

PAULO SÉRGIO LIMA SOUZA

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE METACALUM DE ALTA
REATIVIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTA
RESISTÊNCIA**

**Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia**

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre

2003

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Dr^a pela Universidade de São Paulo

Orientadora

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Jefferson Benedicto Libardi Liborio (UFSCar)

Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Maria Luiza Canas Martins (UCPel)

Dr. pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof. Angela Borges Masuero

Dr^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*ao meu pai, Antônio Paulo,
à minha mãe, Maria de Nazaré, e
à Ludmila, meu grande amor*

Agradecimentos

À Deus, a Nossa Senhora de Nazaré e a Santa Rita de Cássia, onde sempre encontrei o apoio necessário para as situações mais difíceis, por ter me dado o dom da vida e ter me proporcionado mais esta conquista.

À professora Denise Dal Molin, por quem tenho a maior admiração, pela orientação precisa e segura para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, irmãs, tias, tios, primos e primas, pelo incentivo, apoio, amor e carinho que sempre deram ao longo de minha vida, fundamentais para a realização deste trabalho.

À Ludmila, pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e paciência, demonstrados em todos os momentos, bem como pela contribuição profissional. EU TE AMO.

À professora Ângela Masuero, pela amizade e auxílio durante a realização dos ensaios.

Ao professor José Luiz Duarte Ribeiro (UFRGS) e a Giovana Pasa, pela orientação na análise estatística do experimento.

Ao professor Cláudio de Souza Kazmierczak, da UNISINOS, pela orientação na análise de porosimetria.

Aos professores, funcionários e bolsistas do LACER, LAPROM e do LASID que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao Fontes, Airton e Ederson do LEME, pela amizade, dedicação e eficiência no desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

Aos colegas Elvira, Fernanda, João Antônio, Marlova, Rômulo, Tamara da minha turma do mestrado do NORIE, pelo incentivo e amizade demonstrados durante este novo período de convivência.

Aos professores e colegas do NORIE, pelo convívio, incentivo e amizade demonstrados durante este período. Em especial a Adriana Guerra, Adriana Silveira, Aguida, Alexandre, Ana Paula, Daniel, Jairo, Martina, Lucília, Geilma, Marcos Guerreiro, Juliana, Diana, Cristine e Natalia, que através do debate, sugestões e bibliografias transmitidas, muito ajudaram na realização deste trabalho. Vou sentir saudade.

Aos bolsistas do NORIE, em especial ao Cleomar, Camile, Simone e Walter, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

À CADAM (Caulins da amazônia), a CAMARGO CORREA cimentos, a CIBRASA e a FOSROC REAX pelo fornecimento dos materiais, que possibilitaram a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Pará, principalmente ao Departamento de Construção Civil, pela liberação para a realização deste curso. Em especial aos colegas Salim, Elarrat, Perilo, Malaquias e Ronaldson, pelo incentivo e amizade sempre demonstrados.

Ao amigo André Cruz, do Núcleo de Habitação da Amazônia – NUHAM/UFPA, pelo incentivo e apoio demonstrados desde o início da minha vida acadêmica.

À Claudinha, secretária do NUHAM, pela amizade e apoio.

À Bibliotecária June Magda Sharnberg (UFRGS), pela competente revisão e formatação do texto e das referências bibliográficas.

Ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização de mais uma etapa da minha vida profissional.

Paulo Sérgio

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.4 HIPÓTESES.....	22
1.5 ABRANGÊNCIA DO TRABALHO.....	23
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
O USO DE ADIÇÕES NO CONCRETO.....	26
2.1 GENERALIDADES.....	26
2.2 BENEFÍCIOS DO EMPREGO DE POZOLANAS NO CONCRETO.....	29
2.3 PRINCÍPIO DE AÇÃO DAS POZOLANAS NO CONCRETO.....	30
2.4 POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS.....	33
2.4.1 Tipos de pozolanas altamente reativas.....	34
2.4.2 Características químicas.....	39
2.4.3 Características mineralógicas.....	40
2.4.4 Características físicas.....	41
2.5 EFEITO DAS POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS EM MATERIAIS A BASE DE CIMENTO.....	42
2.5.1 No estado fresco.....	43
2.5.2 No estado endurecido.....	48
O USO DO METACAULIM NO CONCRETO.....	58
3.1 HISTÓRICO.....	58
3.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO METACAULIM.....	60
3.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DO METACAULIM.....	65
3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO METACAULIM.....	66
3.5 EFEITO DA CALCINAÇÃO E MOAGEM NA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO METACAULIM.....	67
3.6 FONTES ALTERNATIVAS PARA A OBTENÇÃO DO METACAULIM.....	71
3.7 EFEITO DO METACAULIM DE ALTA REATIVIDADE (MCAR) EM MATERIAIS A BASE DE CIMENTO.....	75
3.7.1 No estado fresco.....	75
3.7.2 No estado endurecido.....	79

PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	87
4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	87
4.1.1 Ensaios Mecânicos.....	88
4.1.2 Ensaios na microestrutura.....	91
4.2 METODOLOGIA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	92
4.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	92
4.3.1 Cimento Portland.....	93
4.3.2 Agregado miúdo.....	93
4.3.3 Agregado graúdo.....	94
4.3.4 Água.....	95
4.3.5 Metacaulim de alta reatividade (MCAR).....	95
4.3.6 Aditivo Superplastificante.....	101
4.4 DOSAGEM DOS MATERIAIS.....	101
4.5 PRODUÇÃO E PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	103
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	104
5.1 CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	104
5.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	106
5.2.1 Resistência à compressão axial.....	107
5.2.2 Resistência à tração.....	117
5.2.3 Módulo de elasticidade.....	134
5.2.4 Coeficiente de Poisson.....	144
5.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DAS MISTURAS COM MCAR.....	145
5.3.1 Análise em MEV.....	145
5.3.2 Difração de raios-x.....	158
5.3.3 Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG).....	161
5.3.4 Titulometria.....	165
5.3.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	167
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	171
6.1 CONCLUSÕES.....	171
6.1.1 Em relação à resistência à compressão.....	171
6.1.2 Em relação à resistência à tração.....	172
6.1.3 Em relação ao módulo de elasticidade.....	174
6.1.4 Em relação ao coeficiente de Poisson.....	176
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	177
REFERÊNCIAS.....	178
ANEXOS	
ANEXO A - Estudo piloto com o uso da argila caulinítica calcinada.....	192
ANEXO B - Apresentação das curvas granulométricas obtidas através do diversos processos de moagem da argila calcinada.....	196
ANEXO C - Apresentação da composição e dos resultados de resistência das argamassas usadas no ensaio de determinação da atividade pozolânica com o cimento portland de alta resistência inicial (ARI) e com a cal, do metacaulim proveniente da calcinação de argilas cauliníticas.....	198
ANEXO D - Apresentação da composição e dos resultados de resistência das argamassas usadas no ensaio de determinação da atividade pozolânica com o cimento portland de alta resistência inicial (ARI) e com a cal, do metacaulim proveniente da calcinação do rejeito da indústria de papel.....	199

ANEXO E - Valores obtidos para a resistência à compressão com o uso do modelo.....	200
ANEXO F - Valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral com o uso do modelo.....	201
ANEXO G - Valores obtidos para a resistência à tração por flexão com o uso do modelo.....	202
ANEXO H - Valores obtidos para o módulo de elasticidade com o uso do modelo.....	203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Concentração do hidróxido de cálcio na zona de transição, em concretos com diferentes adições minerais (NIELSEN et al., 1993).....	31
Figura 2 Idade em que as adições passam a contribuir na resistência (MEHTA, 1994).....	32
Figura 3 Difrátograma típico da sílica ativa e da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).....	40
Figura 4 Comparação da distribuição granulométrica da sílica ativa e da cinza de casca de arroz com o cimento Portland.....	41
Figura 5 Comportamento da exsudação no concreto, com e sem o uso da sílica ativa (MALHOTRA e MEHTA, 1996).....	44
Figura 6 Comportamento do calor de hidratação do concreto, com e sem o uso de sílica ativa (ROY citado por DAL MOLIN, 1995).....	46
Figura 7 Comportamento do calor de hidratação no concreto, com o uso de cinza de casca de arroz, em concretos com relação água/(c+cca) de (a) 0,35 e (b) 0,47 (HWANG e WU, 1989).....	47
Figura 8 Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (DAL MOLIN, 1995).....	56
Figura 9 Estrutura cristalina da argila caulínica (GRIM, 1962).....	62
Figura 10 ATD e TG da argila caulínica usada para pozolana, após o tratamento térmico (BATTAGIN, 1987).....	69
Figura 11 Fluxograma do processo de beneficiamento de uma indústria exploradora de caulim localizada na região amazônica (BARATA, 1998).....	73
Figura 12 Comportamento do calor de hidratação em diferentes misturas (ZHANG e MALHOTRA, 1995).....	78
Figura 13 Comportamento da resistência à compressão, do concreto com sílica ativa e com o MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1995).....	82
Figura 14 Comportamento da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de sílica ativa e de MCAR (CALDARONE et al., 1994).....	83
Figura 15 Comportamento da resistência à tração, em concretos com MCAR e com a sílica ativa (CALDARONE et al., 1994).....	84
Figura 16 Comportamento da resistência à tração na flexão e na compressão diametral do concreto com sílica ativa e MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1995).....	85
Figura 17 Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com sílica ativa e com o MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1994).....	85
Figura 18 Comportamento do módulo de elasticidade de concretos com diferentes teores de sílica ativa e de MCAR (CALDARONE et al., 1994).....	86
Figura 19 A estrela e o cubo do projeto estatístico fatorial fracionado.....	88
Figura 20 Difração de raios-x do rejeito: (a) Material “in natura”; (b) Calcinado por 30 minutos; (c) Calcinado por 45 minutos; (d) Calcinado por 60 minutos.....	97
Figura 21 Curva TG e ATD do rejeito (a) antes da calcinação e (b) depois da calcinação por 60 minutos. (Condições do ensaio: atmosfera: nitrogênio, taxa de aquecimento: 10 °C/min, temperatura máxima: 1100 °C).....	98

Figura 22	Curvas granulométricas, diâmetro médio e superfície específica obtidos no estudo visando a definição do tempo extra de moagem. A) Moído por 90 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 30 minutos. B) Moído por 120 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 60 minutos. C) Moído por 180 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 120 minutos.....	99
Figura 23	Resistência à compressão em função do efeito isolado da: a) relação $a/(c+MCAR)$ b) Idade de rompimento.....	109
Figura 24	Resistência à compressão em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico f_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico f_c (idade de rompimento).....	110
Figura 25	Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição.....	112
Figura 26	Resistência à compressão em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico f_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico f_c (teor de substituição).....	113
Figura 27	Resistência à compressão em função da interação teor de substituição x idade de rompimento: a) gráfico f_c (teor de substituição) b) gráfico f_c (idade de rompimento).....	115
Figura 28	Resistência à tração em função do efeito isolado da: a) relação $a/(c+MCAR)$ b) idade de rompimento.....	121
Figura 29	Resistência à tração por compressão diametral em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico f_{tD} (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico f_{tD} (idade de rompimento) c) gráfico f_{tF} (relação $a/(c+MCAR)$) d) gráfico f_{tF} (idade de rompimento).....	123
Figura 30	Resistência à tração em função do efeito isolado do teor de substituição.....	124
Figura 31	Resistência à tração em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico f_{tD} (relação $a/(c+MCAR)$); b) gráfico f_{tD} (teor de substituição); c) gráfico f_{tF} (relação $a/(c+MCAR)$); b) gráfico f_{tF} (teor de substituição).....	127
Figura 32	Resistência à tração em função da interação teor de substituição x idade a) gráfico f_{tD} (idade); b) gráfico f_{tD} (teor de substituição); c) gráfico f_{tF} (idade); d) gráfico f_{tF} (teor de substituição).....	129
Figura 33	Comparação da relação f_{tD}/f_c obtida neste trabalho, com a obtida por outros pesquisadores e recomendada por algumas normas.....	133
Figura 34	Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da: a) relação $a/(c+MCAR)$ b) Idade de rompimento.....	136
Figura 35	Módulo de elasticidade em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico E_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico E_c (idade de rompimento).....	137
Figura 36	Módulo de elasticidade em função do efeito isolado do teor de substituição.....	138
Figura 37	Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico E_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico E_c (teor de substituição).....	140
Figura 38	Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição x idade de rompimento: a) gráfico E_c (teor de substituição) b) gráfico E_c (idade).....	141
Figura 39	Relação entre os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	143

Figura 40 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 100x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com relação a/(c+MCAR) de 0,25 b) À 1 dia, com a relação a/(c+MCAR) de 0,60 c) Aos 28 dias, com a relação a/(c+MCAR) de 0,25 d) Aos 28 dias, com a relação a/(c+MCAR) de 0,60 (4P agregado; 7P pasta; 8P vazio).....	146
Figura 41 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com a/c de 0,25 b) À 1 dia, com a/c de 0,60 c) Aos 28 dias, com a/c de 0,25 d) Aos 28 dias, com a/c de 0,60 (1⇒Ca(OH) ₂ ; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 6⇒etringita; 8⇒vazio).....	147
Figura 42 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 100x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com a relação a/(c+MCAR) de 0,25 b) À 1 dia, com a relação a/(c+MCAR) de 0,60 c) Aos 28 dias, com a relação a/(c+MCAR) de 0,25 d) Aos 28 dias, com a relação a/(c+MCAR) de 0,60 (3P Zona de transição; 4P agregado; 5P grão cimento anidro; 7P pasta).....	148
Figura 43 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,25 e teor de substituição de MCAR de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH) ₂ ; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 6⇒etringita).....	149
Figura 44 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,60 e teor de substituição de MCAR de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH) ₂ ; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 8⇒ vazios).....	150
Figura 45 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,25 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒ pasta).....	151
Figura 46 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 7⇒pasta; 8⇒vazio).....	152
Figura 47 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 1 dia, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH) ₂ ; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 8⇒ vazios).....	153
Figura 48 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 1 dia, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒ pasta; 8⇒vazios).....	154
Figura 49 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 14 dias, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH) ₂ ; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 8⇒ vazios).....	155
Figura 50 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 14 dias, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a)0% b)10% c)20% (3⇒Zona de transição; 4⇒agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒Pasta; 8⇒vazio).....	156

Figura 51 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 28 dias, relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1 \Rightarrow Ca(OH) ₂ ; 2 \Rightarrow C-S-H; 3 \Rightarrow Zona de transição; 4 \Rightarrow agregado; 6 \Rightarrow etringita; 8 \Rightarrow vazio).....	157
Figura 52 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 28 dias, relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a)0% b)10% c)20% (3 \Rightarrow Zona de transição; 4 \Rightarrow agregado; 5 \Rightarrow grão cimento anidro; 7 \Rightarrow Pasta; 8 \Rightarrow vazio).....	158
Figura 53 Difratogramas das pastas: (a) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 1º dia; (b) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 1º dia; (c) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 14º dia; (d) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 14º dia; (e) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 28º dia; (f) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 28º dia.....	159
Figura 54 ATD das pastas: (a) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 1º dia; (b) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 1º dia; (c) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 14º dia; (d) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 14º dia; (e) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 28º dia; (f) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 28º dia.....	162
Figura 55 TG das pastas. (a) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 1º dia; (b) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 1º dia; (c) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 14º dia; (d) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 14º dia; (e) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 28º dia; (f) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 28º dia.....	164
Figura 56 Consumo do Ca(OH) ₂ nas misturas com: (a) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 (b) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60.....	165
Figura 57 Valores de pH, medidos por titulometria, nas misturas com: (a) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 (b) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60.....	166
Figura 58 Valores do diâmetro médio dos poros: (a) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 1º dia; (b) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 1º dia; (c) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 14º dia; (d) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 14º dia; (e) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 28º dia; (f) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 28º dia.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação das adições minerais (RILEM, 1998).....	28
Tabela 2	Composição química típica da sílica ativa e da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).....	40
Tabela 3	Resultados obtidos na resistência à compressão do concreto, decorrente do uso da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).....	50
Tabela 4	Exigências químicas para pozolans do tipo do metacaulim.....	61
Tabela 5	Composição química típica do MCAR (MALHOTRA e MEHTA, 1996).....	61
Tabela 6	Exigências físicas para a pozolana comum, do tipo do metacaulim.....	66
Tabela 7	Principais produtores e principais reservas de caulim sedimentar (DNPM, 2001).....	72
Tabela 8	Variáveis analisadas no programa experimental dos ensaios mecânicos.....	89
Tabela 9	Combinação dos teores de substituição e relação $a/(c+MCAR)$	90
Tabela 10	Aleatorização da ordem de execução das betonadas.....	91
Tabela 11	Variáveis analisadas nos ensaios de microestrutura.....	92
Tabela 12	Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.....	93
Tabela 13	Características do agregado miúdo (areia).....	94
Tabela 14	Características do agregado graúdo (brita).....	94
Tabela 15	Características químicas e físicas do rejeito da centrífuga.....	96
Tabela 16	Características químicas e físicas do MCAR produzido.....	100
Tabela 17	Comparação das características químicas e físicas do MCAR, com as exigências normativas.....	100
Tabela 18	Atividade pozolânica do MCAR proveniente do rejeito.....	101
Tabela 19	Proporcionamento dos materiais para a produção do concreto.....	102
Tabela 20	Valores obtidos no estado fresco.....	104
Tabela 21	Níveis reais e codificados das variáveis independentes utilizadas.....	106
Tabela 22	Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, em MPa.....	107
Tabela 23	Valor-p dos termos do modelo para a resistência à compressão.....	108
Tabela 24	Análise de variância do modelo para a resistência à compressão.....	109
Tabela 25	Valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (ftD) e resistência à tração por flexão (ftF), em MPa.....	118
Tabela 26	Valor-p dos termos dos modelos para a resistência à tração.....	120
Tabela 27	Análise de variância do modelo para o ensaio de resistência à tração por flexão.....	120
Tabela 28	Análise de variância do modelo para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	120
Tabela 29	Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão.....	132
Tabela 30	Valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade, em GPa.....	134
Tabela 31	Valor-p dos termos do modelo para o módulo de elasticidade.....	135
Tabela 32	Análise de variância do modelo para o módulo de elasticidade.....	136
Tabela 33	Valores obtidos para o coeficiente de Poisson.....	144
Tabela 34	Perda de massa dos principais compostos das pastas estudadas.....	164
Tabela 35	Valores de porosidade total das amostras.....	167

