

JOÃO BOSCO MOREIRA DO CARMO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COMPOSTOS
COM SÍLICA ATIVA E METACULIM FACE À RESISTÊNCIA MECÂNICA E À
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção de grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE – Setor de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella

CURITIBA

2006

À Deus onipotente, onipresente e onisciente.

Ao meu pai, José Augusto do Carmo (in memorian).

À minha querida mãe, Leonina Conceição Moreira do Carmo.

À minha esposa, Rosana Sene do Carmo, meu grande amor.

Aos meus filhos Ivan Sene do Carmo, Ana Elisa Sene do Carmo e Mariana Sene do Carmo, meus anjos.

Aos meus irmãos Maria Aparecida, José Augusto, Maris Stela, Olavo Antônio, meus pares.

Aos meus avós Olavo Moreira e Maria Ines Cruz Moreira (in memorian), exemplares.

Aos meus cunhados, cunhadas, sobrinhos, sobrinhas, tios, tias, primos e primas, amigos e amigas, meus parceiros de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus o dom da vida, que é único e especial.

Ao professor, companheiro, orientador e mestre Kleber Franke Portella pelas fundamentais e precisas informações fornecidas durante o período de elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, mais especificamente ao PIPE pelo fomento e condução deste curso fundamental para o desenvolvimento profissional.

Ao Lactec que aprovou a realização deste mestrado e, em nenhum momento, mediu esforços para apoiar esta iniciativa.

Aos Colegas e amigos de trabalho, que contribuíram em todos os momentos e principalmente aqueles que estiveram diretamente envolvidos com essa pesquisa: Ruy Dickran, Paulo Chamecki, Douglas Moser, Eustáquio Ferreira, Roberto Zorzi, Cintia Ribeiro, Amauri Fausto, Marcelo Silva, Valdevan, Anivo, João Luiz, Betina, Patrícia, Sandro, Waleska, Carmen, Cris e a todos demais funcionários do LAME.

À Impercia, representante da sílica ativa Silmix, em especial ao Richelieu que, sem medidas, apoiou essa pesquisa.

À Metacaulim do Brasil, em especial ao Guilherme Gallo e Marcos Rabelo, pela ajuda, apoio, fornecimento de matéria-prima e fonte bibliográfica.

À empresa Cimentos Itambé, mais especificamente à engenheira Aline Rosa Martins, que contribuiu para esta pesquisa fornecendo o cimento para a realização deste estudo.

À Faculdade de Engenharia Civil de Itajubá, FECI, MG, escola onde concluí a graduação e de onde guardo boas recordações.

Aos queridos Professores que tive em toda minha formação básica, da graduação e do mestrado, por quem tenho muito respeito e admiração.

À Construtora Norberto Odebrecht, empresa que atualmente trabalho e que também apoiou a conclusão deste mestrado.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização de mais uma etapa da minha formação acadêmica e profissional.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	1
1.3	OBJETIVO	3
1.4	ABRANGÊNCIA DO TRABALHO	4
1.5	HIPÓTESE DO TRABALHO	6
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2	O USO DE ADIÇÕES NO CONCRETO	12
2.1	GENERALIDADES	12
2.2	BENEFÍCIOS DO EMPREGO DE POZOLANAS NO CONCRETO	17
2.3	PRINCÍPIO DA AÇÃO DAS POZOLANAS NO CONCRETO	19
2.4	POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS.....	23
	<i>2.4.1 Tipos de pozolanas altamente reativas.....</i>	<i>24</i>
	<i>2.4.2 Características químicas.....</i>	<i>28</i>
	<i>2.4.3 Características mineralógicas.....</i>	<i>35</i>
	<i>2.4.4 Características físicas.....</i>	<i>37</i>
2.5	EFEITO DAS POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	43
	<i>2.5.5 Estado fresco.....</i>	<i>43</i>
	<i>2.5.6 Estado endurecido.....</i>	<i>46</i>

3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
3.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	54
3.1.1	<i>Ensaio mecânico</i>	55
3.2	METODOLOGIA DOS ENSAIOS MECÂNICOS	60
3.3	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	60
3.3.3	<i>Água</i>	64
3.3.4	<i>Adição mineral de alta reatividade</i>	65
3.3.5	<i>Aditivo superplastificante</i>	67
3.4	DOSAGEM DO CONCRETO.....	68
3.5	PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CONCRETO	71
4.2	CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	81
4.2.1	<i>Resistência à compressão axial simples</i>	86
4.2.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	102
4.2.3	<i>Relação entre resistências à compressão e à tração</i>	109
5	CONCLUSÕES	119
6	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	122
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Composição química típica da sílica ativa proveniente de algumas indústrias metalúrgicas, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996).	30
Tabela 2.	Exigências químicas estabelecidas pelas normas IS 1344 (1968), ASTM C 618 (1991) e NBR 12653 (1992) para pozolanas do tipo do metacaulim.	32
Tabela 3.	Composição química típica do MCAR (MALHOTRA e MEHTA (1996).	33
Tabela 4.	Exigências físicas para a pozolana comum, do tipo do metacaulim.	39
Tabela 5.	Principais países produtores e reservas de caulim sedimentar, DNPM (2003).	41
Tabela 6.	Testes físico-químicos e mecânicos no concreto e agregados com suas respectivas normas técnicas.	57
Tabela 7.	Testes físico-químicos e mecânicos no cimento, materiais cimentícios e aditivo e suas respectivas normas técnicas.	58
Tabela 8.	Coeficiente de variação (CV) dos ensaios e desvio padrão aceitáveis.	59
Tabela 9.	Características físico-químicas do cimento utilizado, segundo informações do fabricante.	62

Tabela 10.	Características físico-químicas do agregado miúdo.....	63
Tabela 11.	Características físico-químicas do agregado graúdo.	63
Tabela 12.	Características físico-químicas do metacaulim, segundo informações do fabricante.....	66
Tabela 13.	Características físico-químicas da sílica ativa, segundo informações do fabricante.....	67
Tabela 14.	Composição e ensaios do concreto–referência no estado fresco.	83
Tabela 15.	Composição e ensaios do concreto com metacaulim, no estado fresco.....	84
Tabela 16.	Composição e ensaios do concreto com sílica ativa, no estado fresco.....	85
Tabela 17.	Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto-referência.....	87
Tabela 18.	Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto com 8% de metacaulim.....	88
Tabela 19.	Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto com 8% de sílica ativa.....	89
Tabela 20.	Erros de ensaio da resistência à compressão.....	92
Tabela 21.	Composição das dosagens do concreto-referência, aos 28 d.....	94
Tabela 22.	Composição das dosagens do concreto-referência, aos 90 d.....	95

Tabela 23. Composição das dosagens do concreto com 8% de metacaulim, aos 28 d.	96
Tabela 24. Composição das dosagens do concreto com 8% de metacaulim, aos 90 d.	97
Tabela 25. Composição das dosagens correspondentes ao concreto com 8% de sílica ativa, aos 28 d.	98
Tabela 26. Composição das dosagens correspondentes ao concreto com 8% de sílica ativa, aos 90 d.	99
Tabela 27. Resistência à tração por compressão diametral e seus erros de ensaio do concreto-referência.	104
Tabela 28. Resistência à tração por compressão diametral e erros de ensaio do concreto com 8% de metacaulim.	105
Tabela 29. Resistência à tração por compressão diametral e erros de ensaio do concreto com 8% de sílica ativa.	106
Tabela 30. Erros de ensaio da resistência à tração por compressão diametral.	107
Tabela 31. Eficiência econômica dos concretos sem e com adições.	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Reatividade potencial álcali-agregado, conforme método ASTM C1260.....	64
Figura 2.	Gráfico de dosagem: relação a/c em função do % de areia.....	72
Figura 3.	Gráfico de dosagem pelo módulo de finura em função do % de areia.....	73
Figura 4.	Gráfico de dosagem resistência à compressão versus módulo de finura - amostra referência.....	75
Figura 5.	Gráfico de dosagem: resistência à compressão versus relação (a/ceq) - amostra referência (curva de Abrams).....	76
Figura 6.	Gráfico de dosagem água unitária versus módulo de finura – amostra referência.....	76
Figura 7.	Gráfico de dosagem - resistência à compressão versus módulo de finura para o metacaulim.....	78
Figura 8.	Gráfico de dosagem resistência compressão versus relação (a/ceq) para o metacaulim (curva de Abrams).....	78
Figura 9.	Gráfico de dosagem água unitária versus módulo de finura para o metacaulim.....	79
Figura 10.	Gráfico de dosagem resistência compressão versus módulo finura para a sílica ativa.....	80

Figura 11. Gráfico de dosagem resistência à compressão versus relação (a/ceq) para a sílica ativa (curva de Abrams).	80
Figura 12. Gráfico de dosagem, água unitária versus módulo de finura para a sílica ativa.	81
Figura 13. Resistência à compressão aos 7 d, versus relação 1: m.	91
Figura 14. Resistência à compressão 28 d, versus relação 1: m.	91
Figura 15. Resistência à compressão 90 d, versus relação 1: m.	92
Figura 16. Consumo de cimento e adição mineral versus resistência especificada, aos 28 d.	101
Figura 17. Consumo de cimento e adição mineral versus resistência especificada, aos 90 d.	101
Figura 18. Resistência à tração por compressão diametral aos 7 d, em função da relação 1: m.	108
Figura 19. Resistência à tração por compressão diametral aos 28 d, em função da relação 1: m.	108
Figura 20. Resistência à tração por compressão diametral aos 90 d, em função da relação 1: m.	109
Figura 21. Resistência à compressão versus tração por compressão diametral.	110
Figura 22. Custo para a resistência à compressão do concreto aos 28 d.	112
Figura 23. Custo para a resistência à compressão do concreto aos 90 d.	113

Figura 24. Percentual do custo com as hipóteses analisadas aos 28 d.	114
Figura 25. Percentual do custo com as hipóteses analisadas aos 90 d.	114
Figura 26. Eficiência econômica dos concretos sem e com adições, em função da resistência à compressão axial aos 28 d.	117
Figura 27. Eficiência econômica dos concretos sem e com adições, em função da resistência à compressão axial aos 90 d.	117

LISTA DE CÓDIGOS E ABREVIATURAS

Código	Descrição
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
a.C. -	Antes do nascimento de Cristo;
ACI -	American Concrete Institute;
AHE -	Aproveitamento hidroelétrico;
ASTM -	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
BET -	Ensaio para determinação da superfície específica e porosidade de materiais, utilizando o gás azoto. Método Brunauer, Emmett e Teller;
CAD -	Concreto de alto desempenho;
CANMET -	<i>Canada Centre for Mineral and Energy Technology – Natural Resources Canada;</i>
CAR -	Concreto de alta resistência;
CEB -	<i>Comité Euro-International du Béton;</i>
CP II Z – 32 -	Cimento Portland composto com pozolana, classe 32 MPa aos 28 d;
C-S-H -	$(1,5-2)CaO.SiO_2.nH_2O$;
C2S -	$2CaO.SiO_2$;
C3A -	$3CaO.Al_2O_3$;
C3S -	$3CaO.SiO_2$;

Código	Descrição
C4AF -	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$;
d.C. -	Depois do nascimento de Cristo;
Dmáx -	Dimensão máxima característica do agregado;
DNPM -	Departamento Nacional de Produção Mineral;
EE -	Eficiência econômica;
Etringita -	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 3[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] + 25\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$
Ftd -	Resistência característica à tração por compressão diametral;
Fc -	Resistência característica à compressão axial simples;
Fck -	Resistência característica à compressão axial simples na idade requerida;
Fcj -	Resistência à compressão axial simples obtida na idade requerida;
Ftf -	Resistência característica à tração na flexão;
IS -	Indian Standard;
K -	Coeficiente de argamassividade do concreto;
MCAR -	Metacaulim de alta reatividade;
Melilita -	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7$;
NBR -	Norma Brasileira;
NM	Norma Mercosul;
t -	Coeficiente de confiabilidade estatística de Student;

Código	Descrição
v -	Coeficiente de variação de uma série de valores em relação à média, expresso em porcentagem.
Relação a/c -	relação água/cimento (representada neste trabalho como a/c+p; a/c+sa; a/ceq; a/c+mcar)
Relação a/(c + p) -	Relação água/(cimento + pozolana);
Relação a/(c + sa) -	Relação água/(cimento + sílica ativa);
Relação a/(ceq) -	Relação água/(material cimentício equivalente);
Relação a/(c + mcar) -	Relação água/(cimento + metacaulim de alta reatividade);

RESUMO

A utilização de materiais pozolânicos combinados com cimento para obter concretos mais duráveis e econômicos faz parte do objetivo de tecnólogos, principalmente, daqueles preocupados com a inibição de reações expansivas do tipo álcali-agregado, ataques químicos em estruturas submetidas a ambientes agressivos e, também, em estruturas massivas onde a preocupação com o surgimento de fissura de origem térmica é uma constante. Em síntese, esse trabalho trata de um estudo comparativo entre concretos convencionais compostos com dosagens padrão de referência (sem adição), dosagens com sílica ativa e com metacaulim. Os concretos foram produzidos em condições normalizadas de laboratório. Desta maneira projetou-se a possibilidade de reprodução deste estudo e aplicação de seus resultados em diferentes obras não somente em barragens. Foram mantidos constantes o tipo de agregado, cimento e trabalhabilidade do concreto. O desempenho dos concretos foi analisado em termos das propriedades mecânicas, notadamente a resistência à compressão axial simples e a resistência à tração por compressão diametral. O principal objetivo dessa pesquisa foi comprovar, para as mesmas condições de laboratório, que as adições apresentam o mesmo desempenho em relação às propriedades mecânicas pré-definidas. Os valores de resistência à compressão estudados foram aqueles comumente especificados em obras não somente de barragens, ou seja, entre 20 MPa e 40 MPa, aos 28 d e 90 d. Além da análise das propriedades mecânicas já citadas, foi efetuada análise comparativa de custos dos concretos, levando-se em consideração os consumos de aglomerantes obtidos para as mesmas resistências propostas e os preços dos produtos praticados no Brasil, atualmente. Os consumos totais de materiais cimentícios estudados foram da ordem de 180 kg/m³ a 650 kg/m³, e o teor de adição de 8% em massa de metacaulim e de sílica ativa em relação ao cimento, uma vez que esta quantidade foi suficiente para inibir a reação do tipo álcali-agregado presente no agregado definido para o estudo.

ABSTRACT

The utilization of pozzolanic materials combined with cement to obtain concretes more durables and more economics is part of the technologic objectives, mainly of the ones worried about the inhibition of expanded reactions of the alkali-aggregate kind, chemicals attacks in structures submitted to extreme weather, also in massive structures the worry of thermal cracking is a constant problem. This research features in a first part an inquiry about the differences obtained from concretes, analyzing only the mechanical properties. At the other stages are demonstrated the influence and the performance of the concrete mixtures in the concrete durability against the different aggressive ambient. In synthesis, this work is about a comparative study between conventional concrete with standard mixtures (without addition), mixtures with active silica and with Metacaulim. These concretes where made in standard laboratory conditions. In this way the possibility of reproduction of this study and the application of its results in dam sites or similar enterprises. The materials were homogenized and kept in standard laboratory conditions. The aggregate and cement types and the workability of concrete, as well, were kept constant. The performance was analyzed in terms of mechanical properties, basically the compressive strength and tensile strength trough diametrical compression. The main objective of this research work was to establish, for the same laboratory conditions, if the admixtures would show the same performance regarding the predefined mechanical properties. The compressive strength values studied where those commonly specified for dams, i.e., between 20 MPa and 40 MPa, at ages of 28 days and 90 days. Besides the analysis of the mechanical properties, comparative cost analysis was carried out by taking into account the binders consumption at the same strength, and also the products prices currently available in Brazil. The total consumptions of cimentitious materials studied were in the range of 180 kg/m³ to 650 kg/m³, whereas the replacement of 8% of High Reactivity Metacaulim and Silica Fume over cement weight was enough to inhibit alkali-aggregate reaction, concerning the aggregate chosen for this study.

PALAVRAS-CHAVE

Concreto – adição - aditivo - mineral – sílica ativa – metacaulim – resistência -
compressão – tração – diametral – cimento – agregado – reação – álcali-agregado

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em um empreendimento, notadamente construções de barragens, há necessidade de se utilizar concretos que atendam às especificações técnicas com a obtenção do menor custo, sem comprometimento da qualidade final do produto.

Esse motivo incentivou esta pesquisa na busca de alternativas específicas para a construção civil. Provocar o estudo comparativo entre materiais de construção e/ou desenvolver novos produtos, incrementando a pesquisa universitária aliada às necessidades dos consumidores, permite caminhar e crescer em termos do desenvolvimento tecnológico, macro economia e do bem estar social.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O aspecto econômico é um grande fator nessa pesquisa e chama a atenção para o fato de promover, em condições de igualdade, a análise comparativa entre dois produtos nobres e que estão colocados em evidência atualmente no mercado da construção civil. Esta análise procurou ser a mais fiel possível, mantendo-se as mesmas condições de ensaio para os produtos escolhidos para esta pesquisa.

O benefício em se utilizar produtos que sejam provenientes de subprodutos industriais tem um grande valor, principalmente, quando essa utilização diminui a poluição, aumenta a consciência de preservação do meio ambiente e promove o crescimento das empresas diretas e indiretamente envolvidas no universo da construção.

A redução da poluição decorrente do uso da sílica ativa em estruturas de concreto, por si só, é promissora, por ser um subproduto da indústria metalúrgica, portanto, um rejeito industrial reutilizável. No caso das adições ao concreto há a possibilidade de que cada quilo destes materiais utilizados por metro cúbico de concreto reduza de 2 kg a 4 kg de cimento, fazendo diferença em termos de CO₂ ou da poluição em geral lançada na atmosfera, pela produção deste insumo.

Quanto à durabilidade das estruturas, o emprego de tais produtos vem demonstrando menor recuperação estrutural.

Estes processos de evolução e de busca da utilização de novas adições têm, como exemplo, a valorização da escória de alto forno moída e da sílica ativa, que inicialmente eram classificadas como resíduos de produção, respectivamente, das indústrias de ferro gusa e de ligas de ferro-silício metálico. Contudo, as pesquisas visando a adequação da adição destes produtos ao concreto, os transformaram em materiais de grande interesse comercial e de custo elevado.

Seguindo esta tendência, têm-se buscado novas adições minerais, economicamente mais viáveis, entre as quais pode-se citar o metacaulim de alta

reatividade (MCAR). As pesquisas em torno desta nova geração de adições têm demonstrado resultados promissores com relação ao seu uso como adição mineral ao concreto (BARATA (1998); PERA e AMROUZ (1998); ZHANG, LASTRA e MALHOTRA (1996); MALHOTRA e MEHTA (1996)).

1.3 OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é o estudo de produtos de ponta consagrados no mercado utilizados como adição em concretos, promovendo a redução do custo em relação aos concretos sem os mesmos.

Verificar a influência de adições da sílica ativa e do metacaulim na resistência à compressão, resistência à tração e na análise de custos de concretos convencionais.

Verificar a influência destas adições em função da idade dos concretos e dos concretos convencionais analisados.

Verificar a influência da resistência na eficiência das adições.

Verificar o comportamento da trabalhabilidade dos concretos com as adições analisadas.

1.4 ABRANGÊNCIA DO TRABALHO

Procurou-se restringir o universo de aplicação dos concretos para simular, em particular, para uma mesma trabalhabilidade da mistura, qual o desempenho dos concretos compostos com metacaulim e sílica ativa. A partir dos concretos estudados, houve a possibilidade de uma análise mais criteriosa do desempenho de cada produto, tomando-se o cuidado em reconhecer as limitações em se reproduzir as mesmas condições de laboratório em qualquer obra e a sua extrapolação para outras trabalhabilidades.

Esta pesquisa é atraente para aplicação em empresas do ramo da construção civil, devido ao benefício em se poder comparar, com base em dados experimentais, produtos com características similares em resistência à compressão axial simples e em resistência à tração por compressão diametral, bem como os seus custos equivalentes.

Em função da definição do foco principal deste trabalho, teve-se a necessidade, visando o planejamento do experimento, de selecionar os campos das variáveis, conforme segue:

- variáveis de resposta, como sendo aquelas que serão o foco de avaliação, ou seja, medidas como resposta do experimento; e, as
- variáveis independentes ou controláveis, como sendo os fatores que poderiam ter alguma influência na resposta a ser medida.

Quanto às variáveis controláveis, constatou-se um grande número que, de uma maneira ou de outra, tendem a ter alguma influência nas propriedades do concreto, tais como: relação água/cimento (representada neste trabalho como a/c+p; a/c+sa; a/ceq; a/c+mcar) tipo de cimento, características do agregado graúdo, características do agregado miúdo, tipo de cura, entre outros.

Contudo, em função das limitações inerentes à realização deste trabalho, houve a necessidade de se restringir o número destas variáveis, fixando algumas destas, o que, conseqüentemente, resultou numa diminuição quanto ao número de informações a serem obtidas neste estudo. Optou-se por manterem constantes as seguintes variáveis:

- **teor de adição mineral.** Devido a que, por meio do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado (ASTM C-1260), foi verificado um teor ideal de adição mineral de 8% em relação à massa de cimento. Em ambos os casos (com sílica ativa e com metacaulim), esta quantidade foi suficiente para inibir a reação do tipo álcali-agregado;
- **trabalhabilidade do concreto.** Para se estabelecer uma condição estável e de reprodução sistemática da aplicação do concreto, foi mantida a mesma trabalhabilidade das misturas para ser prontamente reprodutível este estudo e não haver problemas com o lançamento do concreto em obras.

- **quantidade de aditivo polifuncional.** O percentual foi mantido constante, para não influenciar nas propriedades do concreto fresco;
- **módulo de finura das dosagens.** Foi mantido o módulo de finura das dosagens ótimas, sem adição mineral, como referência. Essa manutenção também foi importante para não influenciar diretamente no teor de água unitária das misturas e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas dos concretos; e, nas
- **idades e no número de corpos-de-prova para rompimento.** Foi adotado o número de três corpos-de-prova por idade de controle, sendo definidas as idades de 7, 28 e 90 dias. Estas idades são comumente adotadas como padrão em estudos de dosagens para barragens.

1.5 HIPÓTESE DO TRABALHO

Para a realização deste trabalho a hipótese principal foi verificar o comportamento dos concretos com metacaulim e com sílica ativa em concretos convencionais, comparados com concretos sem estas adições.

A melhoria obtida com a inclusão da sílica ativa pode ser verificada em vários trabalhos científicos na área de concreto, como os de DAL MOLIN (1995), MEHTA (1989) e CARETTE E MALHOTRA (1992).

No trabalho de DAL MOLIN (1995), onde se adotou a adição de 10% de sílica ativa, chegou-se a obter uma melhoria média, dentre as várias relações $a/(c + sa)$ estudadas de, aproximadamente, 13,5% na resistência à compressão do concreto, aos 28 dias de idade.

Além da melhoria na resistência, o uso desta adição tem proporcionado ao concreto uma menor quantidade de hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, que é o composto mais sujeito a lixiviar e a ataques químicos (AÏTCIN (1998)).

A constatação dos benefícios do uso da sílica ativa fez com que o uso desta adição mineral apresentasse um grande impulso para a produção dos concretos convencionais e, notadamente, para os concretos de elevado desempenho.

Quanto ao metacaulim, os estudos encontram-se em um estágio de desenvolvimento, com diversas aplicações atuais no Brasil e em outros países. Esta pozolana é derivada da calcinação do caulim, donde se destaca o mineral caulinita, a temperaturas que variam de 600 °C a 900 °C, passando, posteriormente, por processo de moagem ou micronização.

Segundo BARATA (1998), alguns pesquisadores tendem a distinguir entre o metacaulim e o metacaulim de alta reatividade (MCAR), decorrente, principalmente, da maior pureza e finura do segundo. Trabalhos realizados por alguns pesquisadores (BARATA, 1998; PERA e AMROUZ, 1998) também relatam a possibilidade de obtenção desta pozolana pelo uso de certos tipos de resíduos

industriais, principalmente, provenientes da fabricação da polpa de celulose e papel.

Atualmente, está havendo uma tendência de abreviação do metacaulim de alta reatividade para MCAR, o que pode gerar uma confusão no meio técnico devido à semelhança com o concreto de alta resistência (CAR). Segundo GALLO (2005), a opção por usar o nome completo por extenso, sem abreviações, tem obtido boa aceitação e é mais aconselhável.

Outra vantagem deste tipo de pozolana é a necessidade de uma menor quantidade de aditivo superplastificante, em relação à sílica ativa, para uma mesma trabalhabilidade, bem como à maior facilidade de acabamento, o que tende a diminuir o custo por metro cúbico do concreto com MCAR.

Segundo CALDARONE, GRUBER e BURG (1994), estas vantagens fazem com que esta pozolana possa apresentar um uso promissor quanto à sua aplicação em concreto de alto desempenho ou em concreto de alta resistência.

Neste trabalho, procurou-se verificar a utilização em concretos convencionais de baixo, médio e elevado consumo de aglomerantes.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo foi elaborado com concreto convencional, contemplando materiais normalmente utilizados na construção civil, notadamente, em construção de barragens.

Para o seu desenvolvimento foi adotada a premissa de se manter as condições de realização das moldagens e cura dos concretos em laboratório com ambiente normalizado, ou seja, sala de dosagens, câmara úmida e sala de realização de ensaios mecânicos climatizados.

Foi dada ênfase à análise do desempenho dos produtos sílica ativa e metacaulim e verificação do desempenho dos concretos com diferentes consumos de cimento, em relação às propriedades mecânicas particulares pré-definidas: resistência à compressão axial simples e resistência à tração por compressão diametral.

Os consumos totais de materiais cimentícios estudados foram da ordem de 180 kg/m^3 a 650 kg/m^3 , extrapolando os consumos médios utilizados em barragens, da ordem de 250 kg/m^3 . O teor de adição de metacaulim e de sílica ativa, ambos de 8%, foi adotado em massa e em substituição ao consumo de cimento para um metro cúbico de concreto.

