

JORGE SUGAMOSTO

**COMPARATIVO ENTRE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SÍLICA
ATIVA EM PÓ E SÍLICA ATIVA EM FORMA DE LAMA**

CURITIBA

2007

JORGE SUGAMOSTO

**COMPARATIVO ENTRE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SÍLICA
ATIVA EM PÓ E SÍLICA ATIVA EM FORMA DE LAMA**

**Trabalho apresentado ao Curso Superior
de Tecnologia em Construção Civil -
Modalidade Concreto, do Departamento
Acadêmico de Construção Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.**

**Orientador: Prof. MSc. Sandro Eduardo
da Silveira Mendes.**

**Curitiba
2007**

Termo de Aprovação

JORGE SUGAMOSTO

**COMPARATIVO ENTRE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SÍLICA
ATIVA EM PÓ E SÍLICA ATIVA EM FORMA DE LAMA**

Orientador: Prof. MSc. Sandro Eduardo da Silveira Mendes - UTFPR

Examinador: Prof. MSc. Gilberto Gogola - UTFPR

Examinador: Eng^o. Maurício Bianchini - Engemix

Curitiba, 22 de novembro de 2007.

Aos amigos de boa vontade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de poder transpor mais uma fase de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Sandro Mendes, pelo auxílio, amizade, competência, boa vontade e disposição para me atender durante o trabalho.

Ao Prof. Gilberto Walter Gogola pela compreensão e ser humano que é.

Aos colegas de curso, pelo auxílio, principalmente ao amigo Ed Carlos e meu filho Gabriel, que muito ajudaram na confecção dos concretos.

Ao Engenheiro Alfredo Motti que se prontificou em ceder as instalações do laboratório da Empresa Supermix Concreto S.A. para a realização dos ensaios.

A minha esposa Jomara Regina que me apoio desde o início do curso com compreensão e companheirismo.

E, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este momento tão especial para mim se concretizasse.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	2
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 HISTÓRICO DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS.....	4
2.2 DEFINIÇÕES	5
2.3 TIPOS OU FORMAS DE SÍLICA ATIVA	6
2.4 APLICAÇÕES DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS	11
2.4.1 Características físicas e químicas da sílica ativa.....	11
2.4.2 Dosagem da sílica ativa	13
2.4.3 Efeitos da sílica ativa na microestrutura do concreto	14
2.4.4 Efeito da sílica ativa nas propriedades do concreto fresco e endurecido	16
2.5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	19
2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES.....	19
2.6.1 Cimento	20
2.6.2 Agregados.....	21
2.6.3 Água de amassamento	22
2.6.4 Aditivos superplastificantes.....	23
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	24
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	24
3.2 METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	26
3.2.1 Seleção e caracterização dos materiais	26
3.2.2 Proporcionamento dos materiais	29
3.2.3 Produção e preparo dos corpos-de-prova	30
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5.1 CONCLUSÕES.....	40
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1 –	FUMOS DE SÍLICA	5
FIGURA 2 –	SÍLICA ATIVA – NATURAL	7
FIGURA 3 –	SÍLICA ATIVA – DENSIFICADA.....	8
FIGURA 4 –	SÍLICA ATIVA – SOB FORMA DE LAMA	9
FIGURA 5 –	SÍLICA ATIVA – PELOTIZADA	10
FIGURA 6 –	SÍLICA ATIVA – PRÉ-MISTURADA	10
FIGURA 7 –	SÍLICA ATIVA – PÓ FINO.....	11
FIGURA 8 –	MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO DA SÍLICA ATIVA.....	12
FIGURA 9 –	LIGAÇÃO AGREGADO-PASTA.....	15
FIGURA 10 –	EFEITO MICROFILER DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO	15
FIGURA 11 –	ESTRUTURA DE C-S-H DENSO NUM CONCRETO COM SÍLICA ATIVA EM TORNO DO AGREGADO	16
FIGURA 12 –	ATUAÇÃO DA SÍLICA NA INTERFACE AGREGADO-PASTA DOS CONCRETOS.....	17
FIGURA 13 –	MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO	19
FIGURA 14 –	FOTO DOS MATERIAIS COM A SÍLICA EM PÓ	24
FIGURA 15 –	FOTO DOS MATERIAIS COM A SÍLICA EM FORMA DE LAMA.....	25
FIGURA 16 –	ADENSAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA	31
FIGURA 17 –	CORPOS-DE-PROVA	31
FIGURA 18 –	CORPOS-DE-PROVA CAPEADOS COM ENXOFRE, PRENSA E CP'S ROMPIDOS.....	32
FIGURA 19 –	CAPEAMENTO COM ENXOFRE.....	32
FIGURA 20 –	RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA.....	35
FIGURA 21 –	RESISTÊNCIA MÉDIA DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA - 10%.....	36
FIGURA 22 –	RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA - 10%	36
FIGURA 23 –	RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA - 5%	37
FIGURA 24 –	RESISTÊNCIAS MÉDIAS DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA	38
FIGURA 25 –	RESISTÊNCIAS MÉDIAS DOS CONCRETOS SEM E COM SÍLICA - 5%.....	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO CIMENTO ITAMBÉ ARI-RS	26
TABELA 2 –	ENSAIOS FÍSICOS CIMENTO ITAMBÉ ARI-RS	27
TABELA 3 –	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS	27
TABELA 4 –	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO À SECO (NBR-7217/87)	28
TABELA 5 –	CARATERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MÍUDOS	28
TABELA 6 –	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE.....	30
TABELA 7 –	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 10% SÍLICA.....	33
TABELA 8 –	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO – 10% SÍLICA	34
TABELA 9 –	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO – 5% SÍLICA.....	34
TABELA 10 –	RESISTÊNCIA MÉDIA A COMPRESSÃO – 5% SÍLICA	35

LISTA DE SIGLAS

A/AGLOM:	Relação água/ aglomerante
A/C:	Relação água/cimento
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C ₂ S:	Silicato Dicalcico
C ₃ S:	Silicato Tricálcico
CAD:	Concreto de Alto Desempenho
CAR:	Concreto de Alta Resistência
CP'S	Corpos-de-Prova
C-S-H:	Silicato de Cálcio Hidratado
CV:	Coeficiente de Variação
DMáx:	Diâmetro Máximo do Agregado
DPad:	Desvio Padrão
M.F.:	Módulo de Finura
MgO:	Oxido de Magnésio
REF:	Referência (concreto sem sílica)
SiO:	Monóxido de Silício
SiO ₂ :	Óxido de Silício
SiO ₃ :	Oxido de enxofre
SL:	Sílica em Lama (suspensão aquosa)
SP:	Sílica em Pó (não densificada)

RESUMO

O presente estudo analisa o desempenho de dois tipos de sílica ativa nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Estas são comercializadas no Brasil como: sílica ativa em pó e sílica ativa em suspensão aquosa ou forma de lama. Foram produzidos cinco concretos, um concreto referência sem adição, dois com adição de sílica ativa em pó e dois com adição de sílica ativa em forma de lama. Os teores de sílica ativa adotados foram de 5% e 10% de substituição de massa de cimento, sendo descontada a parcela de água presente na sílica em lama e considerado apenas seu teor de sólidos. Os resultados mostram que os concretos com sílica ativa em pó possuem, aos 28 dias, resistências ligeiramente superiores aos concretos com sílica ativa em lama.

Palavras-Chave: Sílica ativa; sílica ativa em pó; sílica ativa em lama (líquida).

ABSTRACT

The current study analyses the performance of two types of silica fume in fresh and hardened concrete properties. These two types are available in Brazil, the undensified form and the slurry form which is a suspension of silica fume in water. Five concretes had been produced: a reference concrete without silica addition, two with addition of undensified silica fume and two with silica fume slurry. The silica content was 5% and 10% of replacement of the cement content. For using silica fume slurry, the water parcel present must be deducted and considered only its solid content. The results show that concrete with undensified silica fume has, at 28 days, slightly higher compressive strength than the one with silica fume slurry.

Keywords: Silica fume; undensified silica fume; silica fume slurry.

1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O conhecimento adquirido com o estudo da estrutura interna dos concretos proporcionou grandes avanços na tecnologia do concreto nos últimos anos principalmente com a descoberta de novos materiais, tais como os superplastificantes e as adições, principalmente a sílica ativa (AÏTCIN, 2000).

A sílica ativa é considerada como uma adição pozolânica que pode melhorar significativamente as propriedades dos produtos cimentícios. O seu desempenho com relação às demais adições minerais se deve principalmente pelas suas características físico-químicas, que lhe dão uma alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland e proporcionam um melhor empacotamento das partículas de cimento. Por estas razões, entre as adições minerais, a sílica ativa é ainda a mais empregada atualmente para a produção de CAD. A adição de sílica ativa neste caso pode auxiliar na concepção de estruturas mais esbeltas, aumentando significativamente a área útil dos pavimentos e diminuindo consideravelmente o peso próprio da estrutura com conseqüente diminuição da carga nas fundações (MENDES, 2002).

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar o desempenho de concretos produzidos com dois tipos de sílica ativa disponíveis no mercado nacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar a resistência à compressão axial dos concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama;

Avaliar os resultados encontrados entre os teores utilizados de cada adição (5% e 10%) em relação a um concreto referência (sem adição).

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em 5 capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução sobre a pesquisa e são descritos os objetivos do estudo, estrutura e limitações.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica sobre concretos com sílica ativa - histórico, definições, tipos de sílica ativa, aplicações e viabilidade técnica e econômica. Também são abordados os demais materiais constituintes do concreto.