RESUMO

Atualmente, tem-se cada vez mais adotado o uso de pozolanas de alta reatividade como ferramenta para a obtenção do concreto de alta resistência (CAR). As pozolanas de alta reatividade dividem-se em sílica ativa, cinza de casca de arroz e o metacaulim de alta reatividade (MCAR). O estudo focalizando o efeito da sílica ativa e cinza de casca de arroz no concreto já se encontra em estado adiantado, principalmente quando se refere à sílica ativa. Contudo, esta situação não se repete quando se focaliza o uso do MCAR, visto que o estudo em relação ao efeito deste material no concreto encontra-se em um estágio inicial, principalmente quando refere-se ao Brasil. O MCAR é oriundo do processo de calcinação em temperaturas entre 400°C e 950°C e posterior processo de moagem de argilas com altos teores de caulinita, como a argila caulínica e o caulim. A elevada finura obtida no MCAR é o principal diferencial deste material em relação ao metacaulim. Além destas argilas, tem-se também buscado atualmente o uso de outros materiais, como os resíduos provenientes da indústria do papel, para a produção do MCAR. Esta nova opção, além do resultado técnico, ainda apresenta como vantagem o caráter ecológico decorrente do uso de um resíduo industrial. Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o uso do MCAR, decorrente de resíduo industrial, nas propriedades mecânicas do concreto, mais especificamente na resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Na realização deste trabalho variou-se os teores de substituições de MCAR, as relações água/cimento e as idades de rompimento dos corpos-de-prova. A metodologia baseou-se em ensaios laboratoriais e no uso de ferramentas estatísticas para validação dos resultados. Em paralelo realizou-se um estudo da microestrutura utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura, a difração de raios-x, a análise termodiferencial e termogravimétrica, a titulometria e a porosimetria por intrusão de mercúrio, visando um melhor entendimento do comportamento obtido nos ensaios mecânicos. Com base nesses ensaios, foram propostas equações a partir dos parâmetros estudados, que indicaram, em todos os ensaios mecânicos realizados, melhorias decorrente do efeito pozolânico e filler do MCAR. A ratificação destes efeitos foi obtida nos ensaios realizados na microestrutura. Na comparação com os resultados relatados com o uso da cinza de casca de arroz e com a sílica ativa, obtidos em ensaios com metodologia e materiais semelhante, verificou-se um comportamento similar a estes materiais. Conclui-se com um resumo dos resultados obtidos neste trabalho que evidenciam claramente a possibilidade do uso do MCAR na produção do CAR.

ABSTRACT

Nowadays, the use of pozzolans of high reactivity as a tool to gain the high resistance concrete (HRC) is more and more adopted. The pozzolans of high reactivity are divided in silica fume, rice husk ash and the high-reactivity metakaolin (HRM). Regarding the silica fume and the rice husk ash, the study focusing the effect of this material in the concrete is already in advanced state, mainly when it is referred to the silica fume. However, this situation doesn't repeat when the use of HRM is focused, due to the study related to the effect of this material in the concrete is in a inicial stage, mainly when it is referred to Brazil. HRM is originated from the calcination process in temperatures between 400°C and 950°C and after process of milling clays with high kaolinite content, as the clay kaolinite and the kaolin. The high fineness obtained in HRM is the main differential of this material in relation to the metakaolin. Besides these clays, other materials are also looked for, like the residues coming from the industry of the paper, for the production of HRM. This new option, besides the technical result, still presents as advantage the ecological character due to the use of an industrial residue. In such case, the main objective of this work was to evaluate the use of HRM, due to industrial residue, in the mechanical properties of the concrete, more specifically in the compressive strength, tensile splitting strength, flexural strength, modulus of elasticity and ratio Poisson's. Doing this work, the content of substitutions of HRM was diversified, the water-to-cement ratio and the ages of breaking of the specimens. The used methodology was based on lab rehearsals and in the use of statistical tools to validate the results. Meanwhile a study of the microstructure being used the scanning electron microscopy (SEM) took place, the X-rays diffraction, the thermodiferencial and thermogravimetric analysis, the chemical titration analysis and the mercury intrusion porosimeter, seeking a better understanding of the behavior obtained in the mechanical rehearsals. Based in those rehearsals, equations were proposed to esteem the mechanical properties starting from the studied parameters. The study indicated that the use of HRM provides improvements in all the accomplished mechanical rehearsals, due to the effect pozzolanic and filler of this material. The ratification of these effects was obtained in the rehearsals accomplished in the microstructure. Compared to the results displayed with the use of the rice husk ash and with the silica fume, obtained in rehearsals with methodology and similar materials, a similar behavior was verified to these materials. It is concluded with a summary of the results obtained in this work that the possibility of the use of HRM clearly evident in the production of the concrete of high resistance.

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O concreto de cimento Portland, mesmo sendo o material manufaturado mais utilizado do mundo, sempre teve como uma das desvantagens a dificuldade em se ter resistências superiores a 50 MPa. Esta situação começou a sofrer alteração na segunda metade do século XX, face à necessidade de reconstrução após a 2ª guerra mundial e aos poucos recursos disponíveis. Este contexto, adicionado ao melhor conhecimento da estrutura interna do concreto e ao aparecimento de novos materiais proporcionou um crescimento considerável nas resistências mecânicas usadas nas estruturas de concreto armado. Daí, surgiu o que muitos pesquisadores denominam como “concreto de alta resistência” ou simplesmente CAR.

Segundo Peterman e Carrasquillo (1983), o CAR é o concreto com uma resistência à compressão maior que a comumente utilizada em determinada região. Esta definição, ainda segundo os autores, tem sido bastante aceita pelos engenheiros, visto que a máxima resistência do concreto pode variar de região para região. De acordo com o ACI 363 (1991), o CAR é definido como concreto com resistência à compressão, medida em cilindros, superior a 41 MPa, enquanto que a NBR 8953 (ABNT, 1992) classifica como concretos do grupo II, os que possuem resistência à compressão com valores superiores a 50 MPa. É oportuno destacar que a definição do CAR é diferente da colocada para o concreto de alto desempenho (CAD), que é definido, segundo Aïtcin (1998), como misturas que apresentam também melhoria em outras características, como trabalhabilidade e/ou estabilidade dimensional e durabilidade, dentre outras.

O uso do CAR em pilares de edifícios, segundo Freedman citado por Aïtcin (1998), teve origem nos Estados Unidos, mais especificamente na cidade de Chicago, na década de 60, visando sua aplicação em colunas de edifícios de grande altura. Esta aplicação fez com que o uso do CAR sofresse um grande impulso, havendo, a partir daquela época, uma gradativa substituição do aço, empregado neste tipo de construção, pelo CAR. Na década de 70, este processo de substituição também foi observado em outras cidades americanas como New York, Houston, Minneapolis, e em Melbourne, na Austrália (FIB/CEB, 1990; ACI 363, 1991).

Atualmente, constata-se também uma diversificação quanto ao uso do CAR na construção civil, o que tem se refletido na execução de pontes, viadutos e de estruturas *off-shore* para a extração de petróleo. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o uso do CAR nas estruturas *off-shore* visa não somente a melhoria da resistência do concreto e menor peso

próprio, mas também um aumento da durabilidade, face à exposição ao meio extremamente agressivo em que se encontra este tipo de estrutura.

No Brasil, apesar da execução de obras com a resistência média de 45MPa, como o museu de arte de São Paulo, na década de 60, observa-se que o uso do CAR na construção civil só teve maior impulso na década de 80, com a realização de obras em grandes cidades, como São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador, entre outras. Dentre essas obras, pode-se destacar o CNEC em São Paulo com 60 MPa, o edifício Suarez Trade em Salvador com 60 MPa e a recuperação da ponte Rio-Niterói no Rio de Janeiro (ROCHA, 1997). Quanto às pesquisas brasileiras sobre o CAR, observa-se também um incremento de trabalhos, principalmente a partir da década de 90. Segundo Dal Molin (1995), alguns destes trabalhos focalizaram o aspecto mecânico do CAR, contudo, a maior parte visou o estudo da durabilidade destes concretos.

O uso do CAR, além de proporcionar à construção civil um avanço tecnológico, pode ser mais vantajoso do ponto de vista econômico, quando comparado com o concreto de resistência convencional. O uso deste tipo de concreto na execução de edifícios altos permite reduzir as seções dos pilares dos andares inferiores, o que conseqüentemente resulta numa maior velocidade de execução, bem como na redução da carga permanente da estrutura e das fundações.

Esta situação pôde ser comprovada por Dal Molin e Wolf (1995) que compararam o custo da estrutura de um edifício de 15 pavimentos, quando o mesmo tinha um f_{ck} de 60 MPa (CAR) e quando possuía um f_{ck} de 21 MPa. Neste estudo, realizado no Rio Grande do Sul, avaliou-se o custo da mão-de-obra e do material, e verificou-se que o edifício com o f_{ck} de 60MPa apresentou um custo 12% inferior ao obtido com o edifício de f_{ck} de 21 MPa. Ressalta-se que não foram avaliadas pelos autores outras vantagens do CAR, como aumento da área para garagem e menor peso próprio da estrutura e fundações, dentre outras.

Em função dessas vantagens, o uso do CAR tem apresentado um crescente número de aplicações, tanto no Brasil quanto na Europa e nos Estados Unidos. Contudo, o seu uso ainda apresenta alguns problemas relacionados principalmente ao elevado consumo de cimento existente neste tipo de concreto. Segundo Neville (1997) e Mehta e Monteiro (1994), o elevado consumo de cimento tende a produzir altas temperaturas, que resulta no aparecimento de deformações de retração, seja química, de origem térmica ou por secagem. Esta situação normalmente leva ao aparecimento de uma rede de fissuras e microfissuras interconectadas, o que tende a diminuir a vida útil do CAR, pela ação dos agentes agressivos. É interessante destacar que tais conseqüências poderiam ser diminuídas ou até mesmo eliminadas com a

realização da cura; contudo, constata-se que pouco ou quase nenhuma atenção é dada a este procedimento.

Além destas conseqüências, devido ao elevado consumo de cimento no CAR, tem-se também o maior consumo de matéria-prima e de energia, que são necessárias para a produção do cimento, bem como a maior quantidade de poluentes lançados na natureza. Segundo John (1999), na realização da decarbonatação do calcário, necessária para a produção do cimento e da cal, há a liberação de grandes volumes de CO₂ para a atmosfera, que é o principal responsável pelo aquecimento global. Estas conseqüências vão de encontro à tendência mundial de diminuição da poluição e de conservação de recursos naturais, que objetivam a melhoria da qualidade de vida do ser humano.

Visando minimizar esses problemas, busca-se a produção do CAR com o auxílio de aditivos químicos e adições minerais. Com relação às adições minerais, justifica-se o seu uso principalmente pela sua reatividade e pelo fato desses materiais serem normalmente resíduos de processo industrial. Em função desta aplicação, este material passa a ter um uso nobre, evitando com isso o seu acúmulo, o que geralmente garante uma menor agressão ao meio ambiente. Este processo de transformação ocorreu com a sílica ativa, que inicialmente era classificada como um resíduo da produção das indústrias de silício metálico e de ligas de ferro silício. Contudo, as pesquisas visando a adequação do seu uso no concreto, a transformaram num sub-produto de grande interesse comercial.

Seguindo esta tendência, tem-se buscado novas adições minerais, entre as quais pode-se citar a cinza de casca de arroz e o metacaulim. As pesquisas em torno desta nova geração de adições, apesar de ainda encontrarem-se em um patamar inferior aos estudos com a sílica ativa, têm demonstrado resultados promissores, em algumas pesquisas preliminares, com relação ao seu uso como adição mineral no concreto (BARATA, 1998; SOUZA et al., 2000; ZHANG et al., 1996; MALHOTRA e MEHTA, 1996; PERA e AMROUZ, 1998).

1.2 Justificativa da pesquisa

Neste início de século XXI nota-se, em todos os setores produtivos, uma grande busca visando a aceleração do processo de industrialização. Esta situação, adicionado ao aumento da população e do consumo, resultou na maioria desses processos, um crescente surgimento de resíduos sólidos. Esta produção, via de regra, resulta em uma série de problemas ambientais, como poluição e desmatamento, entre outros. Segundo Nolasco e Agnesini (1993), a acentuação deste problema deveu-se a basicamente três fatores: aumento no número e variedade de produtos descartáveis, aumento na quantidade de resíduos associados a cada objeto produzido e a tendência para aglomerar certas operações produtoras de resíduos de

uma maneira tal que sobrecarrega qualquer processo natural de tratamento. Um caminho para reduzir o impacto destes resíduos tem sido obtido com o auxílio da indústria da construção civil, que segundo Cincotto (1988), apresenta grande potencial de utilização de resíduos sólidos.

Paralelo a esta potencialidade, observa-se também, por parte desta indústria, a necessidade cada vez maior de se fornecer condições ao concreto para que ele possa melhorar a sua eficiência face às imposições crescentes de desempenho estrutural e de durabilidade, a que ele é submetido. Esta necessidade tem se refletido no aumento do uso do CAR, através da melhoria das práticas construtivas, das técnicas de cálculo estrutural, maior conhecimento dos materiais que constituem o concreto, estudos mais detalhados do desenvolvimento das propriedades do concreto e a inclusão no concreto de adições minerais e aditivos químicos.

Com relação a opção por adições minerais para o aumento da resistência à compressão do concreto, esta pode ser justificada, em primeiro lugar, pelos sensíveis aumentos nesta propriedade do concreto. Em segundo lugar, pelo fato que normalmente estas adições são provenientes de resíduos industriais, sendo deste modo, uma alternativa para a diminuição do seu impacto danoso ao meio ambiente. Como exemplo desta situação, tem-se a sílica ativa.

A melhoria obtida com a inclusão da sílica ativa pode ser verificada em vários trabalhos científicos na área do concreto, como os de Dal Molin (1995), Mehta (1989), Carette e Malhotra (1993), entre outros. No trabalho de Dal Molin (1995), onde adotou-se a adição de 10% de sílica ativa, chegou-se a obter uma melhoria média, dentre as várias relações $a/(c+sa)$ estudadas, de aproximadamente 13,50% na resistência à compressão do concreto, ao vigésimo oitavo dia de idade. Além da melhoria na resistência, o uso desta adição tem proporcionado ao CAR uma menor quantidade de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que, segundo Aïtcin (1998), é o composto mais sujeito a sofrer lixiviação e ataques químicos.

A constatação dos benefícios do uso da sílica ativa fez com que o uso desta adição mineral apresentasse um grande impulso para a produção do CAR. Contudo, apesar da viabilização técnica do uso desta adição mineral na sua produção, tem-se ainda alguns empecilhos para uma plena utilização deste material no Brasil. Em primeiro lugar, tem-se o seu alto custo de transporte, decorrente principalmente da sua baixa massa específica. Em segundo lugar, a produção atual existente no Brasil não consegue suprir as necessidades do mercado, visto que ele é coletado em apenas três indústrias, fazendo com que haja dificuldade, em algumas situações, do aproveitamento desta adição no concreto, o que consequentemente tende a dificultar a difusão desta tecnologia e a obtenção do CAR em situações em que seja necessário o uso de adição mineral.

Outro ponto negativo apontado por Caldarone et al. (1994), com relação ao uso de sílica ativa, é o fato do uso desta adição mineral resultar em uma cor escura ao concreto, o que geralmente não é desejável quando se adota o concreto com fins arquitetônicos. É interessante ressaltar que com relação à sílica ativa produzida no Brasil, não se tem este resultado no concreto, visto que esta pozolana apresenta uma cor cinza claro.