O método de dosagem utilizado foi o método do módulo de finura dos agregados.

O agregado definido para o estudo foi britado e classificado nas instalações do Aproveitamento Hidroelétrico, AHE, Espora, localizado próximo à cidade de Aporé - GO. A rocha é do tipo litológico basalto, classificada nas dimensões máximas características de 4,8 mm (areia artificial) e de 25 mm.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, conforme descrito a seguir.

No primeiro capítulo está apresentada a Introdução, onde constam a justificativa e a importância deste trabalho. Também, são apresentados os objetivos, as hipóteses, a estrutura e a abrangência desta pesquisa.

No segundo capítulo está apresentada a Revisão Bibliográfica sobre o uso de pozolanas de alta reatividade no concreto, mostrando como podem influenciar na macroestrutura do concreto, bem como os principais tipos e características destas adições minerais.

No terceiro capítulo foram enfocadas a metodologia adotada e a influência das pozolanas altamente reativas nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, no Programa Experimental.

No quarto capítulo estão descritos os resultados e discussões, mostrando o planejamento e a execução dos ensaios mecânicos, bem como alguns resultados de testes necessários para as dosagens estudadas. Foi dada ênfase especial às propriedades mecânicas, principalmente, à resistência à compressão axial simples do concreto que é, sem dúvida, a propriedade mais referenciada e, ainda, em certas aplicações rastreáveis, a que melhor se correlaciona com outras propriedades do concreto. A resistência à tração por compressão diametral é um ensaio conhecido internacionalmente por ensaio brasileiro. Este ensaio foi desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro e tem um valor fundamental no conhecimento da fragilidade deste compósito quando submetido a este regime de tensões de tração.

São apresentados os dados obtidos para cada propriedade específica, assim como, os comentários pertinentes.

No quinto capítulo as conclusões são comentadas em relação às propriedades mecânicas analisadas e em relação ao benefício das adições minerais nos diferentes concretos.

E, no sexto capítulo, as sugestões para futuras pesquisas como motivação para que outros estudantes ou profissionais da área avaliem este tema e desenvolvam novos projetos de pesquisa.

Finalmente, têm-se as citações bibliográficas adquiridas e estudadas no desenvolvimento deste trabalho.

2 O USO DE ADIÇÕES NO CONCRETO

2.1 GENERALIDADES

MALHOTRA e MEHTA (1996) afirmam que o uso de adições provém do período de 1500 a.C., na Grécia, onde se adotava um material de origem vulcânica originado de erupções ocorridas na ilha Santorini. Esta afirmação evidencia que o uso de adições minerais na construção é anterior à invenção do cimento sendo, também, anterior à adoção do termo pozolana para alguns tipos de adições minerais; haja vista que ele foi utilizado pela primeira vez na Itália, no ano 300 a.C., para descrever as cinzas vulcânicas provenientes da vila de Pozzuoli, próxima à cidade de Nápoles.

SOUZA (2003) retrata bem este tema e LEA (1971) afirma que o uso destas adições tornou-se muito difundido em todo o império romano na execução de suas construções, como material cimentante. No ano de 79 d.C. tinha-se como principal fonte deste tipo de material, as cinzas vulcânicas oriundas do monte Vesúvio, que provocou a destruição de várias cidades localizadas na baía de Nápoles, como Pompéia e Herculano.

Também, foram adotados outros tipos de adições com origem vulcânica; na Alemanha, por exemplo, utilizavam-se materiais que eram denominados de tufos vulcânicos. Contudo, a busca de adições para uso na produção de argamassa e de concreto não se restringiu somente aos materiais de origem vulcânica. Foram

adotados posteriormente, em outras regiões, materiais como, por exemplo, a argila calcinada.

Atualmente, devido a diversos fatores (ecológicos, econômicos e técnicos), procura-se aumentar o consumo de adições minerais no concreto, tendo como principal fonte, de acordo com MEHTA e RAMACHANDRAN (1984), pozolanas provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa oriunda da indústria metalúrgica, a cinza volante, subproduto das usinas termoelétricas, a escória de alto forno moída, subproduto da fabricação do ferro gusa e as agrícolas, como a cinza de casca de arroz.

A ASTM C 618 (1991) e a NBR 12653 (ABNT, 1992) definem como pozolana o material silicoso ou sílico-aluminoso, que apresenta poder aglomerante quando na presença de umidade em temperaturas próximas à ambiente, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento.

Esta reação promove, durante a produção de argamassas e de concretos, um aumento do desempenho tecnológico destas misturas o que, via de regra, leva a uma diminuição de custo quando comparado com a mistura sem adição devido a menor necessidade de cimento para se alcançar as características desejadas.

A possibilidade de obtenção de menores consumos de cimento faz com que a adoção de pozolanas seja extremamente vantajosa em casos onde haja a utilização de estruturas maciças de concreto como, por exemplo, em barragens.

Desta forma o seu emprego em concretos estruturais vem aumentando rapidamente. O crescente uso de pozolanas, segundo MIELENZ, citado por SANTOS (1992), tem como razão, além do menor consumo de cimento, as seguintes vantagens:

- a) eliminação ou retardamento da reação álcali-agregado;
- b) aumento da resistência ao ataque de águas naturais, especialmente as ricas em sulfatos;
- c) redução do calor de hidratação do concreto;
- d) aumento da resistência à tração do concreto;
- e) diminuição da permeabilidade do concreto; e, a
- f) melhoria da reologia do concreto, no seu estado fresco.

De acordo com NEVILLE (1997) as pozolanas podem ter origem natural ou artificial. As naturais são aquelas que possuem atividade pozolânica no seu estado natural, ou podem ser facilmente transformadas em pozolanas, por um processo de calcinação e moagem.

As pozolanas artificiais, também denominadas de subprodutos industriais, podem ou não necessitar de um tratamento (secagem ou moagem complementar) para que venham a desenvolver atividade pozolânica.

Apesar de o termo adição mineral estar, via de regra, relacionado à atividade pozolânica, há outras adições minerais que desenvolvem somente a atividade cimentante, enquanto outras desenvolvem além desta a atividade pozolânica.

Segundo RILEM (1988) as adições minerais podem ser classificadas quanto à sua atividade em uso na produção do concreto, principalmente, em função da sua composição química e mineralógica, tais como:

- **cimentante: escória granulada de alto-forno.** Na maior parte, silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Podem estar presentes, em pequena quantidade, compostos cristalinos do grupo melilita $(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al,Si)_3O_7$. O material não-processado tem a dimensão da areia e contém de 10% à 15% de umidade. Antes do uso, deve ser seco e moído até partículas menores do que 45 μm , (e cerca de 500 m^2/kg de finura Blaine). As partículas têm textura rugosa.
- **cimentante e pozolânico.** Cinza volante com alto teor de cálcio ($CaO > 10\%$). Na maior parte, silicatos vítreos contendo, principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste, geralmente, de quartzo e C_3A ; podem estar presentes cal livre e periclásio (MgO). O carbono não queimado é comumente inferior a 2%. Pó com 10% a 15% de partículas maiores do que 45 μm (comumente, entre os valores de 300 m^2/kg e 400 m^2/kg de finura Blaine). Muitas partículas são esferas sólidas menores do

que 20 μm de diâmetro. A superfície das partículas é, geralmente, lisa, mas não tão limpa quanto as cinzas volantes de baixo teor de cálcio.

- **pozolanas comuns:** (a) cinza volante de baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$); e, (b) materiais naturais. Na maior parte, são silicatos vítreos contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste, geralmente, de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita. As pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica. Pó com teores entre 15% e 30% de partículas maiores do que 45 μm (entre 250 m^2/kg e 350 m^2/kg de finura Blaine). A maior parte das partículas são esferas sólidas com 20 μm de diâmetro médio. Podem estar presentes cenosferas e plerosferas. As partículas são moídas na sua maior parte, abaixo de 45 μm e têm textura rugosa.
- **altamente pozolânicas:** (a) sílica ativa; (b) cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada; e, (c) metacaulim. Pós finos constituídos de esferas sólidas de diâmetro médio entre 0,1 μm e 5,5 μm ; (b) partículas com tamanho inferior a 1,5 μm , dependendo do tipo e da qualidade de moagem; (c) apresenta superfície específica variável de acordo com moagem. São partículas com diâmetros geralmente inferiores a 45 μm , podendo ser lamelares.
- **Outras.** Escória granulada de alto-forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escórias ácidas, cinza de casca de arroz queimada em campo.

Consiste essencialmente de silicatos cristalinos e somente uma pequena quantidade de material não-cristalino. Os materiais devem ser moídos a um pó muito fino para desenvolver uma certa atividade pozolânica. As partículas moídas têm textura rugosa.

Nesta abordagem foi adicionado o metacaulim, que segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), também é classificado como uma pozolana de alta reatividade. Ressalta-se, contudo, que serão atribuídas neste capítulo, apenas, a sílica ativa e o metacaulim, pelo fato de se enquadrarem na mesma classe da adição mineral estudada nesta pesquisa.

2.2 BENEFÍCIOS DO EMPREGO DE POZOLANAS NO CONCRETO

A adição de pozolanas, geralmente, se reflete em uma série de benefícios para o concreto, bem como outros não necessariamente relacionados à construção civil. Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), estes benefícios podem ser divididos em três categorias.

Tecnológicos. A introdução de um material fino no concreto, tal como a cinza volante, tende a proporcionar um aumento da sua trabalhabilidade ou uma menor necessidade de água para o mesmo valor de abatimento. No caso do uso de pozolanas de alta reatividade que apresentam grande área superficial como, por exemplo, a sílica ativa, este comportamento se repete somente quando se utilizam pequenos teores. Outra vantagem técnica do uso de pozolanas no

concreto é o aumento da durabilidade e a melhoria de suas propriedades mecânicas.

Econômicos. No concreto, o cimento Portland é, geralmente, o material com maior custo e a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta diminuições no seu consumo e no da energia elétrica utilizada para a sua produção. Assim sendo, a redução do uso do cimento resulta em economia para a produção do concreto.

Por outro lado, grande parte das pozolanas utilizadas no concreto é derivada de resíduos industriais, fazendo com que o uso destes materiais necessite de pouco ou nenhum custo adicional para sua aplicação no concreto. A substituição do cimento Portland por pozolanas, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), pode variar de 20% a 60%. Este procedimento pode representar uma considerável economia de custo e de energia. No caso de pozolanas com alta reatividade, a adição tende a ocorrer em teores que se situam em torno de 10%.

Ecológicos. Normalmente, como já citado, grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais. Na maioria destes resíduos, constata-se a presença de elementos poluentes que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Neste contexto, as pesquisas contemplando a utilização destes materiais como pozolanas, acima de tudo, visam fornecer uma maneira de evitar agressão ao meio ambiente, haja vista que, geralmente, estes materiais são depositados em rios, campos e lagoas, quando não se dispõe de um uso para estes resíduos.

MEHTA e MONTEIRO (1994) relatam que a construção civil, em especial na produção do concreto, se apresenta como uma excelente opção para o uso destes materiais e, os metais existentes, podem ser combinados com os produtos de hidratação do cimento.

O uso de pozolanas também tende a resultar em outras vantagens, como a menor necessidade de altos consumos de cimento, o que, conseqüentemente, resultará em vários benefícios, como na diminuição da agressão ao meio ambiente, pois para a produção de uma tonelada de clínquer, segundo MEHTA (1999) e MALHOTRA e MEHTA (1996), há a necessidade de 1,5 t de calcário, e consideráveis consumos de combustível além de, também, resultar na emissão de 1 t de CO₂ na atmosfera. MEHTA (1999) acrescenta que esta emissão representa 7% da quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera, contribuindo assim com uma significativa parcela para o efeito estufa existente em nosso planeta.

2.3 PRINCÍPIO DA AÇÃO DAS POZOLANAS NO CONCRETO

O cimento Portland, se totalmente hidratado, produz em torno de 28% da sua própria massa de Ca(OH)₂. Contudo, dificilmente, tem-se a total hidratação do cimento, o que, geralmente, tende a resultar em um total de 20% da sua própria massa (SABIR, WILD e BAI, (2001)). A adição de pozolanas em concretos, especialmente as altamente reativas, faz com que haja uma série de transformações em sua microestrutura, que têm origem na sua ação química e

física. Contudo, a significância de cada uma dessas ações no concreto ainda é objeto de trabalho de vários pesquisadores (ISAIA (2000)).

No que se refere à ação química, a introdução de pozolanas proporciona uma reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), produzido durante a hidratação do cimento. Segundo SANTOS (1992), a capacidade da pozolana em reagir e combinar com este produto é a propriedade fundamental deste material. Esta reação, que alguns autores classificam como uma reação secundária, resulta na formação de compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e os aluminatos de cálcio hidratado, que são os principais elementos responsáveis pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

BATTAGIN (1987) explicando a ação química das pozolanas, relata que a atividade pozolânica tem origem na instabilidade termodinâmica existente quando estes materiais entram em contato com a água saturada de Ca(OH)_2 , haja vista que a sílica e a alumina existentes na pozolana pertencem a estruturas facilmente deslocáveis (estruturas amorfas ou desordenadas). Esta situação faz com que o autor afirme que esta atividade é decorrente da composição química e da microestrutura da pozolana.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) o uso de pozolanas, mesmo em pequenas quantidades, é capaz de consumir quase que completamente o Ca(OH)_2 produzido na hidratação. A transformação do Ca(OH)_2 em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) faz com que o concreto se torne mais resistente ao ataque ácido e ao ataque por sulfatos. DAL MOLIN (1995), pelo uso de

difratogramas de raios X, verificou aos 7 dias a redução dos picos de hidróxido de cálcio nas misturas com sílica ativa, evidenciando o início das reações pozolânicas.

Contudo, é interessante ressaltar que o C-S-H formado na reação pozolânica tende a apresentar uma densidade um pouco menor que o C-S-H formado na hidratação do cimento (ACI 226 (1987)). Mesmo com a redução do teor de Ca(OH)_2 devido ao emprego de pozolanas, não se constata no concreto uma diminuição significativa de sua alcalinidade. Esta constatação foi obtida por vários pesquisadores tais como SEIDLER (1999) que realizou um programa experimental onde comparou misturas com até 30% de sílica ativa, de cinza de casca de arroz e de cinza volante, com a mistura sem o uso de pozolana; concluiu que o uso destas adições minerais resulta numa diminuição máxima do pH do concreto de 13 para 12.

A variação com relação ao início da contribuição à resistência, por parte das pozolanas, no que tange ao início da ação química decorre, principalmente, das suas características mineralógicas e granulométricas. DAL MOLIN (1995), citando vários pesquisadores, apresenta quando do uso da sílica ativa, variações no início da reação aos 7 dias e que são creditadas às variações no processo de produção da liga metálica, que resultam em alterações mineralógicas e granulométricas na sílica ativa.

ROY, citado por DAL MOLIN (1995), relata que em misturas com 10% de sílica ativa, metade da adição mineral é hidratada em um dia e dois terços nos primeiros três dias, apesar do restante das reações ocorrerem lentamente.

Quanto à ação física, tem-se neste caso um efeito mais intenso no concreto, quando da utilização de pozolanas de alta reatividade, haja vista que estes materiais, normalmente, apresentam uma elevada finura das partículas. Este efeito no concreto pode se apresentar de três formas:

a) pelo aumento da densidade da mistura devido ao preenchimento dos vazios decorrentes, principalmente, das minúsculas partículas destas pozolanas, normalmente, mais finas que as partículas de cimento. Este efeito, também chamado microfíler provoca uma microcarga;

b) pelo grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho, devido aos menores espaços disponíveis para os produtos de hidratação crescerem. O menor espaço ocorre pelo fato da pozolana agir como ponto de nucleação para os produtos de hidratação, resultando no refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento. Este refinamento é apontado por SELLEVOLD e NILSEN (1987) como um dos principais fatores responsáveis pela influência da sílica ativa nas propriedades mecânicas.

c) pela densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, devido à interferência na movimentação das partículas de água livre em relação aos sólidos da mistura. A alteração na movimentação provoca a

eliminação ou a redução do acúmulo de água que comumente fica retido sob o agregado. Este efeito ainda é acompanhado da diminuição do número de vazios entre as partículas de cimento e a superfície do agregado (novamente o efeito *microfilar*) e da redução da concentração de hidróxido de cálcio nesta região do concreto (ação química).

2.4 POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS

Em meados da década de 60, devido ao grande acúmulo de resíduos provenientes da indústria ferrosilício e ligas metálicas, partiu-se para a sua adoção como pozolanas, em estruturas *off-shore* visando a produção de um concreto com alto desempenho, CAD (MEHTA e MONTEIRO 1994). Esta aplicação, além do ótimo resultado relacionado à durabilidade do concreto, também proporcionou à estrutura altos valores de resistência, fazendo com que se começasse a utilizar este resíduo com o intuito de se obter o concreto de alta resistência, CAR.

O excelente resultado na atividade pozolânica desses resíduos fez com que fossem denominados pozolanas de alta reatividade. Atualmente, como principais pozolanas altamente reativas em uso no concreto ou em pesquisa visando o seu uso no futuro, têm-se a sílica ativa e o metacaulim de alta reatividade (MCAR).

Por se tratar de um estudo comparativo entre a sílica ativa e o metacaulim, será dada ênfase, apenas, a esses dois materiais, neste trabalho.

2.4.1 Tipos de pozolanas altamente reativas

a) Sílica ativa

Conforme descrito anteriormente, este produto é oriundo do processo de produção das indústrias de ferrosilício e silício-metálico. Neste processo, o silício é produzido em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco voltaico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas. Como resultado tem-se a produção do monóxido de silício gasoso (SiO), que se condensa quando entra em contato com temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO_2), apresentando uma coloração que pode variar do cinza claro ao escuro.

Esta variação está diretamente relacionada, segundo MALHOTRA, CARETTE e SIVASUNDARAM (1994), ao excesso de carbono residual, proveniente do carvão combustível ou da madeira utilizada como carga para o forno.

Segundo UNICAMP citado por DAL MOLIN (1995), a presença de uma cor mais clara é resultado da temperatura mais alta na parte superior do forno, fazendo com que a maior parte do carvão ascendente seja queimado.

O teor de ferro, em menor escala, tende a também apresentar uma influência na cor desta pozolana.

Este rejeito recebeu várias denominações, como microsílica e fumos de sílica, contudo, a NBR 13956 (1997) estabeleceu-se como sílica ativa a denominação padrão a ser dada a este rejeito no Brasil.

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), a produção anual de sílica ativa encontrava-se em torno de 1 milhão de toneladas, sendo os maiores produtores a Noruega e os Estados Unidos. No ano de 2001, a produção mundial era de 585,7 milhões de toneladas e o valor produzido no Brasil era de 10,5 milhões de toneladas (IBGE 2002).

A sílica ativa foi a primeira pozolana altamente reativa utilizada realmente com o objetivo de se alcançar altas resistências. As primeiras investigações tiveram como origem a Noruega, em meados da década de 60, sendo aplicada pela primeira vez numa estrutura de concreto no ano de 1971 (MALHOTRA, CARETTE e SIVASUNDARAM (1994); JONES (1997)). Esta linha de pesquisa se estendeu, na década de 80, a outros países como Estados Unidos e Canadá, que coincidiu com o início da exploração comercial deste produto.

Mesmo com o início da comercialização na década de 80, constata-se que o comportamento do concreto com esta pozolana de alta reatividade, ainda não estava totalmente conhecido. Esta situação é relatada por KHAYAT e AÏTCIN (1993), que realizaram um levantamento sobre o estado-da-arte do concreto com a sílica ativa, onde constataram que até o ano de 1983 haviam sido publicados somente 47 artigos em língua inglesa.

Este quadro fez com que houvesse um crescimento no número de pesquisas visando o melhor entendimento da ação da sílica ativa no comportamento do concreto, que resultou na promoção de eventos internacionais como congressos e conferências sobre o assunto.

Com relação ao Brasil, a adoção da sílica ativa no concreto só começou a ser debatida em congressos no ano de 1984, com a realização do I Seminário Tecnológico da Elken; contudo, foi no 8th *International Congress on The Chemistry of Cement*, no Rio de Janeiro em 1986, que o assunto recebeu uma maior atenção.

A partir deste momento, iniciou-se um crescente número de publicações, em congressos nacionais e internacionais, realizados no Brasil, relacionando principalmente, o uso de sílica ativa à produção do CAR. No ano de 1999, realizou-se na cidade de Gramado-RS, com o patrocínio do *ACI/CANMET*, o segundo congresso internacional sobre o CAD, onde 31% dos trabalhos publicados abordaram a utilização de sílica ativa no concreto. No terceiro congresso internacional sobre CAD, novamente com o patrocínio do *ACI/CANMET* realizado no ano de 2002 na cidade de Recife-PE, constatou-se, aproximadamente, 20% dos trabalhos relacionados ao uso da sílica ativa.

Além dos debates em congressos, começaram a ser publicadas no Brasil, no início da década de 90, várias dissertações e teses sobre o uso da sílica ativa no concreto que abordavam o aspecto mecânico, como o de DAL MOLIN (1995), MORAES (1990), RAMIRES (1993); e outros que abordavam o aspecto da

durabilidade, como o de HASPARYK (1999), WOLF (1991), FORNASIER (1995), ISAÍÁ (1995) e LOPES (1999), que tiveram um grande papel na consolidação do conhecimento com relação a este assunto.

b) Metacaulim

A primeira forma de obtenção desta pozolana foi proveniente da calcinação de argilas cauliníticas. Recentemente, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), têm-se também obtida esta pozolana por meio da calcinação, em baixas temperaturas e da moagem de argilas especiais como o caulim de alta pureza. Neste processo, é obtida uma pozolana com alta atividade pozolânica, fazendo com que recebesse a denominação de metacaulim de alta reatividade (MCAR). Além da alta reatividade, esta pozolana tem se tornado, pela sua cor clara, muito atrativa quando se utiliza o concreto com fins arquitetônicos.

Em função da potencialidade de seu uso como pozolana de alta reatividade, constata-se um aumento na busca do maior conhecimento do comportamento do concreto com uso do MCAR. Esta busca pode ser refletida no crescente número de publicações internacionais sobre o assunto, principalmente a partir da metade da década de 90, como os trabalhos de CALDARONE, GRUBER e BURG (1994) e ZHANG e MALHOTRA (1995).

No Brasil, mesmo apresentando uma grande potencialidade para o uso do metacaulim no concreto, têm-se observado poucos trabalhos sobre o assunto. Dentre estes, pode-se destacar os realizados por ZAMPIERI (1989), que estudou

o metacaulim proveniente de argilas caulínicas calcinadas e por BARATA (1998), que estudou o rejeito da indústria papelreira para a produção do MCAR e mais recentemente SOUZA (2003) com uma avaliação mais profunda sobre este material em concretos de alta resistência e GALLO (2005) com um trabalho sobre a caracterização microestrutural do MCAR.

2.4.2 Características químicas

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), no caso de pozolanas de alta reatividade, as diferenças na composição química são pouco significativas, a menos que seja acompanhada de mudanças significativas na sua composição mineralógica.

Contudo, ressalta-se a necessidade da pozolana ser constituída de certos elementos, em quantidades mínimas. A necessidade do estabelecimento de teores mínimos para este tipo de material é refletida pelas normas relacionadas ao assunto.

Na sílica ativa, tem-se como principal característica, a grande quantidade de SiO_2 presente, que, invariavelmente, fica em patamares superiores a 80%, sendo que este teor está diretamente relacionado com a forma de produção existente.

As indústrias que adotam o teor de silício na ordem de 75% produzem um rejeito com teores entre 85% e 90% de SiO_2 não-cristalina, enquanto que nas indústrias que adotam um menor teor de silício (50%), o rejeito apresenta uma

quantidade inferior de SiO_2 não-cristalina, tornando-o menos reativo (MEHTA e MONTEIRO (1994)).

Segundo DAL MOLIN (1995), na Noruega, por exemplo, adota-se o teor mínimo de 85% de SiO_2 para que a pozolana seja utilizada em concretos. No Brasil, a NBR 13956 (1997) também fixa o teor mínimo de 85% para o SiO_2 não-cristalino.

Segundo SENSALÉ (2000) e SILVEIRA (2001), as principais impurezas são os álcalis K_2O e Na_2O , onde o primeiro encontra-se em teores de 1% a 5%. Impurezas como CaO e MgO ocorrem em teores inferiores a 2%. MALHOTRA e MEHTA (1996) apresentam, na Tabela 1, os teores típicos dos principais elementos que constituem a sílica ativa.

Com relação ao aspecto químico, tanto para o metacaulim quanto para o MCAR, devem-se focalizar dois pontos principais: a sua composição química e a sua estrutura interna.

O primeiro, está diretamente relacionado à argila utilizada para a produção da pozolana. MALHOTRA e MEHTA (1996) relatam que esta pozolana de alta reatividade é a única que não é caracterizada pelo alto teor de sílica, tendo geralmente proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 , em massa.

Tabela 1. **Composição química típica da sílica ativa proveniente de algumas indústrias metalúrgicas, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996).**

Material	Sílica ativa (ind. silício-metálico)	Sílica ativa (ind. ferro-silício) (75%)	Sílica ativa (ind. ferro-silício) (50%)
SiO₂	94,00	90,00	83,00
Al₂O₃	0,06	1,00	2,50
Fe₂O₃	0,03	2,90	2,50
CaO	0,50	0,10	0,80
MgO	1,10	0,20	3,00
Álcalis	0,10	2,20	2,30
Perda ao fogo	2,50	2,70	3,60

A caulinita, mineral que dá nome ao grupo das argilas caulíníticas, apresenta, de acordo com GOMES (1988), composição química teórica de, aproximadamente, 39,8% Al₂O₃, 46,3% SiO₂ e 13,9% H₂O.

Segundo SABIR, WILD e BAI (2001), a sua composição química tem uma grande influência na definição do teor ótimo de substituição deste material por cimento.