No capítulo 3, o programa experimental com planejamento e metodologia de ensaios, seleção e caracterização dos materiais, dosagem, moldagem e cura dos concretos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos em forma de tabelas e gráficos e a análise destes resultados.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

É um estudo experimental em concretos convencionais preparados sem e com sílica ativa, nas formas de pó e de lama.

Os teores de substituição adotados foram de 5% e 10% para cada forma de sílica ativa.

A pesquisa limita-se ao ensaio de consistência do concreto fresco “*slump test*” e ao ensaio de resistência à compressão axial, sendo os aspectos de durabilidade destes concretos sugeridos para uma nova pesquisa.

A escolha dos ensaios foi determinada pela sua relevância e importância, e pela limitação da pesquisa em função da disponibilidade de tempo e utilização do laboratório, além da escassez de recursos materiais, humanos e financeiros destinados à pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS

A sílica ativa vem se difundindo como um dos principais componentes para a produção de produtos com cimento Portland de alta qualidade (GOBBI et al. 2005).

Conforme ALMEIDA (2001), no início da década de 50, na Universidade Técnica da Noruega, foram feitos estudos em concretos, visando aumentar sua durabilidade, com a adição de sílica ativa, que seria utilizado em uma parte de um túnel em Oslo exposto a águas super-sulfatadas. O primeiro emprego documentado ocorreu em 1971, no concreto utilizado em uma fundição, também na Noruega.

Em meados da década de 70, o emprego da sílica ativa no concreto ampliou-se na Noruega e expandiu-se para a Suécia, Dinamarca e Islândia.

A utilização da sílica ativa difundiu-se pelo mundo ao final dos anos 70, princípio da década de 80.

No Brasil, o uso de sílica ativa foi discutido e difundido em 1984 e 1986 em um seminário tecnológico e em um congresso internacional no Rio de Janeiro. Em 1988, 5 trabalhos técnicos foram publicados na 30.^a REIBRAC, sobre o uso de sílica ativa (DAL MOLIN, 1995).

Ainda, DAL MOLIN (1995) comenta que, a partir de 1990, inúmeras pesquisas com sílica ativa em concretos foram publicadas no país, dando origem a diversos trabalhos de mestrado e doutorado.

Em Curitiba foram produzidos “Concretos de Alto Desempenho - CAD” com adição de sílica ativa utilizando agregados graúdos da região (MENDES, 2002) e também “Diferentes Métodos de Dosagem para CAR” (FREITAS JÚNIOR, 2005).

2.2 DEFINIÇÕES

A sílica ativa pode ser definida como fumos de sílica provenientes da oxidação do monóxido de silício (SiO) durante a fabricação de silício metálico ou ligas de ferro silício que se dá em fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico, onde ocorre a redução do quartzo a silício pelo carbono a temperaturas em torno de 2000°C (figura 1), coletada ao passar através de filtros especiais denominados filtros de manga. O processo utiliza o quartzo de alta pureza, o carvão ou o coque (fonte de carbono), cavacos de madeira e, eventualmente, o minério de ferro no caso da produção de ferro-silício (MALHOTRA e CARETTE, 1983, *apud* MEHTA e MONTEIRO, 1994).



FIGURA 1 – Fumo de Sílica ativa

A sílica ativa é reconhecida como uma adição pozolânica que pode contribuir de maneira significativa nas propriedades dos produtos com cimento Portland (KHAYAT e AİTCIN, 1993 *apud* MENDES, 2002).

A sílica ativa, com sua alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento ocasiona uma microestrutura mais compacta ao concreto em relação às demais adições minerais. Por estas razões, entre as adições minerais, a sílica ativa é ainda a mais empregada atualmente para a produção de CAD.

Os efeitos benéficos da sílica ativa no concreto, de modo geral, podem ser descritos como (HJORTH, 1984 *apud* GOBBI et al., 2005).

- a) Efeito microfíler - as partículas da sílica ativa possuem formato esférico e tem diâmetro médio cerca de cem vezes menores do que os grãos de cimento. Esta característica permite à sílica ativa fazer um empacotamento dos grãos de cimento, reduzindo o espaço disponível para a água.
- b) Efeito pozolânico - as partículas da sílica ativa são compostas por dióxido de silício amorfo com uma área superficial específica elevada, a qual reage rapidamente com o hidróxido de cálcio que as envolve. Os produtos desta reação se assemelham aos produtos resultantes da hidratação do cimento.

2.3 TIPOS OU FORMAS DE SÍLICA ATIVA

A sílica ativa está disponível comercialmente em diversas formas. Todas as formas apresentam aspectos positivos e negativos que podem afetar o desempenho técnico, o manuseio, a eficiência e o teor de adição nos concretos.

As diversas formas comercializáveis de sílica ativa são descritas a seguir, com base em DAL MOLIN (1995) e ACI 234R-96 (2001) *apud* MENDES (2002):

Natural, Densificada, Forma de Lama, Pelotizada e Pré-misturada ao cimento.

Natural: pó extremamente fino, sem nenhum tratamento, coletado em filtros manga, após captação e filtragem. Podem apresentar dificuldades no transporte e manuseio, devido à sua extrema finura e baixa massa específica aparente (192 a 300 kg/m³) (figura 2).

Por outro lado, possui a vantagem da facilidade de mistura e dispersão das partículas no concreto.



FIGURA 2 – Sílica ativa – Natural

Densificada: as partículas de sílica ativa são compactadas (normalmente por ar comprimido) após a filtragem, tornando-se suficientemente densas para serem transportadas, pois ocupam um menor volume por peso (500 a 700 kg/m³), (figura 3). Além disto, o processo de compactação reduz significativamente a nuvem de pó, comum na captação da sílica na forma natural. Seu uso, entretanto, no concreto pode apresentar maior dificuldade de dispersão na mistura.



FIGURA 3 – Sílica ativa – Densificada.

Sob forma de lama: onde a sílica ativa é pré-misturada com água, geralmente em teores de 40 a 60% da massa, resultando em uma massa específica aparente de 1300 kg/m³ a 1400 kg/m³, (figura 4). Desta forma,

elimina-se a formação da nuvem de pó, além de facilitar o bombeamento para o interior dos veículos de transporte. Possui como aspecto negativo a dificuldade de garantia da quantidade de água realmente empregada em relação aos sólidos, afetando a qualidade final da mistura, bem como o fato de se armazenar e transportar a metade da tonelagem em água.



FIGURA 4 – Sílica ativa – sob forma de lama.

Pelotizada: similar à sílica ativa densificada porém é obtida com a adição de pequena quantidade de água suficiente para produzir micro-pelotas aglomeradas com massa específica aparente em torno de 700 kg/m^3 . Entretanto, as pelotas formadas são muito duras para serem quebradas facilmente durante o processo de mistura do concreto, o que a torna muito pouco utilizada, figura 5.



FIGURA 5 – Sílica ativa – Pelotizada.

Pré-misturada com cimento: adição de 6,5 a 8% de sílica ativa (natural, densificada ou pelotizada) sob a massa de cimento. Possui como vantagem a facilidade de controle da dosagem e perfeita homogeneização dos materiais cimentantes, conforme figura 6. DAL MOLIN (1995) cita que, na época, o Canadá comercializava este tipo de cimento a um valor de 10-13% mais caro que ao do cimento Portland comum.

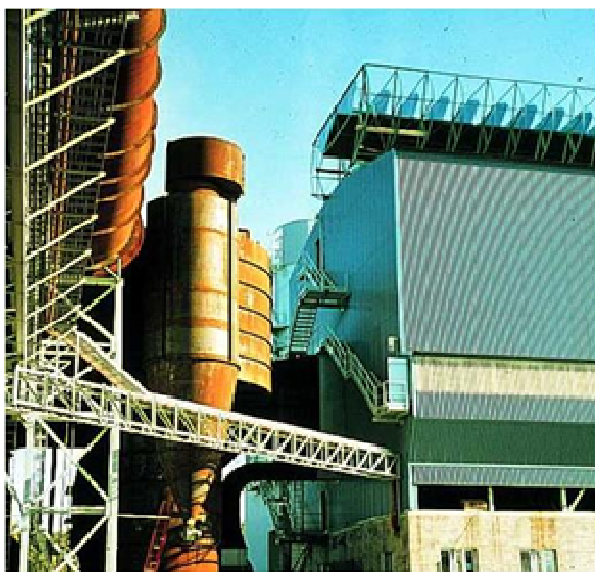


FIGURA 6 – Sílica ativa – Pré-Misturada

Com aditivos incorporados: qualquer uma das formas anteriores, incorporando aditivos químicos à sílica ativa (plastificantes, superplastificantes, retardadores, incorporadores de ar e outros).

2.4 APLICAÇÕES DA SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS

Sílica ativa pode ser utilizada como uma adição aos produtos cimentícios ou como substituição de porcentagens do cimento para melhorar algumas das propriedades do concreto.

A princípio a adição de sílica ativa pode ser feita em qualquer tipo de cimento. Mas, quando necessitar-se de um concreto de elevada resistência, deve-se dar preferência aos cimentos de Alta Resistência Inicial (ACI 363R-92, 2001, apud MENDES, 2002).