Esta situação tem feito com que centros de pesquisa e universidades partam em busca de materiais alternativos, com o objetivo de suprir a falta deste produto para o uso no CAR. Como resultado deste esforço, tem-se conseguido gerar informações visando a utilização de novas adições minerais para o concreto, como a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

Estas novas pozolanas, mesmo apresentando excelentes resultados, fato que proporcionou, assim como a sílica ativa, a sua denominação de superpozolanas, ainda carecem de um melhor estudo que possibilite a completa viabilização técnica de seu uso para a produção do CAR. Com relação à cinza de casca de arroz, tem-se nesse caso um resíduo natural cujo o estudo com o objetivo de utilizá-lo como pozolana de alta reatividade se encontra bastante evoluído em nível de laboratório, estando deste modo, na etapa de transferência para o meio técnico desta nova tecnologia.

Quanto ao metacaulim, os estudos encontram-se em um estágio menos avançado, pois constata-se poucos trabalhos visando o uso desta adição ao concreto, principalmente no Brasil. Esta pozolana é uma adição mineral aluminossilicosa derivada normalmente da calcinação, entre 600°C e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as argilas caulínicas e os caulins. Segundo Barata (1998), alguns pesquisadores tendem a distinguir entre o metacaulim e o metacaulim de alta reatividade (MCAR), decorrente principalmente da maior finura do segundo. Trabalhos realizados por alguns pesquisadores (BARATA, 1998; PERA e AMROUZ, 1998) também relatam a possibilidade de obtenção desta pozolana através do uso de certos tipos de resíduos.

Apesar do estado inicial em que se encontra o estudo do concreto com o metacaulim de alta reatividade, Taylor e Burg (1999) e Baloch (1995) relatam outras vantagens, além da tecnológica, do seu uso em comparação a outras pozolanas de alta reatividade. Dentre estas vantagens, tem-se o fato do uso do MCAR pouco interferir na cor original do concreto, tornando-se deste modo atraente quando se visa a produção de concreto aparente. Outra vantagem deste tipo de pozolana é a necessidade de uma menor quantidade de aditivo superplastificante, em relação à sílica ativa, bem como a maior facilidade de acabamento, o que tende a diminuir o custo por metro cúbico do concreto com MCAR. Segundo Caldarone et al. (1994), estas vantagens fazem com que esta pozolana possa vir a apresentar um uso promissor quanto à sua aplicação em CAD ou CAR.

Como um dos poucos trabalhos científicos realizados no Brasil, apresenta-se o de Barata (1998), que focalizou o uso do MCAR no concreto produzido com os materiais (seixo e a areia muito fina) provenientes do estado do Pará. Neste trabalho, apesar de ter como objetivo principal o estudo da durabilidade do concreto, constatou-se aumentos, no vigésimo oitavo dia de idade, de até 64% na resistência à compressão, quando comparado com o concreto de referência. Estes resultados, mesmo com o uso do seixo encontrado na região norte, que é reconhecidamente um material de baixa resistência, quando comparado com a brita, evidenciam uma grande potencialidade no uso desta adição mineral, com vistas à obtenção de melhores resultados no que tange às propriedades mecânicas do concreto.

Além da produção do MCAR a partir de argilas, tem-se o fato que este também pode ser obtido através do tratamento de certos tipos de resíduos industriais, como o proveniente da indústria produtora de cobertura de papel, constituído basicamente de um caulim beneficiado de extrema alvura, finura e pureza. Como exemplo deste processo industrial, tem-se a indústria localizada a norte do estado do Pará, que atualmente realiza o depósito deste rejeito em lagoas preparadas para esta finalidade. Ocorre que pelo fato do seu volume ser significativo, estas lagoas transformaram-se em um problema ambiental de grandes proporções, visto que há a necessidade de imensas áreas de desmatamento para a execução das mesmas. Este resíduo, recebendo um beneficiamento, que consta de calcinação e moagem, transforma-se numa pozolana de elevada reatividade, ou seja, o MCAR (BARATA, 1998; FLORES, 1998).

Assim sendo, adotou-se neste trabalho, como matéria-prima para a produção do MCAR, o rejeito proveniente da indústria produtora de cobertura de papel. O uso deste material, além dos possíveis benefícios no que se refere à atividade pozolânica, ainda apresenta como vantagem o caráter ecológico decorrente do seu uso, haja vista que viabiliza tecnicamente o uso de um rejeito que atualmente tem provocado um grande impacto ambiental na região norte do estado do Pará. Este rejeito apresenta como principais características a elevada finura e pureza (alto teor de caulinita – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Acredita-se que os resultados obtidos neste trabalho possam fornecer informações para a viabilização do uso do MCAR proveniente de resíduo industrial no concreto, tornando, deste modo, este trabalho importante sob vários aspectos. Em primeiro lugar, por proporcionar ao meio técnico uma outra opção pozolânica ao concreto que possibilite alcançar altas resistências sem a necessidade de altos consumos de cimento. Em segundo lugar, por proporcionar informações que possam viabilizar o uso de um resíduo industrial, que atualmente tem se revelado um grande problema ambiental. Por último, pelo fato deste trabalho se constituir, em nível nacional, num dos primeiros em que se procura, através de um

estudo sistematizado, relacionar as propriedades mecânicas do concreto com o uso do MCAR, visto que ainda é muito reduzido o número de publicações sobre esta adição mineral no Brasil.

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem o objetivo principal de verificar as variações existentes nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência, decorrentes da inclusão do MCAR como adição mineral.

Especificamente, este trabalho tem o objetivo de verificar e de analisar as mudanças nas principais propriedades mecânicas do concreto com a inclusão do MCAR: resistência à compressão, resistência à tração (tração na flexão e tração por compressão diametral), módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, avaliando a influência da relação água/(cimento+adição), da idade e do teor de adição mineral, utilizando para isto as curvas de comportamento das variáveis consideradas no estudo. Deste modo, são descritos a seguir os objetivos específicos a serem obtidos com a realização deste trabalho:

- adequar e caracterizar o metacaulim visando a obtenção de uma pozolana de alta reatividade;
- estabelecer a correlação entre a resistência à compressão e as demais propriedades analisadas para o concreto com inclusão de MCAR;
- verificar se os parâmetros existentes referentes ao comportamento do concreto de alta resistência com outras pozolanas de alta reatividade, são ratificados quando se adota o MCAR como adição mineral;
- verificar as alterações na microestrutura do concreto, com o uso do MCAR.

1.4 Hipóteses

Para a realização deste trabalho, tem-se como hipótese principal que, através do uso do MCAR no concreto, pode-se produzir um CAR que apresente um comportamento similar, ou em alguns casos, superior aos produzidos com outras pozolanas altamente reativas, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

Como hipótese secundária, tem-se que o concreto com a inclusão do MCAR tende a apresentar uma correlação entre a resistência à compressão e as demais propriedades, similar ao comportamento observado no concreto com outras pozolanas de alta reatividade.

1.5 Abrangência do trabalho

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;
- variáveis independentes ou controláveis, como sendo os fatores que possam ter alguma influência na resposta a ser medida.

Com relação às variáveis de resposta, ou seja, as propriedades mecânicas que serão medidas no experimento, mesmo se estando ciente das carências relacionadas ao estudo do concreto com o MCAR, foi feita a opção pela análise de algumas de suas principais propriedades, como:

- resistência à compressão;
- resistência à tração por compressão diametral;
- resistência à tração na flexão;
- módulo de elasticidade; e
- coeficiente de Poisson.

Quanto às variáveis controláveis, novamente constata-se um grande número de variáveis que de uma maneira ou de outra tendem a ter alguma influência nas propriedades do concreto, tais como: relação água/cimento, 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 seu número, através da fixação de algumas variáveis, o que conseqüentemente resultou numa diminuição quanto ao número de informações a serem obtidas com este estudo. Optou-se pelas seguintes variáveis:

- **Relação água/ (cimento + MCAR):** devido a esta relação ser uma das que mais influencia o comportamento da resistência à compressão, bem como as demais propriedades do concreto.
- **Teor de adição mineral (MCAR):** por ser uma adição mineral em que os estudos ainda se encontram em fase bem superficial, foi feita a opção por valores que possam fornecer o maior número de informações possíveis sobre o comportamento desta adição sobre as propriedades mecânicas do concreto, bem como os que possam fornecer o teor ótimo deste tipo de adição mineral. Optou-

se também que a inclusão da adição mineral na forma de substituição em relação ao volume absoluto de cimento.

- **Idade de rompimento:** a opção por esta variável decorre da necessidade de um melhor conhecimento da evolução das propriedades mecânicas do concreto com o MCAR, visto que a sua inclusão pode influenciar no desenvolvimento das reações. Esta influência está diretamente relacionada à reação secundária que ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) produzido durante a hidratação do cimento.

Foi adotado o número de duas repetições para cada variável de resposta, o que resultou em um total de 1000 corpos-de-prova, o que poderia inviabilizar a execução do trabalho, principalmente por questões econômicas e de tempo. Esta situação tornou necessária a utilização de uma metodologia para o fracionamento dos experimentos. Esta metodologia permitiu a redução do número total de corpos-de-prova para aproximadamente 312, sem comprometer a sua análise final, pois a mesma será realizada em função do ajuste das curvas de comportamento.

Visando obter o conhecimento do comportamento da estrutura interna do concreto com esta adição mineral, foi realizado, em conjunto com os ensaios acima descritos, um estudo da microestrutura do concreto. Neste estudo foram utilizados a microscopia eletrônica de varredura (por elétrons secundários e retro-espalhados), a titulometria, a difração de raios-x, análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (TG) e a porosimetria por intrusão de mercúrio, que possibilitaram um melhor embasamento das análises realizadas nas variáveis de resposta.

Conforme citado anteriormente, são inúmeras as variáveis de resposta bem como os fatores que podem influenciar nestas variáveis, o que impossibilita um estudo completo sobre o uso desta adição mineral no concreto. Esta deficiência decorre do fato de que qualquer pesquisa sofre uma limitação, seja por questões econômicas ou de tempo, pois cada variável adicionada implica no aumento do número de ensaios.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, conforme segue:

O primeiro capítulo apresenta a introdução, onde constam a justificativa e a importância deste trabalho. Também são apresentados neste capítulo os objetivos, as hipóteses, a estrutura e a abrangência do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de pozolanas de alta reatividade no concreto, mostrando como podem influenciar na microestrutura do concreto, bem como os principais tipos e as principais características destas adições minerais. É enfocada também neste capítulo a influência das pozolanas altamente reativas nas propriedades do concreto no estado fresco e do endurecido.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso do metacaulim e do MCAR em concretos, mostrando a influência desta adição mineral nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, dando ênfase especial às propriedades mecânicas, visto que estas são o objeto da parte experimental deste trabalho. Este capítulo também focaliza as características necessárias para a utilização do metacaulim como pozolana de alta reatividade, bem como o processo de beneficiamento deste material com vistas à sua obtenção.

No quarto capítulo é descrita toda a parte experimental desenvolvida neste trabalho, mostrando a forma com que foram feitos o planejamento e a execução dos ensaios mecânicos e de microestrutura propostos, bem como os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados. Neste capítulo, também são definidas todas as variáveis utilizadas.

No quinto capítulo é realizada a análise dos resultados dos ensaios mecânicos e da microestrutura do concreto, bem como a correlação entre as propriedades avaliadas.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas nesta área.

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 AC, na Grécia, onde adotava-se 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 AC, para descrever as cinzas vulcânicas provenientes da vila de Pozzuoli, próxima à cidade de Nápoles.

Segundo Lea (1971), 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, Herculano, entres outras. Neste período 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 (1984), pozolanas provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa, oriunda da indústria metalúrgica, a cinza volante, oriunda das usinas termoelétricas, 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 e em temperaturas próximas à ambiente, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento. Esta reação secundária resulta, quando na produção de argamassas e de concretos, num 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, barragens e instalações portuárias e outras como as estruturas *off-shore*. Todavia, 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
- 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, através do processo de calcinação e moagem. As artificiais, também denominadas de subprodutos industriais, podem ou não necessitar de um tratamento (secagem, moagem) complementar para que venham a desenvolver atividade pozolânica.

Apesar do termo adição mineral ser via de regra relacionado à atividade pozolânica, há outras adições minerais que desenvolvem somente a atividade cimentante, enquanto outras, desenvolvem tanto a atividade pozolânica quanto a atividade cimentante. Na Tabela 1, é apresentada pelo RILEM (1998) uma classificação, quanto à atividade, das principais adições minerais em uso na produção do concreto. Nesta tabela é adicionado o metacaulim, que segundo Malhotra e Mehta (1996), também é classificado como uma pozolana de alta reatividade. Ressalta-se, contudo, que serão abordadas neste capítulo apenas as adições com alta atividade pozolânica, pelo fato de se enquadrarem na mesma classe da adição mineral estudada neste trabalho.

Tabela 1 Classificação das adições minerais (RILEM, 1998).

CLASSIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	CARACTERÍSTICA DAS PARTÍCULAS
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 e merinita.	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 45µm, (comumente 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 ₃ A; podem estar presentes cal livre e periclásio (MgO); CS e C ₄ A ₃ S podem estar presentes em carvões de elevado teor de enxofre. O carbono não queimado é comumente inferior a 2%.	Pó com 10-15% de partículas maiores do que 45µm, (comumente 300 – 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 limpas quanto as cinzas volantes de baixo teor de cálcio.
Pozolanas Comuns: (a) Cinza volante de baixo teor de cálcio (CaO< 10%) (b) Materiais naturais	Na maior parte 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 além de vidro de aluminossilicato.	Pó com 15-30% de partículas maiores do que 45µm, (comumente 250 – 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 abaixo de 45 µm, na maior parte, e têm textura rugosa.
Altamente pozolânicas: (a) Sílica ativa (b) Cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada. (c) Metacaulim	Sílica na forma amorfa Sílica na forma amorfa Aluminossilicato na forma amorfa	Pó fino constituído de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1µm. Superfície específica em torno de 20.000 m ² /kg. Partículas geralmente inferiores à 45µm. Altamente celulares com superfície específica de até 60.000 m ² /kg. Partículas com tamanho médio de 1,5µm. Superfície específica em torno de 16.800 m ² /kg.
Outras: Escória granulada de alto-forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escória, 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.

2.2 Benefícios do emprego de pozolanas no concreto

A adoção 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 no concreto de um material fino, tais 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 utiliza-se pequenos teores. Outra vantagem técnica do uso de pozolanas no concreto é o aumento da durabilidade e melhoria de suas propriedades mecânicas, abordadas nos itens 2.5 e 3.7.

Econômicos: No concreto, onde geralmente tem-se no cimento Portland o material com maior custo, a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta uma diminuição no consumo de cimento. Além da consequência monetária, o maior consumo de cimento ainda tem como agravante, o fato do grande consumo de energia elétrica utilizada para a sua produção. Assim sendo, a diminuição do uso do cimento resulta não somente em economia para a produção do concreto, mas principalmente economia de consumo de energia elétrica, um dos grandes problemas dos dias atuais. Por outro lado, grande parte das pozolanas utilizadas no concreto são derivadas de resíduos industriais, fazendo com que o uso destes materiais necessite de pouco ou nenhum custo adicional para o seu uso 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 custos e de energia. No caso de pozolanas com alta reatividade, a substituição tende a ocorrer em teores que se situam em torno de 10%.

Ecológicos: Normalmente, como citado anteriormente, grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais. Na maioria destes resíduos, constata-se a grande presença de elementos poluentes que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana. Neste contexto, as pesquisas visando a utilização destes materiais como pozolanas, acima de tudo, visam fornecer uma maneira de evitar uma agressão ao meio ambiente, visto que geralmente estes materiais são depositados em rios, campos e lagoas, quando não se dispõe de um uso para estes resíduos. Hamilton e Sammes (1999) relata que a construção civil, em especial a produção do concreto, apresenta-se como uma excelente opção para o uso destes materiais, visto que os metais existentes podem ser aprisionados pelos 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 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 toneladas de calcário e consideráveis consumos de combustível, além de também resultar na emissão de 1 tonelada de dióxido de carbono 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 de 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 num total de 20% da sua própria massa (SABIR et al., 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 o hidróxido de cálcio 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 silicatos e 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/ou 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), através do uso de difratogramas de raios-x, verificou, já nas primeiras idades, 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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, onde concluiu que o uso destas adições minerais resultam numa diminuição máxima do pH do concreto de 13 para 12.

A redução da concentração do hidróxido de cálcio, devido à reação pozolânica, se faz presente principalmente na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Bentz e Garboczi (1991), relacionando o comportamento da zona de transição com a inclusão de pozolanas altamente reativas, ratificaram este efeito. A figura 1, apresentada por Nielsen et al. (1993), ilustra esta situação.