A composição química, mesmo não sendo, segundo SANTOS (1992) e ZAMPIERI (1989), um parâmetro adequado para a avaliação da pozolanicidade, pois impossibilita a diferenciação entre a sílica cristalina e a não-cristalina,

apresenta-se como uma forma de controle de produção ou de recepção de uma argila, com relação à sua origem ou procedência.

Contudo, para que este controle seja eficaz, há a necessidade de se ter valores mínimos de compostos, visando a garantia da atividade pozolânica, principalmente, no que refere aos teores de SiO_2 e Al_2O_3 .

Para as pozolanas do tipo do metacaulim são estabelecidas algumas exigências químicas, descritas pela norma indiana (IS 1344 (1968)), pela norma americana (ASTM C 618 (1991)) e pela brasileira (NBR 12653, (1992)), conforme apresentado na Tabela 2. Mesmo não se tendo uma norma específica referente ao MCAR, acredita-se que os padrões definidos, também, devem se adequar, na sua maioria, a esta pozolana, haja vista não ser este o fator principal de diferenciação entre o metacaulim e o MCAR.

Dentre os valores colocados na Tabela 2 que talvez devam ter alteração quando se visa à utilização do MCAR, tem-se o valor mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e, o valor máximo de perda de fogo. No primeiro, acredita-se que o teor mínimo deva se elevar a 90%; quanto ao segundo, tem-se que o valor máximo deva ser diminuído para o patamar de 3%.

Tabela 2. **Exigências químicas estabelecidas pelas normas IS 1344 (1968), ASTM C 618 (1991) e NBR 12653 (1992) para pozolanas do tipo do metacaulim.**

Exigências químicas	IS 1344 (1968)	ASTM C-618 (1991)	NBR 12653 (1992)
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) - mín.	70%	70%	70%
SiO ₂ – mín.	40%	-	-
CaO – máx.	10%	-	-
MgO – máx.	3%	-	-
SO ₃ – máx.	3%	4%	4%
Na ₂ O + K ₂ O – máx.	3%	-	-
Teor de umidade – máx.	-	3%	3%
Álcalis solúveis em água – máx.	0,1%	-	-
Álcalis disponíveis em Na ₂ O – máx.	-	1,5%	1,5%
Material solúvel em água – máx.	1%	-	-
Perda ao fogo – máx.	5%	10%	10%

A definição desses valores tem como base a literatura referente ao assunto e objetiva assegurar uma maior atividade pozolânica do MCAR.

Na Tabela 3, está transcrita uma composição típica do MCAR (MALHOTRA e MEHTA (1996)).

Tabela 3. **Composição química típica do MCAR (MALHOTRA e MEHTA (1996)).**

Composição típica do metacaulim	Porcentagem em massa
SiO ₂	51,52
Al ₂ O ₃	40,18
Fe ₂ O ₃	1,23
CaO	2,00
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao fogo	2,01

Segundo LEA citada por SANTOS (1992), argilas com maiores teores de Al₂O₃ resultam num metacaulim com maior atividade pozolânica. BATTAGIN (1987), citando como exemplo a caulinita, também relaciona a maior presença do Al₂O₃ aos maiores teores deste argilomineral, que são os componentes verdadeiramente ativos por tratamento térmico. Quanto maior o teor de SiO₂, a partir de uma determinada faixa de composição química, maior é a presença de materiais com pouca atividade pozolânica, como o quartzo. AMBROISE, MURAT, e PERA (1993) e SALVADOR (1995) também constataram a maior reatividade com a cal no tipo de argila com maior teor de Al₂O₃.

Outro ponto importante nas argilas, mais especialmente nas argilas cauliniticas, que se apresentam como as mais apropriadas para a obtenção do metacaulim, é a estrutura cristalina do argilomineral caulinita. Esta estrutura,

segundo GRIM (1962), é constituída por unidades lamelares, sendo cada unidade formada por uma folha tetraédrica de silicato (SiO^{-4}) e uma folha octaédrica de gibsita, cujas unidades $\text{Al}(\text{OH})_3$ estão ligadas entre si pelos átomos de oxigênio, que têm em comum. Esta estrutura, quando sujeita ao tratamento térmico, com temperatura entre 400 °C e 550 °C, tem o seu arranjo estrutural destruído, pela retirada dos íons de hidroxilas, que também é denominado de desidroxilação. O material formado é denominado de metacaulinita, apresentando perante a difração de raios X uma estrutura amorfa. Segundo HE OSBAECK, MARKOVICKY (1995), este processo térmico é essencial para o desenvolvimento da atividade pozolânica por parte das argilas.

Segundo ZAMPIERI (1989), as reações pozolânicas entre a metacaulinita e o hidróxido de cálcio são, em essência, reações de dissolução e formação de novas fases. Assim sendo, a metacaulinita, principalmente, devido ao grande desequilíbrio físico-químico (desordenação atômica) oriundo do tratamento térmico, ao entrar em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland (pH em torno de 13,5), provoca a dissolução do silício e do alumínio na superfície de suas partículas; que, posteriormente, reagem com o excesso de cálcio existente, cristalizando em aluminatos, silicatos e alumino-silicatos de cálcio hidratado. COLEMAN e PAGE (1997), em pastas com 10% e 20% de MCAR, constataram diminuições do pH, quando comparadas com a mistura de referência, porém em valores que não ultrapassaram o limite para a despassivação do aço.

Dentre os produtos resultantes do processo de reação pozolânica, colocados neste item, deve-se destacar a gelenita, que apresenta resistências superiores às obtidas com o C-S-H (TAYLOR (1992)). Esta situação, adicionado ao fato deste produto ser normalmente decorrente da reação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com o Al_2O_3 do MCAR, faz com que se ratifique o colocado anteriormente por diversos autores, que apontam para as argilas com maiores teores de Al_2O_3 como as mais indicadas para a obtenção do MCAR.

Recentemente, CABRERA e ROJAS (2001), empregando argamassas com cal, obtiveram resultados que apontam para a reação pozolânica como origem da formação da hidrogranada, ao invés da reação de transformação descrita anteriormente. Conclusões similares foram obtidas no trabalho desenvolvido por ROJAS e CABRERA (2002).

2.4.3 Características mineralógicas

O material para ser classificado como pozolana de alta reatividade deve, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), combinar dois fatores: uma estrutura amorfa e uma grande área específica. Nestas pozolanas, altamente reativas em relação ao aspecto mineralógico, tem-se algumas semelhanças às pozolanas comuns, como a estrutura do SiO_2 sendo essencialmente não-cristalina.

Nesta condição, segundo DASTOL (1984), este elemento mostra-se inofensivo à saúde humana, evitando, deste modo, o aparecimento da silicose,

que tem origem no contato como o SiO₂ cristalino. A forma amorfa da sílica ativa decorre, principalmente, da desordem da estrutura SiO₂, que se origina na condensação do material submetido à fusão.

O metacaulim empregado como pozolana, tanto o comum quanto o de alta reatividade, provém de certos tipos de argilas, sendo deste modo classificado, segundo a NBR 12653 (1992), como uma pozolana do tipo N. Contudo, é interessante ressaltar que determinados tipos de argilas podem proporcionar ao material um melhor desempenho, tanto no aspecto referente à sua produção quanto no aspecto referente ao seu uso no concreto.

Com relação à pureza destas argilas, AMBROISE, MARTIN-CALLE e PÉRA (1993) estipularam em 90% o teor mínimo de caulinita, para a produção de pozolanas altamente reativas. Este teor foi novamente constatado por WALTERS e JONES (1991) e AMBROISE, MURAT e PERA, (1985a), onde os autores relatam que teores de até 10% de fases inertes finamente divididas, como a mica e o quartzo, não produzem uma grande influência na resistência à compressão de misturas com esta pozolana.

Tal situação também foi evidenciada no trabalho de ZAMPIERI (1989) onde o uso de argilas cauliníticas de alta pureza, com a substituição por quartzo de mesma granulometria, em teores de até 40%, resultaram numa redução de 22% na resistência à compressão em ensaios de pozolanicidade com a cal.

2.4.4 Características físicas

O tamanho, a forma e a textura das partículas das pozolanas altamente reativas provocam uma grande influência nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, quando comparado com a influência da sua composição química (MEHTA (1989)). No estado fresco, verifica-se que a demanda de água e a trabalhabilidade são controladas pelas características físicas das partículas.

No estado endurecido, propriedades como resistência e permeabilidade estão diretamente relacionadas a estas características físicas. Quanto à distribuição dos grãos, AÏTCIN (1998) relata que na sílica ativa o diâmetro das partículas varia de 0,0001 mm a 0,002 mm, sendo, deste modo, em média, 5 vezes a 100 vezes menor que o tamanho médio das partículas de cimento. MEHTA (1989) ressalta que a sílica ativa oriunda da indústria de silício metálico geralmente apresenta um menor tamanho de partículas, quando comparada com a oriunda da indústria de ferro-silício.

Quanto ao diâmetro das partículas, a NBR 13956 (1997) fixa o valor máximo de 10%, para o retido na peneira 0,045 mm. A elevada finura da sílica ativa faz com que o efeito *microfíler* seja uma das propriedades mais importantes deste material, visto que as partículas se introduzem facilmente entre os grãos de cimento atuando como pontos de nucleação dos produtos de hidratação. Como

conseqüência, tem-se a distribuição mais homogênea dos produtos de hidratação nos espaços disponíveis.

Outro ponto importante, com relação às características físicas, é a área específica das partículas. Na sílica ativa a área específica, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio pelo método denominado BET, fica entre 15.000 m²/kg e 25.000 m²/kg, com o valor médio em torno de 20.000 m²/kg, sendo deste modo, extremamente superior à obtida no cimento Portland, que fica na ordem de 800 m²/kg a 1500 m²/kg.

Com relação à forma, DAL MOLIN (1995), MEHTA e MONTEIRO (1994), entre outros, com uso do microscópio eletrônico, apresentam estudos realizados com a sílica ativa, onde se verifica a forma esférica desta pozolana.

Como visto anteriormente, as características físicas, como tamanho da partícula e a superfície específica, são alguns dos principais fatores que, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), podem garantir a alta atividade pozolânica. Todavia, durante o tratamento térmico tem-se a aglomeração das partículas, que resulta no aumento de sua granulometria.

Este comportamento faz com que sempre haja a necessidade, quando se usam argilas calcinadas, da realização de moagem, para que tanto o metacaulim quanto o MCAR possam alcançar todo o potencial de sua atividade pozolânica.

Atualmente, no que se refere às exigências físicas fixadas por norma para este tipo de pozolana, verifica-se que as mesmas têm como principal objetivo assegurar o seu uso como pozolana comum.

As principais exigências físicas das normas indiana, americana e brasileira, com relação ao uso do metacaulim como pozolana comum, estão colocadas na Tabela 4.

Tabela 4. **Exigências físicas para a pozolana comum, do tipo do metacaulim.**

Exigências físicas	IS 1344 (1968)	ASTM C618 (1991)	NBR 12653 (1992)
Material retido na peneira 0,045 mm, máx.	12	34	34
Superfície específica, Blaine, mín. (m ² /kg)		320	

Quanto ao MCAR, acredita-se, com base na literatura existente, que uma menor quantidade de material retido na peneira 0,045 mm e uma maior superfície específica possam assegurar o desempenho especificado para este tipo de pozolana (CALDARONE, M.A.; GRUBER, K. A.; BURG (1994); CALDARONE e GRUBER (1995); e ZHANG e MALHOTRA (1995)).

Tem-se desse modo, nas características físicas, o grande fator de diferenciação entre o metacaulim e o MCAR.

Nos concretos com MCAR têm-se, também, assim como na sílica ativa, os efeitos *filler* de nucleação e de densificação da zona da transição decorrentes da elevada finura deste material. Este efeito foi relatado por vários autores (KOSTUCH, WALTERS e JONES (2000); KHATIB e WILD, 1996; DELVASTO e MORALES, 2000; POON, LAM, KOU, WONG e WONG (2001)) pela diminuição da porosidade de pastas, argamassas e concretos, com diferentes teores de substituição de MCAR. FRIAS e CABRERA (2000) acrescentam que este efeito é mais intenso após o primeiro dia.

O aumento de densidade e a melhoria da resistência da zona de transição, em relação à mistura de referência, foi ratificada por ASBRIDGE, PAGE e PAGE (2002) em pastas com diferentes relações $a/(c+MCAR)$. É interessante ressaltar que não se pode descartar o efeito da atividade pozolânica nas primeiras idades, visto que todas as pozolanas de alta reatividade já apresentam reações nestes períodos.

O grande número de aplicações fez com que o aumento da produção de caulim subisse de 20 milhões para 23 milhões de toneladas, no período de 1984 à 1992. Dentre os principais responsáveis pela grande produção de caulim sedimentar apresenta-se, em primeiro lugar, os EUA cuja produção foi equivalente a 40% da produção mundial.

Com dados mais recentes a produção dos EUA caiu para 17,8%, seguido do Brasil com 11,5%, República Tcheca com 8,9%, Alemanha com 8,4%, República da Coreia com 6,3% e demais países com 47,1% da produção mundial. O restante

da produção, aproximadamente, 36%, é obtida em outros países, como Ucrânia, Rússia, Brasil, China, Alemanha, França, Chile, Índia, entre outros (LOUGHBROUGH (1993)). Na Tabela 5, apresentada pelo DNPM (2003), tem-se a produção mundial nos anos de 1999 e de 2000, bem como as reservas mundiais.

Tabela 5. **Principais países produtores e reservas de caulim sedimentar, DNPM (2003).**

País	Reservas (10³ t)	%	Produção (*) (10³ t)	%
Brasil	7.179.126	40,0	5.206	11,5
Estados Unidos	(***)	(***)	8.010	17,8
Rep. Tcheca	(***)	(***)	4.000	8,9
Alemanha	(***)	(***)	3.800	8,4
Rep. Coreia	(***)	(***)	2.850	6,3
Outros países	(***)	60,0	21.234	47,1
Total	18.000.000 (**)	100,0	45.100	100,0

(*) Preliminar para o Brasil e estimada para os demais países.

(**) Estimado em 2003.

(***) Valor não informado em 2003.

Apesar do Brasil ter, atualmente, pouca participação no mercado mundial é interessante observar a pequena quantidade explorada de caulim sedimentar em relação às reservas estimadas. De acordo com LOUGHBROUGH (1993), a região

norte, em especial os estados do Pará e do Amapá, é responsável por 80% da produção nacional, sendo que grande parte desta produção é oriunda da indústria de mineração e beneficiamento, localizada na divisa entre estes dois estados, visando a produção de caulins do tipo *coating* e *filer*. KENDALL (1996) relata que o caulim extraído desta região, quando submetido às novas tecnologias de beneficiamento, apresenta características substancialmente diferentes no que se refere à alvura e às propriedades reológicas, do que qualquer outro caulim produzido atualmente.

Cabe enfatizar que 99,9% da produção mundial de caulim, beneficiado ou *in-natura*, é direcionado para outras aplicações além do concreto (papel, refratário, tintas, louças e cerâmicas, entre outros). Para uso em concreto, pode-se pensar no beneficiamento de argilas caulínicas provenientes de rejeitos da produção de areia de jazida (de barranco) que passa por processo de lavagem e gera, em média, 30% de argila.

Na fabricação de MCAR, esta argila teria que passar por um complexo e eficaz processo de beneficiamento, porém, em muitos casos, viável economicamente (transporte do caulim da região norte do Brasil, por exemplo, para o grande centro consumidor).

2.5 EFEITO DAS POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Conforme descrito anteriormente, a introdução de pozolanas altamente reativas no concreto resulta em uma série de alterações em suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Estas propriedades tendem a refletir a ação física, principalmente, no que se refere ao tamanho das partículas que, via de regra, são muito mais finas que as do cimento Portland, bem como a ação química resultante da atividade pozolânica e a atuação em conjunto das duas ações.

Assim sendo, são apresentados a seguir alguns aspectos importantes das principais características e propriedades do concreto, em seu estado fresco e estado endurecido, que são influenciados devido à adição de pozolanas altamente reativas. Ressalta-se que, no que se refere às propriedades no estado endurecido, será dada ênfase às propriedades mecânicas, que são o foco desta pesquisa.

2.5.5 *Estado fresco*

a) Consumo de água. Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), para uma dada consistência, o emprego de materiais de área específica muito elevada, como as pozolanas altamente reativas, tende a aumentar o consumo de água em argamassas e concretos.

No caso da sílica ativa, o aumento da demanda de água deve-se, principalmente, à sua alta superfície específica (ACI 234 (1995)). Todavia, estudos realizados por MEHTA (1989) constataram um aumento da trabalhabilidade decorrente da forma esférica da sílica ativa, em misturas onde se utilizaram teores de adição na ordem de 2% a 3%, em relação à massa do cimento. A forma esférica da pozolana fez com que atuasse na mistura como um rolamento, mesmo tendo a sílica ativa uma maior superfície específica.

Esta melhoria, de acordo com MALE (1989), pode ser refletida numa maior facilidade de bombeamento e lançamento do concreto, que compensam possíveis diminuições do abatimento da mistura. Com relação à adoção de maiores teores de sílica ativa, MALHOTRA e MEHTA (1996), tendo como base várias pesquisas com o uso de 10% de sílica ativa, constataram que o aumento da necessidade de água por parte da mistura não é constante; em concretos com baixo consumo de cimento (100 kg/m^3) há um decréscimo da demanda de água com a adição de sílica ativa, enquanto que, em concretos com maior consumo ($>250 \text{ kg/m}^3$) a demanda de água aumenta com a adição de sílica ativa.

De um modo geral é consenso entre os pesquisadores que a maior necessidade de água, devido à inclusão de pozolanas altamente reativas é resolvido com o uso de superplastificantes (MALHOTRA (1993); MALHOTRA e MEHTA (1996)).

b) Aspectos reológicos. Segundo MEHTA (1984), a coesão da mistura é controlada pelo volume de pasta presente no concreto, assim sendo, tem-se com

a substituição em massa de cimento por pozolanas com menor massa específica, o aumento da quantidade de pasta no concreto, o que resulta numa melhoria do aspecto reológico da mistura. Esta melhoria está diretamente relacionada ao menor diâmetro das partículas destas pozolanas, visto que reduz o tamanho e o volume dos vazios.

Contudo, é interessante ressaltar que esta melhoria ocorre normalmente no concreto convencional, visto que no CAR já se tem um alto teor de finos. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) e o ACI 234 (1995), uma das grandes vantagens da introdução de pozolanas de alta reatividade é o fato destas adições resultarem numa diminuição ou até eliminação da exsudação e da segregação, o que normalmente prejudica a reologia dos concretos sem o uso destas pozolanas.

No caso da sílica ativa, MALE (1989) acrescenta que pelo fato da sua forma esférica aumentar o contato sólido-sólido, bloqueando os poros, quanto mais fina a adição mineral, menor é a sua necessidade para que haja o aumento da coesão da mistura.

O aumento da coesão em situações em que haja a necessidade de bombeamento tem uma importância considerável. Contudo, segundo KHAYAT e AÏTCIN (1993), a melhoria na coesão pelo uso das pozolanas altamente reativas pode ser diminuída em misturas que são submetidas a longos períodos de vibração, principalmente quando se tem alto valor para o abatimento inicial.

2.5.6 Estado endurecido

a) Resistência à compressão. A ação química e física das pozolanas de alta reatividade normalmente produz a melhoria da resistência à compressão do concreto. MEHTA e MONTEIRO (1994) creditam esta melhoria na resistência principalmente ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento hidratada, pois provocam um aumento da resistência da matriz, na zona de transição. A melhoria da estrutura interna do concreto proporciona, segundo DAL MOLIN (1995), uma estimativa do seu desempenho tanto em termos mecânicos, como indiretamente, da sua durabilidade.

Esta situação faz com que normalmente a resistência à compressão seja apresentada como a principal propriedade do concreto.

No que se refere ao uso da sílica ativa, MALHOTRA e MEHTA (1996) e MEHTA (1989) relatam que a contribuição desta pozolana para a resistência à compressão, bem como a sua evolução com o tempo, está diretamente relacionada a diversos fatores, como: teor e características mineralógicas, físicas e químicas da sílica ativa, composição do cimento, relação $a/(c+sa)$, tipo e dosagem de superplastificante, temperatura, umidade, dosagem e processo de cura a que é submetido o concreto. DAL MOLIN (1995), adotando um teor de adição de 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento, obteve no vigésimo oitavo dia uma melhoria média, dentre as diversas relações $a/(c+sa)$ estudadas, de 13,51%.

A melhoria da resistência à compressão, pelo uso da sílica ativa, tende a manifestar-se desde o período inicial de hidratação (1 dia a 3 dias), sendo que a contribuição mais significativa ocorre até o vigésimo oitavo dia de idade. Após este período, constata-se ser pequena a contribuição da sílica ativa na melhoria desta propriedade (MEHTA (1989); ACI 234 (1995). Este comportamento foi ratificado por DAL MOLIN (1995) e PAULON e IBRAIM (1995), em diferentes programas experimentais utilizando a sílica ativa.

Em consonância com estes resultados, apresenta-se o trabalho realizado por CARETTE e MALHOTRA (1993), com 10% de substituição de cimento Portland por sílica ativa e com relações $a/(c+sa)$ nos valores de 0,25, 0,30 e 0,40. Neste trabalho, os autores concluem que após o vigésimo oitavo dia, as diferenças entre o concreto com e sem sílica ativa diminuem, atingindo valores similares após 3,5 anos. HASSAN, CABRERA e MALIEHE (2000), adotando um teor de substituição de 10%, avaliaram a influência da sílica ativa durante um ano na resistência à compressão, onde também verificaram valores similares entre o concreto de referência e o concreto com sílica ativa.

A diminuição dessas diferenças também foi constatada por MORAES (1990) em um estudo envolvendo concretos com vários teores de substituição e por LOPES (1999) em um estudo com o teor de substituição na ordem de 8%. Verificaram que a eficiência da sílica ativa aos 91 d era inferior ao constatado aos 28 d de idade do concreto.

A influência da relação $a/(c+sa)$ na melhoria da resistência à compressão, decorrente do uso da sílica ativa, é relatada por MALHOTRA e CARETTE (1983), que afirmam que as maiores contribuições podem ser obtidas em concretos com relações $a/(c+sa)$ elevadas, o que vai ao encontro de algumas pesquisas referentes ao assunto.

Quanto à quantidade consumida de sílica ativa no concreto, visando os melhores resultados nesta propriedade, observa-se ser este um parâmetro de grande influência, o que tem motivado muitos trabalhos, visando adequar o teor ótimo de consumo à obtenção do objetivo especificado. MALHOTRA e MEHTA (1996) chegaram à conclusão que o teor ótimo varia de 7% a 10%, podendo em algumas situações especiais chegar a teores de 15%. Estes valores são muito semelhantes aos sugeridos por AİTCIN (1998), de 8% a 10% da massa de cimento. SABIR (1995) observou que teores de substituição superiores a 16% proporcionaram uma uniformidade nos resultados de resistência à compressão.

De um modo geral, é consenso entre os diversos pesquisadores da área que a obtenção do CAR, com uso de pozolanas altamente reativas, passa necessariamente pela adoção de aditivos superplastificantes. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) este material visa, além de compensar a maior demanda de água por parte das minúsculas partículas, fornecer condições para que possa utilizar todo o potencial físico-químico decorrente da adição de pozolanas de alta reatividade.

b) Resistência à tração. Segundo LOPES (1999), o conhecimento desta propriedade é de grande importância, visto que, por meio dela, pode-se estimar a carga para a qual ocorre a fissuração, e deste modo, prever a durabilidade do concreto. Outra importância desta propriedade, bem como das suas relações com a resistência à compressão, é o seu uso para o cálculo de concretos protendidos. DAL MOLIN (1985), relatando o processo para a obtenção dos valores de resistência à tração do concreto, cita três ensaios distintos: a resistência à tração por compressão diametral (ftD) regida pela NBR 7222 (1994), a resistência à tração na flexão (ftF) regida pela NBR 12142 (1992) e a resistência à tração direta. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o ensaio de resistência à tração direta é pouco usado, pois o equipamento de fixação dos corpos-de-prova introduz tensões secundárias, que podem levar a variação nos resultados. Os autores também relatam que os resultados do ensaio de tração na flexão superestimam a resistência à tração do concreto, de 50% a 100%, o que faz com que esses resultados, quase sempre, sejam diferentes quando comparados com os resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral.

Além da variabilidade dos resultados entre os ensaios há, também, uma variabilidade dentro de cada ensaio. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a variação de resultados em relação a esta propriedade decorre de diversos fatores, tais como: a resistência à compressão do concreto, as características do agregado, das adições e dos aditivos químicos.

Com a introdução de pozolanas altamente reativas, tem-se também constatada a obtenção de maiores valores nesta propriedade, quando comparados com o concreto de referência. A influência da sílica ativa nesta propriedade é descrita no trabalho de SELLEVOLD (1987), onde o autor afirma que há uma melhoria desta propriedade com a sua inclusão.

Outros autores, como MALHOTRA e MEHTA (1996), com base em resultados obtidos por vários pesquisadores e LOLAND e HUSTAD (1981), com base em resultados experimentais, apresentam uma constância de valores para a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração, tanto para concretos com sílica ativa quanto para concretos sem adições. Esta constância de valores evidencia que a melhoria obtida na resistência à compressão não é proporcional à acompanhada na melhoria na resistência à tração.

DAL MOLIN (1995), com o uso de 10% de sílica ativa, observou aumentos médios de 21,74% na resistência à tração por compressão diametral e de apenas 4,15% na resistência à tração na flexão aos 28 d de idade, dentre as diversas relações $a/(c+sa)$ estudadas. A autora acrescenta que a pouca eficiência da sílica ativa, na flexão, pode ser creditada à menor área do corpo submetido à tração, onde aparentemente a sílica ativa tem um papel fundamental. Neste trabalho, observou-se, também, que o efeito da sílica ativa já ocorre no primeiro dia, principalmente, quando se realiza o ensaio de compressão diametral. Esta melhoria estende-se até o sétimo e até o nonagésimo primeiro dia, nos ensaios de tração na flexão e de tração por compressão diametral, respectivamente.