Conforme foi descrito no subitem 2.3 diversos tipos ou formas de sílica ativa existentes no mercado podem ser utilizados nos concretos. Normalmente, o “tipo” escolhido é limitado por fatores econômicos, disponibilidade no mercado e por características próprias de cada obra.

2.4.1 Características físicas e químicas da sílica ativa

As características da sílica ativa, como cor, distribuição granulométrica e composição química, dependem do tipo e dosagem das matérias primas.

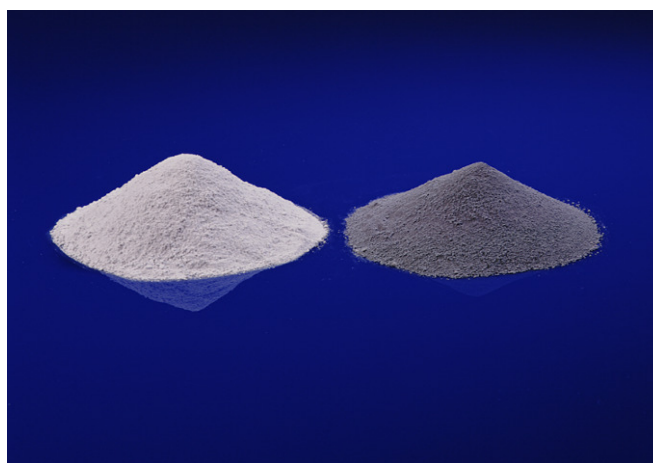


FIGURA 7 – Sílica ativa – Pó fino (cinza claro a cinza escuro)

A sílica ativa é um pó fino cuja cor varia de cinza claro a cinza escuro, conforme mostra a figura 7. Como o SiO_2 (dióxido de silício) é incolor, a cor da sílica ativa é determinada pelo teor de carbono e de óxido de ferro presentes. Do ponto de vista físico, as partículas de sílica ativa são esféricas (Figura 8), extremamente pequenas, com diâmetro médio entre $0,1\ \mu\text{m}$ e $0,2\ \mu\text{m}$, sendo 50 a 100 vezes menores que as do cimento (ACI 234R-96, 2001 *apud* MENDES, 2002)

Sua área específica, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio, varia de 13.000 a 30.000 m^2/kg , ficando a média em torno de 20.000 m^2/kg , bastante superior à do cimento Portland – 350 a 600 m^2/kg (ACI 363R-92, 2001 *apud* MENDES, 2002). A sua massa específica real é geralmente de $2,2\ \text{g}/\text{cm}^3$, menor que a do cimento, que é de aproximadamente $3,10\ \text{g}/\text{cm}^3$ (NEVILLE, 1997).

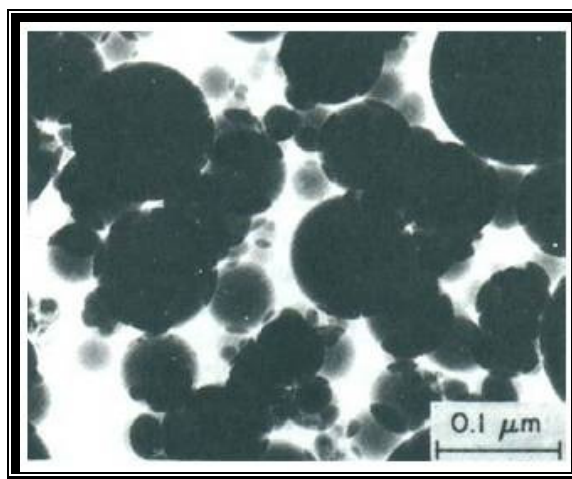


FIGURA 8 – Micrografia Eletrônica de Transmissão da sílica ativa (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

A massa unitária na forma natural é da ordem de 250 a 300 kg/m^3 , e na forma densificada passa a ser de 500 a 700 kg/m^3 . A baixa massa unitária associada à pequena dimensão das partículas de sílica ativa faz com que o material apresente problemas de manuseio e transporte, encarecendo seu custo final (SILVA, 2000).

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta principalmente de SiO_2 , com pequenas quantidades de alumina, ferro, cálcio, álcalis, carbono, entre outros. O conteúdo de SiO_2 na sílica ativa depende do tipo de liga que está sendo produzida. Do ponto de vista de estrutura química, o arranjo molecular das partículas de sílica ativa apresenta-se sob forma de sílica amorfa. Quanto maior o teor de silício da liga, maior o teor de SiO_2 da sílica ativa. De maneira geral, este valor deve estar entre 85 a 98% de SiO_2 . Estes teores proporcionam a sílica ativa propriedades pozolânicas. As pozolanas caracterizam-se por reagirem na presença de água com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento Portland. O resultado dessa reação possui características cimentantes e assemelham-se aos silicatos de cálcio hidratados resultantes da hidratação do cimento (AÏTCIN, 2000).

2.4.2 Dosagem da sílica ativa

Segundo AÏTCIN (2000), a dosagem teórica ideal de sílica ativa, necessária para fixar todo potencial de cal liberada pela hidratação do C_3S (silicato tricálcico) e do C_2S (silicato dicálcico) estaria entre 25 e 30%. Porém, devido a grande quantidade de superplastificante, na prática, essas dosagens não seriam viáveis.

Conforme NEVILLE(1997), adições de sílica abaixo de 5% são insuficientes para fortalecer a interface agregado-pasta, não resultando em aumento de resistência. Existe concordância entre pesquisadores que, além de não prejudicar a trabalhabilidade de concretos com relação a/c baixas, ocorre uma melhora no ganho de resistência quando da incorporação de 10% de sílica ativa em substituição a mesma massa de cimento.

Importante frisar que existem dois métodos de incorporação de sílica ativa no concreto. O mais utilizado é a substituição de parte da massa de cimento pela adição mineral onde é possível reduzir o consumo inicial de cimento, acarretando tanto benefícios de ordem técnica quanto econômica.

Outra maneira consiste em adicionar uma quantidade de sílica ativa à massa de cimento já especificada resultando em aumento significativo da resistência a compressão entre 3 e 28 dias quando comparado com os concretos sem adição (BARATA, 1998).

2.4.3 Efeitos da sílica ativa na microestrutura do concreto

Segundo AITCIN (2000), a sílica ativa se comparada a outros materiais cimentícios suplementares, possui características peculiares que a tornam um material pozolânico muito reativo sendo eles, o seu teor muito alto de SiO_2 (> 90%), o seu estado amorfo e a sua extrema finura. A sílica ativa além de rápida reação pozolânica (reação química) provoca o que se chama de “efeito filler” (efeito físico), que provoca um aumento da fluidez do concreto reduzindo a exsudação interna e superficial, e um conseqüente preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento pelas minúsculas partículas esféricas da sílica ativa, cujo diâmetro médio é 100 vezes menor que o do cimento, além de preencher os vazios deixados pelas partículas de cimento próximas a superfície do agregado, contribuindo desta maneira para diminuição da porosidade e da espessura da zona de transição (figura 9).

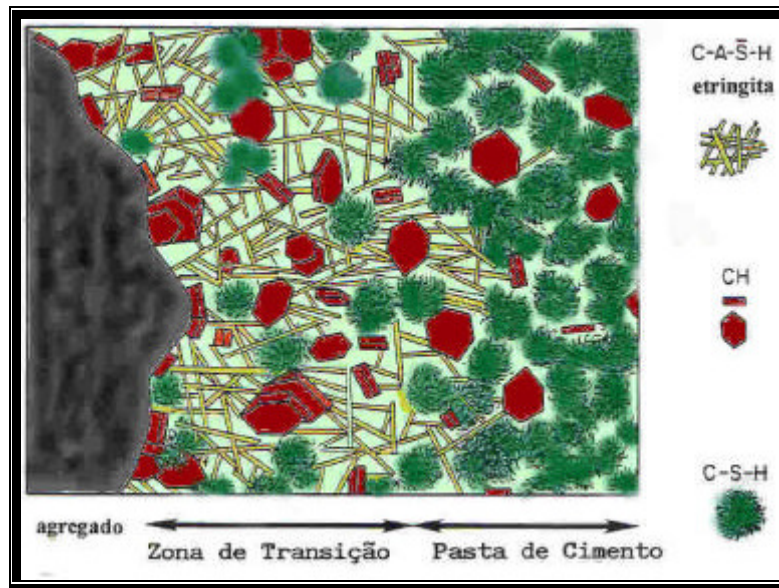


FIGURA 9 – Ligação agregado-pasta.
(MEHTA E MONTEIRO 1994)

Porém, de acordo com os estudos de PAULON (1996) *apud* MENDES (2002), essa diminuição rápida da zona de transição, resultante da eficiente ação pozolânica e física da sílica ativa, inicia somente após os três primeiros dias de cura do concreto.

O efeito “filler”, figura 10, que se apresenta nos concretos com adição de sílica ativa proporciona um melhor desempenho, pois sua microestrutura fica mais compacta (BARBOSA, et al., 2005).

