegre, Globo.

RATH G. (1983). Condensed silica fume. *Les Editions de L'Universite de Sherbrooke*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 52 p.

RAU G.; AITCIN P.C. (1983). Condensed silica fume. *Les Editions de L'Universite de Sherbrooke*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 52 p.

REGOURD M. (1983). Condensed silica fume. *Les Editions de L'Universite de Sherbrooke*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 52 p.

REGOURD M., MORTUREUX B., HORNAIN H. (1983), Use of Condensed Silica Fume as Filler in Blended Cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, Detroit. Proceedings. *ACI-SP/79*, 2v, p. 847-865.

RODRIGUES, P. P. F.(1984). *Parâmetros de dosagem de concretos*. Associação Brasileira de Cimento Portland. /Estudo Técnico 67/

SEKI S., MORIMOTO M., YAMANE N. (1985). Recherches expérimentales sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous-produits industriels. *Annales de L'Institut Technique Batiment et des Travaux Publics*, série: béton 231, n. 436, p. 14-26, jui. / aout.

SELLEVOLD E. J., BAGER D. H., JENSEN E. K., KNUDSEN T. (1982). Silica fume cement pastes: hydration and pore structure. In: GJORV O. E.; LOLAND K. E.. *Condensed Silica Fume in Concrete*. Trondheim, Norway, The Norwegian Institute of Technology, p. 19-50.

TRAETTEBERG A. (1978). Silica fume as a Pozzolanic Material. *Il Cemento*, n. 3, pp. 369-376.