Em diferentes programas experimentais, MORAES (1990) e LOPES (1999), com teores de substituição de 15% e 8%, respectivamente, constataram no ensaio de resistência à tração por compressão diametral a mesma eficiência, na ordem de 19% aos 28 d de idade. A melhor eficiência do concreto com um menor teor de substituição, constatada no estudo de LOPES (1999), pode ser justificada pela maior relação $a/(c+sa)$ utilizada neste concreto, o que evidencia, também nesta propriedade, a melhor eficiência desta adição em concretos com maior relação $a/(c+sa)$.

Com relação ao ensaio de tração na flexão, MORAES (1990) obteve melhoria na ordem de 10%, tanto com o uso de um teor de substituição de 10% quanto com uso de um teor de 15%. CARETTE e MALHOTRA (1993), adotando um teor de 10% de sílica ativa e relações $a/(c+sa)$ de 0,25, 0,30 e 0,40, também constataram um comportamento semelhante ao observado na resistência à compressão, para a resistência à tração na flexão, ou seja, as melhorias iniciais (7 dias e 28 dias) decorrentes da sílica ativa tenderam a diminuir, chegando a valores similares após 3,5 anos. O aumento da resistência à tração, decorrente do uso de sílica ativa, teve como origem os mesmos fatores que possibilitaram ao aumento da resistência à compressão, ou seja, a redução da porosidade da matriz e da zona de transição.

Contudo, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), no caso da resistência à tração, tem-se aparentemente uma magnitude de aumento relativamente pequena, até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de

transição seja aumentada; o aumento da resistência à tração só ocorrerá quando se processarem as reações pozolânicas da sílica ativa com o hidróxido de cálcio existente na zona de transição. Com base neste comportamento, fica claro que o aumento da resistência à compressão decorrente do efeito *microfiller* não se reflete na resistência à tração.

Por outro lado, no trabalho realizado por PAULON (1995) com o CAR, observa-se que a introdução da sílica ativa não resultou no mesmo nível de aumento de resistência, no ensaio de tração por compressão diametral. Neste trabalho, o autor adotou uma relação $a/(c+sa)$ de 0,27 e um teor de substituição em torno de 9%, obtendo a melhoria de apenas 7% nesta propriedade, quando da realização do ensaio aos 28 d de idade.

Apesar das divergências em relação às melhorias obtidas na resistência à tração com a inclusão da sílica ativa, tem-se como consenso que o seu teor ideal parece estar limitado a um valor máximo, a partir do qual verifica-se um decréscimo nesta propriedade do concreto.

Este decréscimo é verificado por MORAES (1990), que adotando uma relação $a/(c+sa)$ igual a 0,30 e teores de adição de sílica ativa iguais a 0%, 5%, 7,5%, 10% e 15%, constatou que em teores de 15% houve um pequeno decréscimo da resistência à tração por flexão, em relação aos valores obtidos no concreto com o teor de 10%. SABIR (1995), adotando teores de substituição de 0%, 12%, 16%, 20%, 24% e 28%, também constatou um decréscimo nos

resultados de resistência à tração por compressão diametral, para teores maiores que 16%.

De um modo geral, pode-se constatar que os resultados relatados referente à influência do uso da sílica ativa e do metacaulim na resistência à tração evidenciam claramente a falta de consenso em relação a esta propriedade. Esta situação é um reflexo da grande variabilidade dos ensaios, bem como da falta de uma análise estatística mais aprofundada, que impossibilitam a obtenção de uma maneira mais clara das melhorias nesta propriedade do concreto.

A adoção da argila calcinada na produção do cimento utilizado na usina de Jupiá, segundo SAAD, ANDRADE e PAULON (1982), serviu de referencial para que outras cimenteiras o utilizassem em seu processo de produção, tais como: Cimento Tupi (Volta Redonda-RJ), Cimento Itaú de Corumbá, Cimepar (Paraíba) e Companhia de Cimento Itambé (Paraná). Este panorama foi, contudo, sendo revertido em função do aparecimento de outras opções mais vantajosas economicamente como a cinza volante (ZAMPIERI (1989); BATTAGIN (1987)).

BATTAGIN (1987) realizando um levantamento da produção de cimento Portland pozolânico no ano de 1985, constatou que o consumo da argila calcinada ficou limitado apenas às regiões norte e nordeste, representando deste modo um total de 17% do consumo de pozolanas utilizadas na fabricação de cimento no Brasil.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o conhecimento do desempenho dos concretos, foi realizado este programa experimental constituído das seguintes etapas:

- definição do planeamento de ensaios, principalmente, no que se refere às variáveis de resposta e de controle e ao número de corpos-de-prova necessários para se atingir os objetivos estabelecidos;

- seleção e caracterização dos materiais disponíveis em uma obra e que atendam às exigências estabelecidas para a produção do concreto;

- definição do processo de dosagem e betonadas; e, a

- realização dos ensaios com concreto fresco e endurecido e a análise dos resultados.

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Procurou-se estabelecer uma relação de testes no concreto e seus materiais constituintes de maneira que as principais características das misturas fossem representadas.

Nas Tabelas 6 e 7 estão apresentados todos os ensaios realizados no concreto e seus insumos, conforme procedimentos indicados pelas normas

técnicas da ABNT e da ASTM, sendo, esta última, específica para o ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, pelo método acelerado.

3.1.1 Ensaios mecânicos

Os corpos-de-prova foram moldados para a determinação das propriedades mecânicas nas idades de 7, 28 e 90 dias, sendo três corpos-de-prova de uma mesma betonada para cada idade, com o objetivo de avaliar o desvio padrão dentro do ensaio.

A incerteza de medição dos ensaios foi obtida adotando-se o critério estabelecido no laboratório onde foram ensaiados os concretos. Para a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral a incerteza de medição foi de 0,5% por resultado.

A opção por moldagem de três corpos-de-prova por idade se justificou para aumentar o grau de confiabilidade dos resultados.

Segundo SOUSA COUTINHO (1974), em seus experimentos, o erro do ensaio na tração deve ser menor que 5%, sendo que não é aconselhável moldar apenas um corpo-de-prova por amostra, por haver possibilidade de um por mil de aparecer um espécime com tensão de ruptura que se afasta do valor médio de três vezes ou mais o desvio padrão. Neste caso, fica a dúvida se o corpo-de-prova foi mal fabricado, mal conservado, ou mal ensaiado, mal coletado ou se o resultado é próprio do concreto amostrado. Por isso, sugere-se o aumento do

número de corpos-de-prova a ser ensaiado. Nos experimentos apresentados por SOUZA COUTINHO (1974) para uma média de 36 ensaios realizados em condições rigorosas análogas, em que se eliminou o erro de amassadura. Considerando que o erro de amassadura é a incerteza de medição do laboratório onde foram realizados os ensaios, que é de 1%, e que a dimensão dos corpos-de-prova cilíndricos de (10 x 20) cm² utilizados não foi a mesma considerada por aquele autor, neste trabalho foi considerado como adequado o coeficiente de variação da média dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral inferior a 6%, segundo a proposta apresentada na Tabela 8.

Para os ensaios de resistência à compressão foi adotado o critério apresentado na Tabela 8, segundo o ACI 214, que estabelece o grau de confiança do resultado dos ensaios em laboratório e no campo, segundo também recomenda ANDRIOLO (1984).

Para complementar, o erro foi representado pelo coeficiente de variação obtido no ensaio por meio da amplitude máxima obtida dos três resultados, que está apresentado na Tabela 8.

Tabela 6. **Testes físico-químicos e mecânicos no concreto e agregados com suas respectivas normas técnicas.**

Concreto	
Resistência à compressão axial simples	NBR 5739/94
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222/94
Massa específica do concreto fresco	NBR 7223/92
Ar incorporado do concreto fresco	NBR 9833/87
Consistência pelo abatimento tronco de cone	NBR NM 67/98
Moldagem e cura de corpos-de-prova	NBR 5738/94
Agregado	
Abrasão Los Angeles	NBR 6465/84
Absorção do agregado miúdo	NBR 9777/87
Absorção do agregado graúdo	NBR 9937/87
Granulometria dos agregados	NBR 7217/87
Massa específica do agregado miúdo	NBR 9776/87
Massa específica do agregado graúdo	NBR 9937/87
Reatividade potencial álcali-agregado	ASTM C-1260/94
Teor de materiais pulverulentos	NBR 7219/87
Teor de umidade do agregado	NBR 9939/87

Tabela 7. **Testes físico-químicos e mecânicos no cimento, materiais cimentícios e aditivo e suas respectivas normas técnicas.**

Cimento e Materiais Cimentícios	
Análise química cimentos comuns	NBR 9203/85
Expansibilidade Le Chatelier	NBR 11582/96
Finura peneira 200	NBR 11579/91
Finura peneira 325	NBR 12826/93
Finura Blaine	NM 76/98
Massa específica	NBR 6474/84
Cimento Portland - resistência à compressão	NBR 7215/96
Tempo de pega	NBR 1158/91
Massa específica material pozolânico	NM 23/98
Aditivo	
Densidade, pH e resíduo sólido	NBR 10908/86

Tabela 8. **Coeficiente de variação (CV) dos ensaios e desvio padrão aceitáveis**

Resistência à compressão – (ACI 214 (tables 3.2 and 3.3)).		
Ensaio	CV do ensaio (%) ($f_c < 35$ MPa)	CV do ensaio (%) ($f_c > 35$ MPa)
Excelente	< 3,0	< 2,8
Muito Bom	3,0 – 4,0	2,8 – 3,4
Bom	4,0 – 5,0	3,4 – 4,1
Razoável	5,0 – 6,0	4,1 – 4,8
Medíocre	> 6,0	> 4,8

Resistência à tração por compressão diametral (*)		
Ensaio	CV da Média (%)	Desvio Padrão (MPa)
Excelente	< 5,0	< 0,2
Muito Bom	5,0 – 7,0	0,2 – 0,4
Bom	7,0 – 9,0	0,4 – 0,6
Razoável	9,0 – 11,0	0,6 – 0,8
Medíocre	> 11,0	> 0,8

(*) Índices propostos pelo autor desta Dissertação.

3.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão do concreto foram executados conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), no que se refere à velocidade de carregamento, equipamento e preparação dos corpos-de-prova. Os ensaios para a determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiram os procedimentos descritos na NBR 7222 (ABNT, 1994).

3.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1 *Cimento Portland*

Como cimento foi utilizado o produto composto tipo CP II-Z – 32. Para a produção de todos os concretos foi adotado o mesmo cimento, homogeneizado e proveniente do mesmo lote. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento empregado, segundo informações do fabricante, estão apresentadas na Tabela 9 onde se constata que o material utilizado atende às exigências da NBR 5733 (ABNT, 1991).

3.3.2 *Agregado*

A areia artificial e o agregado graúdo utilizados são de origem basáltica, oriundos da britagem do agregado para o Aproveitamento Hidroelétrico Espora, em Aporé-GO. Antes de sua utilização o material foi preparado, deixando-o

próximo da condição de superfície saturada seca, e depositado em tambores fechados de 200 litros mantidos em ambiente de laboratório antes da realização das moldagens.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização básica do agregado miúdo.

Na Tabela 11, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização básica do agregado graúdo.

Na Figura 1 está apresentado o gráfico da reatividade potencial álcali-agregado, segundo método ASTM C1260 (1994), com teor de adição mineral suficiente para inibir a reação em questão, já que aos 16 dias de idade de ensaio a expansão foi menor que 0,1%. Entretanto observaram-se expansões maiores em idades mais avançadas de ensaio, não se podendo estimar com precisão qual a vida útil da estrutura. Para efeito desta pesquisa foi definido o teor de 8% de adição. A curva clássica de expansão com o tempo não obedeceu a uma lei específica, sendo particular para cada tipo de material analisado. Normalmente, quanto maior o grau de reatividade do agregado, maior a ascensão da curva com maiores valores de expansão. Observa-se o valor limite de 0,1% de expansão aos 16 dias de idade dos corpos-de-prova.

Tabela 9. **Características físico-químicas do cimento utilizado, segundo informações do fabricante.**

Propriedade	Resultado
Blaine (cm²/g)	3462
Densidade (g/cm³)	3,00
Expansibilidade a quente (mm)	0,75
Início de pega (h:min)	3:19
Fim de pega (h:min)	4:06
Água de consistência normal	26,8
Finura peneira 200 (%)	1,75
Finura peneira 325 (%)	9,65
Fe₂O₃ (%)	3,18
CaO (%)	53,04
Al₂O₃ (%)	6,43
MgO (%)	5,21
SO₃ (%)	2,98
SiO₂ (%)	21,28
Perda ao fogo (%)	5,38
Cal livre (%)	1,35
Resíduo insolúvel (%)	11,75
Equivalente alcalino (%)	0,71
Resistência à compressão, 1 d (MPa)	10,7
Resistência à compressão, 3 d (MPa)	22,4
Resistência à compressão, 7 d (MPa)	29,1
Resistência à compressão, 28 d (MPa)	38,9

Tabela 10. **Características físico-químicas do agregado miúdo.**

Ensaio	Resultados
Massa específica (g/cm³)	2,97 ± 0,01
Absorção (%)	1,3 ± 0,1
Módulo de finura	3,06 ± 0,01
Material pulverulento (%)	10,4 ± 0,2

Tabela 11. **Características físico-químicas do agregado graúdo.**

Ensaio	Resultado
Massa específica (g/cm³)	2,97 ± 0,01
Absorção (%)	0,8 ± 0,1
Módulo de finura	6,98 ± 0,01
Material pulverulento (%)	1,2 ± 0,2

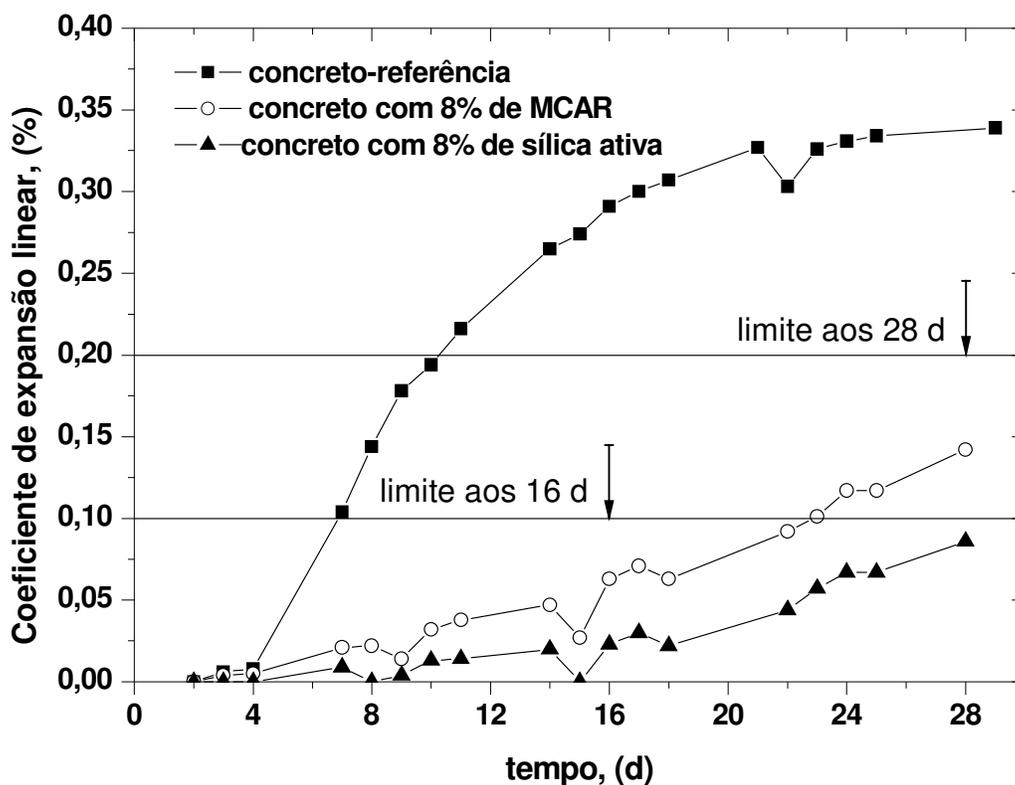


Figura 1. **Reatividade potencial álcali-agregado, conforme método ASTM C1260.**

3.3.3 Água

A água empregada foi proveniente da rede de abastecimento local da cidade de Curitiba-PR. A quantidade de água foi mantida proporcional à manutenção da mesma trabalhabilidade de cada mistura.

3.3.4 Adição mineral de alta reatividade

Conforme descrito anteriormente, as características mineralógicas, químicas e físicas da sílica ativa e do metacaulim exercem significativa influência no comportamento dos concretos. Assim sendo, partiu-se para a obtenção dos dois materiais com melhor desempenho identificado pelos respectivos fabricantes, evidenciando, desta forma, toda a potencialidade no que se refere à utilização como pozolanas.

O metacaulim foi fabricado em Atibaia-SP, mas a matéria-prima é extraída na região sul de Minas Gerais, próximo à cidade de São Tomé das Letras.

A sílica ativa foi fornecida pela representante do produto Silmix na região de Goiânia-GO. Este produto é industrializado na região norte do Brasil, no Estado do Pará.

As principais características físico-químicas das adições minerais trabalhadas, segundo informações dos fabricantes, encontram-se listadas na Tabela 12 e na Tabela 13.

Conforme resultados da Tabela 12, o metacaulim se encontra dentro das características mínimas recomendadas em norma, para bom desempenho em concreto. O índice de atividade pozolânica é que poderia ser maior para atender tais recomendações e melhorar as características do concreto quanto à durabilidade e resistência a ataques químicos.

Tabela 12. **Características físico-químicas do metacaulim, segundo informações do fabricante.**

Propriedade	Resultado (*)
Densidade (g/cm³)	2,57
Índice atividade pozolânica com cimento (%)	103,6 (mín. 75% – NBR 12653/92)
Água requerida (%)	102,5 (máx. 110% – NBR 12653/92)
Índice atividade pozolânica com a cal (MPa)	17,5 (mín. 6 MPa – NBR 12653/92)
Finura, peneira 325 (%)	3,23 (máx. 34% - NBR 13957/97)
Fe₂O₃ (%)	2,8
Al₂O₃ (%)	40,5
Na₂O (%)	0,08
K₂O (%)	0,18
SiO₂ (%)	51,57
Perda ao fogo (%)	2,62 (máx. 6,0% - NBR 12653/92)
Umidade (%)	0,6 (máx. 3,0% - NBR 12653/92)
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (%)	92,07 (mín 70,0% - NBR 12653/92)
Equivalente alcalino (%)	0,20 (máx 1,5% - NBR 12653/92)

(*) Os erros desses ensaios não foram informados pelo fabricante.

Os resultados das características físico-químicas apresentadas para a sílica ativa, na Tabela 13, são considerados satisfatórios para seu emprego em dosagens de concreto.

Tabela 13. Características físico-químicas da sílica ativa, segundo informações do fabricante.

Propriedade	Resultado (*)
pH	8,37
Densidade (g/cm³)	0,32
% Retido 45 µm	1,10
Fe₂O₃	0,06
CaO	0,23
Al₂O₃	0,07
MgO	0,48
Na₂O	0,18
K₂O	0,67
SiO₂	95,8
%Água	0,29

(*) Os erros desses ensaios não foram informados pelo fabricante.

3.3.5 Aditivo superplastificante

Foi empregado o aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonato, constituído de 37% a 39% de sólidos, densidade de 1,2 kg/m³ e com a dosagem recomendada pelo fabricante de 1,0% em relação à massa de cimento.

3.4 DOSAGEM DO CONCRETO

Foi adotado o procedimento de dosagem do concreto proposto por CARLSON e ANDRADE (1981), correspondente ao método do módulo de finura (ANDRADE et al. (1997)).

Para a definição das dosagens de concreto optou-se em empregar uma metodologia que propiciasse consumos de aglomerantes otimizados e com utilização com sucesso em grandes obras, notadamente em concretos para barragens. O método de dosagens consagrado no meio técnico é o método do módulo de finura dos agregados. Este método foi utilizado com êxito na construção de inúmeras barragens no Brasil, tais como, Itaipu, Tucuruí, Serra da Mesa, Corumbá I, Lajeado, Itapebi, Cana Brava, Salto Caxias, Santa Clara. Mais recentemente foi aplicado também na construção do *Proyecto Hidroeléctrico Pinalito*, na República Dominicana.

Primeiramente, optou-se em definir e manter constante a trabalhabilidade das misturas.

Para a realização do controle da trabalhabilidade, foi adotado o valor de (70 ± 10) mm para o ensaio de abatimento de tronco de cone, realizado conforme a NBR 7223 (ABNT, 1992). A fixação do abatimento foi o referencial para a obtenção do teor de água, que foi realizado durante os ajustes finais. Além da manutenção da trabalhabilidade, realizou-se, também, a massa específica no

estado fresco pela NBR 9833 (1987) e o teor de ar incorporado pela NBR 9833 (ABNT, 1987).

3.5 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a produção do concreto foi empregada uma betoneira de eixo vertical. Tomou-se o cuidado de untar com a argamassa do mesmo traço do concreto antes de cada betonada. A colocação dos materiais transcorreu seguindo esta ordem: 100% de agregado graúdo e miúdo mais 50% de água (sem aditivo); 100% de aglomerante; 50% de água e aditivo.

Após a colocação de todos os materiais, foi realizada a mistura por 3 minutos, seguido de um período de descanso de 3 minutos e mais 2 minutos de mistura.

Seguindo as diretrizes estabelecidas anteriormente, foram moldados três corpos-de-prova para cada variável e idade de controle, analisadas. A moldagem e o processo de cura seguiram a NBR 5738 (ABNT, 1994), sendo que os corpos-de-prova foram ensaiados nas idades fixadas de 7, 28 e 90 d.

Para os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, foram trabalhados corpos-de-prova cilíndricos e com as dimensões de norma de $(10 \times 20) \text{ cm}^2$.

Para a execução da moldagem foi utilizado o adensamento mecânico, com uso do vibrador de imersão de agulha de 19 mm de diâmetro. Após o

procedimento de moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos foram cobertos e mantidos no ambiente da sala de dosagens, protegidos por uma fina película plástica durante, aproximadamente, 24 h.

Após as primeiras 24 h, os corpos-de-prova foram retirados das fôrmas sendo, então, colocados na câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de (23 ± 2) °C, até o momento de realização de cada ensaio. Para o rompimento dos mesmos, visando à determinação da resistência à compressão, foi feito capeamento com enxofre e pó de quartzo, na proporção de 1:0,3, respectivamente. Esta combinação visou ao aumento da resistência e à maior durabilidade do capeamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados e discutidos todos os resultados dos testes realizados para a caracterização dos concretos trabalhados.

4.1 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CONCRETO

A verificação dos teores ótimos de areia de cada dosagem foi realizada fixando-se uma relação em massa 1:m (cimento:agregado total) intermediária, ou seja, que fosse suficiente para visualizar o comportamento do concreto e extrapolar para outras relações em massa 1:m. Para a relação 1:7 variou-se a porcentagem de areia de 2% em 2%, mantendo-se o consumo de aglomerante constante, até se obter a mistura com menor relação a/c. Na Figura 2, está representado o comportamento obtido com os diferentes concretos e com a mesma trabalhabilidade.

Esta mistura, chamada ideal, identificada por um módulo de finura ideal, tem seu valor reduzido em 0,2 para obtenção de um concreto um pouco mais argamassado, entretanto, com menor probabilidade de provocar segregação durante sua aplicação no campo. Esta dosagem, chamada de ótima, foi então considerada uma dosagem adequada para ser aproveitada na obra.

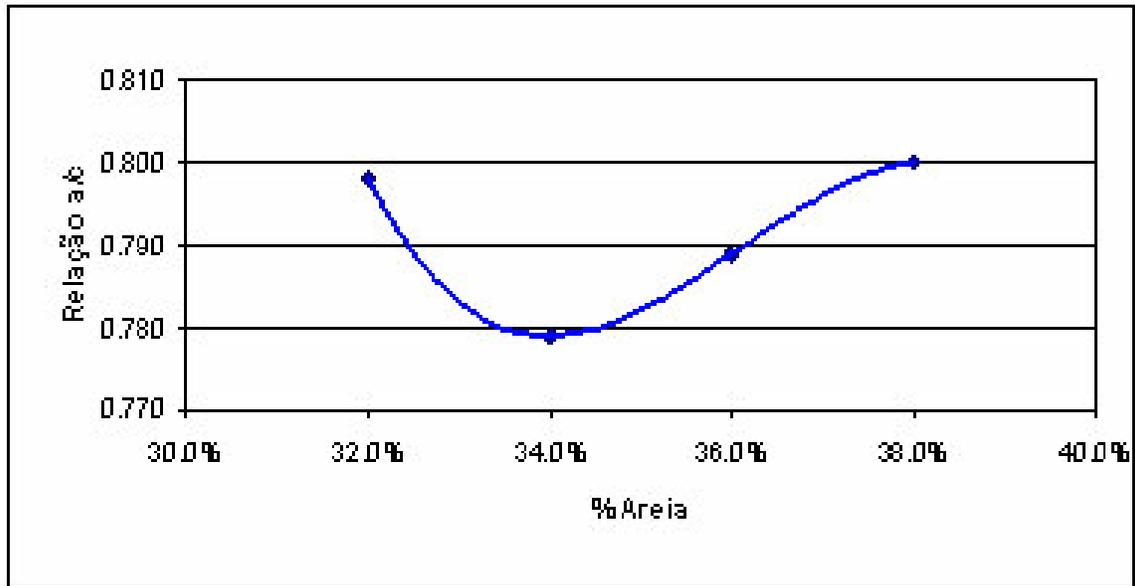


Figura 2. **Gráfico de dosagem: relação a/c em função do % de areia.**

O comportamento do concreto expresso na Figura 2 é clássico. Em virtude da menor quantidade de água necessária para manter a trabalhabilidade das misturas, a curva é descendente, até quando há finos em demasia e passa a ser necessário adicionar mais água, gerando a curva ascendente. Neste gráfico não se determinou a correlação estatística por ser apenas uma linha de tendência de poucos dados.