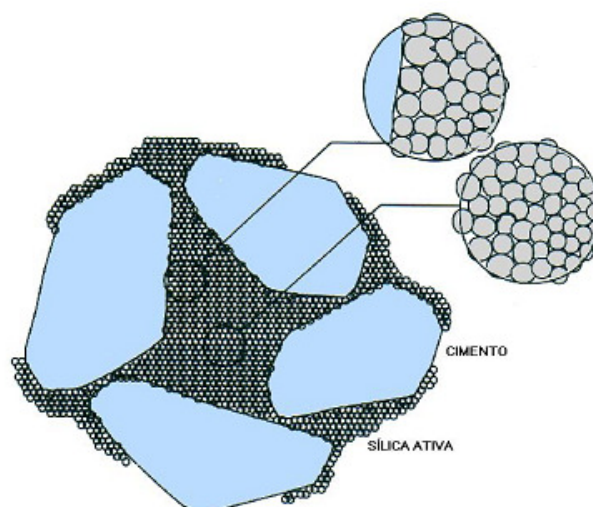


FIGURA 10 – Efeito microfiller da sílica ativa no concreto
(AITCIN, 2000)

Outra consequência é que devido ao tamanho extremamente reduzido de suas partículas, a sílica ativa melhora significativamente a exsudação interna da pasta, pois reduz ou elimina o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados, além de preencher os vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado, contribuindo desta maneira para a diminuição da porosidade e da espessura da zona de transição (Figura 11).

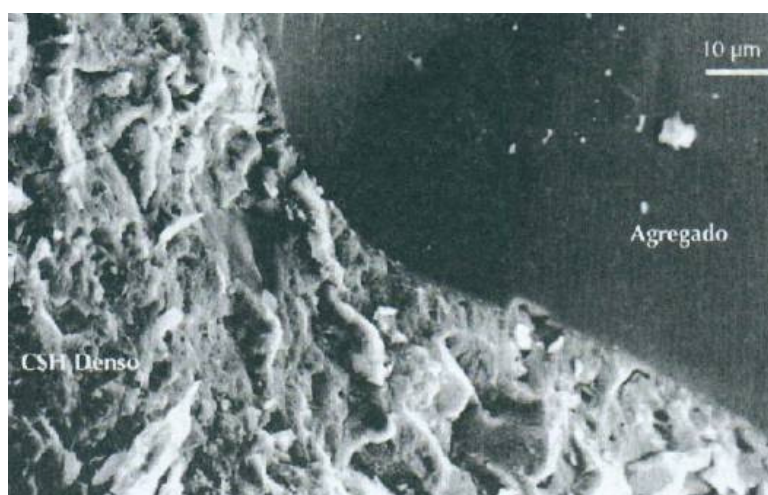


FIGURA 11 – Estrutura de C-S-H denso num concreto com sílica ativa em torno do agregado. Nota-se a ausência de zona de transição entre a pasta e o agregado (AITCIN, 2000).

2.4.4 Efeito da sílica ativa nas propriedades do concreto fresco e endurecido

No concreto, a principal propriedade que a adição da sílica ativa vem demonstrando é o aumento da resistência, pois, além do seu efeito químico de reação pozolânica, suas partículas extremamente finas atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição (DAL MOLIN, 1995).

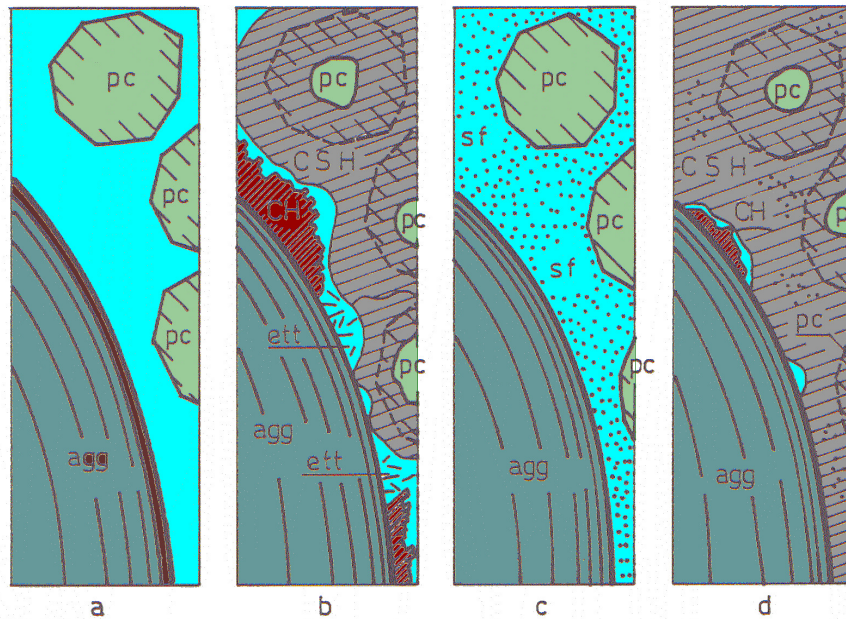


FIGURA 12: Atuação da sílica ativa na interface agregado-pasta dos concretos.

Situação (a): Concreto fresco, sem sílica ativa, com grande espaço preenchido pela água, em torno dos agregados (agg), devido à exsudação e ao empacotamento deficiente dos grãos de cimento (pc) nesta região de fronteira;

Situação (b): Zona de transição do mesmo sistema, em estágio de maior maturidade, mostrando o preenchimento da zona de transição com o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (CSH), mas ainda com espaços vazios, alguns dos quais preenchidos com materiais aciculares, provavelmente etringita (ett);

Situação (c): Concreto fresco, com sílica ativa (sf), cujas partículas preenchem o espaço em volta dos agregados, anteriormente ocupado, na fase (a), pela água;

Situação (d): Zona de transição menos porosa, obtida com o sistema (c) em estágio de maior maturidade (ALMEIDA, 1990, p.79).

Outros benefícios da adição de sílica ativa nas propriedades do concreto são relatados pela literatura, conforme apresentados em MENDES(2002):

- A substituição de 5 a 15% de sílica ativa sobre a massa cimento melhora de maneira significativa a sua resistência ao ataque de sulfatos (MANGAT e KHATIB, 1995).
- As estruturas em concreto armado têm sua durabilidade

melhorada quando é utilizado 5 a 12% de sílica ativa, devido à redução da penetração de cloretos e água no concreto (SCISLEWSKI e WOJTOWICZ, 1996).

- por último, e ratificando todos os argumentos apresentados em estudos recentes de concretos com utilização de sílica ativa, alguns pesquisadores (LACHEMI et al., 1998; MALHOTRA et al., 2000) relataram que a adição deste produto, resultou em aumento da resistência à compressão, boa durabilidade ao gelo-degelo, baixa permeabilidade aos cloretos e reduzida profundidade de carbonatação, apresentando um bom desempenho mesmo após 10 anos de exposição a condições ambientais severas.

Estudos sobre a adição de “finos” em concretos visando melhora nas propriedades mecânicas (60 a 80 MPa) mostraram que o melhor desempenho é obtido com a utilização de sílica ativa (PAULON E IBRAIN, 1995).

Um dos principais inconvenientes quando da utilização da sílica ativa é a finura. Quando se substitui parte do cimento por sílica acontece um aumento na relação água/cimento (maior utilização de água) para que se possa manter uma pasta com as mesmas propriedades reológicas e de trabalhabilidade se comparada com uma pasta de cimento sem sílica ativa, isto é, produz um concreto com relação a/c mais elevada (NEVILLE, 1997). A utilização de aditivos superplastificantes e redutores de água de alta eficiência, que dispersam e minimizam o atrito interno entre as partículas de cimento e sílica ativa, serve para a diminuição de água na mistura, o que permite um lançamento do concreto com abatimentos razoáveis, na obra. (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

2.5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Em concretos com alto consumo de cimento, a adição ou substituição de porcentagens de cimento por sílica ativa para melhorar o desempenho do mesmo, pode minimizar consideravelmente o valor agregado, diminuindo o volume total de concreto aplicado na obra, podendo inclusive deixar a estrutura (vigas, pilares, etc) mais esbelta, podendo dar um aumento significativo nos vãos entre pilares para garagens e estacionamentos. Redução do peso próprio da estrutura e conseqüentemente na carga das fundações. Aumento da durabilidade do concreto devido à baixa porosidade e permeabilidade e maior resistência aos agentes agressivos do meio ambiente (MENDES, 2002).

2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES



FIGURA 13 – Materiais constituintes do concreto.

2.6.1 CIMENTO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Segundo a norma NBR-5732/91, durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores específicos.

A massa específica média do cimento é de $3,00\text{g/cm}^3$, segundo a norma NBR-6474/84. A norma NBR-5733/91 específica para Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) e determina ainda, que o teor de MgO máximo é de 6,50% do peso total de cimento. CPV-ARI-RS – Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos possui maior finura que os demais cimentos, o que contribui para o grau de hidratação do mesmo e quanto mais cristais forem hidratados, maior será a resistência final.

Conforme NEVILLE(1997), concretos com teores de cimento acima de 530 kg/m^3 podem causar uma queda de resistência mecânica, em virtude da perda de aderência entre a pasta e o agregado resultante da fissuração por tensões de retração.

Com a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, como a sílica ativa, cinza de casca de arroz, metacaulim dentre outros e com a adição de superplastificantes, podemos solucionar este problema.

2.6.2 AGREGADOS

Pode ser definido como: Materiais granulosos, relativamente inertes, do concreto podendo ser de origem natural ou artificial. Os agregados naturais podem ser originários do britamento de rochas ou ainda de extração de jazidas naturais. Já os agregados artificiais são aqueles obtidos por meio de processo industrial, como: pedra-pomes, escória granulada, argila expandida, vermiculita entre outros (KLOSS, 1996).