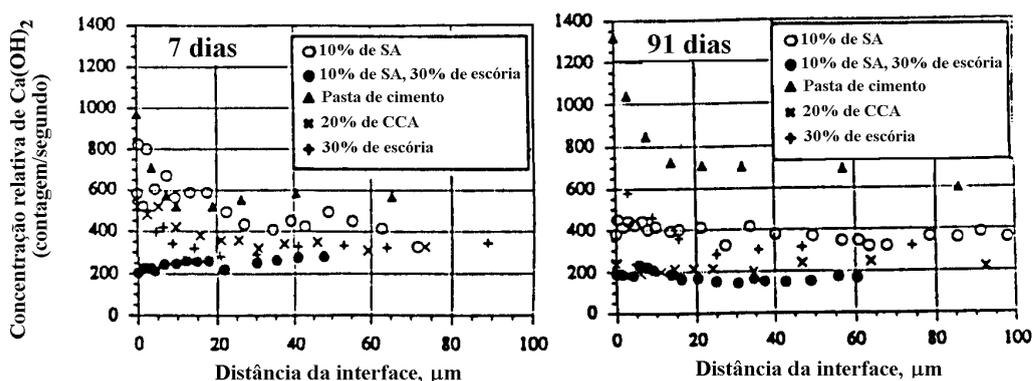


Figura 1 Concentração do hidróxido de cálcio na zona de transição, em concretos com diferentes adições minerais (NIELSEN et al., 1993).

Com relação à velocidade com que se processa essa ação química, observa-se que ela não é um fator constante nas pozolanas. A figura 2, apresentada por MEHTA (1994), mostra o momento em que algumas pozolanas passam a contribuir na resistência do concreto, o que evidencia claramente que a adoção das pozolanas altamente reativas pode ocasionar rápidas reações, o que de certo ponto torna desnecessário longos períodos de cura para este tipo de concreto, visto que o mesmo adquire rapidamente a resistência especificada.

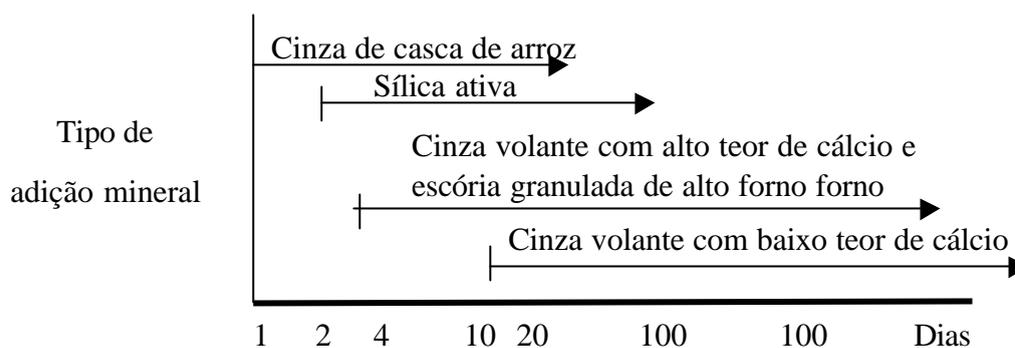


Figura 2 Idade em que as adições passam a contribuir na resistência (MEHTA, 1994).

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, que vão do primeiro ao sétimo dia, 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.

No caso da cinza de casca de arroz, também observam-se variações no que se refere ao início das reações pozolânicas. Khan et al. (1985) observaram que 52% da sílica encontrava-se consumida ao vigésimo oitavo dia de idade, e através do uso da difração de raios-x e da análise termogravimétrica (ATG), constataram que o conteúdo de Ca(OH)_2 nunca foi superior a 3%. Nesta pozolana de alta reatividade, as variações têm origem nas condições de formação da cinza, como tempo e temperatura de queima, e nas suas características físicas, como por exemplo a finura, que são obtidas depois do processo de moagem (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Apesar destes fatores poderem provocar alterações em sua reatividade, o uso da cinza de casca de arroz geralmente resulta numa reação rápida.

Numa comparação entre a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, verifica-se uma maior taxa de reação da segunda, o que segundo Mehta (1984) tem origem na sua alta área superficial quando comparada com a densa textura superficial da sílica ativa, embora ambas tenham condições de alcançar altas resistências. Este comportamento diferenciado da sílica ativa, segundo Isaia (1995), tem origem no fato da mesma ser oriunda de resfriamento rápido de gotas fundidas a altas temperaturas, o que resulta numa menor permeabilidade da superfície dos grãos, necessitando de um período maior de indução para que a sílica amorfa seja atacada pelos compostos alcalinos. Na cinza, devido à sua produção ser desenvolvida a

baixas temperaturas, tem-se como resultado uma superfície microporosa, não sendo deste modo necessário o período de indução para que ocorram as reações superficiais. Contudo, algumas pesquisas desenvolvidas no Brasil, como a realizada por Dal Molin (1995) e por Sensale (2000) com a sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, respectivamente, não ratificaram este comportamento.

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

- a) aumento da densidade da mistura pelo maior preenchimento dos vazios, decorrente principalmente das minúsculas partículas destas pozolanas, normalmente mais finas que as partículas de cimento. Este efeito é definido como microfíler;
- b) um 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. Trabalhos com uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz ratificam o refinamento dos poros e dos produtos de hidratação do cimento (BENTZ e GARBOCZI, 1991; MALHOTRA e MEHTA, 1996);
- c) 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 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 (efeito microfíler) 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 silício-metálico, 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 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, tem-se a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim de alta reatividade (MCAR).

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 et al. (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 de níveis elevados de temperatura 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 microssílica e sílica fume, contudo, a NBR 13956 (ABNT, 1997) estabeleceu 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 encontra-se em torno de 1 milhão de toneladas, sendo os maiores produtores a Noruega e os Estados Unidos. No Brasil, segundo Kulakowski (2002), a capacidade potencial no ano de 2001 ficou em torno de 100 mil toneladas.

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 et al., 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.

Nesta nova etapa da pesquisa com estas pozolanas, destacam-se as conferências internacionais promovidas pelo ACI/CANMET, que eram realizadas a cada 3 anos e denominadas INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLLANS IN CONCRETE. Na sua primeira edição, realizada na cidade de Montebello, no Canadá, no ano de 1983, obteve-se um total de 62 trabalhos; desses, somente 17 abordavam a adoção da sílica ativa, o que representou 27% de todos os trabalhos. Face aos excelentes resultados iniciais obtidos no concreto com a sílica ativa, verificou-se uma crescente busca em aumentar o conhecimento sobre este assunto, o que pôde ser refletido na quarta edição desta conferência, ocorrida em Istambul, onde 37% dos trabalhos apresentados abordaram a utilização de sílica ativa no concreto. Esta nova etapa foi complementada por vários outros congressos, em nível internacional, que também abordavam o uso da sílica ativa.

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 ELKEM MICROSSÍLICA; contudo, foi no 8th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT 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, 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, 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 Müller (1999), Dal Molin (1995), Moraes (1990), Ramires (1993) e Vieira (1994); e outros que abordavam o aspecto da durabilidade, como o de Hasparyk (1999), Wolf (1991), Kulakowski (1994), Fornasier (1995), Isaia (1995) e Lopes

(1999), que tiveram um grande papel na consolidação do conhecimento com relação a este assunto.

b) Cinza de casca de arroz

Segundo Mehta (1992), o arroz contém grandes quantidades de silicatos, principalmente em sua casca, que apresenta em sua composição teores de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra. Segundo Houston (1972), o silício contido na casca de arroz apresenta uma forma amorfa hidratada de sílica, com uma estrutura em estado similar ao vítreo (opalina) ou na forma de gel. Este material representa um sério problema para a operação de beneficiamento do arroz, visto que se produz na ordem de 200 kg de casca para cada tonelada de arroz produzido. Segundo Souza et al. (2000), tem-se uma produção mundial de casca de arroz de 80 milhões de toneladas por ano; no Brasil esta produção fica em torno de 2 milhões de toneladas.

Nesta situação, a cinza de casca de arroz tem substituído o carvão mineral, como fonte de energia para as centrais termoelétricas, onde aproximadamente 20% da casca é transformada em cinza, sendo que a celulose e a lignina são removidas durante a queima (MALHOTRA e MEHTA, 1996). De acordo com o volume de casca de arroz produzido, constatou-se que se pode obter um total de 16 milhões de toneladas de cinza anualmente, daí a necessidade de se buscar uma aplicação para este rejeito.

No processo de queima desta cinza, a fixação da temperatura tem como objetivo principal a manutenção da sílica em seu estado amorfo, visto que na forma cristalina, além de ser prejudicial à saúde humana, apresenta elementos tais como a cristobalita e a tridimita, que tornam a sílica não reativa. Dass (1983) focalizou o estudo da temperatura de queima, onde constatou um ponto crítico, em relação a esta temperatura, em que a cinza passa a se tornar cristalina e não reativa. Neste trabalho, o autor analisa cinzas obtidas em temperaturas de queima variando de 500 °C à 1000 °C, onde conclui que as cinzas produzidas através de temperaturas inferiores à 700°C tendem a apresentar alta reatividade.

Devido ao processo de queima, a cinza de casca de arroz, via de regra, apresenta uma cor escura, decorrente da presença de certo teor de carbono. Esta cor tende a ficar mais forte com o aumento do teor de carbono, que está diretamente relacionado à quantidade de matéria orgânica não queimada. A obtenção de cinza de casca de arroz na cor rosa-branca é resultado de altas temperaturas e longos períodos de exposição e indicam a presença de sílica na forma cristalina: cristobalita e tridimita (SENSALE, 2000).

Com a obtenção de uma estrutura amorfa, ainda há a necessidade de posteriormente ser realizada a moagem desta cinza, visando proporcionar ao material uma menor

granulometria. Mesmo com o processo de moagem, não se constata neste material, partículas tão finas quanto as verificadas na sílica ativa; contudo, a alta reatividade deste rejeito é mantida pela sua microporosidade e pela alta superfície específica. Silveira et al. (1996), estudando a produção da cinza de casca de arroz, constatou a importância do controle sobre a queima e a moagem deste material, para que o material possa desenvolver elevada atividade pozolânica.

Com a perspectiva do uso deste resíduo na produção do concreto, verifica-se a partir da década de 70 o surgimento de publicações não somente com a intenção do aproveitamento do material, mas também com o objetivo de atingir altas resistências. Deste modo, os institutos de pesquisas localizados em países onde há uma grande produção deste rejeito, como Índia e Tailândia, iniciaram trabalhos com o objetivo do seu aproveitamento em concretos e argamassas. Ressalta-se, segundo Houston (1972), que os estudos de aproveitamento deste rejeito já datam de mais de cem anos, porém, como não era realizado o controle da queima, não se conhecia a sua potencialidade pozolânica.

Num primeiro momento, esta busca tinha como principal objetivo estudar a redução da expansão devido à reação álcali-agregado e a diminuição do calor de hidratação, pela inclusão da cinza de casca de arroz no concreto. Como exemplo, apresenta-se o trabalho realizado por Mehta e Pirtz (1978), sobre o seu uso na produção de concreto massa. Com base nas publicações sobre o uso da cinza de casca de arroz no concreto, a RILEM (1988) a inclui em sua tabela de classificação para as adições minerais para uso no cimento e no concreto, como altamente pozolânica. No caso da cinza de casca de arroz, o crescimento do conhecimento também pode ser refletido pelo maior número de trabalhos apresentados em congressos, bem como nos eventos científicos (UNIDO/Conference on Rice Processing, Madras-Índia, 1971; Rice By-Products Utilization, Valência- Espanha, 1974) realizados sobre este assunto, nas décadas de 70 e 80.

Na década de 90, com a crescente busca por melhoria nas resistências e na durabilidade do concreto, as publicações com relação à adoção da cinza de casca de arroz visaram, via de regra, a sua aplicação como adição mineral para a produção do CAD. Mesmo em menor escala, quando comparado com a sílica ativa, constatou-se trabalhos que focalizaram o estudo das propriedades mecânicas do concreto com a cinza de casca de arroz, onde foi verificado aumento na resistência à compressão e diminuição na resistência à tração por compressão diametral (SENSALE, 2000).

No Brasil, mesmo sendo o nono produtor mundial de arroz, ainda é pequena a iniciativa visando a sua adoção como pozolana para a produção do cimento e do concreto, o que pode ser refletido pelo reduzido número de pesquisas sobre o assunto. Como resultado

desta situação, segundo Prudêncio e Santos (1996), tem-se verificado a sua colocação, de forma clandestina, em terrenos baldios e em rios. Contudo, a partir da metade da década de 90, constatou-se uma maior preocupação neste sentido, que originou um aumento nas pesquisas científicas sobre o assunto. Estas pesquisas focalizaram tanto o aspecto mecânico como o de durabilidade destes concretos, como por exemplo os trabalhos realizados por Isaia (1995), Sensale (2000), Prudêncio e Santos (1996), Silveira (1996), Dáfico (2001), Weber (2001) e Souza et al. (2000).

Dentre estas novas pesquisas no Brasil que focalizaram o uso da casca de arroz, destaca-se a realizada por Souza et al. (2000). Neste trabalho, a casca de arroz é colocada numa autoclave para ser lavada com ácidos a uma temperatura controlada, para a perda dos sais, sendo posteriormente calcinada a aproximadamente 500 °C e desagregada em moinho de bolas, tendo-se como resultado, segundo os autores, uma sílica na forma mais pura e branca. No uso deste material em pastas, teve-se no vigésimo oitavo dia de idade, com o uso de um teor de adição de 10% sobre a massa de cimento, melhorias de aproximadamente 190% e 75%, em relação a pasta de referência e a pasta com 10% de sílica ativa, respectivamente.

c) Metacaulim

A primeira forma de obtenção desta pozolana foi proveniente da calcinação de argilas cauliníticas. Recentemente, segundo Malhotra e Mehta (1996), tem-se também obtido esta pozolana através da calcinação, em baixas temperaturas, e da moagem de argilas especiais como o caulim muito puro. 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 metacaulim de alta reatividade. 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 et al. (1994) e Zhang e Malhotra (1995). No Brasil, mesmo apresentando uma grande potencialidade para o uso do metacaulim no concreto, tem-se observado poucos trabalhos sobre o assunto. Dentre estes, pode-se destacar os realizados por Zampieri (1989), que estudou o metacaulim proveniente de argilas cauliníticas calcinadas e por Barata (1998), que estudou o rejeito da indústria papelreira para a produção do MCAR.

Contudo, face ao uso desta pozolana no concreto se constituir no assunto principal da pesquisa, optou-se por apresentar no capítulo seguinte, o estado da arte referente ao emprego do MCAR na produção de concretos, especialmente nos de altas resistências.

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 concreto. No Brasil, a NBR 13956 (ABNT, 1997) também fixa o teor mínimo de 85% para o SiO_2 não cristalina.

Com relação à cinza de casca de arroz, os teores de sílica apresentam valores que variam de 90% a 95%, de acordo com o seu processo de queima (temperatura e tempo de queima). Houston (1972), estudando a composição química de diversas cinzas, originárias de vários países do mundo, e Hwang e Wu (1989), estudando a cinza de casca de arroz de Taiwan, queimada a diversas temperaturas, chegaram a poucas variações quanto aos elementos químicos e a teores de sílica entre 88% e 97%. Segundo Sensale (2000) e Silveira et al. (1996), 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 2, o teores típicos dos principais elementos que constituem a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

Tabela 2 Composição química típica da sílica ativa e da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Álcalis	Perda ao fogo
Sílica ativa da indústria silício-metálico	94,00	0,06	0,03	0,50	1,10	0,10	2,50
Sílica ativa da indústria ferro-silício 75%	90,00	1,00	2,90	0,10	0,20	2,20	2,70
Sílica ativa da indústria ferro-silício 50%	83,00	2,50	2,50	0,80	3,00	2,30	3,60
Cinza de casca de arroz	92,15	0,41	0,21	0,41	0,45	2,39	2,77

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 SiO₂ 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 Si-O₂, que se origina na condensação do material submetido à fusão. A desordem na estrutura Si-O₂ da sílica ativa também é constatada na cinza de casca de arroz, quando queimada sob temperaturas controladas. Com relação à cinza de casca de arroz, de acordo com Malhotra e Mehta (1996), existe normalmente a presença, na ordem de 1-2%, de impurezas cristalinas de cristobalita. Na sílica ativa estas impurezas variam com o seu tipo. Malhotra e Mehta (1996) apresentam na figura 3, como exemplo deste tipo de estrutura, o difratograma de raios-x típico da sílica ativa e da cinza de casca de arroz.

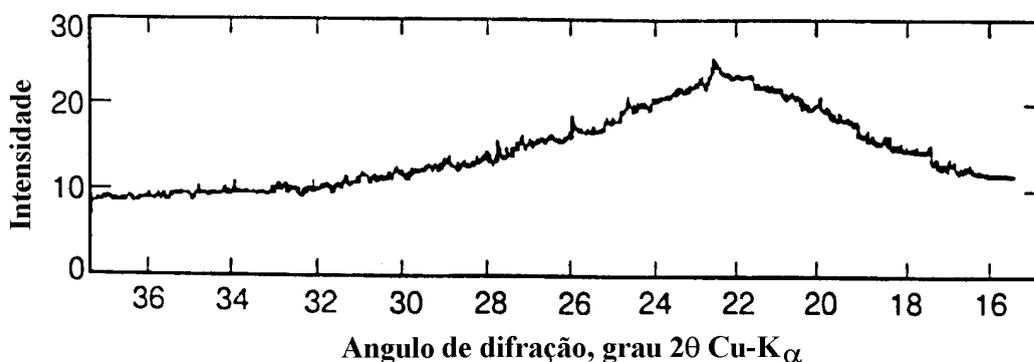


Figura 3 Difratograma típico da sílica ativa e da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

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 0,1 μm a 1 ou 2 μm , sendo, deste modo, em média, 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 uma maior finura, quando comparada com a oriunda da indústria de ferro-silício. Quanto ao diâmetro das partículas, a NBR 13956 (ABNT, 1997) fixa o valor máximo de 10%, para o retido na peneira 45 μm .