Na Figura 3, pode-se visualizar o resultado da relação entre a porcentagem de areia e o módulo de finura do concreto, obtido nas misturas.

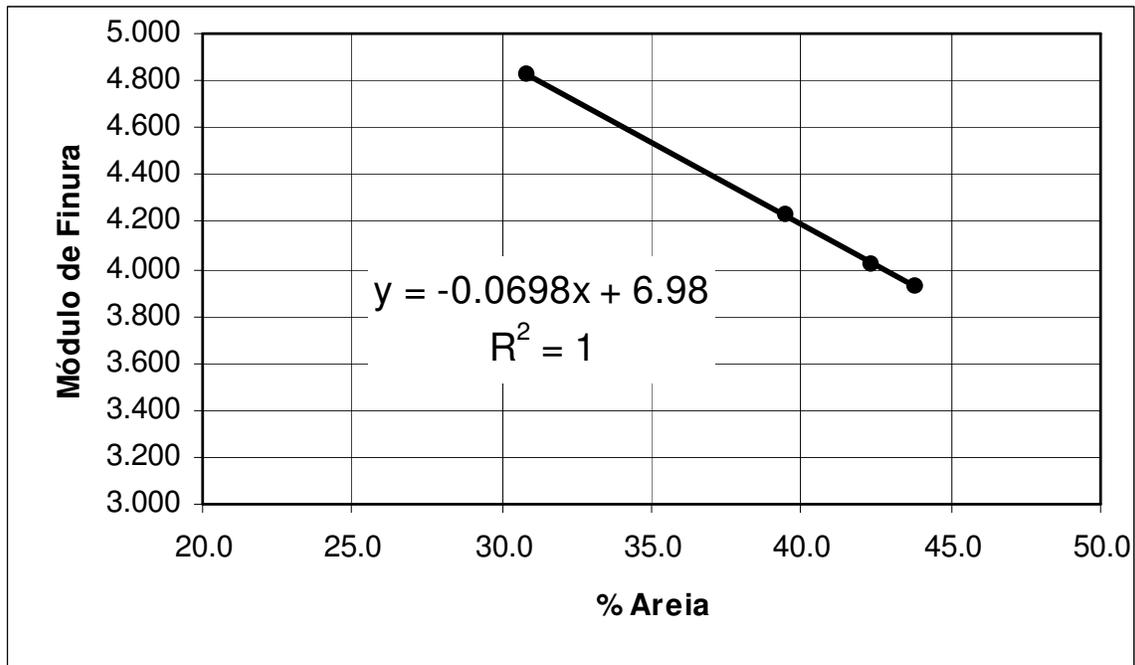


Figura 3. **Gráfico de dosagem pelo módulo de finura em função do % de areia.**

Para a obtenção das dosagens ótimas para as demais relações em massa, foi mantido o índice K obtido para a relação 1:7. O valor de $K = 0,482$ (condição ótima) foi obtido pela seguinte equação:

$$K = \frac{(1 + a)}{(1 + m)}$$

Onde:

K= índice de argamassividade do concreto;

a= % de areia multiplicada pela relação em massa m; e,

m = proporção de agregado total em massa em relação ao aglomerante total.

A relação K representa o índice de argamassividade de uma dosagem. Se este índice se mantiver constante, independente da relação em massa que se estiver estudando, a argamassividade dos diferentes concretos será uniformizada.

Logo, foram moldadas as dosagens ótimas para todas as relações em massa escolhidas 1:3, 1:6, 1:9 e 1:12. Essas relações em massa foram mantidas para as dosagens de referência (sem adição mineral), com metacaulim e com sílica ativa. Sendo assim, foram montados os gráficos de dosagens para as três hipóteses analisadas: dosagens sem adição mineral, dosagens com metacaulim e dosagens com sílica ativa.

Para cada dosagem ótima e sua respectiva relação em massa (1: m), obteve-se um ponto do gráfico, de maneira que por meio da linearização dos pontos (método dos mínimos quadrados) pode-se estabelecer uma correlação confiável.

Nas Figuras 4 a 6 estão apresentados os gráficos de dosagens ótimas obtidos para os estudos com as dosagens de referência (sem adição mineral). Após a moldagem dos concretos para as idades de controle, foram obtidas as resistências à compressão. Essas resistências foram correlacionadas com os módulos de finura ótimos das dosagens de relações em massa escolhidas 1:3, 1:6, 1:9 e 1:12.

O módulo de finura passa a ser um parâmetro fundamental porque a partir dele, pode-se estabelecer um vínculo permanente de coerência em relação à

resistência do concreto e sua granulometria média. Mantendo-se a granulometria média, expressa pelo módulo de finura do concreto, pode-se esperar durante a aplicação em campo de uma determinada dosagem, a manutenção da resistência específica para aquele módulo de finura. Isso pode ser facilmente adotado, notadamente em obras de barragens, para diminuir o coeficiente de variação das resistências obtidas.

Se o regime de comportamento da relação $(a/(c+p))$ estabelecido pela Figura 5 e complementado pela Figura 6, pela relação da água unitária e o módulo de finura do concreto, se estabelece um critério para obtenção de composição de dosagens para diferentes resistências requeridas.

Este raciocínio é válido desde que as resistências requeridas estejam dentro do universo de resistências obtidas no estudo de dosagens.

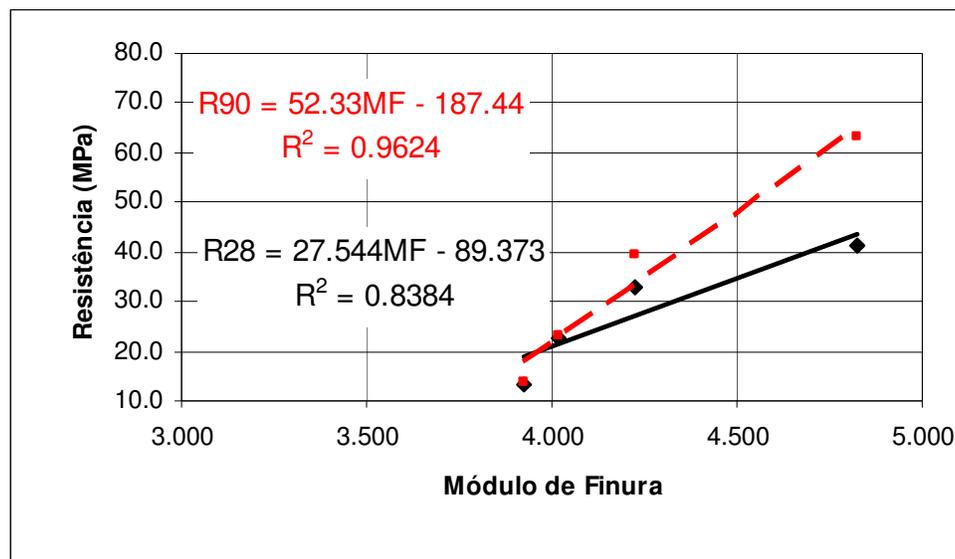


Figura 4. Gráfico de dosagem resistência à compressão versus módulo de finura - amostra referência.

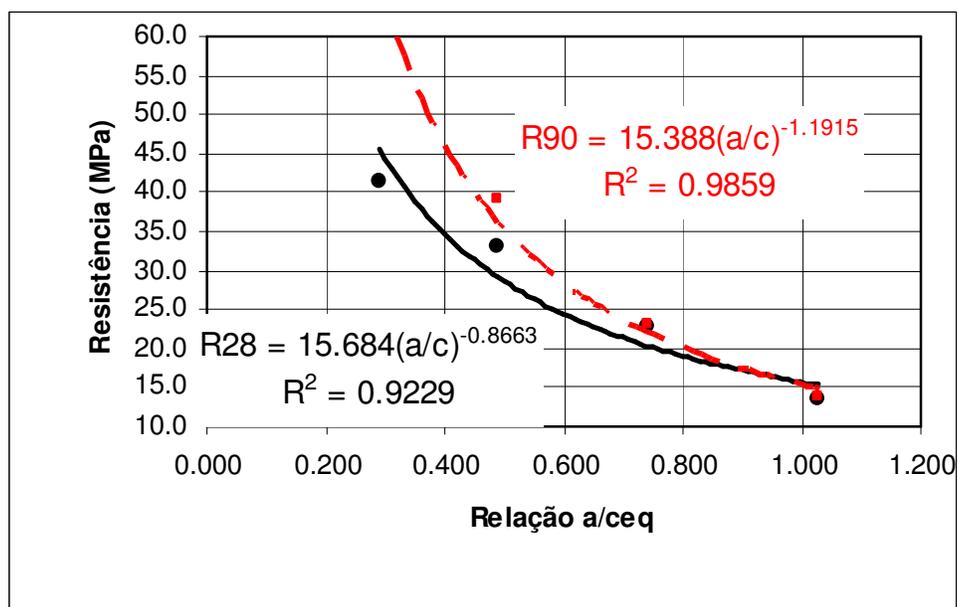


Figura 5. Gráfico de dosagem: resistência à compressão versus relação (a/ceq) - amostra referência (curva de Abrams).

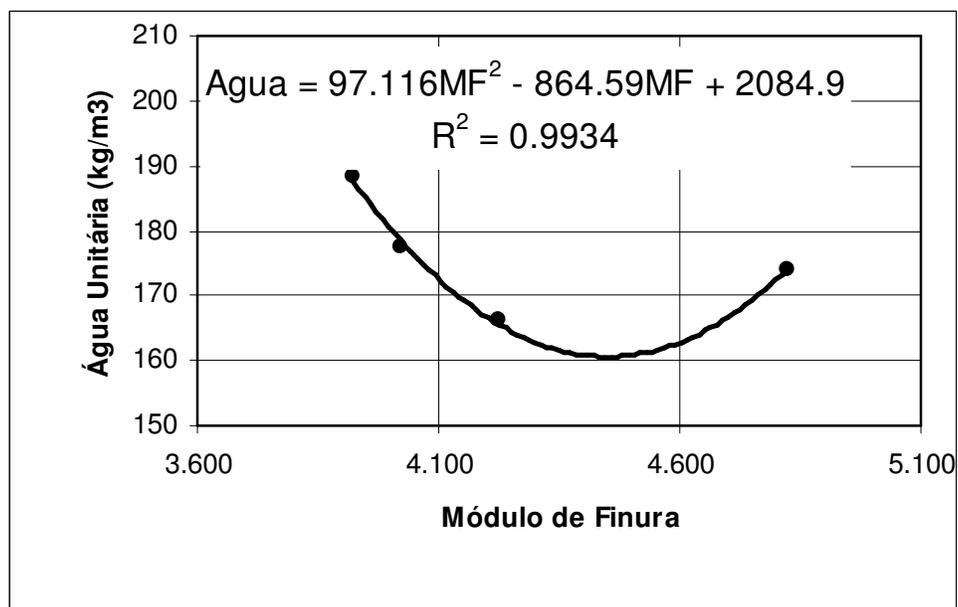


Figura 6. Gráfico de dosagem água unitária versus módulo de finura - amostra referência.

Nas Figuras 7 a 9 estão apresentados os gráficos de dosagens ótimas obtidos para os estudos com as dosagens com metacaulim. O ganho de resistência observado nas dosagens com metacaulim, pode ser observado na Figura 7, já nas primeiras idades em relação às dosagens de referência e mais evidente a partir dos 28 dias. Destaca-se que para o metacaulim, em relação às dosagens de referência, que apesar da manutenção da trabalhabilidade, houve uma redução do consumo de água unitária dos concretos (Figuras 8 e 9). Isso quer dizer que o metacaulim provocou um ganho de trabalhabilidade no concreto, sem a necessidade de aumentar o consumo de água.

A adição do metacaulim provocou uma significativa melhora nos concretos em relação à referência, tanto na trabalhabilidade da mistura, quanto na resistência obtida. Entretanto este comentário se faz mais justo compondo os concretos para mesmas resistências e comparando-se os consumos de aglomerantes.

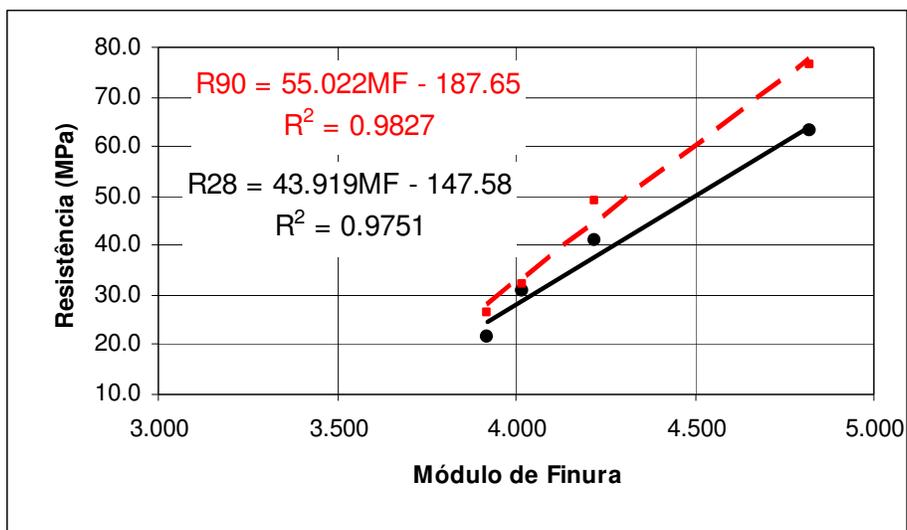


Figura 7. Gráfico de dosagem - resistência à compressão versus módulo de finura para o metacaulim.

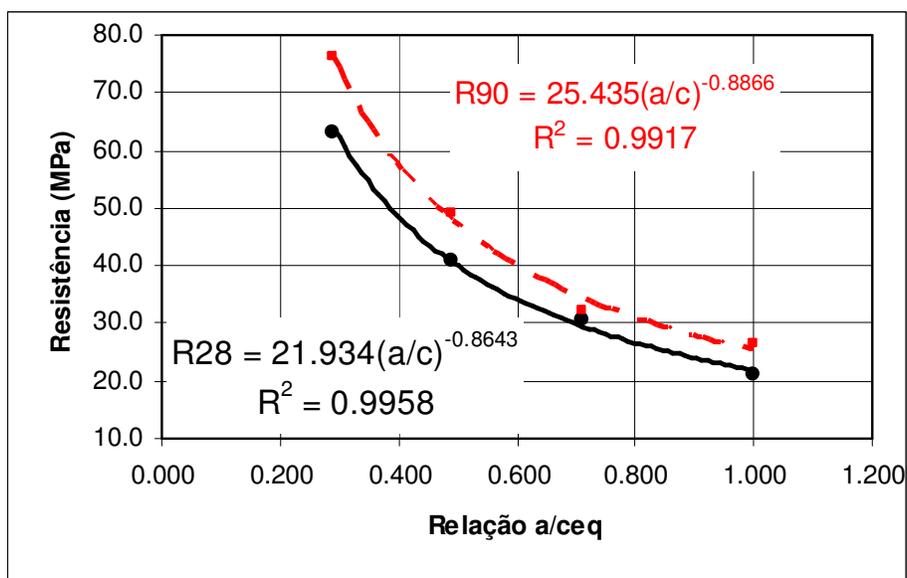


Figura 8. Gráfico de dosagem resistência compressão versus relação (a/ceq) para o metacaulim (curva de Abrams).

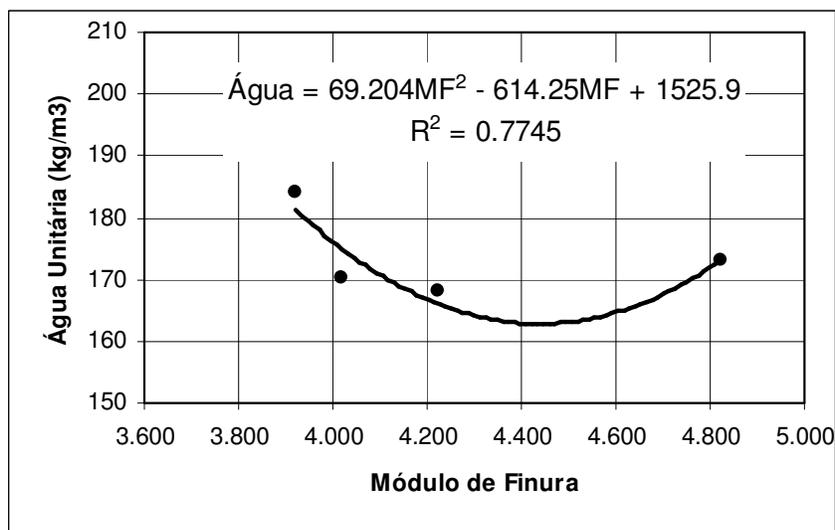


Figura 9. **Gráfico de dosagem água unitária versus módulo de finura para o metacaulim.**

Nas Figuras 10 a 12 estão apresentados os gráficos obtidos para os estudos com as dosagens com sílica ativa.

Observa-se um comportamento muito similar entre as trabalhabilidades dos concretos compostos com sílica ativa e metacaulim em igualdade de proporções.

O que se pode dizer dos gráficos compostos com os dados obtidos com a sílica ativa é que o comportamento do concreto fresco e endurecido foi similar ao comportamento dos concretos com metacaulim e superiores aos concretos tomados como referência.

Nas Figuras 6, 9 e 12, se visualiza um comportamento uniforme da água unitária dos concretos em função dos diferentes módulos de finura dos concretos

ótimos, respectivamente para dosagens de referência, com metacaulim e com sílica ativa.

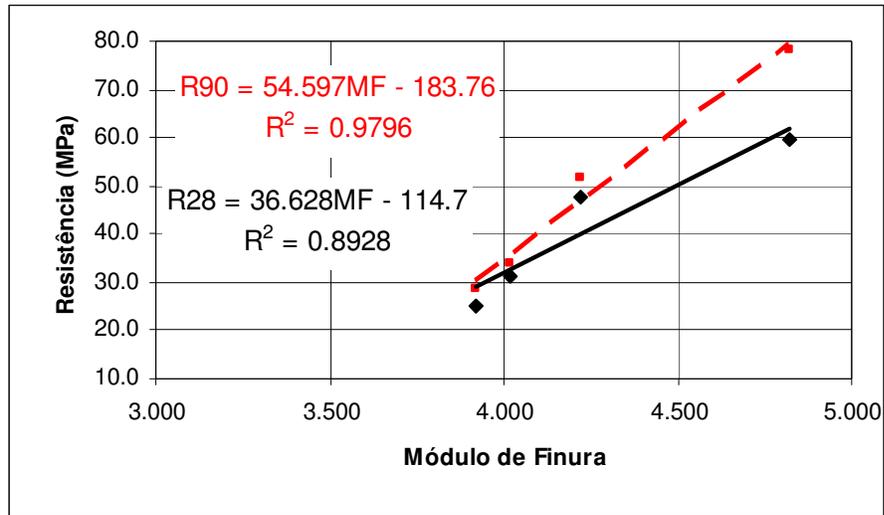


Figura 10. Gráfico de dosagem resistência compressão versus módulo finura para a sílica ativa.

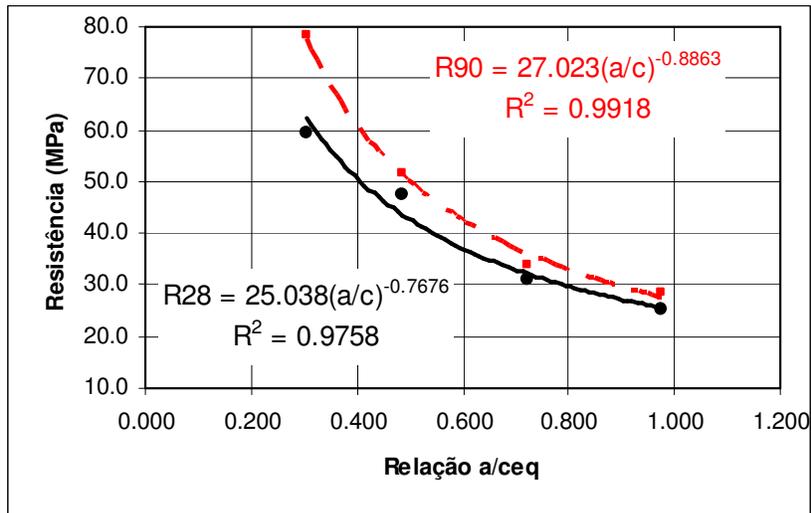


Figura 11. Gráfico de dosagem resistência à compressão versus relação (a/ceq) para a sílica ativa (curva de Abrams).

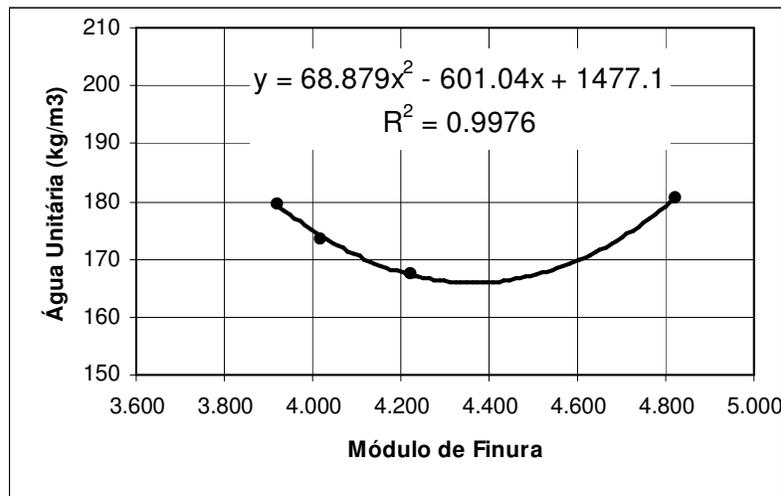


Figura 12. **Gráfico de dosagem, água unitária versus módulo de finura para a sílica ativa.**

Por meio dos gráficos de dosagens foi possível compor as misturas com quantidades de materiais que propiciassem o atendimento das resistências predefinidas, objeto principal para análise comparativa dos concretos estudados.

4.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Realizou-se a caracterização das propriedades mecânicas definidas para este trabalho visando com isso avaliar o comportamento dos diversos traços de concreto estudados, sem e com adições minerais, cujos dados de composição e propriedades no estado fresco e endurecido estão apresentados nas Tabelas 14 a 16, para as respectivas dosagens: referência, com metacaulim e com sílica ativa.

Os valores de abatimento do tronco de cone, via de regra, mantiveram-se dentro do intervalo pré-estabelecido.

Os valores de massa específica apresentaram um comportamento dentro do esperado, ratificando a uniformidade dos diferentes concretos em relação à massa específica do concreto fresco.

O teor de ar incorporado dos concretos foi medido, apesar de não ter sido utilizado aditivo incorporador de ar, sendo considerado o resultado como ar aprisionado na mistura.

A trabalhabilidade do concreto foi considerada constante para todas as dosagens estudadas.

A temperatura dos concretos, sem e com as adições, não foi alterada significativamente e os corpos-de-prova foram mantidos em cura normal, o que é bom por evitar fissuras térmicas, retração ou mesmo, perda d'água excessiva.

Na Tabela 14, estão listados os principais resultados obtidos para o concreto-referência, sem adições.

Na Tabela 15 estão apresentados, as dosagens estudadas com metacaulim e seus dados de composição, além dos ensaios com o concreto fresco.