2.6.2.1 Agregados graúdos

Conforme a norma NBR-7211/83, agregado graúdo é pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de ABNT 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Todas as partículas maiores que 4,8 mm são responsáveis por uma considerável fração de volume do concreto. Estes agregados devem possuir elevada resistência à compressão, baixo índice de Abrasão Los Angeles, módulo de elasticidade maior ou igual ao da pasta de cimento, baixo teor de materiais friáveis e boa aderência à pasta de cimento.

2.6.2.2 Agregados miúdos

Conforme a norma NBR 7211/83 agregado miúdo é areia de origem natural ou resultante de britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

O agregado miúdo natural deve possuir partículas arredondadas e textura lisa a fim de determinar um menor consumo de água para uma consistência constante na produção de concretos normais.

Por possuir a superfície específica maior que a dos agregados graúdos, agregados miúdos exercem maior influência sobre as características do concreto o que acaba acarretando uma maior quantidade de pasta para envolver os grãos. (ARAUJO et al., 2003).

2.6.3 ÁGUA DE AMASSAMENTO

Água potável não é sinônimo de água adequada para a produção de concreto, em algumas regiões áridas, esta água é salobra e contém um teor muito alto de cloretos. Raramente a água potável contém teores de sais inorgânicos acima de 2000 ppm (0,2% em peso), geralmente este valor fica abaixo de 1000 ppm (METHA e MONTEIRO, 1994) sendo esta água adequada para a produção de concreto. Águas ligeiramente ácidas com pH 6,0, apesar de inadequadas para o consumo, podem ser utilizadas para a produção de concreto.

“A água destinada ao amassamento do concreto será aquela isenta de teores prejudiciais de substâncias estranhas, tais como óleos, ácidos, sais, matéria orgânica e outras que possam interferir nas reações de hidratação do cimento e afetar a coloração final do concreto”. (SILVA, 1995)

De acordo com a norma NBR-12655/96 a água destinada ao amassamento do concreto deve ser guardada em caixas estanques e tampadas, de modo a evitar a contaminação por substâncias estranhas.

Na água de abastecimento público, água tratada, os sais de cálcio e magnésio aparecem na ordem de 400 ppm (0,04%), e por serem pouco solúveis não apresentam problema ao concreto (KLOSS, 1996).

2.6.4 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

Com a descoberta de aditivos superplastificantes, desenvolveram-se com maior eficácia os concretos de alta resistência e os de alto desempenho. Estes aditivos também são conhecidos como superfluidificantes ou aditivos redutores de água de alta eficiência, que quando incorporados ao concreto fresco produzem consistência fluida e alta trabalhabilidade.

O uso de aditivos superplastificantes nos concretos pode ter propósitos específicos bem como combinações e apresentam algumas características:

- Aumento da trabalhabilidade e da durabilidade;
- Aumento da fluidez no concreto fresco;
- Aumento da resistência;
- Menor exsudação;
- Menor porosidade;
- Grande aderência à armadura.

A adição adequada destes aditivos proporciona uma boa trabalhabilidade com uma relação água/aglomerante baixa que são características essenciais para concretos de alto desempenho (MENDES, 2002).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Para a realização dos experimentos, além do concreto de referência, foram produzidos concretos com adição de sílica ativa em forma de pó e em forma de lama (líquida). Os teores utilizados foram de 5% e 10% de substituição da massa de cimento. Assim sendo, os traços programados foram:

- Concreto Convencional (concreto referência) sem adição de sílica ativa;
- Concreto Convencional com sílica ativa sob forma de pó (5%);
- Concreto Convencional com sílica ativa sob forma de pó (10%);
- Concreto Convencional com sílica ativa sob forma de lama (5%);
- Concreto Convencional com sílica ativa sob forma de lama (10%);
- Foram utilizados dois tipos de sílica ativa: A sílica ativa não densificada, em pó (figura 14), comercializada em sacos, com teores de dióxido de silício (SiO_2) variando de 85 a 98% da SILMIX;



FIGURA 14 – Foto dos materiais com a sílica em pó.

- E a sílica em suspensão aquosa (lama), Centrilit Fume S da MC Bauchemie (figura 15), com densidade de $1,38 \text{ g/m}^3$, e teor de sólidos de $50 \pm 2,0\%$.



FIGURA 15 – Foto dos materiais com a sílica em forma de lama.

Os agregados utilizados na execução das amostras são os disponíveis e comumente comercializados na região metropolitana de Curitiba. Como agregado miúdo foi utilizada a areia natural média, de rio, com módulo de finura igual a 2,6 e como agregado graúdo, a brita 1, com dimensão máxima característica de 19 mm.

3.2 METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Para um resultado mais preciso nos resultados, foram realizados ensaios dos materiais constituintes do concreto nos laboratórios da UTFPR.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados no laboratório da empresa Supermix Concreto S.A.

Inúmeros fatores têm influência nas propriedades dos concretos. Neste trabalho foram consideradas a relação água/aglomerante e as idades de 3, 7 e 28 dias de cura para o ensaio de resistência à compressão.

3.2.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta pesquisa foram utilizados materiais comercializados na região metropolitana de Curitiba sem alterações em suas características, por exemplo: ajuste na curva granulométrica dos agregados, lavagem dos materiais para diminuição do pó, entre outras.

3.2.1.1 Cimento

Neste estudo foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos, CPV- ARI RS. O cimento foi fornecido em sacos de papel Kraft, com 50 kg cada.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO CIMENTO ITAMBÉ ARI-RS

QUÍMICOS (%)										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF	CaO Livre	R. Ins.	Eq. Alc.
Média	6,43	21,23	3,07	52,17	5,63	3,18	3,60	1,55	10,58	0,71

FONTE: Cimento Itambé.

TABELA 2 – ENSAIOS FÍSICOS CIMENTO ITAMBÉ ARI-RS.

FÍSICOS											
	EXP. QUENTE	TEMPO DE PEGA (MIN)		CONS. NORMAL	BLAINE	# 200	# 325	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA)			
	mm	Início	Final	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Média	0,30	148	209	30,10	4.062	0,17	1,40	22,40	33,30	39,30	49,60

FONTE: Cimento Itambé.

3.2.1.2 Agregados

3.2.1.2.1 Agregados graúdos

O material utilizado (brita 1) neste estudo foi o comercializado normalmente na região metropolitana de Curitiba, e empregado nos Laboratórios de Materiais da UTFPR.

TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

ENSAIOS E MÉTODOS	RESULTADOS
Absorção (%) NBR 9937/87	1,29
Massa Específica Absoluta (kg/dm ³) NBR 9937/87	2,74
Massa Unitária no estado solto (kg/cm ³) NBR 7251/82	1,49
Teor de materiais pulverulentos (%) NBR 7219/87	0,36
Dimensão máxima (mm) NBR 7217/87	19,00

3.2.1.2.2 Agregados miúdos

A areia utilizada neste estudo foi a comercializada normalmente na região metropolitana de Curitiba, e empregada nos Laboratórios de Materiais da UTFPR.

TABELA 4 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO À SECO (NBR-7217/87)

PENEIRAS		C	%	%	%
ASTM	mm	RETIDO (g)	RETIDA	ACUMULADA	PASSANDO
3/4	19	0	0,00	0,00	100,00
1/2	12,5	0	0,00	0,00	100,00
3/8	9,5	0	0,00	0,00	100,00
4	4,8	27	2,70	2,70	97,30
8	2,4	136	13,60	16,30	83,70
16	1,2	160	16,00	32,30	67,70
30	0,6	172	17,20	49,5	50,50
50	0,3	183	18,30	67,8	32,20
100	0,15	235	23,50	91,30	8,70
Fundo		20	2,00	100,00	0,00
Total		933	100,00		

TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS

ENSAIOS E MÉTODOS	RESULTADOS
Massa Específica (NBR 9776/87)	2,65 g/cm ³
Massa Unitária no estado solto (NBR 7251/82)	1,45 g/cm ³
Teor de material pulverulento (NBR 7219/87)	3,6%
Índice de impurezas orgânicas húmicas (NBR 7220/87)	Mais clara que a solução padrão aproximadamente 100 ppm
Módulo de Finura (M.F.)	2,60
Dimensão máxima NBR 7217/87	4,8mm

3.2.1.3 Adições

Nos ensaios desenvolvidos foi feita a substituição, em massa, de 5 e 10%, do cimento CPV ARI RS utilizado, por sílica ativa em pó e em forma de lama. No caso da sílica em forma de lama, foi considerada somente a quantidade de sólidos da amostra.

3.2.1.4 Aditivo

Foi utilizado aditivo superplastificante Glenium de terceira geração, base de policarboxilatos, com densidade de $1,087 \text{ g/cm}^3$ e teor de sólidos de 30%. A dosagem utilizada é determinada pela % de aditivo em relação à massa de aglomerantes (cimento e sílica).

3.2.1.5 Água de amassamento

Foi utilizada água do sistema de abastecimento (poço artesiano) da UTFPR.

3.2.2 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

O concreto foi dosado utilizando-se o método IPT/EPUSP com traço em massa de 1:2:3, com relação água/aglomerante igual a 0,55 (Tabela 6).

Em todos os traços, o tipo de cimento, a quantidade de agregados, a relação água/aglomerante, foram mantidos constantes.

Para manter a mesma consistência, foi necessário utilizar aditivo superplastificante nos concretos com sílica ativa. No concreto de referência não foi utilizado aditivo.

O concreto foi dosado utilizando-se o método IPT/EPUSP com traço em massa de 1:2:3, teor de argamassa 50%, com relação água/aglomerante igual a 0,55 (Tabela 6).