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

No caso da cinza de casca de arroz tem-se, conforme Malhotra e Mehta (1996), o diâmetro médio das partículas variando de 6 a 10 μm . Na figura 4 é apresentada uma comparação da distribuição granulométrica da sílica ativa e da cinza de casca de arroz com a do cimento Portland.

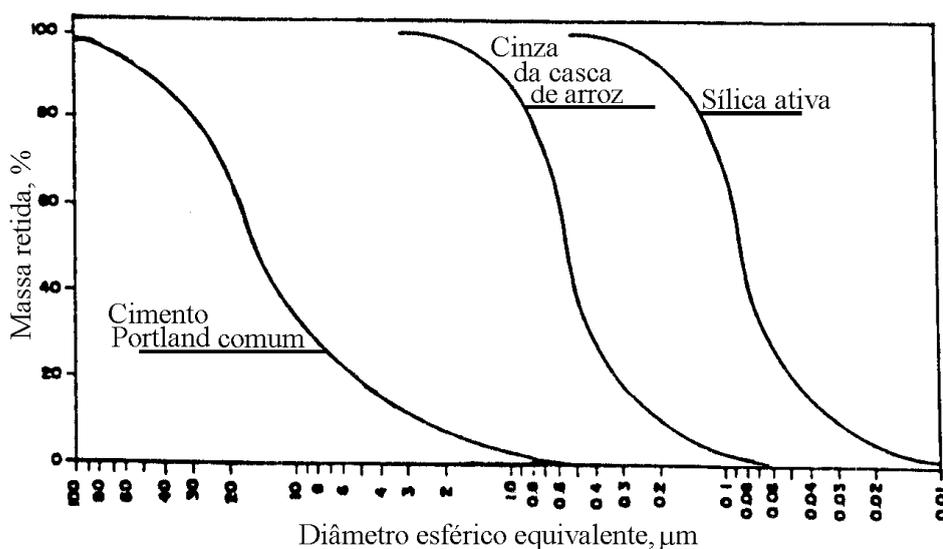


Figura 4 Comparação da distribuição granulométrica da sílica ativa e da cinza de casca de arroz com o cimento Portland.

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, fica entre 15.000 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 345 m²/kg. Na cinza de casca de arroz, esta característica apresenta valores ainda maiores, que variam de 50.000 a 60.000 m²/kg, resultado de sua característica microporosa e da sua superfície interna (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

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 verifica-se a forma esférica desta pozolana. Segundo Mehta (1984), diferentemente da sílica ativa, as partículas da cinza de casca de arroz têm uma forma angular e altamente porosa, que tem como causa o processo de queima, sob temperatura controlada, e o processo de moagem a que o material é submetido. O conjunto de características físicas da cinza de casca de arroz evidencia, no caso deste material, que a sua reatividade não é reflexo do tamanho das partículas mas da porosidade interna de cada uma.

Na cinza de casca de arroz, a microporosidade aparece como a característica dependente do processo de combustão. Segundo Hara et al. (1989), com uso da microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, constatou-se grandes diferenças neste material, quando é queimado em temperaturas distintas. Em menores temperaturas, inferiores a 800°C, tem-se a presença de uma estrutura mais porosa, enquanto que em faixas maiores, de 800 a 1100°C, tem-se observado uma estrutura mais densa. Segundo o autor, a variação é resultado da maior aglomeração dos poros internos da pozolana, exposta a maiores temperaturas, o que tende a diminuir a sua microporosidade e a superfície específica.

2.5 Efeito das pozolanas altamente reativas em materiais a base de cimento

Conforme descrito anteriormente, a introdução no concreto de pozolanas altamente reativas resulta em uma série de alterações em suas propriedades, tanto no estado fresco como 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 sofrem influência 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 principal desta pesquisa.

2.5.1 No 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 utilizou-se 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, pois 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.

Quanto à cinza de casca de arroz, estudos feitos por Zhang et al. (1996), utilizando também teores de adição na ordem de 10%, constataram haver aumento da demanda de água e conseqüente necessidade de aditivos superplastificantes. No caso da cinza, estes resultados deveram-se principalmente à elevada área específica, ao alto teor de carbono e a forma não esférica do grão.

De um modo geral, é consenso entre os pesquisadores que a maior necessidade de água, devido à inclusão de pozolanas altamente reativas, pode ser 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 uma 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. A diminuição da exsudação obtida com a inclusão de pozolanas altamente reativas pode ser verificada na figura 5, que é apresentada por Malhotra e Mehta (1996), utilizando os resultados obtidos por Bilodeau, em misturas com a adição de sílica ativa.

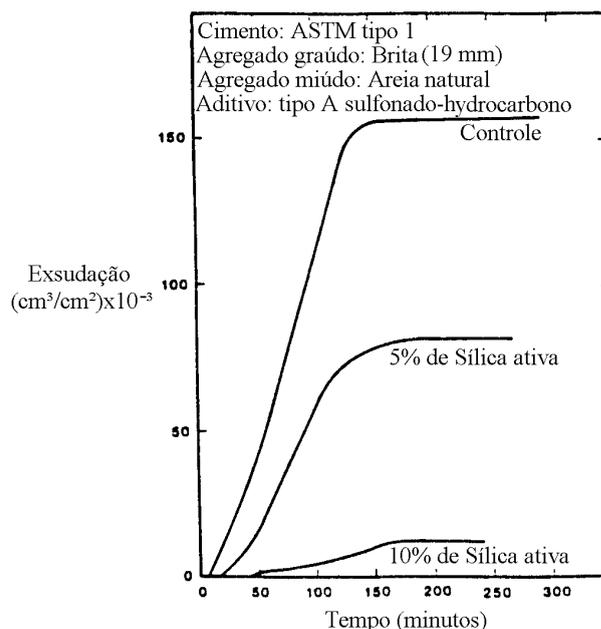


Figura 5 Comportamento da exsudação no concreto, com e sem o uso da sílica ativa (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

A melhoria obtida com a sílica ativa também é observada quando do uso da cinza de casca de arroz. Zhang et al. (1996), utilizando esta pozolana no teor de 10% e com a relação água/(c+cca) na ordem de 0,30, constataram a quase inexistência de exsudação, em comparação à mistura de referência. Hwang e Wu (1989), em pesquisas que focalizaram o uso da cinza em pastas de cimento, chegaram à conclusão que a exsudação é inversamente proporcional ao consumo de cinza, por parte da mistura.

O aumento da coesão em situações em que haja a necessidade de bombeamento, tem uma importância considerável. Contudo, segundo Khayat e Aïcin (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 altos valores para o abatimento inicial.

c) Calor de hidratação

Um dos grandes problemas para a obtenção do CAR é a necessidade de altos consumos de cimento, que além de provocar uma elevação de custos, resulta também num grande aumento do calor de hidratação, o que, na maioria dos casos, pode trazer prejuízo ao desempenho do concreto. Segundo Neville (1997), tal fenômeno tem como origem as reações químicas exotérmicas existentes no processo de hidratação do cimento e a baixa condutividade térmica do concreto, tornando-o praticamente um isolante, o que pode acarretar um considerável aumento da temperatura interna do concreto, podendo gerar fissuras, principalmente em grandes volumes.

Com este panorama, a introdução das pozolanas comuns, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), tem como um dos objetivos fornecer condições que visem a diminuição da temperatura, em uma relação quase que diretamente proporcional à quantidade de cimento Portland substituído por pozolanas comuns. Ainda segundo os autores, o seu uso em concreto pode diminuir à metade o calor de hidratação, em comparação ao observado no processo de hidratação do cimento Portland sem esta adição mineral.

Entretanto, com a utilização de pozolanas de alta reatividade no concreto, esta situação não se mantém, pois segundo Malhotra (1993), verificou-se que estas adições geralmente não oferecem a possibilidade de diminuição do calor de hidratação, sendo contudo, um assunto que ainda está sendo pesquisado. A situação diferenciada ocorrida com a inclusão de pozolanas altamente reativas decorre do fato de suas características químicas e físicas, como a elevada superfície específica, influenciarem na cinética de hidratação do cimento, acelerando este processo.

Dal Molin (1995), com o objetivo de explicar a influência das pozolanas altamente reativas, mais especificamente a sílica ativa, na cinética de hidratação do cimento, transcreve o relato de Roy:

“Logo após a mistura com a água, os íons Ca^{2+} da fase líquida da pasta são absorvidos à sílica ativa e tendem a iniciar a nucleação do C-S-H na sua superfície. O íon Ca é dissolvido ativamente do silicato tricálcico, e a sua absorção na superfície da sílica reduz a concentração do íon Ca na fase líquida, sendo a hidratação do C_3S no estágio

inicial acelerada. Ao mesmo tempo, o conteúdo de CaSO_4 é também reduzido, tornando a hidratação do C_3A e C_4AF acelerada.”

Este fenômeno pode ser verificado na figura 6, apresentada por Roy citado por Dal Molin (1995), que mostra a influência de diferentes teores de adição de sílica ativa no processo de hidratação do cimento. O aumento do calor de hidratação decorrente do uso de sílica ativa também foi relatado por Dahl e Meland (1989). Por outro lado, Frias et al. (2000), estudando argamassas com 10% e 30% de sílica ativa, constataram que o máximo calor de hidratação ocorre entre 15 e 20 horas de hidratação, sendo que somente a argamassa com 10% de sílica ativa apresentou o calor de hidratação superior a de referência.

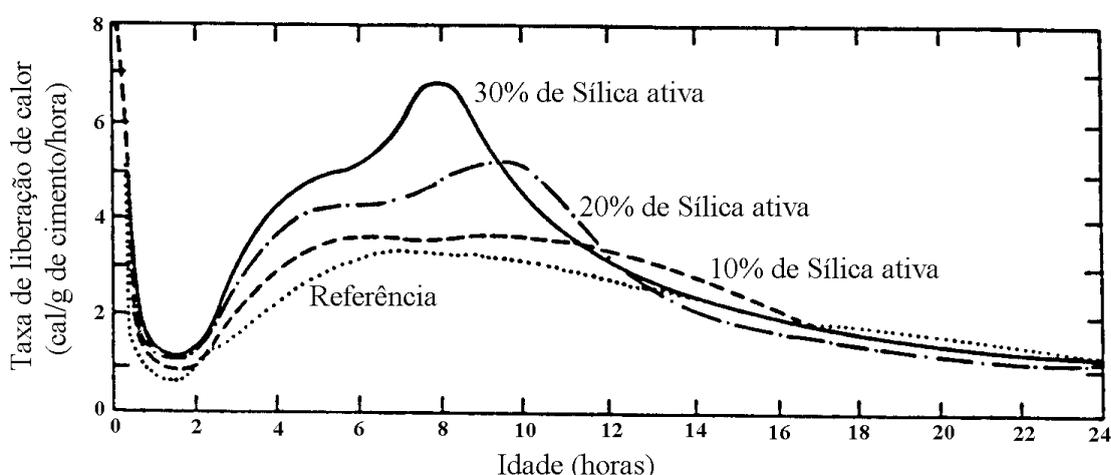


Figura 6 Comportamento do calor de hidratação do concreto, com e sem o uso de sílica ativa (ROY citado por DAL MOLIN, 1995).

A situação diferenciada existente com a introdução da sílica ativa no concreto não se repete quando se utiliza a cinza de casca de arroz. Este comportamento pôde ser constatado por Mehta (1994), que utilizando a cinza de casca de arroz no concreto verificou que se alcança maiores resistências e menor calor de hidratação, entre o sétimo e o vigésimo oitavo dia, em comparação com o concreto sem adição mineral. Este comportamento pode ser justificado pelo maior diâmetro das partículas da cinza, que normalmente resulta na redução da velocidade da reação pozolânica, em relação à sílica ativa.

Outras pesquisas com a cinza de casca de arroz apresentaram um comportamento semelhante. Hwang e Wu (1989) apresentam, na figura 7, a evolução do calor de hidratação em pastas com variação no teor de adição e na relação água/(c+cca), onde verifica-se que o calor de hidratação fica diluído pelo efeito da água, o que levou à conclusão que a relação água/(c+cca) é inversamente proporcional ao calor de hidratação.

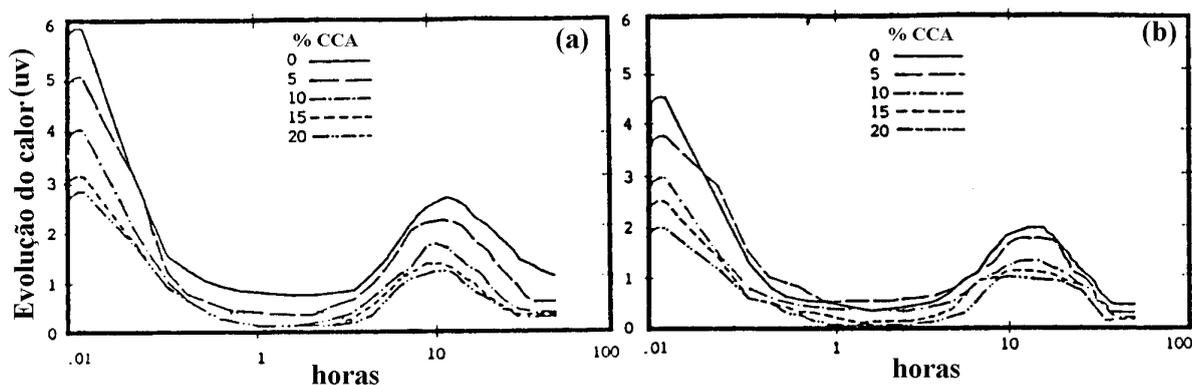


Figura 7 Comportamento do calor de hidratação no concreto, com o uso de cinza de casca de arroz, em concretos com relação água/(c+cca) de (a) 0,35 e (b) 0,47 (HWANG e WU, 1989).

O melhor desempenho, com relação à diminuição do calor de hidratação, fez com que alguns autores, como Mehta e Pirtz (1978), propusessem a substituição do cimento Portland pela cinza de casca de arroz, em teores mínimos de 30%, quando se busca a produção do concreto massa. Contudo, segundo Silveira (2001), o uso de altos teores atualmente é contestado por diversas pesquisas, visto que teores de cinza de casca de arroz superiores a 15% tem resultado no aparecimento da reação álcali-sílica, provocando a expansão do concreto.

d) Fissuração por dessecação superficial e retração plástica

A retração plástica é a redução do volume do concreto fresco, quando o mesmo ainda se encontra no seu estado plástico. Este fenômeno ocorre por aproximadamente duas horas, iniciando após a evaporação da água existente sobre a superfície do concreto e terminando normalmente de forma rápida, com o endurecimento do concreto. Se a retração não é uniforme ou há resistência a este movimento, tem-se como resultado o aparecimento de tensões na superfície do concreto, que via de regra gera fissuras, sendo deste modo denominadas fissuras por retração plástica (COHEN et al., 1989).

Segundo Dal Molin (1995), as fissuras decorrentes da retração plástica ou do processo de dessecação superficial tendem a ocorrer quando não é realizada a cura do concreto e quando a velocidade de evaporação de água na superfície for maior que a taxa de reposição de água pelo fenômeno de exsudação. Como as pozolanas altamente reativas causam uma significativa diminuição do fenômeno da exsudação, ou seja, diminuição da ascensão de água à superfície do concreto, há a possibilidade de se ter o aumento das fissuras, principalmente quando a taxa de evaporação é elevada (KHAYAT e AİTCIN, 1993).

O ACI 226 (1987) relata, com base em experiências de campo e de laboratório, a maior tendência dos concretos com sílica ativa virem a desenvolver fissuras oriundas de retração plástica. O efeito da sílica ativa na retração plástica do concreto foi investigado por Johansen citado por Sellevold e Nilsen (1987), onde o autor concluiu que o momento crítico para o aparecimento deste fenômeno ocorre durante a acomodação do concreto na forma. Segundo alguns autores, como Neville (1997), este problema pode ser facilmente evitado com um eficaz sistema de cura, principalmente no que se refere às primeiras idades.

2.5.2 No estado endurecido

a) Resistência à compressão

A ação química e física das pozolanas de alta reatividade normalmente produzem 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, principalmente 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 água/(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 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

água/(c+sa) nos valores de 0,25, 0,30 e 0,4. Neste trabalho, os autores concluem que após o vigésimo oitavo dia, as diferenças entre o concreto com e sem sílica ativa diminuem, atingido níveis similares após 3,5 anos. Hassan et al. (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%, onde verificaram que a eficiência da sílica ativa ao nonagésimo primeiro dia era inferior ao constatado no vigésimo oitavo dia de idade do concreto.