As dosagens com sílica ativa, os respectivos ensaios com o concreto fresco assim como os dados de composição, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 14. **Composição e ensaios do concreto–referência no estado fresco.**

Identificação da mistura	Dosagem	D _{máx} 25 mm – <i>slump</i> entre 60 e 70			
	Identificação	E-2271	E-2272	E-2273	E-2274
	Ar incorporado solicitado, (%)	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5
	<i>Slump</i> solicitado, (mm)	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10
Dados da composição	m (relação 1: m)	12	9	6	3
	Cimento, (kg/m ³)	183	239	341	598
	MCAR ou sílica ativa, (%)	0	0	0	0
	Água, (kg/m ³)	188	178	166	174
	Areia artificial, (kg/m ³)	965	913	808	556
	Brita 25 mm, (kg/m ³)	1236	1238	1238	1238
	Aditivo, (kg/m ³)	1,834	2,390	3,411	5,979
	Relação, (a/(c+a))	1,03	0,74	0,49	0,29
	Areia, (% p/p)	43,8	42,4	39,5	30,9
	Módulo de finura	3,92	4,02	4,22	4,82
	Massa específica teórica, (kg/m ³)	2598	2616	2636	2626
	Temperatura ambiente, (°C)	24,9	24,9	24,4	24,7
	Temperatura do cimento, (°C)	23,4	23,4	24,4	24,4
	Temperatura da água, (°C)	22,9	22,9	22,4	22,4
Propriedades do concreto fresco	Abatimento, (cm)	65	70	70	65
	Ar incorporado, (%)	2,5	2,5	3,0	2,5
	Massa específica, (kg/m ³)	2587	2574	2552	2568
	Temperatura, (°C)	24,8	23,9	24,4	25,7

Tabela 15. **Composição e ensaios do concreto com metacaulim, no estado fresco.**

Identificação da mistura	Dosagem	D _{máx} 25 mm – <i>slump</i> entre 60 e 70			
	Identificação	E-2275	E-2276	E-2277	E-2278
	Ar incorporado solicitado, (%)	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5
	<i>Slump</i> solicitado, (mm)	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10
Dados da composição	m (relação 1: m)	12	9	6	3
	Cimento, (kg/m ³)	169	220	316	549
	Metacaulim, (kg/m³)	15	19	27	48
	Água, (kg/m ³)	184	170	168	173
	Areia artificial, (kg/m ³)	969	915	813	555
	Brita 25 mm, (kg/m ³)	1242	1240	1245	1234
	Aditivo, (kg/m ³)	1,842	2,390	3,430	5,960
	Relação, (a/(c+a))	1,00	0,71	0,49	0,29
	Areia, (% p/p)	43,8	42,4	39,5	30,9
	Módulo de finura	3,92	4,02	4,22	4,82
	Massa específica teórica, (kg/m ³)	2603	2626	2630	2619
	Temperatura ambiente, (°C)	21,4	19,9	19,9	20,0
	Temperatura do cimento, (°C)	19,3	19,3	18,3	19,3
	Temperatura da água, (°C)	19,3	18,3	18,3	18,3
Propriedades do concreto fresco	Abatimento, (cm)	65	65	70	60
	Ar incorporado, (%)	1,0	2,5	2,5	2,5
	Massa específica, (kg/m ³)	2578	2565	2571	2560
	Temperatura, (°C)	20,3	18,7	19,3	19,4

Tabela 16. **Composição e ensaios do concreto com sílica ativa, no estado fresco.**

Identificação da mistura	Dosagem	D _{máx} 25 mm – <i>slump</i> entre 60 e 70			
	Identificação	E-2279	E-2280	E-2281	E-2282
	Ar incorporado solicitado, (%)	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5	1,0 ± 0,5
	<i>Slump</i> solicitado, (mm)	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10	70 ± 10
Dados da composição	m (relação 1: m)	12	9	6	3
	Cimento, (kg/m ³)	169	220	316	544
	Sílica ativa (kg/m³)	15	19	28	47
	Água, (kg/m ³)	179	174	167	180
	Areia artificial, (kg/m ³)	968	918	815	550
	Brita 25 mm, (kg/m ³)	1241	1245	1248	1225
	Aditivo, (kg/m ³)	1,840	2,400	3,440	5,920
	Relação, (a/(c+a))	0,98	0,72	0,49	0,31
	Areia, (% p/p)	43,8	42,4	39,5	30,9
	Módulo de finura	3,92	4,02	4,22	4,82
	Massa específica teórica, (kg/m ³)	2608	2618	2627	2604
	Temperatura ambiente, (°C)	20,4	18,1	20,0	21,0
	Temperatura do cimento, (°C)	19,3	16,2	20,0	21,0
Temperatura da água, (°C)	18,3	16,2	19,5	20,0	
Propriedades do concreto fresco	Abatimento, (cm)	60	65	65	65
	Ar incorporado, (%)	1,0	2,5	1,5	1,0
	Massa específica, (kg/m ³)	2570	2585	2570	2537
	Temperatura, (°C)	19,8	18,2	20,0	21,0

4.2.1 Resistência à compressão axial simples

Nesta propriedade constatou-se que, de um modo geral, os valores obtidos foram diretamente proporcionais à idade e ao teor de adição mineral e inversamente proporcional à relação $a/(c+p)$. Os resultados obtidos para resistência à compressão estão apresentados na Tabela 17 para as dosagens de referência.

Na Tabela 18 estão apresentadas as resistências das dosagens de concreto moldadas com metacaulim.

Na Tabela 19 estão apresentadas as resistências das dosagens de concreto moldadas com sílica ativa.

Tabela 17. Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto-referência.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto-referência			
			E-2271	E-2272	E-2273	E-2274
Resistência mecânica à compressão, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	8,0	15,8	30,4	39,0
		Corpo-de-prova 2	7,5	14,6	26,6	40,2
		Corpo-de-prova 3	7,0	15,8	30,1	33,1
		Média	7,5	15,4	29,0	37,4
		Valor máximo	8,0	15,8	30,4	40,2
		Valor mínimo	7,0	14,6	26,6	33,1
		Amplitude	1,0	1,2	3,8	7,1
		Desvio padrão	0,5	0,7	2,1	3,8
		Coef. variação médio (%)	0,6	0,7	2,2	4,2
	28 d	Corpo-de-prova 1	13,1	23,7	33,9	45,4
		Corpo-de-prova 2	13,4	22,7	30,6	33,8
		Corpo-de-prova 3	13,7	21,8	34,6	44,7
		Média	13,4	22,7	33,0	41,3
		Valor máximo	13,7	23,7	34,6	45,4
		Valor mínimo	13,1	21,8	30,6	33,8
		Amplitude	0,6	1,9	4,0	11,6
		Desvio padrão	0,3	1,0	2,1	6,5
		Coef. variação médio (%)	0,4	1,1	2,4	6,9
	90 d	Corpo-de-prova 1	14,6	18,4	36,9	66,5
		Corpo-de-prova 2	13,8	25,6	39,3	55,0
		Corpo-de-prova 3	13,2	25,4	41,6	67,6
		Média	13,9	23,1	39,3	63,0
		Valor máximo	14,6	25,6	41,6	67,6
		Valor mínimo	13,2	18,4	36,9	55,0
		Amplitude	1,4	7,2	4,7	12,6
		Desvio padrão	0,7	4,1	2,4	7,0
		Coef. variação médio (%)	0,8	4,3	2,8	7,4

Tabela 18. Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto com 8% de metacaulim.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto com 8% de metacaulim			
			E-2275	E-2276	E-2277	E-2278
Resistência mecânica à compressão, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	12,5	24,8	36,9	56,9
		Corpo-de-prova 2	12,5	22,0	35,2	48,7
		Corpo-de-prova 3	13,0	22,5	36,9	56,0
		Média	12,7	23,1	36,3	53,9
		Valor máximo	13,0	24,8	36,9	56,9
		Valor mínimo	12,5	22,0	35,2	48,7
		Amplitude	0,5	2,8	1,7	8,2
		Desvio padrão	0,3	1,5	1,0	4,5
		Coef. variação médio (%)	0,3	1,7	1,0	4,8
	28 d	Corpo-de-prova 1	20,0	32,4	39,7	63,3
		Corpo-de-prova 2	21,5	29,1	42,6	61,5
		Corpo-de-prova 3	22,4	30,4	40,1	64,4
		Média	21,3	30,6	40,8	63,1
		Valor máximo	22,4	32,4	42,6	64,4
		Valor mínimo	20,0	29,1	39,7	61,5
		Amplitude	2,4	3,3	2,9	2,9
		Desvio padrão	1,2	1,7	1,6	1,5
		Coef. variação médio (%)	1,4	1,9	1,7	1,7
	90 d	Corpo-de-prova 1	28,1	30,5	49,2	75,9
		Corpo-de-prova 2	22,3	32,2	47,3	74,4
		Corpo-de-prova 3	28,6	34,4	50,8	78,9
		Média	26,3	32,4	49,1	76,4
		Valor máximo	28,6	34,4	50,8	78,9
		Valor mínimo	22,3	30,5	47,3	74,4
		Amplitude	6,3	3,9	3,5	4,5
		Desvio padrão	3,5	2,0	1,8	2,3
		Coef. variação médio (%)	3,7	2,3	2,1	2,7

Tabela 19. Resistência à compressão e erros de ensaio no concreto com 8% de sílica ativa.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto com 8% de sílica ativa			
			E-2279	E-2280	E-2281	E-2282
Resistência mecânica à compressão, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	15,4	17,1	36,2	51,9
		Corpo-de-prova 2	14,8	17,8	37,6	51,9
		Corpo-de-prova 3	15,3	18,0	34,1	48,2
		Média	15,2	17,6	36,0	50,7
		Valor máximo	15,4	18,0	37,6	51,9
		Valor mínimo	14,8	17,1	34,1	48,2
		Amplitude	0,6	0,9	3,5	3,7
		Desvio padrão	0,3	0,5	1,8	2,1
		Coef. variação médio (%)	0,4	0,5	2,1	2,2
	28 d	Corpo-de-prova 1	26,3	30,2	49,4	52,8
		Corpo-de-prova 2	25,2	31,7	46,8	63,3
		Corpo-de-prova 3	24,3	31,3	46,4	62,7
		Média	25,3	31,1	47,5	59,6
		Valor máximo	26,3	31,7	49,4	63,3
		Valor mínimo	24,3	30,2	46,4	52,8
		Amplitude	2,0	1,5	3,0	10,5
		Desvio padrão	1,0	0,8	1,6	5,9
		Coef. variação médio (%)	1,2	0,9	1,8	6,2
	90 d	Corpo-de-prova 1	30,1	32,9	57,2	79,0
		Corpo-de-prova 2	29,0	36,4	49,1	72,7
		Corpo-de-prova 3	27,1	32,9	48,4	82,8
		Média	28,7	34,1	51,6	78,2
		Valor máximo	30,1	36,4	57,2	82,8
		Valor mínimo	27,1	32,9	48,4	72,7
		Amplitude	3,0	3,5	8,8	10,1
		Desvio padrão	1,5	2,0	4,9	5,1
		Coef. variação médio (%)	1,8	2,1	5,2	6,0

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão apresentados os comportamentos dos concretos em termos de resistência à compressão respectivamente nas idades de controle de 7 dias, 28 dias e 90 dias. Percebe-se que o desempenho dos concretos com adição mineral apresentaram ganho de resistência superior aos concretos de referência em todas as idades analisadas.

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados dos erros dos ensaios obtidos a partir dos critérios adotados pelo ACI 214, que já foram descritos na Tabela 8. Percebe-se que os resultados obtidos apresentaram pequena variação em relação à média, confirmando a padronização das moldagens e execução dos ensaios segundo as referidas normas.

Outros autores, tais como Souza (2003) e Dal Molin (1995) também chegaram a valores similares em relação aos erros de ensaios obtidos.

Vale destacar que o erro do ensaio está correlacionado com o coeficiente de variação do ensaio, segundo recomendado pela norma ACI 214.

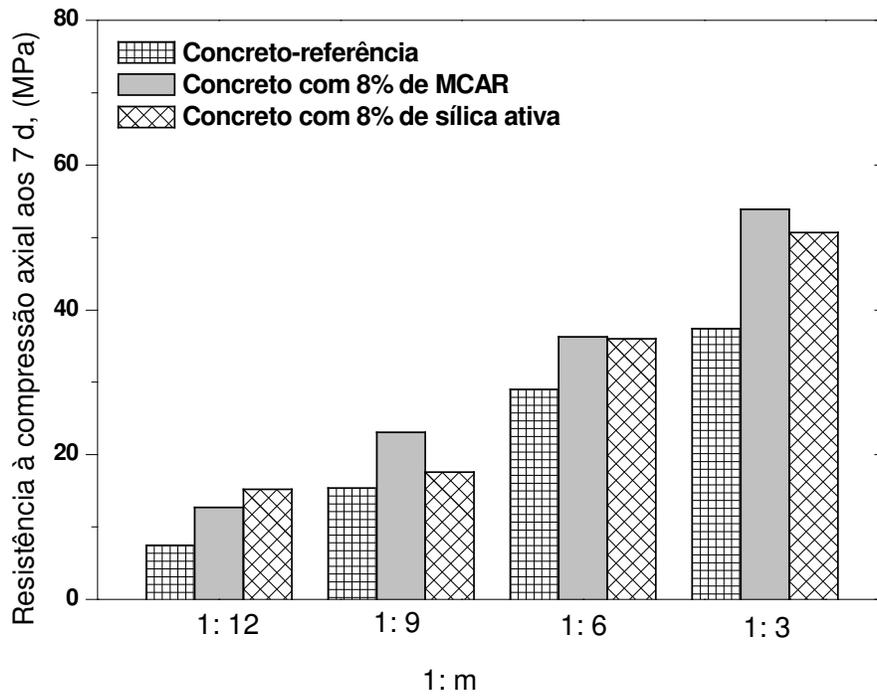


Figura 13. Resistência à compressão aos 7 d, em função da relação 1: m.

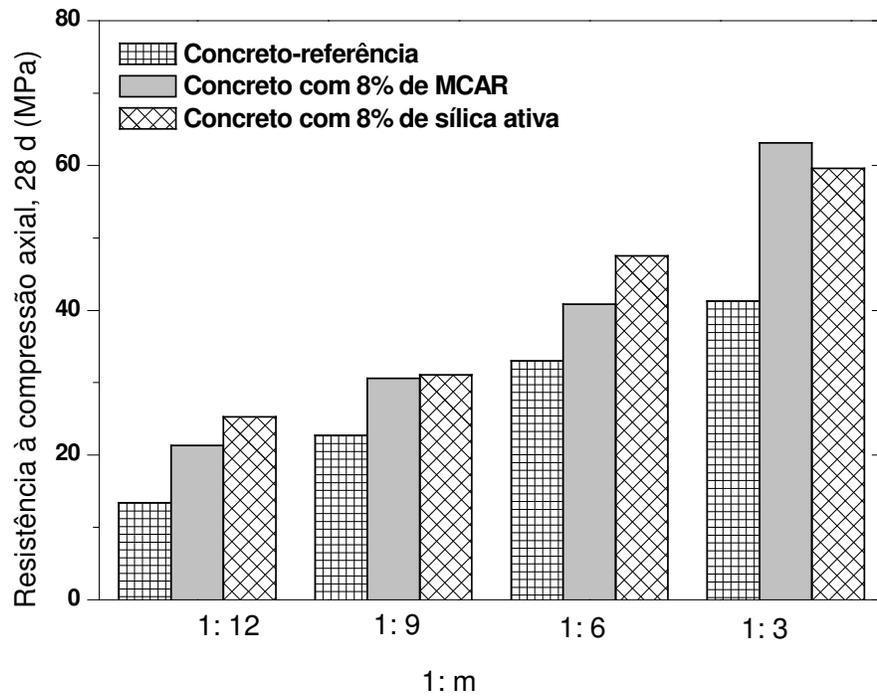


Figura 14. Resistência à compressão 28 d, em função da relação 1: m.

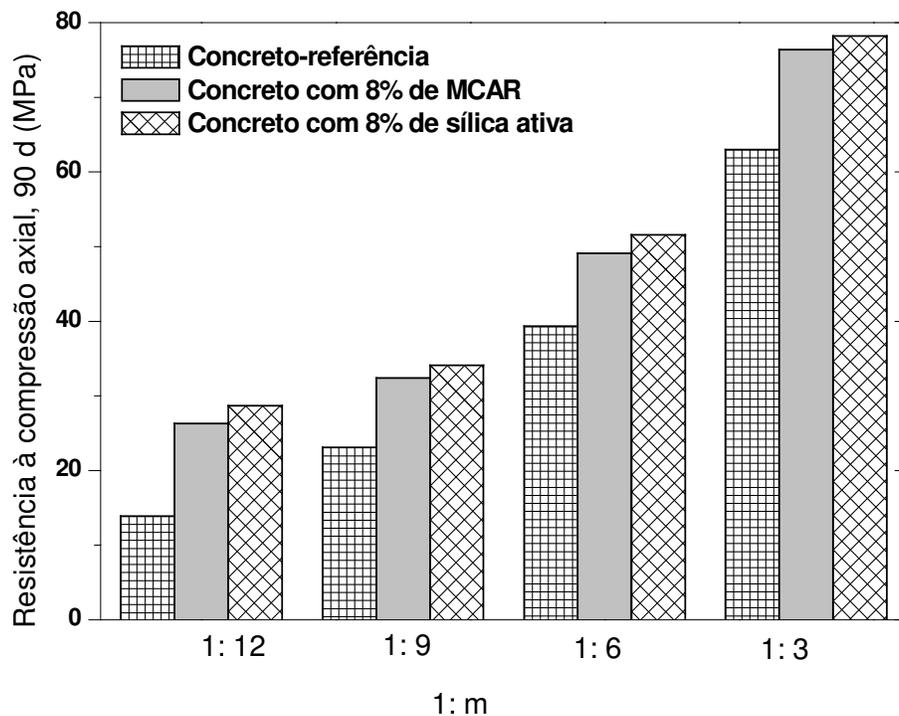


Figura 15. Resistência à compressão 90 d, em função da relação 1: m.

Tabela 20. Erros de ensaio da resistência à compressão dos concretos sem e com adição.

Ensaio de resistência à compressão			
Idade	Amostras	Erro ensaio	Avaliação (ACI 214)
7 d	Desvio padrão	1.6	Excelente
	Coef. variação do ensaio (%)	1.7	Excelente
28 d	Desvio padrão	2.1	Excelente
	Coef. variação do ensaio (%)	2.3	Excelente
90 d	Desvio padrão	3.1	Muito Bom
	Coef. variação do ensaio (%)	3.4	Muito Bom

Para verificar o efeito da adição mineral no consumo de cimento para diferentes resistências, foram estipuladas resistências do concreto de 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa para a composição e a análise dos consumos de cimento dos diferentes concretos. Essas resistências são, normalmente utilizadas em obras e por isso foram escolhidas para representar os diferentes concretos.

Com o método do módulo de finura, por intermédio dos gráficos de dosagens, foi correlacionado o módulo de finura com as propriedades mecânicas e físicas do concreto, bem como seus respectivos consumos de materiais para cada resistência requerida. Seus valores numéricos estão apresentados nas Tabelas 21 a 26, respectivamente para as dosagens de referência, metacaulim e sílica ativa.

Tabela 21. **Composição das dosagens do concreto-referência, aos 28 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	28	28	28	28	28
Módulo de finura	4,21	4,45	4,69	4,93	5,17
Relação (a/(c+p))	0,546	0,431	0,355	0,301	0,261
Água unitária, (kg/m³)	168	163	165	180	185
Cimento e pozolana, (kg/m³)	308	378	465	598	709
Cimento CP II F, (kg/m³)	308	378	465	598	709
Porcentagem de adição, (%)	0	0	0	0	0
Pozolana, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	3,08	3,78	4,65	5,98	7,09
Areia em massa, (%)	39,7	36,2	32,8	29,3	25,9
Areia em volume, (%)	39,7	36,2	32,8	29,3	25,9
Areia, (kg/m³)	859	764	661	540	444
Brita 1, (kg/m³)	1305	1345	1356	1301	1272
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	7,03	5,58	4,34	3,08	2,42
Argamassa sem ar incorporado, (%)	55,97	54,63	54,25	56,10	57,07
Argamassa com ar incorporado, (%)	56,07	54,73	54,35	56,20	57,17
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Tabela 22. **Composição das dosagens do concreto-referência, aos 90 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	90	90	90	90	90
Módulo de finura	4,09	4,22	4,34	4,47	4,60
Relação (a/(c+p))	0,631	0,525	0,451	0,397	0,356
Água unitária, (kg/m³)	175	170	163	160	168
Cimento e pozolana, (kg/m³)	277	324	361	403	472
Cimento CP II F, (kg/m³)	277	324	361	403	472
Porcentagem de adição, (%)	0	0	0	0	0
Pozolana, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	2,77	3,24	3,61	4,03	4,72
Areia em massa, (%)	41,4	39,6	37,8	35,9	34,1
Areia em volume (%)	41,4	39,6	37,8	35,9	34,1
Areia, (kg/m³)	900	848	803	752	683
Brita 1, (kg/m³)	1273	1294	1322	1340	1318
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	7,83	6,61	5,88	5,19	4,24
Argamassa sem ar incorporado, (%)	57,04	56,34	55,37	54,77	55,52
Argamassa com ar incorporado, (%)	57,14	56,44	55,47	54,87	55,62
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Tabela 23. **Composição das dosagens do concreto com 8% de metacaulim, aos 28 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	28	28	28	28	28
Módulo de finura	3,97	4,12	4,27	4,42	4,57
Relação (a/(c+p))	0,800	0,618	0,501	0,420	0,360
Água unitária, (kg/m³)	175	166	165	163	165
Cimento e pozolana, (kg/m³)	219	269	329	388	458
Cimento CP II F, (kg/m³)	201	247	303	357	422
Porcentagem de adição, (%)	8	8	8	8	8
Pozolana, (kg/m³)	18	21	26	31	37
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	2,01	2,47	3,03	3,57	4,22
Areia em massa, (%)	43,2	41,0	38,9	36,7	34,5
Areia em volume, (%)	43,2	41,0	38,9	36,7	34,5
Areia, (kg/m³)	962	904	834	768	696
Brita 1, (kg/m³)	1266	1300	1313	1326	1321
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	10,19	8,21	6,52	5,40	4,40
Argamassa sem ar incorporado, (%)	57,19	56,01	55,56	55,10	55,23
Argamassa com ar incorporado, (%)	57,29	56,11	55,66	55,20	55,33
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Tabela 24. **Composição das dosagens do concreto com 8% de metacaulim, aos 90 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	90	90	90	90	90
Módulo de finura	3,89	4,01	Q4,14	Q4,26	4,38
Relação (a/(c+p))	0,948	0,738	0,602	0,507	0,436
Água unitária, (kg/m³)	180	175	1170	165	165
Cimento e pozolana, (kg/m³)	190	237	282	325	378
Cimento CP II F, (kg/m³)	174	217	259	298	346
Porcentagem de adição, (%)	8	8	8	8	8
Pozolana, (kg/m³)	14	17	21	24	28
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	1,74	2,17	2,59	2,98	3,46
Areia em massa, (%)	44,2	42,5	40,8	39,0	37,3
Areia em volume, (%)	44,2	42,5	40,8	39,0	37,3
Areia, (kg/m³)	992	940	889	841	784
Brita 1, (kg/m³)	1252	1272	1293	1314	1318
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	11,82	9,33	7,73	6,62	5,56
Argamassa sem ar incorporado, (%)	57,74	57,06	56,36	55,66	55,52
Argamassa com ar incorporado, (%)	57,84	57,16	56,46	55,76	55,62
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Tabela 25. **Composição das dosagens correspondentes ao concreto com 8% de sílica ativa, aos 28 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	28	28	28	28	28
Módulo de finura	3,86	4,04	4,22	4,40	4,58
Relação (a/(c+p))	0,914	0,688	0,546	0,449	0,379
Água unitária, (kg/m³)	184	174	169	168	170
Cimento e pozolana, (kg/m³)	201	253	310	374	449
Cimento CP II F, (kg/m³)	185	233	285	344	413
Porcentagem de adição, (%)	8	8	8	8	8
Pozolana, (kg/m³)	16	20	25	30	36
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	1,85	2,33	2,85	3,44	4,13
Areia em massa, (%)	44,7	42,1	39,5	36,9	34,3
Areia em volume, (%)	44,7	42,1	39,5	36,9	34,3
Areia, (kg/m³)	991	924	850	771	689
Brita 1, (kg/m³)	1224	1269	1300	1316	1316
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	11,01	8,67	6,95	5,58	4,47
Argamassa sem ar incorporado, (%)	58,48	56,94	55,84	55,23	55,14
Argamassa com ar incorporado, (%)	58,58	57,04	55,94	55,33	55,24
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Tabela 26. **Composição das dosagens correspondentes ao concreto com 8% de sílica ativa, aos 90 d.**

Concreto	Referência				
t	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
v	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
fck, (MPa)	20	25	30	35	40
fcj= fck/(1-tv), (MPa)	26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Idade, (d)	90	90	90	90	90
Módulo de finura	3,85	3,97	4,10	4,22	4,34
Relação (a/(c+p))	1,014	0,790	0,644	0,542	0,467
Água unitária, (kg/m³)	185	175	170	168	168
Cimento e pozolana, (kg/m³)	182	222	264	310	360
Cimento CP II F, (kg/m³)	168	204	243	285	331
Porcentagem de adição, (%)	8	8	8	8	8
Pozolana, (kg/m³)	15	18	21	25	29
Porcentagem de aditivo, (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aditivo polifuncional, (kg/m³)	1,68	2,04	2,43	2,85	3,31
Areia em massa, (%)	44,8	43,1	41,3	39,6	37,8
Areia em volume, (%)	44,8	43,1	41,3	39,6	37,8
Areia, (kg/m³)	1000	957	906	852	795
Brita 1, (kg/m³)	1232	1265	1287	1301	1307
Brita 2, (kg/m³)	0	0	0	0	0
Traço em peso – 1	12,28	10,03	8,31	6,94	5,84
Argamassa sem ar incorporado, (%)	58,25	57,10	56,31	55,81	55,56
Argamassa com ar incorporado, (%)	58,35	57,20	56,41	55,91	55,65
Volume do traço, (l)	1000	1000	1000	1000	1000

Dos resultados, foram elaborados os gráficos mostrados nas Figuras 16 e 17, onde, nas ordenadas tem-se o consumo de aglomerantes e, nas abscissas, a resistência mecânica à compressão para as idades de cura de 28 d e 90 d, respectivamente. A idade de 7 d foi analisada para verificação do comportamento inicial do concreto e não fez parte da análise comparativa.

Foi constatada diferença de valores no consumo de cimento e adição para praticamente todas as dosagens analisadas, ou seja, a introdução de metacaulim e/ou sílica ativa nos concretos estudados provocou uma redução geral nos consumos de cimento. Isto ficou mais evidente aos 90 d devido ao ganho de resistência nesta idade em relação aos 28 d. Se a estrutura não vai ser submetida a um carregamento imediato, deve-se adotar uma idade mais adiantada.

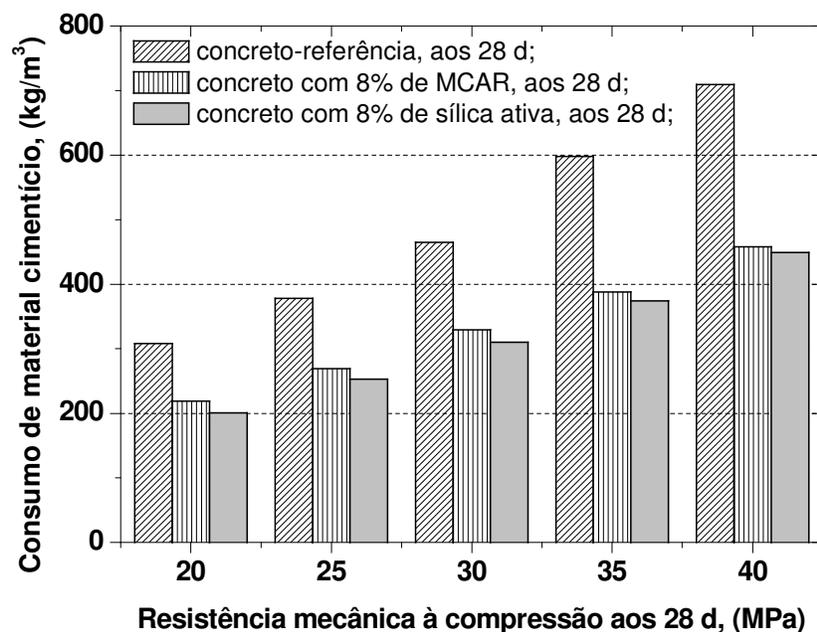


Figura 16. Consumo de cimento e adição mineral versus resistência especificada, aos 28 d.