TABELA 6 – RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE

TIPOS	CIMENTO (kg)	SÍLICA (kg)	ADITIVO (g)	RELAÇÃO (a/c)	ABATIMENTO (mm)
CP V ARI RS referência	9,0	-	-	0,55	55mm
CP V ARI RS c/sílica pó 10%	8,1	0,90	44	0,55	55mm
CP V ARI RS c/sílica lama 10%	8,1	1,80	36	0,55	55mm
CP V ARI RS c/sílica pó 5%	8,55	0,45	44	0,55	60mm
CP V ARI RS c/sílica lama 5%	8,55	0,90	36	0,55	60mm

3.2.3 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA

Os materiais foram misturados mecanicamente, em betoneira de eixo inclinado, previamente imprimada. Para a mistura dos materiais foi adotado o seguinte procedimento: inicialmente todo o agregado graúdo e 80% da água de amassamento, o cimento, a sílica, o aditivo superplastificante com o restante da água de amassamento, seguindo a especificação fornecida pelo fabricante para a utilização do produto, e finalmente todo o agregado miúdo.

O tempo de mistura foi maior para o concreto com adição de sílica em pó para que os traços tivessem uma homogeneidade similar.

Para os ensaios foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10x20cm, moldados em duas camadas com 12 golpes cada (Figura 16).



FIGURA 16 – Adensamento dos Corpos de Prova.

No total, foram moldados 81 corpos-de-prova, sendo: 9 cp's do concreto de referência, 18 cp's com 10% sílica em pó, 18 cp's com 10% sílica em lama, 18 cp's com 5% sílica em pó e 18 cp's com 5% sílica em lama.

Os corpos-de-prova ficaram nos moldes por 24 horas (figura 17), quando foram desmoldados e então imersos em água saturada de cal até as idades de rompimento (3, 7 e 28 dias).



FIGURA 17 – Corpos de prova.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados segundo os procedimentos da NBR 5739/1994, nas idades de 3, 7 e 28 dias para os corpos-de-prova.

Antes de cada ensaio, os CP'S foram capeados com enxofre (figura 19).

Para cada idade de ensaio foram rompidos 3 corpos-de-prova.



FIGURA 18 – Corpos de prova capeados com enxofre, prensa e cp's rompidos.



FIGURA 19 – Capeamento com enxofre.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com cimento Portland CP V-ARI RS com e sem utilização de sílica ativa são apresentados separadamente, nas tabelas abaixo.

TABELA 7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 10% SÍLICA

TEOR DE SÍLICA = 10%						
TRAÇO	3 DIAS	MÉDIA (MPa)	7 DIAS	MÉDIA (MPa)	28 DIAS	MÉDIA (MPa)
REF	27,1	25,3	30,5	30,7	41,4	39,5
	25,1		30,8		38,6	
	23,8		30,9		38,5	
	D.Pad =	1,6	D.Pad =	0,2	D.Pad =	1,6
	C.V. =	6,3	C.V. =	0,7	C.V. =	4,1
SP 1	29,3	28,8	38,4	37,6	52,8	55,0
	27,1		36,4		57,2	
	29,9		38,1		55,1	
	D.Pad =	1,5	D.Pad =	1,1	D.Pad =	2,2
	C.V. =	5,2	C.V. =	2,9	C.V. =	4,0
SP 2	29,8	29,4	41,7	40,6	51,8	51,1
	28,9		40,7		51,5	
	29,3		39,4		50,0	
	D.Pad =	0,5	D.Pad =	1,1	D.Pad =	1,0
	C.V. =	1,7	C.V. =	2,7	C.V. =	2,0
SL 1	32,2	32,5	38,1	42,0	47,8	49,8
	32,9		44,1		47,9	
	32,5		43,7		53,8	
	D.Pad =	0,4	D.Pad =	3,4	D.Pad =	3,4
	C.V. =	1,2	C.V. =	8,1	C.V. =	6,8
SL 2	28,1	29,4	42,8	38,0	44,6	47,6
	30,5		39,0		47,6	
	29,7		32,2		50,6	
	D.Pad =	1,3	D.Pad =	5,4	D.Pad =	3
	C.V. =	4,4	C.V. =	14,2	C.V. =	6,3

NOTA: SP – sílica em pó (não densificada); SL – sílica em lama (suspensão aquosa).

D.Pad – Desvio padrão (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

TABELA 8 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO – 10% SÍLICA

RESISTÊNCIA MÉDIA EM MPa POR TRAÇO – SÍLICA 10%			
TRAÇO	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
REF	25,3	30,7	39,5
	<i>DP = 1,6</i>	<i>DP = 0,2</i>	<i>DP = 1,6</i>
	<i>CV = 6,3</i>	<i>CV = 0,7</i>	<i>CV = 4,1</i>
SP	29,1	39,1	53,1
	<i>DP = 1,0</i>	<i>DP = 1,9</i>	<i>DP = 2,6</i>
	<i>CV = 3,4</i>	<i>CV = 4,9</i>	<i>CV = 4,9</i>
SL	31,0	40,0	48,7
	<i>DP = 1,9</i>	<i>DP = 2,8</i>	<i>DP = 3,1</i>
	<i>CV = 6,1</i>	<i>CV = 7,0</i>	<i>CV = 6,4</i>

NOTA: REF – Concreto Referência; SP – sílica em pó (não densificada);

SL – sílica em lama (suspensão aquosa).

D.Pad – Desvio padrão (MPa) - C.V. – Coeficiente de variação (%)

TABELA 9 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 5% SÍLICA

TEOR DE SÍLICA = 5%						
TRAÇO	3 DIAS	MÉDIA (MPa)	7 DIAS	MÉDIA (MPa)	28 DIAS	MÉDIA (MPa)
REF	27,1	25,3	30,5	30,7	41,4	39,5
	25,1		30,8		38,6	
	23,8		30,9		38,5	
	<i>D.Pad =</i>	<i>1,6</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>0,2</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>1,6</i>
	<i>C.V. =</i>	<i>6,3</i>	<i>C.V. =</i>	<i>0,7</i>	<i>C.V. =</i>	<i>4,1</i>
SP 1	28,6	28,3	36,1	36,8	50,9	47,2
	28,6		37,7		45,2	
	27,8		36,6		45,4	
	<i>D.Pad =</i>	<i>0,5</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>0,8</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>3,2</i>
	<i>C.V. =</i>	<i>1,8</i>	<i>C.V. =</i>	<i>2,2</i>	<i>C.V. =</i>	<i>6,8</i>
SP 2	32,0	32,0	31,4	33,2	49,9	47,0
	32,4		33,0		45,7	
	31,7		35,1		45,5	
	<i>D.Pad =</i>	<i>0,3</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>1,9</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>2,5</i>
	<i>C.V. =</i>	<i>0,9</i>	<i>C.V. =</i>	<i>5,7</i>	<i>C.V. =</i>	<i>5,3</i>
SL 1	25,1	25,7	34,2	34,4	45,4	44,7
	25,0		35,4		43,7	
	27,1		33,6		45,1	
	<i>D.Pad =</i>	<i>1,1</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>0,9</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>0,9</i>
	<i>C.V. =</i>	<i>4,3</i>	<i>C.V. =</i>	<i>2,6</i>	<i>C.V. =</i>	<i>2,0</i>
SL 2	25,5	24,6	32,3	32,8	42,3	41,4
	24,3		32,6		42,6	
	24,2		33,4		39,3	
	<i>D.Pad =</i>	<i>0,7</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>0,6</i>	<i>D.Pad =</i>	<i>1,9</i>
	<i>C.V. =</i>	<i>2,8</i>	<i>C.V. =</i>	<i>1,8</i>	<i>C.V. =</i>	<i>4,6</i>

NOTA: SP – sílica em pó (não densificada); SL – sílica em lama (suspensão aquosa).

D.Pad – Desvio padrão (MPa)

TABELA 10 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO – 5% SÍLICA

RESISTÊNCIA MÉDIA EM MPa POR TRAÇO – SÍLICA 5%			
TRAÇO	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
SP	30,2	34,9	47,1
	<i>DP = 2,0</i>	<i>DP = 2,4</i>	<i>DP = 2,6</i>
	<i>CV = 6,6</i>	<i>CV = 6,9</i>	<i>CV = 5,5</i>
SL	25,2	33,6	43,1
	<i>DP = 1,0</i>	<i>DP = 1,1</i>	<i>DP = 2,3</i>
	<i>CV = 4,0</i>	<i>CV = 3,3</i>	<i>CV = 5,3</i>

NOTA: SP – sílica em pó (não densificada); SL – sílica em lama (suspensão aquosa).

D.Pad – Desvio padrão (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

Abaixo, os gráficos comparativos entre as resistências dos concretos com e sem a adição de sílica ativa.