A influência da relação água/(c+sa) na melhoria da resistência à compressão, decorrente do uso da sílica ativa, é relatada por Malhotra e Carrette (1983), que afirmam que as maiores contribuições podem ser obtidas em concretos com relações água/(c+sa) elevadas, o que vai ao encontro de algumas pesquisas referentes ao assunto. Contudo, ressalta-se que esta melhoria ainda não é consenso, pois algumas pesquisas apontam para um comportamento contrário ao relatado por Malhotra e Carrette (1983).

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) chegam 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 Aïtcin (1998), de 8 à 10% da massa de cimento. Sabir (1995) observou que teores de substituição superiores a 16% proporcionam uma redução nos resultados de resistência à compressão.

Com relação à utilização de cinza de casca de arroz, o comportamento da resistência à compressão apresenta uma evolução diferente da constatada na sílica ativa, visto que a melhoria imposta a esta propriedade tem se prolongado a idades posteriores ao vigésimo oitavo dia de idade. Malhotra e Mehta (1996), utilizando concretos com 10% de adição de cinza de casca de arroz, verificaram aumentos de 25% na resistência à compressão entre o 28º e o 180º dia, enquanto que no concreto sem a adição, obteve um aumento de 21%. A evolução destas resistências são apresentados na tabela 3 e representam a média de três corpos-de-prova cilíndricos.

Tabela 3 Resultados obtidos na resistência à compressão do concreto, decorrente do uso da cinza de casca de arroz (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Mistura	CCA %	a/(c+a)	m _{esp} kg/m ³	Resistência à Compressão					
				1 d	3 d	7 d	28 d	90 d	180 d
CO	0	0,40	2350	20,9	25,5	28,9	36,4	42,5	44,2
R10	10	0,40	2320	22,1	26,2	31,1	38,6	47,0	48,2

O comportamento da cinza de casca de arroz no concreto também foi estudado por Zhang et al. (1996), que compararam a resistência à compressão de três tipos de concreto, um com 10% de adição de sílica ativa, outro com 10% de cinza de casca de arroz e outro sem adição, todos com uma relação água/(cimento+adição) de 0,30. Neste trabalho, os autores, além de confirmarem os ganhos de resistência à compressão com o tempo, quando do uso de pozolanas altamente reativas, ratificaram os menores ganhos de resistência no concreto com a cinza de casca de arroz em curtas idades, e maiores ganhos a partir do vigésimo oitavo dia, quando comparado com o comportamento do concreto com adição de sílica ativa.

Chatveera e Nimityongskul (1996) também obtiveram melhora na resistência à compressão, no CAD, com 30% de substituição e pré-misturado com a água. Neste trabalho, com três tipos diferentes de cinzas de casca de arroz, os autores chegaram a obter em um tipo de cinza uma melhoria de até 85% na resistência à compressão, entre o vigésimo oitavo e o quinquagésimo sexto dia. Em trabalhos com pastas de cimento, Hwang e Wu (1989) também constataram, com relações a/(c+cca) de 0,52 e 0,54, resultados de resistência à compressão similares nas primeiras idades e maiores valores após sessenta dias, nas pastas com adição de cinza de casca de arroz em comparação à pasta sem adição.

Santos (1997), tendo o objetivo de verificar a influência da cinza de casca de arroz proveniente do sistema de produção semi-industrializada via seca, na resistência à compressão, realizou um programa experimental com três relações a/(c+cca): 0,40, 0,50 e 0,60, e com três teores de substituição: 0%, 15% e 40%. Neste trabalho, o autor constatou melhorias nesta propriedade, em relação à mistura sem adição, em ensaios realizados no nonagésimo dia de idade do concreto, evidenciando novamente a influência desta adição em longos períodos.

Por outro lado, também observa-se trabalhos que apresentam um comportamento diferenciado com relação à influência da cinza de casca de arroz na resistência à compressão do concreto. Sensale e Dal Molin (1999), estudando concretos com relação água/(c+cca) igual a 0,50 e com vários teores de substituição (0%, 10% e 20%), não constataram significativas melhorias na resistência à compressão entre o vigésimo oitavo e o nonagésimo dia, tanto nas

misturas com cinza de casca de arroz, quanto nas misturas sem adição. As autoras acrescentam também que não é significativo, nessas idades, o efeito da incorporação de cinza de casca de arroz nos resultados de resistência à compressão. Conclusões semelhantes foram obtidas por Mehta (1994), em estudos com o CAR, onde constatou que apesar da utilização de cinza de casca de arroz resultar num aumento da resistência, não se verificou sensíveis aumentos após o vigésimo oitavo dia.

O comportamento diversificado da cinza de casca de arroz na resistência à compressão do concreto também pode ser exemplificado pelo trabalho realizado por Sensale (2000). Neste trabalho, constatou-se que em concretos convencionais, mesmo com a elevação da relação $a/(c+cca)$, há uma melhoria da resistência à compressão com o aumento do teor de cinza de casca de arroz. A autora acrescenta que com o aumento do teor de cinza de casca de arroz, a resistência à compressão diminui nas primeiras idades e aumenta após longos períodos (> 60 dias), em relação ao concreto de referência.

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, através 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 (f_{tD}) regida pela NBR 7222 (ABNT, 1994), a resistência à tração na flexão (f_{tF}) regida pela NBR 12142 (ABNT, 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 introduzem tensões secundárias, que podem levar a variações 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, tem também uma variabilidade entre os resultados obtidos dentro de cada ensaio. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a variação de resultados em relação à esta propriedade decorre diversos fatores, tais como: a resistência à compressão do concreto, as características do agregado, adições e aditivos.

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 é acompanhada também de 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 no vigésimo oitavo dia 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 a 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% ao vigésimo oitavo dia 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 água/(c+sa) utilizado neste concreto, o que evidencia também nesta propriedade a melhor eficiência desta adição em concretos com maior relação água/(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 água/(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 e 28 dias) decorrentes da sílica ativa tendem a diminuir, chegando a valores similares após 3,5 anos. Neste trabalho, o maior valor de resistência à tração na flexão obtido foi de 11,3 MPa, aos quatorze dias, em concretos com relação água/(c+sa) de 0,25.

O aumento da resistência à tração, decorrente do uso de sílica ativa, tem como origem os mesmos fatores que possibilitam o aumento da resistência à compressão, ou seja, 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, ou seja, 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 microfíler 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 água/(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 no vigésimo oitavo dia 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 água/(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%.

Quanto à influência da cinza de casca de arroz na resistência à tração, Chatveera e Nimityongskul (1996) constataram uma considerável redução da resistência à tração na flexão quando adotaram teores de substituição de 50% e 60%. Por outro lado constataram, nos três tipos de cinzas utilizadas nesta pesquisa, melhorias na resistência à tração na flexão, quando utilizaram os teores de 10% e de 20%. Malhotra e Mehta (1996), utilizando concretos com 10% de adição de cinza de casca de arroz, também verificaram aumentos, na ordem de 8%, na tração na flexão, tendo também obtido melhoria, em torno de 30%, na resistência à tração por compressão diametral.

Sensale (2000), em um vasto programa experimental, constatou que com o aumento do teor de cinza, há a tendência de aumento da resistência à tração por flexão e por compressão diametral. Na tração por compressão diametral, a autora acrescenta que o maior teor de cinza proporciona menores resistências nas primeiras idades e maiores resistências em períodos longos (>60 dias). Com relação à interação entre a relação água/(c+cca) e o teor de adição, a autora chegou às seguintes conclusões:

- a contribuição desta adição, na resistência à tração por compressão diametral, aumenta com a elevação das relações água/(c+cca);
- em comparação com o concreto de referência (sem adição), constatou-se que os diferentes teores de cinza proporcionam uma contribuição semelhante no que se refere à resistência à tração por flexão, com variações menores ao observado na tração por compressão diametral;
- com o aumento do teor de cinza, tem-se um aumento da contribuição desta adição na resistência à tração por flexão, quando diminui-se as relações água/(c+cca).

De um modo geral, pode-se constatar que os resultados relatados referente a influência do uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz na resistência à tração evidenciam claramente a falta de consenso em relação a melhoria obtida com estes materiais. Esta situação é um reflexo da grande variabilidade desses ensaios, bem como da falta de uma análise estatística mais aprofundada, que impossibilitam a obtenção de uma maneira mais clara das melhorias e do momento que elas ocorrem nesta propriedade do concreto.

c) Módulo de elasticidade

Segundo Farny e Panarese citado por Lopes (1999), o conhecimento desta propriedade é de grande importância para a execução do projeto, pois o seu valor auxilia na previsão de deformações, no conhecimento das tensões entre o concreto e o aço das estruturas de concreto armado e protendido, além de contribuir para o cálculo das tensões resultantes de retração e de recalque.

Com relação ao módulo de elasticidade do concreto com adição de pozolanas altamente reativas, observa-se na literatura um maior número de informações referentes ao uso da sílica ativa. Nesta propriedade, Mehta (1989) relata que não basta somente uma maior resistência da zona de transição, pois as características do agregado tornam-se um fator limitante, quando se visa o aumento do módulo de elasticidade do concreto. Com esta limitação, as altas resistências obtidas no CAR com uso da sílica ativa não são acompanhadas, com a mesma intensidade de valores, quando se focaliza o módulo de elasticidade do concreto. Silveira et al. (1999) ratificaram este comportamento verificando menores

benefícios decorrentes do uso da sílica ativa, em relação ao constatado na resistência à compressão e na resistência à tração.

Paulon e Ibraim (1995), estudando CAR com teor de substituição de 8%, obtiveram percentuais de melhorias no módulo de elasticidade na ordem de 2,5%, no vigésimo oitavo dia de idade. As diferenças encontradas no comportamento do módulo de elasticidade do CAR, decorrente do uso da sílica ativa, também foram o foco principal do estudo realizado por Dal Molin e Monteiro (1996). Este trabalho foi baseado em estudos experimentais, comparando o módulo de elasticidade do CAR com 10% de adição de sílica ativa, do CAR sem sílica ativa e do concreto convencional (resistências de até 40 MPa), onde concluíram que:

- a taxa de evolução do módulo de elasticidade é bastante elevada, onde obteve-se, no primeiro dia, o valor médio de 76% do módulo de elasticidade alcançado no vigésimo oitavo dia;
- as variações nas relações água/(c+sa) pouco influíram na evolução do módulo de elasticidade com o tempo. Contudo, constatou-se uma pequena tendência de crescimento mais rápido do módulo, nas primeiras idades, para concretos com menores relações água/(c+sa);
- com a adição de sílica ativa, obteve-se um aumento médio de 3,77% no módulo de elasticidade do concreto no vigésimo oitavo dia, dentre as diversas relações $a/(c+sa)$ estudadas;
- independente da relação água/(c+sa) adotada, a adição de sílica ativa manteve a mesma eficiência com relação ao módulo de elasticidade.

A pouca contribuição obtida nesta propriedade não está diretamente relacionada com teor de substituição, visto que Sabir (1995), estudando teores de substituição na ordem de 0%, 12%, 16%, 20%, 24% e 28%, constatou que substituições maiores de 16% resultam em reduções nos valores obtidos no módulo de elasticidade. A diminuição dos valores de módulo de elasticidade decorrente do uso da sílica ativa também foi relatada por Lopes (1999), que adotando um teor de substituição de 8%, obteve no CAR sem sílica ativa a melhoria de 12% no módulo de elasticidade, em relação ao CAR com adição, no vigésimo oitavo dia, evidenciando, segundo o autor, a possível falta de influência da adição nesta propriedade.

Mesmo com os aumentos de resistência à compressão não se refletindo no aumento do módulo de elasticidade, é apresentado por Dal Molin (1995), com base em diversas pesquisas, uma relação existente entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Esta relação consta na figura 8, e mostra que independentemente do teor de sílica ativa, existe uma

relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto, onde verifica-se que o aumento percentual no módulo de elasticidade é, em média, 1/3 do aumento observado na resistência à compressão. A relação entre estas duas propriedades do concreto também foi constatada por Sellevold (1987) e Diamond (1984).

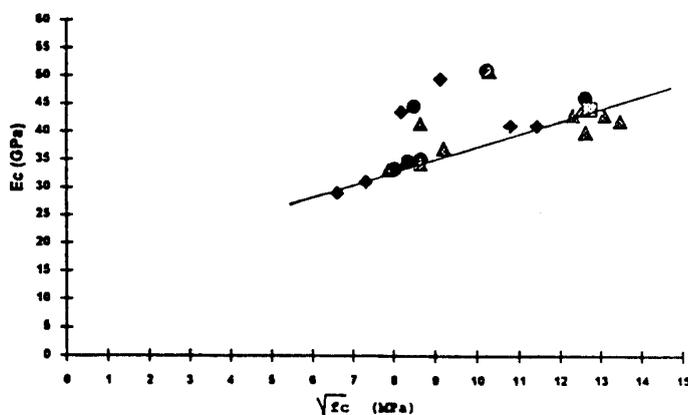


Figura 8 Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (DAL MOLIN, 1995).

Quanto ao estudo da influência da cinza de casca de arroz no módulo de elasticidade, verificou-se um reduzido número de pesquisas referentes ao assunto. Dentre estes poucos trabalhos tem-se o realizado por Sensale (2000), que constatou a interação do teor de adição com a relação $a/(c+cca)$, onde observou o aumento do módulo de elasticidade com o aumento do teor de adição, quando adota-se altas relações $a/(c+cca)$. No caso de concretos com baixas relações $a/(c+cca)$ teve-se um comportamento oposto. A autora também relata que quanto maior o percentual de adição, tem-se uma diminuição do módulo nos primeiros dias, e o seu aumento em períodos mais longos, em relação ao concreto de referência.

Por outro lado, Malhotra e Mehta (1996), utilizando concretos com 10% de adição de cinza de casca de arroz, não constataram diferenças no que se refere a esta propriedade.

d) Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson do concreto é definido como a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal dentro do intervalo elástico, quando submetido à carga uniaxial. Segundo Mehta e Monteiro (1994), esta propriedade é pouco utilizada no processo de cálculo estrutural, sendo contudo necessária para a análise estrutural de túneis, barragens em arco e outras estruturas estaticamente indeterminadas.

Com relação à esta propriedade, Mehta e Monteiro (1994) relatam que para o concreto convencional, não parece haver relação do seu valor com variáveis como: relação

água/cimento, grau de hidratação, granulometria do agregado, adição de pozolanas altamente reativas, entre outras, sendo com que seu valor geralmente fica entre 0,15 e 0,20.

Quanto ao CAR, além de novamente constatar-se o reduzido número de trabalhos, tem-se como agravante as poucas conclusões referentes ao uso de pozolanas altamente reativas. Apesar dos poucos trabalhos, Mehta e Monteiro (1994) apontam para a obtenção de valores menores quando se estuda o CAR. Persson (1999), estudando concretos com resistência entre 54 e 127 MPa, evidenciou novamente esta tendência do coeficiente de Poisson, pois obteve valores variando de 0,11 a 0,17. Neste trabalho, o autor conclui, ratificando novamente a grande influência do tipo de agregado, bem como a não verificação da influência do uso da sílica ativa e da umidade nos resultados obtidos.

Esta tendência, apesar de mantida, apresentou no trabalho realizado por Almeida (1990) valores um pouco diferenciados, haja vista que, para concretos com resistência na faixa de 70 a 80 MPa, obteve valores na ordem de 0,23, para concretos com porcentagem de 11% ou 17% de sílica ativa e 0,20 para concretos sem a adição mineral. Contudo, com resistências mais elevadas, na ordem de 105 MPa, com adições de 11% a 23%, o autor obteve valores de 0,17 para o coeficiente de Poisson. Apresentando resultados semelhantes, tem-se o trabalho realizado por Mc Donald citado por Dal Molin (1995), que obteve valores para o coeficiente de Poisson variando de 0,20 a 0,25, para concretos com uso de sílica ativa e resistências na faixa de 80 a 100 MPa.

Dal Molin (1995), em um programa experimental com várias relações $a/(c+sa)$ e com o teor de adição de sílica ativa de 10% sobre a massa de cimento, obteve tanto no concreto convencional quanto no de alta resistência um valor médio para o coeficiente de Poisson de 0,19. A autora acrescenta que não observou uma tendência clara do comportamento desta propriedade, em relação às variáveis envolvidas. Lopes (1999) também obteve no CAR com sílica ativa um valor na ordem de 0,20, para o coeficiente de Poisson. Estes resultados ratificam a necessidade de um maior número de pesquisas visando obter o conhecimento desta propriedade no CAR, com uso de sílica ativa.

Segundo Persson (1999), a diminuição dos valores do coeficiente de Poisson no CAR, tende-se a modificar próximo à tensão de ruptura. Esta situação é decorrente do surgimento no concreto, sujeito a altas tensões, de microfissuras paralelas à direção das tensões, fazendo com que as deformações transversais aumentem, resultando num aumento rápido do coeficiente de Poisson.

Com relação à cinza de casca de arroz, não se observou na literatura um estudo sistemático e conclusivo sobre a sua influência no coeficiente de Poisson do concreto.