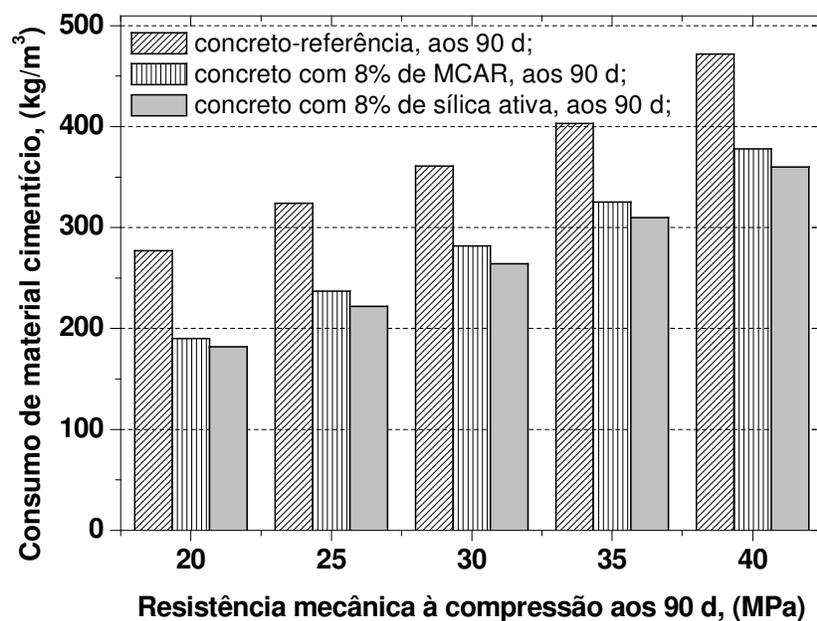


Figura 17. Consumo de cimento e adição mineral versus resistência especificada, aos 90 d.

O efeito da adição dos minerais em função da idade na resistência à compressão do concreto foi considerado benéfico porque os seus valores foram superiores aos encontrados no concreto-referência.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os valores obtidos dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência e com metacaulim e sílica ativa estão colocados nas Tabelas 27 a 29, respectivamente. Constatou-se, novamente, um comportamento diretamente proporcional à idade e ao teor de substituição e inversamente proporcional à relação $a/(c+p)$.

A relação a/c foi muito bem caracterizada por Abrams no início do século XX, demonstrando que para menores teores de água, para um teor específico de cimento, há ganho de resistência à compressão, até o limite de hidratação do cimento. Naquela época o valor mínimo de a/c , sem prejuízo da resistência estava na ordem de 0,3. Entretanto, com o advento de aditivos de última geração e elevado poder de plasticidade dos concretos, obtém-se, atualmente, relações $a/(c+p)$ da ordem de 0,15 e os chamados CAR. Essa inversão é, também, observada na resistência à tração por compressão diametral.

O que se torna evidente é que a ordem de grandeza das diferenças obtidas entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral entre as dosagens de referência, comparadas com as dosagens com adição mineral, não

são significativas, confirmando os resultados de Paulon (1995). Porém se essas diferenças forem transformadas em porcentagem, os valores não são proporcionais aos obtidos na resistência à compressão, obedecem à mesma tendência, porém em escalas distintas.

Salienta-se que o coeficiente de variação calculado e apresentado para a resistência à tração por compressão diametral é o coeficiente de variação da média recomendado por Souza Coutinho (1974) mostrado na Tabela 30.

Tabela 27. Resistência à tração por compressão diametral e seus erros de ensaio do concreto-referência.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto-referência			
			E-2271	E-2272	E-2273	E-2274
Resistência mecânica à tração diametral, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	1,6	2,2	3,4	4,3
		Corpo-de-prova 2	1,6	2,2	3,3	4,5
		Corpo-de-prova 3	1,6	2,0	3,0	3,9
		Média	1,6	2,1	3,2	4,2
		Valor máximo	1,6	2,2	3,4	4,5
		Valor mínimo	1,6	2,0	3,0	3,9
		Amplitude	0,1	0,3	0,4	0,6
		Desvio padrão	0,0	0,1	0,2	0,3
		Coef. variação médio (%)	0,0	6,3	6,8	7,2
	28 d	Corpo-de-prova 1	2,0	2,0	3,8	4,9
		Corpo-de-prova 2	2,0	2,8	3,0	4,1
		Corpo-de-prova 3	2,0	2,6	3,8	4,6
		Média	2,0	2,5	3,5	4,5
		Valor máximo	2,0	2,8	3,8	4,9
		Valor mínimo	2,0	2,0	3,0	4,1
		Amplitude	0,0	0,8	0,8	0,8
		Desvio padrão	0,0	0,4	0,5	0,4
		Coef. variação médio (%)	0,0	16,9	13,1	8,9
	90 d	Corpo-de-prova 1	2,1	3,4	4,3	5,1
		Corpo-de-prova 2	2,2	2,9	3,4	5,3
		Corpo-de-prova 3	2,3	2,8	3,8	5,4
		Média	2,2	3,0	3,8	5,3
		Valor máximo	2,3	3,4	4,3	5,4
		Valor mínimo	2,1	2,8	3,4	5,1
		Amplitude	0,2	0,6	0,9	0,3
		Desvio padrão	0,1	0,3	0,5	0,2
		Coef. variação médio (%)	0,1	10,6	11,8	2,9

Tabela 28. Resistência à tração por compressão diametral e erros de ensaio do concreto com 8% de metacaulim.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto com 8% de metacaulim			
			E-2275	E-2276	E-2277	E-2278
Resistência mecânica à tração diametral, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	1,7	3,0	4,2	4,8
		Corpo-de-prova 2	1,9	2,6	4,2	4,7
		Corpo-de-prova 3	1,9	3,0	4,2	4,7
		Média	1,8	2,8	4,2	4,9
		Valor máximo	1,9	3,0	4,2	5,1
		Valor mínimo	1,7	2,6	4,2	4,7
		Amplitude	0,2	0,5	0,0	0,4
		Desvio padrão	0,1	0,2	0,0	0,2
		Coef. variação médio (%)	5,7	8,7	0,7	4,5
	28 d	Corpo-de-prova 1	2,4	2,6	4,4	4,6
		Corpo-de-prova 2	2,5	3,2	4,6	5,0
		Corpo-de-prova 3	2,4	3,0	4,6	5,0
		Média	2,4	2,9	4,5	4,9
		Valor máximo	2,5	3,2	4,6	5,0
		Valor mínimo	2,4	2,6	4,4	4,6
		Amplitude	0,1	0,6	0,2	0,4
		Desvio padrão	0,1	0,3	0,1	0,2
		Coef. variação médio (%)	2,4	10,4	2,5	4,7
	90 d	Corpo-de-prova 1	2,8	4,0	4,8	5,9
		Corpo-de-prova 2	2,6	4,0	4,7	6,0
		Corpo-de-prova 3	2,6	4,0	4,1	5,7
		Média	2,7	4,0	4,5	5,9
		Valor máximo	2,8	4,0	4,8	6,0
		Valor mínimo	2,6	4,0	4,1	5,7
		Amplitude	0,2	0,0	0,7	0,3
		Desvio padrão	0,1	0,0	0,4	0,2
		Coef. variação médio (%)	4,3	0,0	8,4	2,6

Tabela 29. Resistência à tração por compressão diametral e erros de ensaio do concreto com 8% de sílica ativa.

Ensaio	Idade	Amostras	Concreto com 8% de sílica ativa			
			E-2279	E-2280	E-2281	E-2282
Resistência mecânica à tração diametral, (MPa)	7 d	Corpo-de-prova 1	2,0	2,2	4,0	4,3
		Corpo-de-prova 2	2,1	2,4	4,0	4,5
		Corpo-de-prova 3	2,0	2,4	3,4	4,9
		Média	2,0	2,3	3,8	4,6
		Valor máximo	2,1	2,4	4,0	4,9
		Valor mínimo	2,0	2,2	3,4	4,3
		Amplitude	0,1	0,2	0,6	0,6
		Desvio padrão	0,0	0,1	0,3	0,3
		Coef. variação médio (%)	2,5	3,8	9,1	6,7
	28 d	Corpo-de-prova 1	3,0	3,1	4,6	5,0
		Corpo-de-prova 2	2,9	3,0	4,0	4,8
		Corpo-de-prova 3	3,2	3,2	4,2	5,0
		Média	3,0	3,1	4,3	4,9
		Valor máximo	3,2	3,2	4,6	5,0
		Valor mínimo	2,9	3,0	4,0	4,8
		Amplitude	0,3	0,2	0,6	0,2
		Desvio padrão	0,2	0,1	0,3	0,1
		Coef. variação médio (%)	5,0	3,2	7,2	2,3
	90 d	Corpo-de-prova 1	2,8	3,9	5,3	6,3
		Corpo-de-prova 2	3,6	4,0	4,0	5,0
		Corpo-de-prova 3	3,4	3,6	5,2	6,1
		Média	3,3	3,8	4,8	5,8
		Valor máximo	3,6	4,0	5,3	6,3
		Valor mínimo	2,8	3,6	4,0	5,0
		Amplitude	0,8	0,4	1,3	1,3
		Desvio padrão	0,4	0,2	0,7	0,7
		Coef. variação médio (%)	12,7	5,4	15,0	12,1

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados dos erros dos ensaios obtidos a partir dos critérios sugeridos apresentados na Tabela 8.

Tabela 30. **Erros de ensaio – resistência à tração por compressão diametral.**

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral			
Idade	Parâmetros	Erro médio do ensaio	Avaliação
7 dias	Desvio padrão	0,2	Excelente
	Coef. de variação média (%)	5,2	Bom
28 dias	Desvio padrão	0,2	Excelente
	Coef. de variação média (%)	6,4	Bom
90 dias	Desvio padrão	0,3	Muito Bom
	Coef. de variação média (%)	7,2	Bom

O efeito da adição mineral em função da idade, na resistência à tração do concreto, está apresentado nas Figuras 18 a 20, respectivamente para as resistências especificadas aos 7, 28 e 90 d. Percebe-se que o desempenho dos concretos com adição mineral é ligeiramente superior ao obtido com os concretos de referência. Esta análise deve ser melhor estudada principalmente porque não houve ganho significativo de resistência à tração aos 7 d para as demais idades de controle.

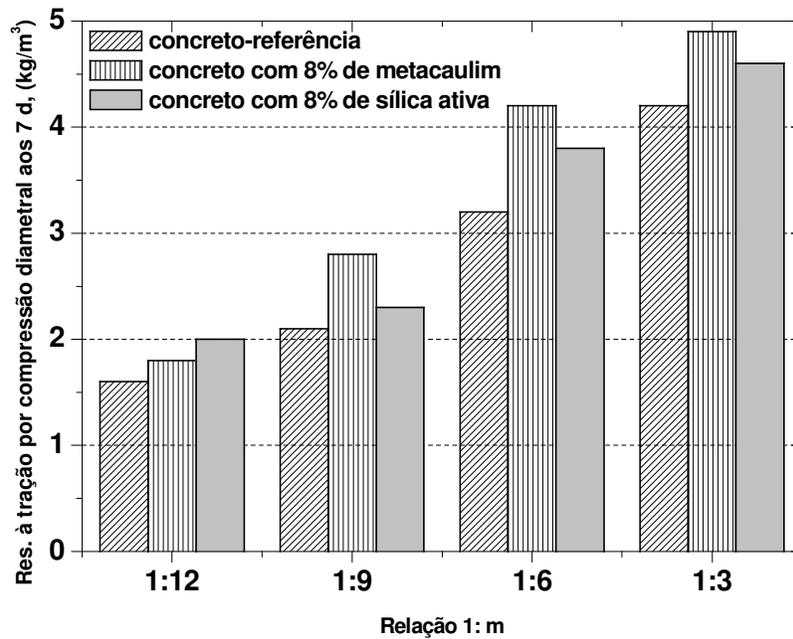


Figura 18. Resistência à tração por compressão diametral aos 7 d, em função da relação 1: m.

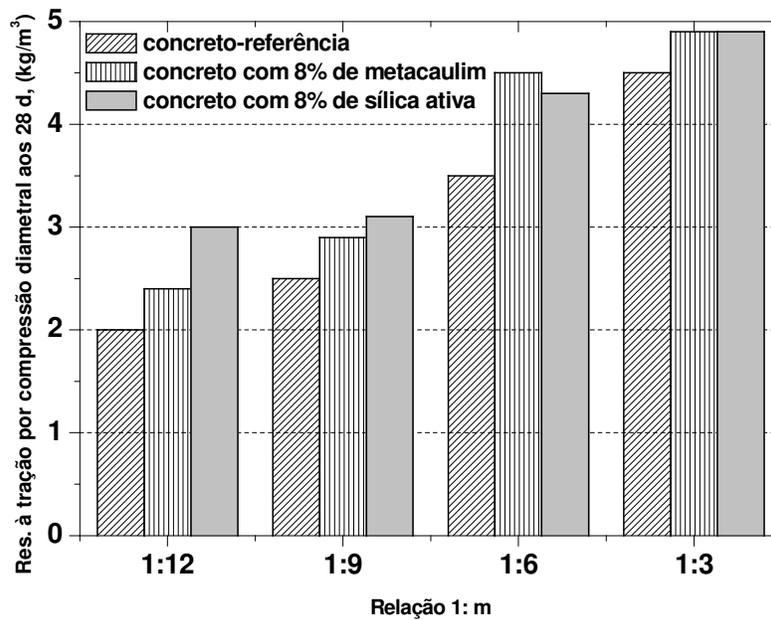


Figura 19. Resistência à tração por compressão diametral aos 28 d, em função da relação 1: m.

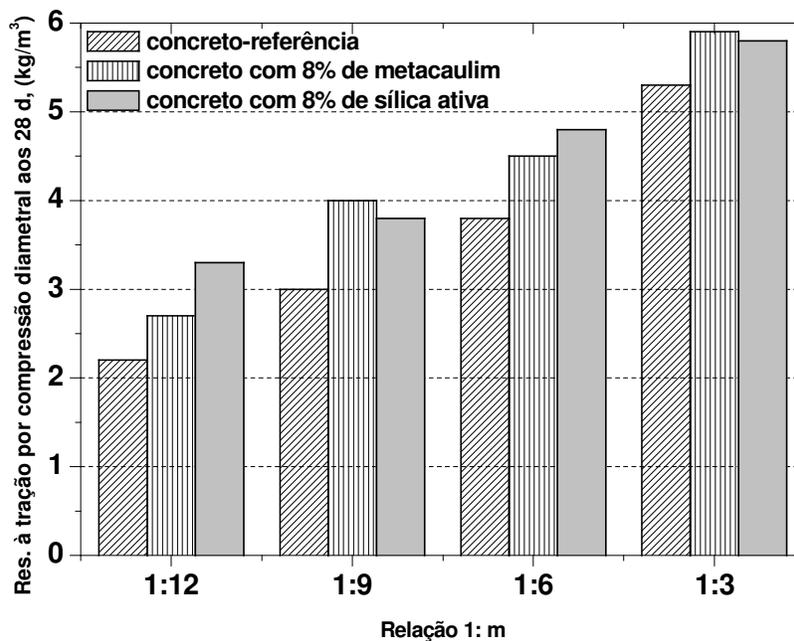


Figura 20. **Resistência à tração por compressão diametral aos 90 d, em função da relação 1: m.**

4.2.3 Relação entre resistências à compressão e à tração

A relação existente entre essas duas propriedades já foi o foco principal de várias pesquisas nesta área (ACI (1991); CEB (1990)), onde a sua razão tende a diminuir com o aumento da resistência à compressão. Este comportamento fez com que se chegasse à conclusão de que muitas fórmulas colocadas como opção para a obtenção da resistência à tração, tendo como base os resultados de resistência à compressão, não fornecem resultados satisfatórios, quando se focaliza concretos com alta resistência. Na Figura 21 está apresentada a correlação entre todos os resultados médios de resistência à compressão e de

resistência à tração por compressão diametral obtidos neste trabalho, independentemente da idade de ruptura e da adição ou não.

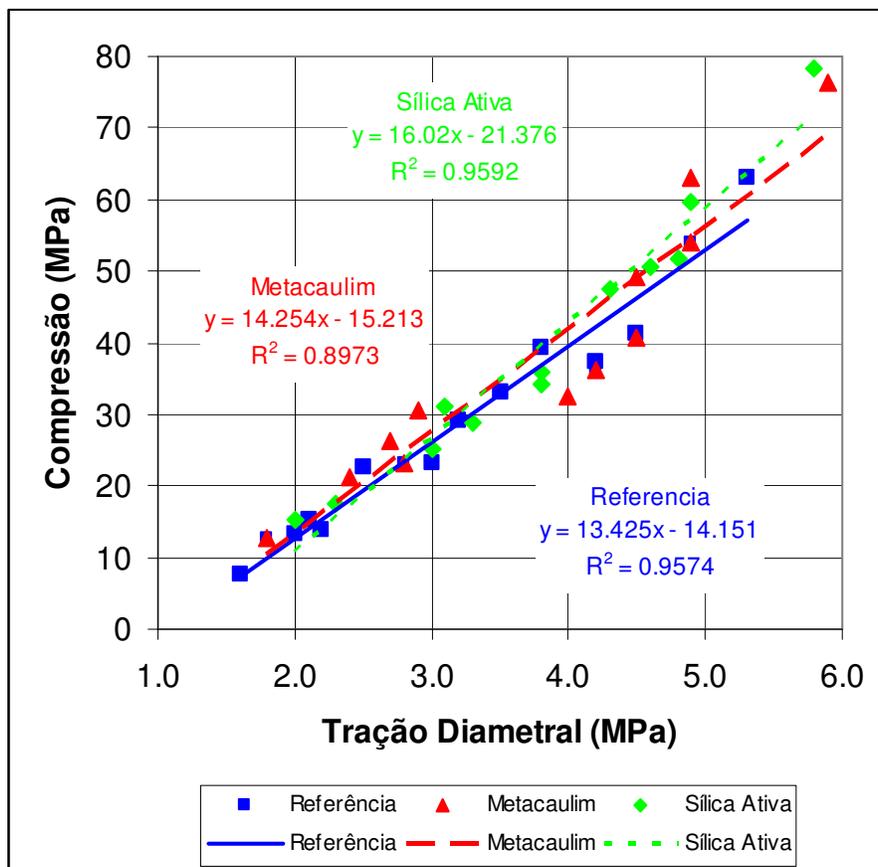


Figura 21. **Resistência à compressão versus tração por compressão diametral.**

O comportamento dos resultados obtidos neste trabalho com o MCAR é semelhante aos obtidos por DAL MOLIN (1995) e SENSALÉ (2000) em concretos com uso de sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, respectivamente. Esta situação evidencia, nitidamente, que o comportamento desta relação está

diretamente influenciado pela relação $a/(c+p)$, não tendo, deste modo, grande influência deste tipo de adição mineral no concreto.

O intervalo de variação obtido para o ensaio de compressão diametral ficou entre 0,07 e 0,15. Estes valores não diferem muito do intervalo especificado por MEHTA e MONTEIRO (1994), para concretos com resistências semelhantes às alcançadas neste trabalho.

De acordo com as curvas apresentadas constatam-se valores semelhantes entre o concreto-referência, o metacaulim e aos obtidos com a sílica ativa. Esta situação é um reflexo da pozolanicidade superior da sílica ativa em relação às outras pozolanas, haja vista que neste tipo de ensaio o concreto é sujeito apenas à tração, onde se tem uma grande influência do efeito pozolânico e pouca influência do efeito *filler*.

4.2.4 *Relação entre custos obtidos*

A escolha dos materiais a serem utilizados em concretos deve ser precedida de uma análise comparativa de custos e desempenho. Para esta análise deve-se levar em consideração o custo real do produto, ou seja, incluir todos os custos indiretos que incidem sobre os materiais desde a fábrica até o canteiro de obras, principalmente, o valor correspondente ao transporte.

Para este trabalho foram considerados os seguintes custos para os materiais praticados no Brasil até meados de 2005: a)cimento: R\$ 0,35/kg; b)metacaulim: R\$ 0,60/kg; c)sílica ativa: R\$ 1,00/kg; e, d)aditivo polifuncional: R\$ 1,00/kg.

Em função dos consumos obtidos nos estudos de dosagens, foi possível estabelecer os gráficos expressos nas Figuras 22 e 23, evidenciando as diferenças obtidas em cada alternativa o parâmetro resistência à compressão constante, ou seja, para a obtenção das resistências pré-estabelecidas de 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, foram compostas as dosagens dos concretos de referência, com metacaulim e com sílica ativa. As quantidades obtidas dos materiais multiplicadas por seus respectivos custos, geraram os custos totais do concreto para a resistência desejada. Já que a dosagem é composta para 1 m³, o custo obtido é correspondente a 1 m³ de concreto.

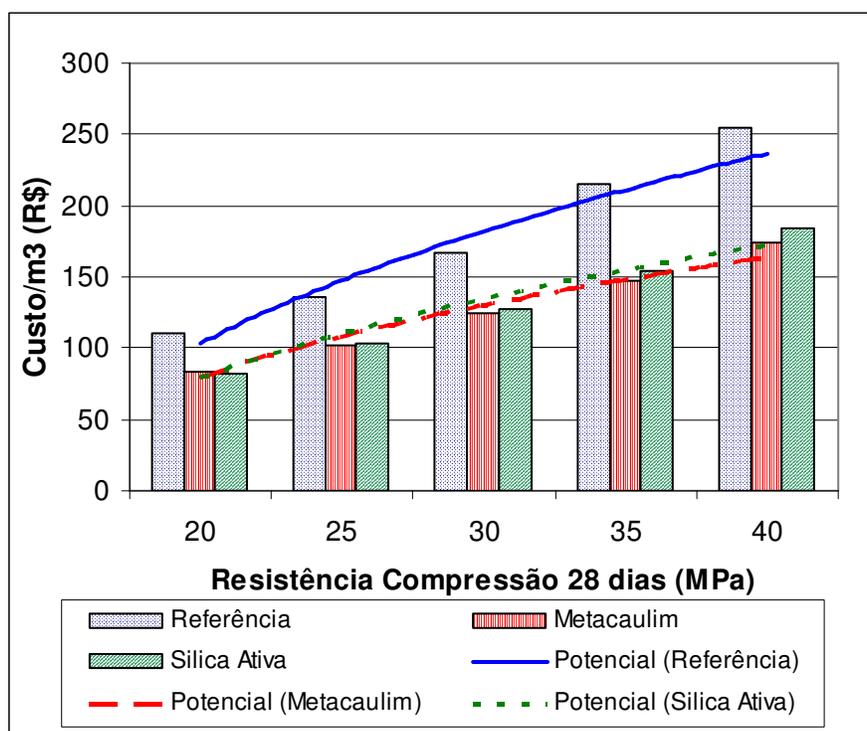


Figura 22. **Custo para a resistência à compressão do concreto aos 28 d.**

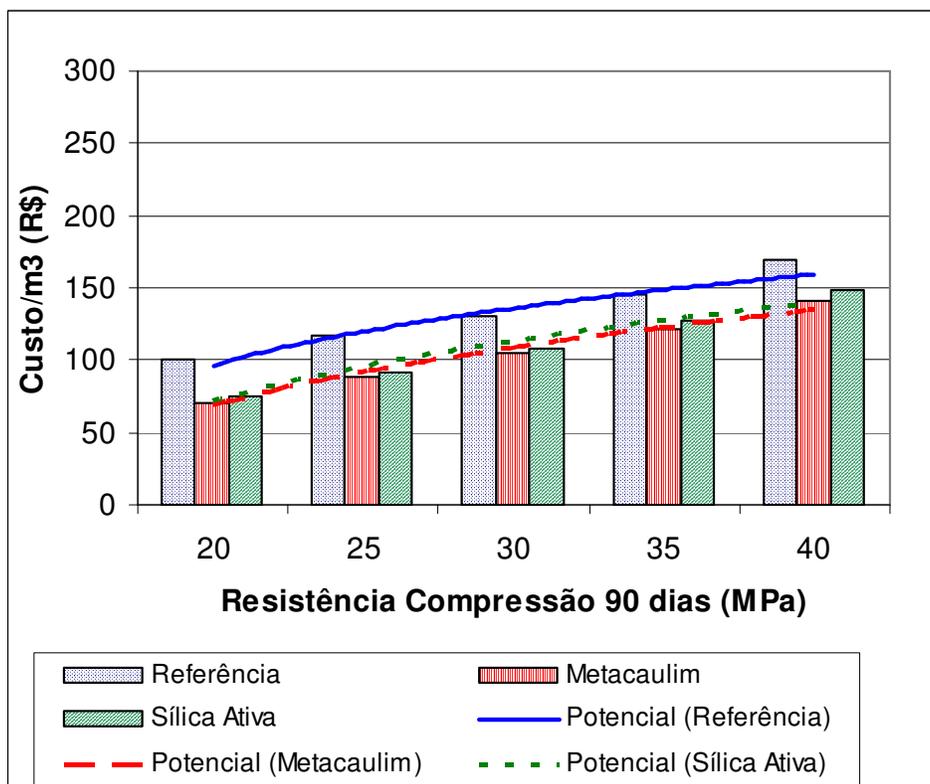


Figura 23. **Custo para a resistência à compressão do concreto aos 90 d.**

Considerando o custo unitário equivalente a 100% para as dosagens de referência, foram calculados os respectivos percentuais correspondentes aos concretos com adições minerais. Os resultados obtidos estão mostrados nas Figuras 24 e 25, respectivamente para resistências à compressão dos concretos aos 28 d e 90 d.