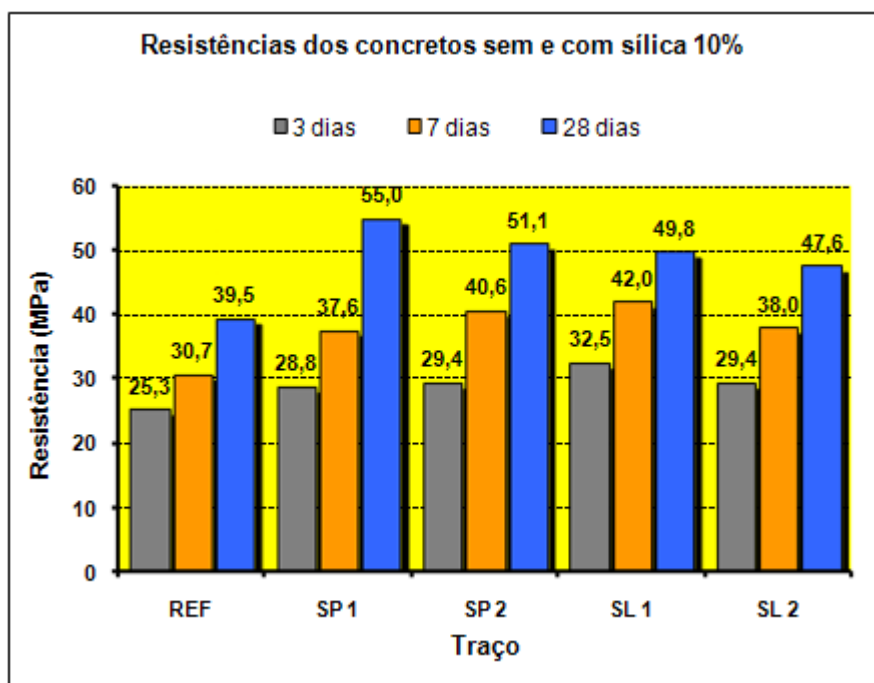


FIGURA 20 – Resistência dos concretos sem e com sílica – 10%.

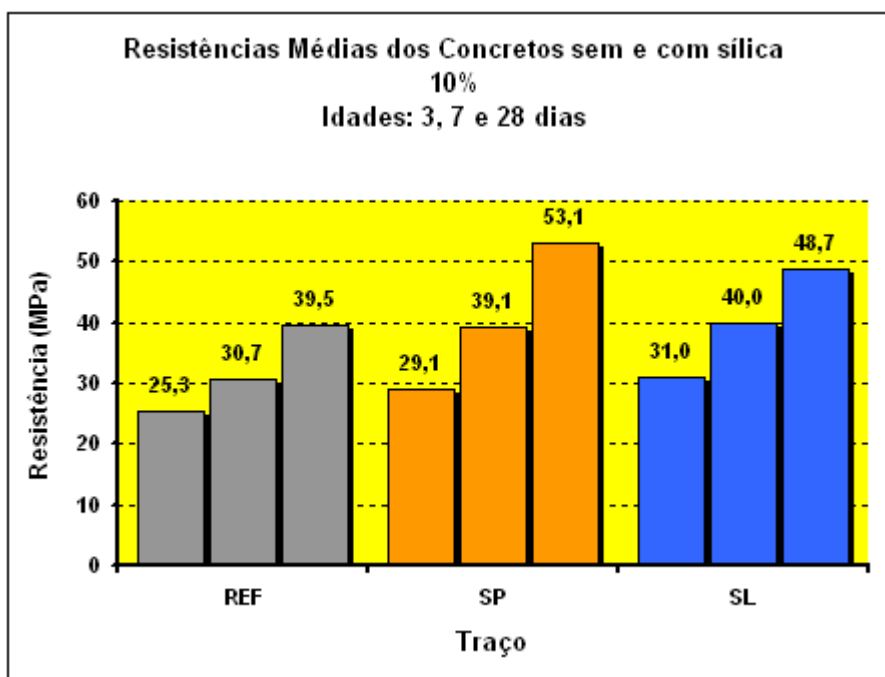


FIGURA 21 – Resistência média dos concretos sem e com sílica – 10%.

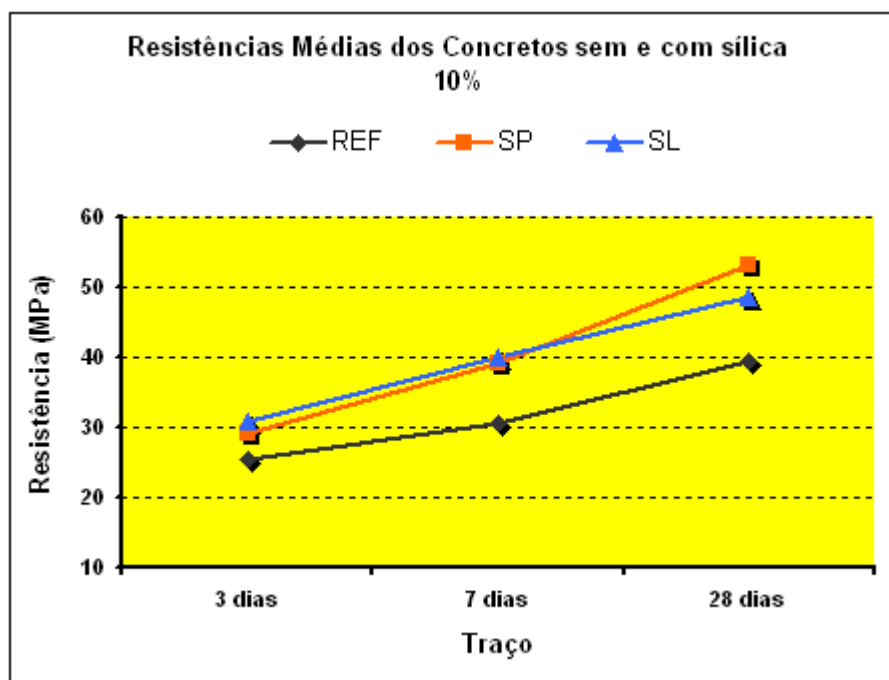


FIGURA 22 – Resistência dos concretos sem e com sílica – 10%.

Analisando as figuras 20, 21 e 22, nota-se que o uso de 10% de sílica

ativa, seja sob a forma de pó ou de lama, traz incrementos significativos nas resistências dos concretos em todas as idades, comparando com o concreto de referência – sem adição de sílica ativa.

Percebe-se também que aos 28 dias o concreto com sílica ativa em pó tem resistência ligeiramente superior ao concreto com sílica em forma de lama. Nas idades menores a diferença não é significativa.

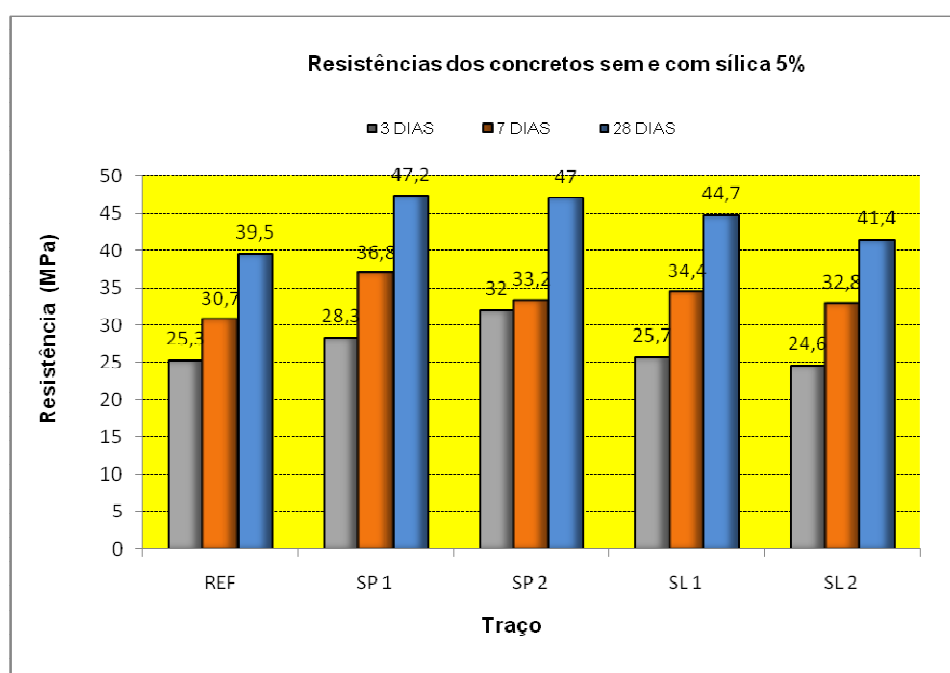


FIGURA 23 – Resistência dos concretos sem e com sílica – 5%.