3 O uso do metacaulim no concreto

3.1 Histórico

Apesar dos estudos com relação ao uso do metacaulim no concreto serem recentes, o seu uso como material pozolânico precede o uso do cimento, onde se utilizava como fonte principal para a sua produção a calcinação de argilas. Segundo Papadikis e Venuat (1968), os romanos utilizavam um material pozolânico proveniente da moagem de telhas e de tijolos cerâmicos em locais onde não havia a disponibilidade de tufos e cinzas vulcânicas, como a Grã-bretanha. Este tipo de aplicação, seguindo o mesmo princípio, foi adotado na Índia e no Egito, sendo que nessas aplicações este material recebia o nome de “surkhi” pelos hindus e “homra” pelos egípcios. Atualmente, este processo de produção ainda é desenvolvido na Índia, Indonésia e outros países em desenvolvimento.

Na Europa, há evidências que o emprego deste tipo de pozolana foi bastante difundido na produção da argamassa de cal e remonta do século XVII. O uso do metacaulim proveniente da calcinação de argilas pode ser exemplificado na construção do farol de Eddystone, em 1754, onde Smeaton fez experimentos com o objetivo de adotar este tipo de argamassa. Outra aplicação foi efetivada na reconstrução da ponte de Londres. Nesta época, em 1868, começou a ser investigado por Frémy a relação entre a propriedade pozolânica das argilas e o seu grau de desidroxilação (COOK, 1986; LEA, 1971).

Com o advento do cimento Portland no início do século XIX, houve um acentuado desuso deste tipo de pozolana, face ao melhor desempenho do novo aglomerante. Segundo Zampieri (1989), esta situação só se alterou quando foi iniciada a aplicação do metacaulim¹ como adição à fabricação do cimento Portland. Esta nova opção de utilização pode ser verificada na Inglaterra, no ano de 1909, com a produção do cimento vermelho de Porter, que possuía uma grande aplicação em construções expostas à ação das águas, fossem de origem marinha ou não. Segundo Lea (1971), até 1915 também foi constatado na França este tipo de aplicação para o metacaulim. Na África, mais especialmente no Egito, adotou-se na construção das barragens de Aswan e Sennar, nos anos de 1902 e 1919, respectivamente, um concreto dosado com cimento Portland com adição de metacaulim.

Quanto às pesquisas visando o uso desta pozolana no concreto, destacam-se os trabalhos realizados pelo Corps of Engineers e pelo Bureau of Reclamation, no início da década de 40 e no final da década de 60. Entretanto, face ao elevado custo decorrente da

¹ O termo está sendo usado genericamente para todas as argilas calcinadas, mesmo sem o conhecimento da composição mineralógica da matéria-prima.

necessidade, por parte da argila, de tratamento térmico para que a mesma desenvolva a atividade pozolânica, teve-se na década de 80 uma diminuição do consumo do material. Esta diminuição tornou seu uso restrito a locais onde não se dispunha de subprodutos industriais como a cinza volante e escória de alto forno, pois apesar do alto custo de produção, o uso do metacaulim ainda representa a melhor opção para a produção do cimento Portland (BARATA, 1998). Na Índia, por exemplo, onde existe a dificuldade de obtenção de subprodutos industriais, utiliza-se pozolanas de argila calcinada na produção do cimento Portland. No ano de 1982, a produção de cimento Portland com metacaulim representou, de acordo com Cook (1986), 65% do total de cimento produzido neste país.

Na década de 80, segundo Murat (1983), o Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lyon na França estudou a viabilização de energia solar na calcinação de argilas, visando suprir os locais onde há falta de subprodutos industriais, com o uso de materiais de baixo custo de aquisição, como a argila. Outras pesquisas (CALDARONE et al., 1994; CALDARONE e GRUBER, 1995; ZHANG e MALHOTRA, 1995) sobre a adoção desta pozolana têm apresentado excelentes resultados, no que se refere à sua atividade pozolânica, em países como EUA, Inglaterra e Canadá. Nestas pesquisas, visa-se a produção do CAR e do CAD, e denominou-se esta pozolana como metacaulim de alta reatividade (MCAR) devido principalmente às suas excelentes características físicas, sendo produzida por duas empresas do setor de mineração do caulim, a Engelhard Corporation e a E.C.C. Kaolim, que utilizam como matéria-prima a argila caulínica. Na sua produção, tem-se como primeira etapa o peneiramento, visando a eliminação de fases inertes, sendo posteriormente submetido ao processo de calcinação. Como etapa final realiza-se a moagem, para obtenção do diâmetro médio com valores próximos a 1,5 μm . Outros pesquisadores como Ambroise et al. (1994) e Banthia e Yan (1996) têm também buscado a aplicação destas pozolanas em concretos coloridos isentos de eflorescências e em matrizes de cimento reforçadas com fibra de aço e de vidro.

No Brasil, o uso deste tipo de pozolana também se desenvolveu de modo semelhante ao constatado em outros países, isto é, utilizou-se principalmente na construção de barragens e de obras marinhas. Como primeira aplicação tem-se a construção da barragem de Jupuíá, na década de 60. Nesta obra, segundo Saad et al. (1982), teve-se como objetivo principal a redução da reação álcali-agregado, sendo que houve outras melhorias, como: menor temperatura adiabática, menor exsudação, menor custo e um aumento da resistência em idades superiores a 90 dias. Os resultados desta obra serviram de ponto de partida para outras três barragens: Ilha Solteira, Capivara e Água Vermelha, todas com teores de substituição de 20% a 50%, em volume de cimento. Segundo Barata (1998), na construção da barragem de

Tucuruú utilizou-se o cimento Portland com adição do metacaulim proveniente da calcinação da argila.

A adoção do metacaulim na produção do cimento utilizado na usina de Jupia 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 desta pozolana ficou limitada apenas às regiões norte e nordeste do Brasil, representando deste modo um total de 17% do consumo de pozolanas utilizadas na fabricação de cimento. Com relação ao MCAR, tem-se atualmente no Brasil um processo industrial visando a sua produção para uso no concreto, que adota como matéria prima, as argilas cauliníticas.

3.2 Características químicas do metacaulim

Com relação ao aspecto químico, tanto para o metacaulim quanto para o MCAR, deve-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. A caulinita, mineral que dá nome ao grupo das argilas cauliníticas, apresenta, de acordo com Gomes (1988), uma composição química teórica de aproximadamente 39,8% Al_2O_3 , 46,3% SiO_2 e 13,9% H_2O . Segundo Sabir et al. (2001), a composição química tem uma grande influência na definição do nível ótimo de substituição deste material por cimento.

A composição química, mesmo não sendo, segundo Santos (1992) e Zampieri (1989), um parâmetro adequado para avaliação da pozolanicidade, pois impossibilita a diferenciação entre a sílica cristalina e 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 tem-se, na tabela 4, algumas exigências químicas, descritas pela norma indiana (IS 1344, 1968), pela norma americana (ASTM C 618, 1991) e pela brasileira (NBR 12653, 1992). Mesmo não se tendo uma norma específica

referente ao MCAR, acredita-se que os padrões definidos na tabela 4 também se adequem, na sua maioria, a esta pozolana, haja vista não ser este o fator principal de diferenciação entre o metacaulim e o MCAR.

Tabela 4 Exigências químicas para pozolans do tipo do metacaulim.

Exigências químicas	IS 1344 (1968)	ASTM C 618 (1991)	NBR 12653 (ABNT, 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%	-	-
SiO 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%

Dentre os valores colocados na tabela 4 que talvez devam sofrer alteração quando se visa a utilização do MCAR, tem-se o valor mínimo de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ 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%. A definição desses valores tem como base a literatura referente ao assunto e objetiva assegurar uma maior atividade pozolânica do MCAR. Na tabela 5 é apresentado por Malhotra e Mehta (1996) uma composição típica do MCAR.

Tabela 5 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 citado 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, pois quanto maior o

teor de SiO_2 , a partir de uma determinada faixa de composição química, maior é a presença de materiais com pouca atividade pozolânica, como o quartzo. Ambroise et al. (1993) e Salvador (1995) também constataram a maior reatividade com a cal no tipo de argila com maior teor de Al_2O_3 .

Outro ponto importante nas argilas, mais especialmente nas argilas caulínicas, que se apresentam como as mais apropriadas para a obtenção do metacaulim, é a estrutura cristalina do argilomineral caulinita. Esta estrutura é apresentada na figura 9, e segundo Grim (1962), é constituída por unidades lamelares, sendo cada unidade formada por uma camada tetraédrica de silicato (SiO_4) e uma camada 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 950°C , tem o seu arranjo atômico destruído, pela retirada dos íons de hidroxilas, que também é denominado de desidroxilação. O elemento formado é denominado de metacaulinita, apresentando perante a difração de raios-x uma estrutura amorfa. Segundo He et al. (1995), este processo térmico é essencial para o desenvolvimento da atividade pozolânica por parte das argilas.

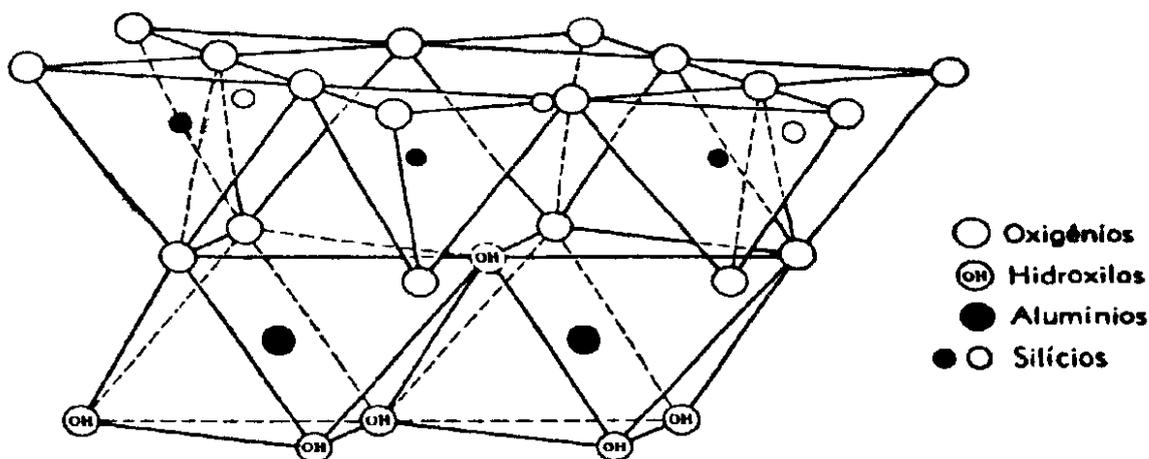


Figura 9 Estrutura cristalina da argila caulínica (GRIM, 1962).

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.

A diminuição do Ca(OH)_2 decorrente do uso do MCAR pode ser constatado nos trabalhos de Wild e Khatib (1997) e Frias e Cabrera (2000), que mesmo não definindo valores concluíram pela necessidade de teores de substituição superiores a 15% de MCAR para que haja o consumo total do Ca(OH)_2 , em pastas. Esta situação foi verificada por Kostuch et al (1993), que obteve uma significativa redução do Ca(OH)_2 com o uso de um teor de substituição de MCAR na ordem de 20%, em concretos. Oriol e Pera (1995) ratificaram este comportamento, onde constataram em um estudo com pastas, a necessidade de teores de substituição de 30% a 40%, para que ocorresse o consumo total de Ca(OH)_2 no vigésimo oitavo dia de idade.

Um comportamento diferente foi obtido por Poon et al. (2001) em relação ao aumento do consumo de Ca(OH)_2 com o aumento do teor de substituição. Neste trabalho, utilizando pastas com relação $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,30, teve-se uma redução na atividade pozolânica quando do aumento do teor de substituição de 10% para 20%, o que conseqüentemente resulta na diminuição do consumo de Ca(OH)_2 por parte da pozolana. Acredita-se que essas diferenças de comportamento são decorrentes dos vários fatores que podem influenciar na variação das reações de hidratação e na atividade pozolânica, tais como composição do cimento Portland, pureza do MCAR e relação água/aglomerante, adicionado ao fato que no concreto, o Ca(OH)_2 encontra-se muito mais diluído que na pasta, o que torna mais difícil a sua quantificação. Outro ponto importante que pode influir na quantificação do Ca(OH)_2 é o procedimento de ensaio adotado para a obtenção.

Segundo He et al. (1995) e Silva e Glasser (1993), como produtos resultantes da reação pozolânica entre o MCAR e o hidróxido de cálcio, tem-se normalmente o C-S-H, o C_2ASH_8 , a hidrogranada e o C_4AH_x , em várias concentrações. Resultados semelhantes também foram relatados por Curcio et al. (1998), quando do uso de argamassas com quatro diferentes tipos de MCAR e por Kostuch et al (1993) quando do uso de teores de substituição de 10% e 20%.

Cabrera e Rojas (2001) constataram, em argamassas com cal, que o C-S-H é detectado após 6 horas do início do processo de hidratação. Os autores acrescentam que após 12 e 21 horas da formação do C-S-H, tem-se a formação do C_4AH_{13} e C_2ASH_8 e da hidrogranada, respectivamente. Com este mesmo tipo de argamassa, Frias e Cabrera (2001) obtiveram tempos diferentes para a detecção dos produtos de hidratação. Neste trabalho o C-S-H, o C_4AH_{13} e o C_2ASH_8 foram detectados ao mesmo tempo, após dois dias de hidratação. Em pastas constituídas de cimento e MCAR, Frias e Cabrera (2001) constataram que o C_2ASH_8 é

detectado entre o terceiro e o sétimo dia. Nesta pasta o C_4AH_{13} é detectado entre o 180° e o 360° dia, quando o teor de substituição é igual ou superior a 20%.

Numa avaliação da mineralogia dos hidratos formados em argamassas de cal-pozolana, Zampieri (1989) e Murat (1983) também constataram a formação do C-S-H, da gehlenita hidratada e de pequenas quantidades de C_4AH_{13} . Zampieri (1989) acrescenta que os dois primeiros são os principais responsáveis pela resistência mecânica das misturas, tendo em vista a íntima correlação entre o desenvolvimento destas fases e a elevação dos valores de resistência à compressão.

Santos (1992) e He et al. (1995) constataram, em argilas com grande teor de Al, que a reação se processa de um modo mais rápido e resulta também em produtos como a gehlenita hidratada (C_2ASH_8) e um silicato de cálcio hidratado (C-S-H_I) com relação Ca/Si variável de 0,8 a 1,5. Taylor citado por Lacerda e Helene (2002) também relata este comportamento acrescentado que apenas uma pequena quantidade desta alumina (Al_2O_3) é incorporada ao C-S-H, sendo que a maior parte reage para formar o aluminato de cálcio hidratado (CAH) e o sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH).

Dentre os produtos resultantes do processo de reação pozolânica, colocados neste item, deve-se destacar a gelenita, visto que Taylor (1992), com base em resultados de vários pesquisadores, relata que a gelenita apresenta resistências superiores às obtidas com o C-S-H. Esta situação, adicionado ao fato deste produto ser normalmente decorrente da reação do $Ca(OH)_2$ com o Al_2O_3 do MCAR, faz com 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.

Sob condições de cura acelerada (55°C), a reação pozolânica provoca a formação da hidrogranada (C_3ASH_6), proveniente do C_4AH_{13} e C_2ASH_8 (ZAMPIERI, 1989; SILVA e GLASSER, 1993). A formação da hidrogranada, após longo período de cura, é decorrente da incompatibilidade entre a gehlenita hidratada e o hidróxido de cálcio. Estas transformações são retardadas quando o processo de cura ocorre à 20°C, devido a maior lentidão da cinética de hidratação, já que nesta situação se fornecem condições ideais para a manutenção de um estado persistente de não-equilíbrio (SILVA e GLASSER, 1993).

O efeito da temperatura no processo de hidratação de pastas com cal e MCAR foi o foco principal do trabalho realizado por Rojas e Cabrera (2002). Os autores verificaram que quando o processo de cura se desenvolve a 20°C tem-se que somente 18% do $Ca(OH)_2$ reagiu com o MCAR aos 9 dias, enquanto que aos 180 dias a reação já consumiu todo o $Ca(OH)_2$. No processo de cura a 60°C, observou-se que aos 9 dias 82% do $Ca(OH)_2$ já reagiu com o MCAR. Contudo, neste processo restou 6% do $Ca(OH)_2$. Neste trabalho, em ambas

temperaturas, o C-S-H foi a principal fase identificada nas primeiras idades, posteriormente verificou a presença da C_4AH_{13} e da C_2ASH_8 , e finalmente, teve-se a presença da C_3ASH_6 . A presença da hidrogranada ocorreu somente no processo de cura a 60°C.

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).

3.3 Características mineralógicas do metacaulim

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 (ABNT, 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 a sua produção quanto no aspecto referente ao seu uso no concreto.

Dentro dos diversos tipos de argilas, tem-se, segundo Santos (1992) e a norma indiana IS: 1344 (1968), como as mais indicadas: as argilas caulínicas, as montmoriloníticas (ou esmectitas) e as ilitas. As argilas relacionadas pela norma indiana têm como base, segundo Zampieri (1989), o grande conhecimento adquirido por este povo ao longo de vários anos utilizando estes materiais para a fabricação de pozolanas. A indicação das argilas caulínicas também é compartilhada por Ambroise et al. (1985b), Zampieri (1989) e Battagin (1987), que apenas acrescentam a necessidade da mesma ser bem pura e com o menor grau de cristalização possível.