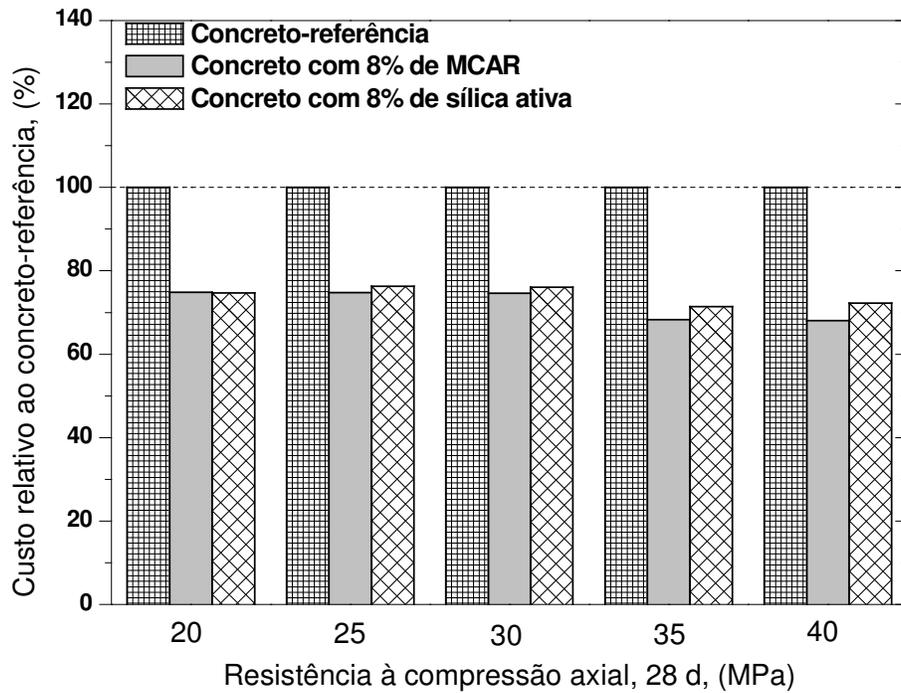


Figura 24. Percentual do custo com as hipóteses analisadas aos 28 d.

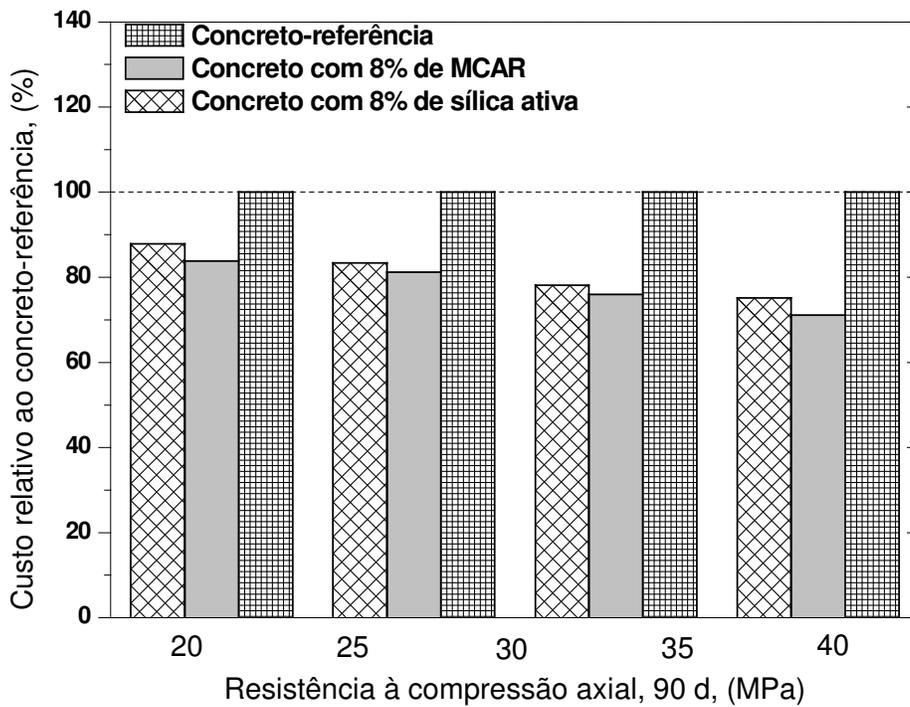


Figura 25. Percentual do custo com as hipóteses analisadas aos 90 d.

Das Figuras 24 e 25 foi calculada a redução de custo com utilização de metacaulim e sílica ativa em relação à referência. Os resultados foram de 27,8% e 25,8% aos 28 d e 21,0% e 17,7% aos 90 d, respectivamente.

Os efeitos da manutenção da trabalhabilidade refletiram positivamente nos resultados de resistência à compressão axial simples. A eficiência do concreto foi um parâmetro que traduziu de maneira clara o efeito direto destes resultados.

Entretanto, para tentar ser mais objetivo e imparcial na análise comparativa de desempenho dos diferentes concretos, procurou-se determinar de maneira complementar, para todas as hipóteses analisadas, a eficiência econômica. A Eficiência econômica (EE) é obtida pelo valor da resistência à compressão (R), dividido pelo consumo de aglomerantes (Cimento, **C**, + Adição, **A**) multiplicado pelos respectivos custos unitários (**CC** = Custo Cimento e **CA** = Custo da Adição), ou seja:

$$EE = \frac{R}{(C \cdot CC + A \cdot CA)}$$

Nota. Recomenda-se levar em consideração também o preço do aditivo principalmente quando se utilizar aditivos especiais do tipo carboxilatos ou similares. Neste estudo não foi considerado o custo do aditivo porque o teor foi mantido constante para todas as dosagens analisadas.

Na Tabela 30 estão apresentados os respectivos valores obtidos para as diferentes alternativas estudadas.

Nos gráficos expressos nas Figuras 26 e 27 estão apresentados os desempenhos dos diferentes produtos analisados aos 28 d e 90 d, respectivamente.

Tabela 31. **Eficiência econômica dos concretos sem e com adições.**

Hipótese	Material (kg/m ³)	Resistência à compressão aos 28 d, (MPa)				
		26,6	33,2	39,9	46,5	53,2
Concreto-referência	Cimento	308	378	465	598	709
	Adição	0	0	0	0	0
Eficiência econômica		0,247	0,251	0,245	0,222	0,214
Concreto com 8% de metacaulim	Cimento	201	247	303	357	422
	Adição	18	21	26	31	37
Eficiência econômica		0,328	0,335	0,328	0,324	0,313
Concreto com 8% de sílica ativa	Cimento	185	233	285	344	413
	Adição	16	20	25	30	36
Eficiência econômica		0,329	0,327	0,320	0,309	0,295
Resistência à compressão aos 90 d, (MPa)						
Concreto-referência	Cimento	277	324	361	403	472
	Adição	0	0	0	0	0
Eficiência econômica		0,274	0,293	0,316	0,330	0,322
Concreto com 8% de metacaulim	Cimento	174	217	259	298	346
	Adição	14	17	21	24	28
Eficiência econômica		0,384	0,385	0,386	0,392	0,386
Concreto com 8% de sílica ativa	Cimento	168	204	243	285	331
	Adição	15	18	21	25	29
Eficiência econômica		0,360	0,371	0,376	0,373	0,367

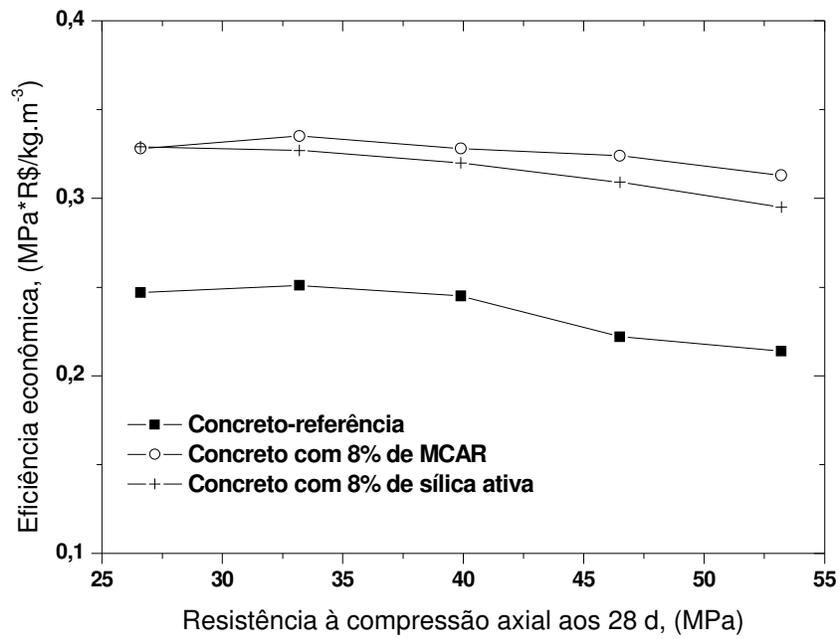


Figura 26. **Eficiência econômica dos concretos sem e com adições, em função da resistência à compressão axial aos 28 d.**

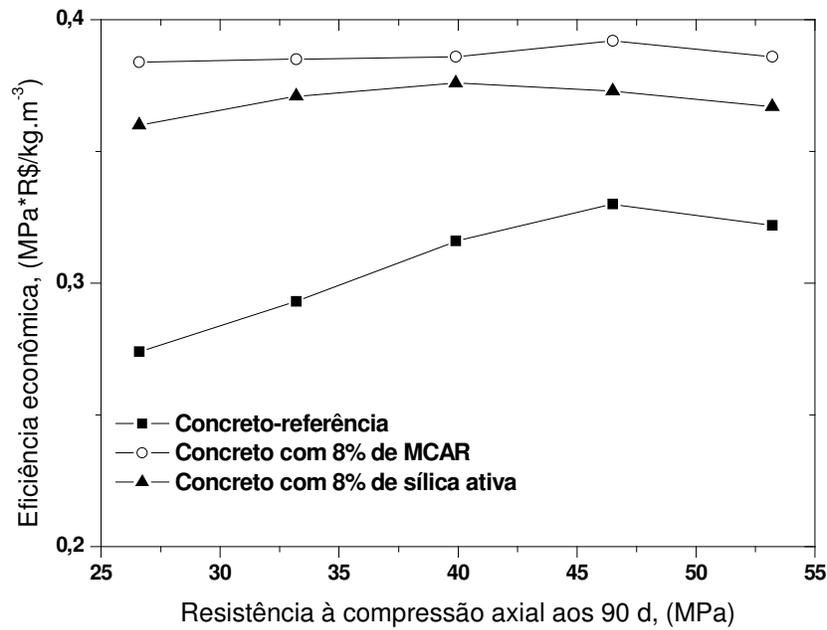


Figura 27. **Eficiência econômica dos concretos sem e com adições, em função da resistência à compressão axial aos 90 d.**

Isso significa que os produtos analisados metacaulim e sílica ativa possuem, em termos de resistência à compressão uma eficiência econômica equilibrada e sempre superior à do cimento analisado. Em virtude do custo da sílica ativa ser superior ao do metacaulim, na época de elaboração deste trabalho, sua eficiência econômica foi menor que a do metacaulim. Devem ser levados em conta os preços praticados no mercado, quando for realizada uma nova análise comparativa.

Observou-se, também, que aos 90 d o cimento analisado isoladamente, apresentou crescimento de sua eficiência econômica em relação a 28 d, à medida que a resistência dos concretos foi aumentada. Isso pode ser justificado devido ao cimento conter adição de pozolana do tipo cinza volante em 15%. Essa adição provocou reações mais lentas e mais estáveis para o concreto de referência, promovendo um ganho de resistência maior na idade de 90 d em relação à idade de 28 d.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo principal verificar as variações existentes nas propriedades mecânicas do concreto composto com metacaulim e sílica ativa decorrentes do uso em concretos de baixo, médio e elevado consumo de aglomerantes, para uma mesma trabalhabilidade e em relação a um grande universo de dosagens. Esta diversidade de consumos de cimento analisados vai além dos consumos de cimento comumente utilizados em obras de hidrelétricas. Por este motivo esta pesquisa tem um significado muito importante não só para concretos-massa como, também, para concretos de alta resistência.

Para isto ser possível foram utilizadas as curvas de comportamento das variáveis de resposta, tomando-se como referência o método do módulo de finura que se mostrou muito adequado a este tipo de investigação.

Em função dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, podem-se enumerar as seguintes conclusões:

- a.) as resistências à compressão dos concretos obtidas gerou uma série de correlações que puderam ser conduzidas de maneira a comprovar a eficiência da adição mineral em relação aos concretos de referência;
- b.) com base nos resultados experimentais, obtiveram-se resultados que possibilitaram a realização das curvas de comportamento da resistência à

compressão e à tração para o ensaio de compressão diametral, em função das variáveis controladas utilizadas na pesquisa;

- c.) verificou-se que, independentemente do consumo de aglomerantes, dentre os valores analisados, o benefício da utilização de adições minerais contribuiu favoravelmente para a otimização dos custos e melhoria do nível das resistências mecânicas analisadas em relação aos concretos de referência estudados neste trabalho;
- d.) os concretos compostos com sílica ativa e com o metacaulim de alta reatividade apresentaram melhor desempenho que os concretos de referência em termos da trabalhabilidade das misturas;
- e.) a relação custo benefício do emprego das adições minerais foi favorável, ou seja, em todas as dosagens estudadas houve economia com a utilização do metacaulim de alta reatividade e da sílica ativa. Nesta economia não esteve computada a redução de custos indiretos de manutenção, com o provável aumento da vida útil das estruturas;
- f.) até aos 7 d de idade dos concretos observou-se ganho discreto das resistências mecânicas investigadas tanto para o metacaulim quanto para a sílica ativa, em relação às dosagens de referência. Entretanto após aos 28 d essa diferença se tornou mais evidente;
- g.) o método de dosagens do módulo de finura se mostrou muito apropriado para este estudo. Por intermédio deste método puderam ser avaliadas,

experimentalmente, as diferenças entre as dosagens e estabelecer, sob as mesmas condições, as diferenças entre os concretos. Outra vantagem diz respeito à possibilidade de se manter o módulo de finura de uma ou mais dosagens definidas preliminarmente em uma obra. Desta maneira pode haver o controle da uniformidade granulométrica desses concretos e uma menor variabilidade nas resistências obtidas durante a aplicação das dosagens em uma obra.

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Em virtude do crescente número de trabalhos enfocando o uso de adições minerais em concretos, principalmente no Brasil, têm-se algumas sugestões que poderiam ser colocadas com o intuito de consolidar e melhorar o desempenho destes produtos em concretos. Assim sendo, são feitas a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

a) estudo do processo de moagem e/ou micronização de pozolanas e adições minerais, com o objetivo de obtenção de um maior empacotamento das partículas;

b) correlação das adições minerais de diferentes finuras, com o objetivo de verificar se há melhoria da relação custo-benefício, quando se adota um produto diferenciado;

c) avaliação das propriedades mecânicas com diferentes teores de substituição e seus efeitos na durabilidade do concreto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P.C. **High-Performance Concrete**. Québec: Université de Sherbrooke, 1998.

AMBROISE, J.; MARTIN-CALLE, S.; PÉRA, J. **Pozzolanic behavior of thermally activated kaolin**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4, 1992, Istanbul, Turkey. *Proceedings of Detroit: America concrete institute, (ACI Special publication, 132)*, v.2, 1993. p 731-748

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 226. **Silica fumes in concrete**. *ACI material Journal, Detroit*, v. 84, n. 2, p 158-166, mar/apr, 1987.

ANDRADE, W. P., FONTOURA, J. T., GUERRA, E. A., BITTENCOURT, R. M. **Um método de dosagens para concreto massa**. IBRACON, São Paulo (1981).

ANDRADE, W. P. **Concretos Massa, Estrutural, Compactado com Rolo e Projetado - Propriedades**. Editora PINI Ltda., São Paulo (1997).

ANDRIOLO, F.R. **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução**. São Paulo: PINI, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da absorção de água em agregado miúdo**, NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo**, NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**, NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman**, NBR 9776. Rio de Janeiro, 1986.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**, NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó**, NBR 6474 , Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confecção e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos**, NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**, NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal**, NBR 5751. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Especificação**, NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Pozolanas - Determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento Portland**, NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação**, NBR 13956. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM, Standard Test Method for Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. ASTM C 618, Philadelphia (1991).

ASTM, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), C 1260-94, West Conshohocken (1994).

BARATA, M.S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção do CAD com materiais disponíveis em Belém, através do emprego de adição de sílica ativa e metacaulim**. Porto Alegre, 1998. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. 153 p.

BATTAGIN, A. F. **Características das escórias e pozolanas aos cimentos Portland brasileiro**. In: CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE TECNOLOGIA DO CONCRETO, 4, ABCP. São Paulo, 1987. p 1-55

CABRERA, J.; ROJAS, M.F. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system. Cement Concrete Research, v. 31, n. 2, p 177-182, 2001.

CALDARONE, M.A.; GRUBER, K.A. High-reactivity metakaolin - a mineral admixture for high-performance concrete. In: CONCRETE UNDER

- SEVERE CONDITIONS*, 1995, Sapporo, Japan. *Proceedings....* London: eds K. SAKAI, N. BANTHIA, and O.E. GJORV, E.& F.N. SPON, 1995. v.1, p1015-1024.
- CALDARONE, M.A.; GRUBER, K. A.; BURG, R.G. **High-reactivity Metakaolin: A New Generation Mineral Admixture**. *Concrete International*, v.16, n.11, 1994. p. 37-40
- CARETTE, G.G.; MALHOTRA, V.M. **Long term strength development of silica fume concrete**. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE*, 4, 1992, Istambul, Turkey. *Proceedings....Detroit: American concrete institute*, 1993. v.2, p.1017-1044 (*ACI Special publication*, 132).
- CINCOTTO, M. A.. **Utilização de subproduto e resíduos na indústria da construção civil**. In: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações, Tecnologia de Edificações, São Paulo: PINI, cap 1, p 71-74. 1988.
- COLEMAN, N.J.; PAGE, C.L. **Aspects of the solution chemistry of hydrated cement pastes containing met kaolin**. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 1, p 147-154, 1997.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *CEB-FIP model code 1990*. Lausanne, 1991. 159p. (*Bulletin d'information*, 203).

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

DASTOL, M. **Produção e propriedades da microssílica da Elkem.** *In:* SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA ELKEM MICROSSÍLICA, 1. São Paulo, 1984. Anais.... São Paulo: ELKEM, 1984, p 1-19.

DELVASTO, R.M. de G.; MORALES, R.T. **Una nueva puzolana para materiales cimentícios de elevadas prestaciones.** *Materiales de construcción*, v.50, n. 260, 2000. p 5-13

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Sumário mineral, 2001.

FORNASIER, R.S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssílica.** Porto Alegre, 1995. 129 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

FRÍAS, M.; ROJAS, M.I.S.; CABRERA, J. **The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars.** *Cement and Concrete Research*. v. 30, 2000. p 209-216

GALLO, G. R. **Caracterização microestrutural do Metacaulim de alta reatividade.** UFMG, 2005. 95 pag.

GOMES, C.F. **Argilas - o que são e para que servem.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

GRIM, R.E. **Applied clay mineralogy.** New York: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1962.

HARA N.; YAMADA, H.; INOUE, K.; INOUE, N.; TSUNEMATSU, S.; NOMA, H. **Hydrothermal reactivity of rice husk ash and its use for calcium silicate products.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 1989. Proceedings....Trondheim, Norway: 3^o CANMET/ American Concrete Institute, v. 1, 1989, p 499-516.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito dacinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 1999.

HASSAN, K.E.; CABRERA, J.G.; MALIEHE, R.S. **The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete.** *Cement Concrete Composites*, v. 22, 2000. p 267-271

HE, C.; OSBAECK, B.; MARKOVICKY, E. **Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects.** *Cement and Concrete Research*, v. 25, p 1691-1702, 1995.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION (IS). **Specification for burnt clay pozzolan.**

IS 1344, New Delhi, 1968.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, Ed. Isaia, G. C. – São Paulo – IBRACON, 2005.

ISAÍA, G.C. **Ação física e pozolânica de adições minerais sobre a resistência mecânica do CAD.** In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29, 2000. Anais.... Punta del Leste, Uruguay: Institute de estructuras y transporte. CD-Room.

JONES, P. **What is micro silica concrete.** *Concrete*. v. 31, n. 4, 1997. p 12-13

KENDALL, A. **Brazil: dacing to a new tune.** *Industrial Minerals*, n. 350, 1996. p 21-38

KHATIB, J.M.; WILD, S. **Pore size distribution of metakaolin paste.** *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 10, 1996. p 1545-1553

KHAYAT, K.H.; AİTCIN, P.C. **Silica fume in concrete - An overview.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 4, 1992. Istambul, Turkey. *Proceedings....Detroit: (ACI Special publication, 132) v.2, 1993. p835-872*

KOSTUCH, J.A.; WALTERS, G.V.; JONES, T.R. **High Performance Concrete incorporating metakaolin – a review.** *Concrete 2000. University of Dundee: Sep, 1993. p 1799-1811*

- LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. 3^a ed. London: Chemical Publishing Company, Inc. 1971. p 1-10.
- LOLAND, K.E.; HUSTAD, T. **Silica in concrete: fresh concrete and methods of analyzing results**. Trondheim: cement and concrete research institute, Norwegian Institute of Technology, 1981. 23p. (Report, STF 065A81031).
- LOPES, A.N. de M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Dissertação de mestrado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 1999. 169 p
- LOUGHBROUGH, R. **Kaolin producer more upmarket**. *Industrial Minerals*, 1993. p51-69
- MALE, **Properties of microsilica concrete: An overview of microsilica concrete in the UK**. *Concrete*. London, v.23, n. 8, p 31-34, sep, 1989.
- MALHOTRA, V.M. **Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: A review**. *Concrete International*, v. 15, n.4, 1993. p 23-28
- MALHOTRA, V.M.; CARRETE, G.G. **Silica fume concrete-properties, applications, and limitations**. *Concrete International*, v.5, n. 5, 1983. p 40-46
- MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. **Role of sílica fume in concrete – a review**. In: *ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY*, 2, Ottawa: Energy Mines and Resources, 1994, p 915-990

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials.**

Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development.** *Concrete*

International, v.21, n 11, 1999. p 47-53

MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – Another**

look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 1989.

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

MEHTA, P.K. RAMACHANDRAN, V.S. **Mineral Admixtures.** In: *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology.* Noyes publications: Park ridge, 1984.

MORAES, M.F. **Algumas propriedades mecânicas do concreto com microssilica.** São Paulo, Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. 161p

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 2ª. edição, Editora PINI Ltda., São Paulo (1997).

PAULON, V.A., IBRAIM, F.L. **O efeito de adições na obtenção do concreto de alta resistência.** In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 37, 1995. Anais...Goiânia, v.2, 1995. p 493-506

- PERA, J.; AMROUZ, A. **Development of highly reactive metakaolin from paper sludge.** *Advanced Cement Based Materials*, n. 7, 1998. p 49-56
- POON, C.S.; LAM, L.; KOU, S.C.; WONG, Y.L.; WONG, R. **Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes.** *Cement Concrete Research*, v. 31, n. 9, 2001. p 1301-1306
- PORTELLA, K. F. **Controle da degradação de estruturas de concreto utilizadas no setor elétrico.** PDTI/COPEL, 1998; FINEP, 2000.
- RAMIREZ, M.V.V. **Estudo da influência da cura na resistência à compressão em concretos de alta resistência.** Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1993. 92p.
- RILEM TECHNICAL REPORTS. **Final Report: Siliceous by-products for use in concrete.** *Materials and Structures*, v. 21, n. 121, 1988. p. 69-80
- ROJAS, M.F.; CABRERA, J. **The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water system.** *Cement Concrete Research*, v. 32, n. 1, 2002. p 133-138
- ROJAS, M.I.S. de; FRÍAS, M.; RIVERA, J. **Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales.** *Materiales de Construcción*, v. 50, n. 260, 2000. p 39-48

SAAD, M.; ANDRADE, W.P.;PAULON, V.A. **Properties of mass concrete containing an active pozzolan made for clay.** *Concrete International*, v. 4, n. 7, p 59-65, 1982.

SABIR, B.B. **High-strength condensed silica fume concrete.** *Magazine of Concrete Research*, Sep, 1995, v. 47, n. 172, p 219-226.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. **Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review.** *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, 2001. p 441-454

SALVADOR, S. **Pozzolanic properties of flash-calcined kaolinite a comparative study with soak-calcined products.** *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 1, 1995. p 102-112

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 3v, 1992

SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo do hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios.** Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1999. 135p

SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. **Condensed silica fume in concrete.** In: MALHOTRA, V.M. *Supplementary cementing materials for concrete*, Ottawa, Canada: CANMET, 1987.

SENSALE, G.R.B. de. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz.** Porto Alegre. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2000. 181p.

SOUSA COUTINHO, A. **Fabrico e propriedades do betão.** LNEC – Lisboa 1974.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** Porto Alegre. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2003. 203p.

Supplementary cementing materials for concrete, Ottawa, Canada: CANMET, 1987.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry.** San Diego: Academic Press Inc., 1992.

WALTERS, G.V.; JONES, T.R. **Effect of metakaolin on alkali-silica (ASR) in concrete manufactured with reactive aggregate.** In: *DURABILITY OF CONCRETE: INTERNATIONAL CONFERENCE. Proceedings.. Montreal, Canada: V.M. Malhotra/ American Concrete Institute, (ACI SP- 126), v. 2, 1991. p 941-953.*

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssilica.** Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1991. 145p.

ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** São Paulo, Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da USP, 1989. 191p

ZHANG, M.H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V.M. ***Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste.*** *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 6, 1996. p 963-977

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. ***Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete.*** *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, 1995. .p1713-1725