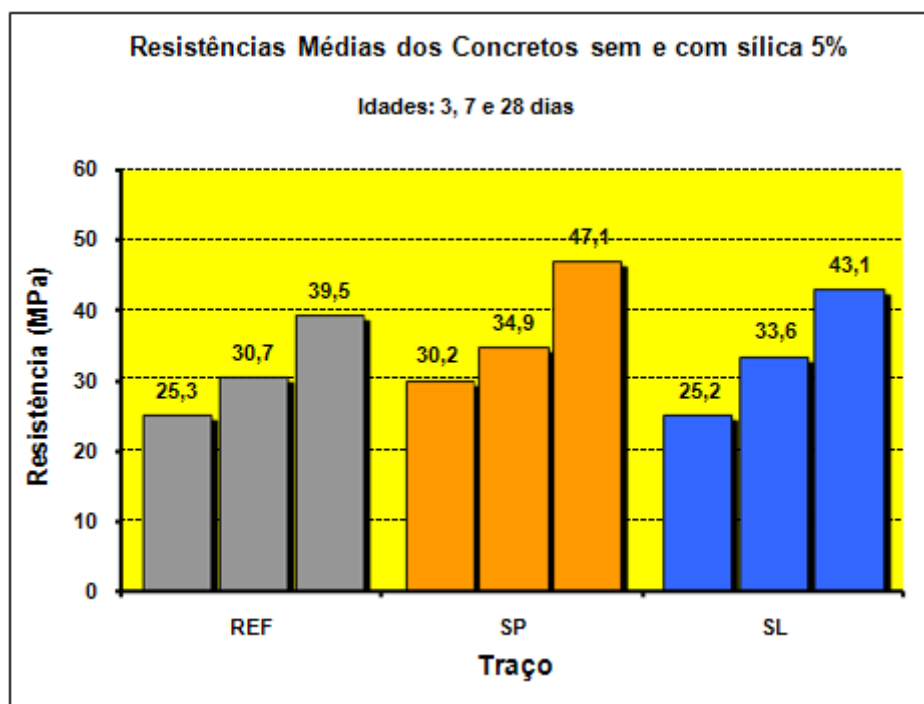


FIGURA 24 – Resistências médias dos concretos sem e com sílica – 5%

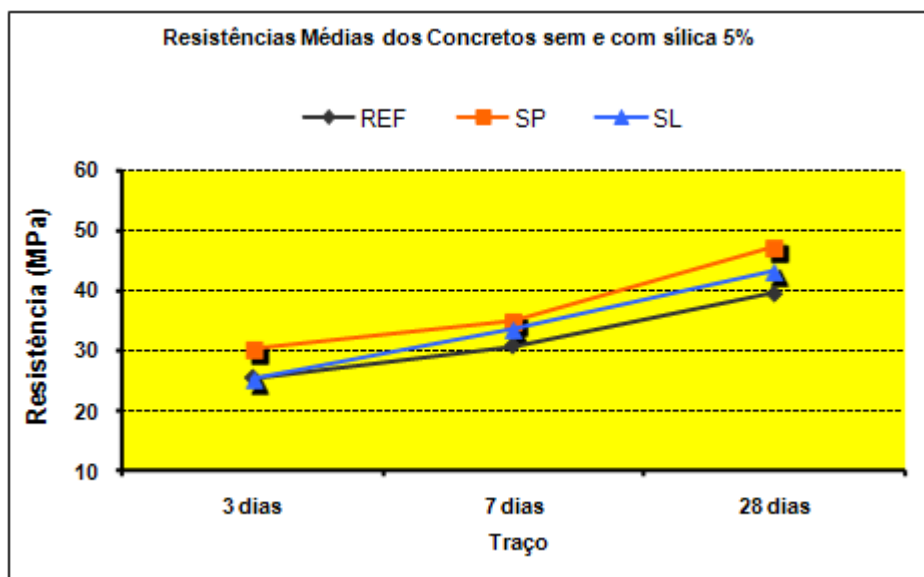


FIGURA 25 – Resistências médias dos concretos sem e com sílica – 5%.

Analisando as figuras 23, 24 e 25, nota-se que o uso de apenas 5% de sílica ativa, seja sob a forma de pó ou de lama, ainda ocasiona aumento

significativo nas resistências dos concretos em todas as idades (excetuando o resultado aos 3 dias com sílica em forma de lama), comparando com o concreto referência – sem adição de sílica ativa.

Percebe-se novamente que aos 28 dias o concreto com sílica ativa em pó tem resistência ligeiramente superior ao concreto com sílica em forma de lama. Aos 7 dias a diferença não é significativa. Já, aos 3 dias, a diferença deve-se ao comportamento atípico das resistências.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como finalidade comparar o desempenho de um concreto com adição de sílica ativa em forma de pó e outro com sílica ativa em forma de lama a partir de um concreto de referência. Os agregados utilizados foram os existentes na Região de Curitiba e cimento CPV ARI RS.

Foi estudada apenas a resistência à compressão axial por se tratar da propriedade fundamental do concreto a partir da qual as demais propriedades podem ser correlacionadas.

Com base nos resultados obtidos procurou-se identificar o tipo e o teor de sílica ativa de melhor desempenho nos concretos produzidos.

As conclusões apresentadas a seguir, não devem ser tomadas de maneira absoluta, pois se referem apenas aos dados obtidos nos concretos produzidos com as duas sílicas estudadas neste trabalho, servindo como base para um melhor conhecimento do comportamento das diferentes formas de sílica ativa comercializadas, disponíveis para uso em concretos.

5.1 CONCLUSÕES

Com relação ao uso de adições minerais no concreto, pode-se dizer que a sílica ativa exerce influência significativa na resistência do concreto.

Concretos que contam com a presença de sílica ativa apresentam melhor desempenho que o concreto de referência (sem adição de sílica).

Concretos com sílica ativa necessitaram de aditivo superplastificante para manter mesma consistência do concreto referência.

Concretos com sílica ativa em lama (SL) necessitaram de uma menor quantidade de aditivo do que concretos com sílica ativa em pó (SP).

Concretos com adição de 5% e 10% de sílica ativa apresentaram melhor desempenho que o CR quanto à resistência aos 28 dias.

Cabe destacar que a diferença foi mais significativa, em todas as idades, para o teor de 5% de SP x SL.

Quanto à avaliação entre o desempenho da sílica ativa em pó (SP) e a sílica ativa em lama (SL), os resultados obtidos aos 28 dias apontam valores de resistência para SP ligeiramente superiores aos valores de SL. Esta diferença é mais significativa para o teor de 5% de substituição

O melhor desempenho da SP em relação à SL foi apontado também no estudo de Gobbi et al. (2005).

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Investigar a influência da sílica ativa em pó e em forma de lama na resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade e determinar a correlação com os ensaios de resistência à compressão axial.
- Avaliar o desempenho da sílica ativa em pó e em forma de lama em concretos de alto desempenho, com relações a/c menores.
- Avaliar a influência das duas formas de sílica ativa na taxa de reação pozolânica, através de ensaios de calor de hidratação.
- Investigar o desempenho de outras formas comercializadas de sílica ativa em concretos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732** – Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** – Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655** – Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 234. Guide for the use of silica fume in concrete, ACI 234R-96. **ACI Manual of Concrete Practice 2001**. ACI, Detroit (USA), 2001. 51p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-art report on high-strength concrete, ACI 363R-92 (Reapproved 1997). **ACI Manual of Concrete Practice 2001**. ACI, Detroit (USA), 2001. 55p.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora PINI, 2000.

ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade**: composição e características. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 1990.

ALMEIDA, I. R. **Primeira parte das notas de aula das disciplinas de complementos de tecnologia do concreto e tópicos especiais em materiais de construção** – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001.

ARAUJO, R. M.; RISTOW NETO, R. **Avaliação de sílica ativa e metacaulim na composição de concreto de alto desempenho com emprego de agregados da região de Curitiba**. Monografia de Trabalho de Diplomação – CEFET 2003.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

BARBOSA, D. C.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. **Avaliação da Carbonatação Natural em Concretos Produzidos com e sem sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura**. 47.º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2005.

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

FREITAS JR, J.A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região de Curitiba.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2005.

GOBBI T. L.; BANDUK, R.C.; AMARAL, C. K. **Propriedades de concretos de cimento Portland preparados com a adição de sílica ativa dos tipos não-densificada, densificada e na forma de lama.** 47.º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2005.

HJORTH, L. A.; Microsilica no concreto. In: SEMINÁRIO – TECNOLOGIA DA ELKEM MICROSILICA, 1., 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Caesar Park Hotel, 1984.

KHAYAT, K. H.; AİTCIN, P. C. **Silica fume in concrete – an overview.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4th., Istanbul. Proceedings... Istanbul, Turkey, 1992. Detroit: American Concrete Institute, v.2, p. 835-872. 1983. (ACI Special Publication, 132).

KLOSS, C. L. **Materiais para Construção Civil, 2 ed.** CEFET-PR, 1996.

LAUCHEMI, M. et AL. **Long-term performance of silica fume concretes.** Concrete International, v. 20, n.1, p.59-65, January, 1998.

MALHOTRA, V. M.; CARRETE, G. G. **Silica fume concrete – properties, applications, and limitations.** Concrete International, v.5, n.5, p. 40-46, May, 1983.

MANGAT, P. S.; KHATIB, J. M. **Influence of fly ash, silica fume, and slag on sulfate resistance of concrete.** ACI Materials Journal, Detroit, v. 92, n.5, p.542-552, Sept/Oct.1995.

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

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Dissertação de Mestrado – ST/PPGCC, Universidade Federal do Paraná, 2002.

NEVILLE, A . M. **Propriedades do Concreto.** trad. Salvador E. Giammusso, São Paulo: Ed. PINI, 1997.

PAULON, V. A. **A interface entre a pasta de cimento e agregado: influência na durabilidade dos concretos.** Revista Técnica, n. 25, Nov/Dez, 1996.

PAULON, V. A.; IBRAIN, F. L. **O efeito de adições na obtenção de concretos de alta resistência.** In: Congresso Brasileiro do Concreto - REIBRAC/IBRACON, 37., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia, v.2, 1995. p. 493-506.

SCISLEWSKI, Z.; WOJTOWICZ, M. **The influence of silica fumes on durability of Concrete and reinforced concrete.** Durability of Building Material and Components 7, v. 1, Ed. C. Sjöstrom, Published by E e FN Spon, London, UK, 1996.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho com adição de sílica ativa: propriedades mecânicas, durabilidade e características da microestrutura.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo: Ed. Pini, 1995.