Segundo Zampieri (1989), o menor grau de cristalização existente nas argilas caulínicas proporcionam uma maior taxa de desidroxilação, durante o tratamento térmico, o que se reflete na maior atividade pozolânica do metacaulim obtido destas argilas. Este melhor desempenho foi ratificado por Ambroise et al. (1985b), ao realizar ensaios de pozolanidade com a cal, visando a obtenção de matéria-prima para a fabricação de cimento pozolânico, onde conseguiu os melhores resultados dos argilominerais oriundos do grupo das argilas caulínicas. Neste trabalho, o autor também constatou que as argilas montmoriloníticas e ilitas (micas mal cristalizadas) resultaram em cimentos com menor resistência, ao vigésimo oitavo dia. Assim sendo, observa-se que no caso do metacaulim e do MCAR, a definição do tipo de argila utilizado para a sua produção está diretamente relacionada à atividade pozolânica desenvolvida pelo material.

Numa comparação entre a atividade pozolânica de seis tipos de argilas, He et al. (1995) obtiveram excelentes resultados quando do uso de argilas montmoriloníticas. Contudo,

para este tipo de argila, houve a necessidade de maiores temperaturas para que a mesma desenvolvesse a atividade pozolânica, o que tende a aumentar o custo de sua produção.

Com relação à pureza destas argilas, Ambroise et al. (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 et al. (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. Esta situação também evidenciou-se 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 pozolanidade com a cal.

3.4 Características físicas do metacaulim

Como visto anteriormente, as características físicas, como tamanho da partícula e superfície específica, são um 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 usa-se 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 tem 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 6. Quanto ao MCAR, acredita-se, com base na literatura existente, que uma menor quantidade de material retido na peneira 45 μm e uma maior superfície específica possam assegurar o desempenho especificado para este tipo de pozolana (CALDARONE et al., 1994; CALDARONE e GRUBER, 1995; ZHANG e MALHOTRA, 1995). Tem-se desse modo, nas características físicas, o grande fator de diferenciação entre o metacaulim e o MCAR.

Tabela 6 Exigências físicas para a pozolana comum, do tipo do metacaulim.

Exigências físicas	IS 1344 (1968)	ASTM 618 C (1991)	NBR 12653 (ABNT, 1992)
Material retido na peneira 45 μm - máx.	12%	34%	34%
Superfície específica – Blaine – mín.	320 m ² /kg	-	-

Massazza e Costa (1979) afirmam que a superfície específica do metacaulim de alta reatividade está diretamente relacionada com a atividade pozolânica nas primeiras idades de hidratação do cimento, sendo que em idades posteriores essa atividade pozolânica está relacionada aos teores de sílica e alumina reativa, o que ratifica a grande influência da moagem, principalmente no que se refere às primeiras idades, na aceleração da atividade pozolânica e, conseqüentemente, no desenvolvimento das resistências. Estudos relatados por Saad et al. (1992) e Sobrinho (1970) constataram que na produção do metacaulim proveniente da calcinação de argilas cauliníticas, há a necessidade da moagem ser realizada até a obtenção de uma superfície específica de 850 m²/kg para melhorar o desenvolvimento das propriedades pozolânicas.

Mesmo com as melhorias obtidas com o aumento da superfície específica para patamares na ordem de 850 m²/kg, outros autores, visando a obtenção de um metacaulim com alta reatividade (MCAR), partiram para valores ainda maiores, no que se refere a esta característica física. A alta reatividade obtida pôde ser constatada por Ambroise et al. (1994), ao utilizar argamassas de cimento Portland com teores de substituição de 10% e 20% em massa de cimento, de MCAR com superfície específica de 20000 m²/kg e por Zhang e Malhotra (1995), em trabalho experimental no concreto com o MCAR com superfície específica de 16.800 m²/kg. Wild et al. (1997) relatam que a finura tem grande influência nas melhorias existentes nas primeiras idades e pouco influencia nas resistências em idades superiores a 90 dias.

Nos concretos com MCAR tem-se também, assim como na sílica ativa, os efeitos filer, de nucleação e de densificação da zona da transição, decorrentes da elevada finura deste material. O efeito filer foi relatado por vários autores (KOSTUCH et al., 2000; KHATIB e WILD, 1996; DELVASTO e MORALES, 2000; POON et al., 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 et al. (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 reação nas primeiras idades.

3.5 Efeito da calcinação e moagem na atividade pozolânica do metacaulim

Conforme exposto anteriormente, a atividade pozolânica do metacaulim está diretamente relacionada com as suas características físicas, químicas e mineralógicas. Deste

modo torna-se evidente que certos fatores podem resultar em uma variação desta atividade. Dentre estes fatores, tem-se principalmente os relacionados aos processos de calcinação e moagem.

A influência da calcinação pode ser dividida em três aspectos: a temperatura ótima, o tempo de calcinação e o método utilizado na calcinação. Quanto à temperatura ótima, é consenso nas várias pesquisas relacionadas ao assunto que no caso das argilas cauliníticas, os valores ideais encontram-se entre 650°C e 850°C (SAAD et al., 1982; MURAT e COMEL, 1983; DAVIES, 1985; AMBROISE et al., 1993; TALERO et al., 1999; CORDEIRO e DÉ SIR, 2001). O intervalo obtido nestes trabalhos vai ao encontro do estipulado pela norma indiana IS 1344 (1968), que especifica o intervalo de 700°C a 800°C. HE et al. (1995), estudando a influência da temperatura, constatou nas argilas montmoriloníticas que a maior atividade pozolânica é obtida quando a calcinação é realizada a 830°C.

A preocupação em restringir a temperatura máxima de calcinação é justificada, por alguns autores, pelo fato que em temperaturas superiores a 900°C o metacaulim (ou metacaulinita) tende a cristalizar novamente, formando o espinélio Al/Si, que após 1100°C forma a mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e a cristobalita (SiO_2), que apresentam uma menor superfície específica e pouca ou praticamente nenhuma atividade pozolânica (GRIM, 1962; SANTOS, 1992; ANDRIOLO, 1984; SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

Uma das formas de se verificar o efeito da temperatura na calcinação é o monitoramento pela análise térmica diferencial (ATD). Battagin (1987) apresenta na figura 10 as curvas termodiferencial e termogravimétrica de uma amostra de argila caulinítica, onde constata-se que a temperatura de desidroxilação da caulinita (550°C) é evidenciada no pico da reação endotérmica, que estende-se até 980°C, representando o início da recristalização do retículo desordenado com a nucleação da mulita, que indica a perda da atividade pozolânica potencial. O pico de reação endotérmica a 40°C representa a perda de umidade por parte da argila caulinítica. É interessante observar, segundo Cook (1986), que a temperatura de desidroxilação da caulinita ocorre num patamar inferior ao intervalo ótimo definido para a sua calcinação, para que se possa garantir a sua total amorfização.

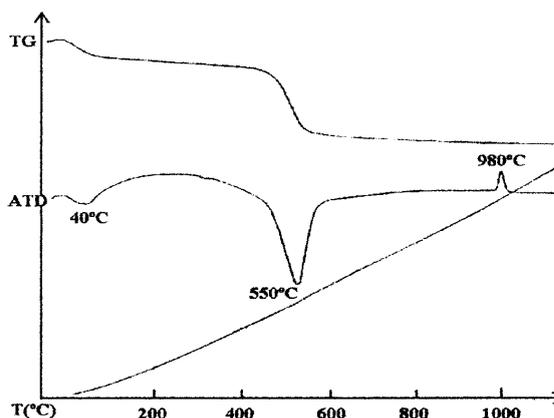


Figura 10 ATD e TG da argila caulínica usada para pozolana, após o tratamento térmico (BATTAGIN, 1987).

Scandiuzzi e Andriolo (1986) ratificam as vantagens da ATD no controle da produção do metacaulim, visto que não havendo pico endotérmico entre 500°C e 560°C, a argila estará bem calcinada, pois já foi formada a metacaulinita. Os autores acrescentam, entretanto, a necessidade de apresentação do pico exotérmico a 950°C, pois significa que a transformação da metacaulinita em compostos cristalinos ainda não ocorreu. Outro fator importante é o tempo utilizado para a realização desta etapa. Cook (1986), em um estudo experimental, afirma que longos períodos de exposição a temperaturas acima da faixa de desidroxilação resultam na recristalização da estrutura da argila.

Com relação à calcinação, tem-se ainda, como outro ponto de influência na atividade pozolânica, o método de produção, onde normalmente se emprega a nível industrial, o uso do forno rotativo ou de leito fluidizado. Uma das principais diferenças entre estes fornos é que, no segundo, o tempo de calcinação é reduzido a poucos minutos (GUPTA e RAO, 1978; COOK, 1986; DAVE citado por COOK, 1986). Contudo, segundo Murat e Comel (1983), em qualquer um dos processos de calcinação, a faixa de temperatura localiza-se entre 700°C e 850°C.

A influência do método de produção na reatividade pozolânica do metacaulim foi avaliada por Murat e Comel (1983). Neste trabalho, os autores constataram que o processo de calcinação mostrou-se menos eficiente no forno rotativo em relação ao forno fixo, o que consequentemente resultou numa menor amorficidade e menor reatividade do material proveniente do forno rotativo. Os autores acrescentam ainda que o processo de calcinação, através do uso de forno rotativo, necessitou de um menor tempo de calcinação. Contudo, devido à elevada finura da caulinita e às características mineralógicas da matéria-prima, teve-se uma maior aglomeração das partículas. A maior aglomeração decorrente do uso de forno rotativo também foi constatada por Ambroise et al. (1994).

É interessante ressaltar o aparecimento recente de um outro método de calcinação, denominado de calcinação instantânea, que segundo Salvador (1995) e Meinhold et al. (1994), apresenta como característica o resfriamento brusco e o reduzido tempo de calcinação, que restringe-se a poucos segundos, não possibilitando a aglomeração da argila, o que evita a moagem e diminui o consumo de energia. Neste processo o metacaulim apresenta baixa densidade, alta capacidade de retenção de água e alta opacidade, possuindo, segundo Salvador (1995) e Bridson et al. (1985), uma reatividade similar ou melhor que o metacaulim proveniente de fornos rotativos e de leito fluidizado. Mesmo com a adoção do processo de calcinação instantânea, acredita-se que, quando da produção do MCAR, haja a necessidade do processo de moagem.

Tem-se por fim, dentre os fatores que podem influenciar a atividade pozolânica, a moagem. Esta etapa se faz necessária, segundo Salvador (1995) e Cook (1986), pela excessiva aglomeração normalmente existente nas argilas durante o processo de calcinação, tanto em fornos rotativos quanto nos de leito fluidizado, pelo fato de necessitarem de horas ou de minutos para a calcinação. Esta etapa, segundo Cook (1986), corresponde de 25% a 30% do custo total necessário para a produção do metacaulim, daí a necessidade de se buscar a sua redução. Acredita-se que, quando da produção do MCAR, tenha-se um maior custo do processo de moagem, visto que tem-se a necessidade de obtenção de uma menor granulometria.

No caso de argilas com altos teores de minerais com extrema dureza e que não sofrem a influência da calcinação, como por exemplo o quartzo, existe a necessidade de várias horas de moagem para que o metacaulim obtenha a granulometria especificada, visando a melhoria de sua atividade pozolânica. A obtenção de uma menor granulometria do metacaulim pode garantir, segundo Sampaio et al. (2001), um maior efeito na cinética de consumo do hidróxido de cálcio e no desenvolvimento da resistência. Esta situação pôde ser verificada por Cordeiro e Désir (2001), que analisando a reatividade de diferentes granulometrias de metacaulim, obteve os melhores resultados nas pozolanas com maior superfície específica.

Além dos fatores relacionados à calcinação e à moagem, a temperatura em que se processa a reação também pode influir na atividade pozolânica, mais especificamente em sua velocidade de reação. Em um estudo sobre a cinética da reação entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio, Oliveira et al. (1995) constataram que o aumento da temperatura proporciona também um aumento de cinética de reação. O autor também constatou que a taxa de reação torna-se bastante lenta depois de ter sido consumido cerca de 80% de hidróxido de cálcio nas temperaturas de reação de 45°C e 75°C.

3.6 Fontes alternativas para a obtenção do metacaulim

Tradicionalmente, como pôde ser visto anteriormente, tem-se como principal fonte para a produção do metacaulim a calcinação de argilas caulínicas, constituída, como o próprio nome quer dizer, por altos teores de caulinita. Estes altos teores de caulinita também se apresentam em outros materiais, como o caulim, tornando-o uma fonte alternativa para a produção tanto de metacaulim quanto de MCAR.

He et al. (1995), analisando a atividade pozolânica de diversos tipos de argilas, obtiveram excelentes resultados com uso do caulim, acrescentando ainda que a calcinação entre 550°C e 800°C neste tipo de argila resulta em poucas variações na sua atividade pozolânica. Forrest (1975) procurou relacionar a temperatura de calcinação do caulim à finalidade desta pozolana, onde conclui que sob o ponto de vista da resistência mecânica, tem-se o melhor resultado quando calcina-se à 800°C, por uma hora. O autor acrescenta que, quando utilizada para controle da reação álcali-agregado, a temperatura de calcinação deve ficar no intervalo de 587°C à 810°C, também durante uma hora.

Ambroise et al. (1994), verificando o comportamento de pastas com diversos teores de substituição, constataram que a incorporação de até 30% de caulim calcinado no cimento Portland não traz nenhum prejuízo, sendo perfeitamente viável. Com o uso do caulim, He et al. (1995) verificaram também que o metacaulim obtido desta forma apresenta maior facilidade de ser moído, reduzindo deste modo o tempo de moagem, quando comparado com outros tipos de argilas.

Ocorre que, devido a algumas características do caulim, como alta reflectância, o elevado índice de refração, a forma e a distribuição granulométrica das partículas, a reologia e a compatibilidade com outros materiais, faz com que se dê preferência à sua aplicação em outros processos industriais como por exemplo a indústria papeleira, de tintas, de cerâmica e refratários, de borracha e plásticos, farmacêutica, entre outras (DAVIES, 1985). Dentro destas indústrias, destaca-se a papeleira, que absorve cerca de 45% da produção de caulim sedimentar, sendo 13% para a realização do preenchimento das fibras de celulose (*filer*) e 32% para servir como material de cobertura da superfície de papel (*coating*) (DNPM, 2001).

O grande número de aplicações fez com que o aumento da produção de caulim subisse de 20,5 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. Num patamar inferior, apresentam-se outros países como o Reino Unido e a República da Coreia, cuja produção em cada país representou aproximadamente 12% da produção mundial. O restante da produção mundial, aproximadamente 36%, é obtida em outros países, como Ucrânia,

Rússia, Brasil, China, Alemanha, França, Chile, Índia, entre outros (LOUGHBROUGH, 1993). Na tabela 7, apresentada pelo DNPM (2001), tem-se a produção mundial nos anos de 1999 e de 2000, bem como as reservas mundiais.

Tabela 7 Principais produtores e principais reservas de caulim sedimentar (DNPM, 2001).

PAÍS	Reservas (10 ³ t) *		Produção (10 ³ t)			
	2000	%	1999**	%	2000***	%
Brasil	4.000.000	28,2	1.517	6,9	1.735	7,9
China	180.000	1,3	950	4,3	950	4,3
Estados Unidos	8.300.000	58,4	9.160	41,5	8.870	40,3
Reino Unido	260.000	1,8	2.500	11,3	2.500	11,3
Ucrânia	980.000	6,9	1.000	4,5	1.000	4,6
Outros países	480.000	3,4	6.973	31,5	6.945	31,6
Total	14.200.000	100	22.100	100	22.000	100

* Reservas totais (no mundo, estimadas; no Brasil, oficiais em 1997).

** Revisado (apenas Brasil e Estados Unidos. O restante, estimado).

*** Dados preliminares.

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 *filler*. Kendal (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. Segundo Santos (1992), este resultado, aliado à elevada presença de partículas menores de 2 µm, credenciam normalmente este tipo de caulim para a produção de cobertura de papel.

Contudo, para a sua utilização, há a necessidade que o caulim passe por um processo de beneficiamento e de retirada de impurezas. Neste processo, segundo Barata (1998), tem-se como primeira etapa a separação, por meio de sedimentação e de peneiras vibratórias, do material com partículas superiores a 44 µm. Posteriormente, com uso de centrífugas, são removidas as partículas maiores de 2 µm da suspensão peneirada de caulim. A solução resultante (<2 µm) é submetida ao separador magnético, visando a retirada das impurezas que são responsáveis pela coloração róseo-escuro e cinza do caulim. Finalizada a separação, a polpa de caulim não magnético sofre a aglomeração através do uso de soluções ácidas, com o objetivo de melhorar a etapa de branqueamento. Após o branqueamento, há a filtragem em filtro-prensa da polpa, para em seguida redispersá-la visando a secagem em secadores do tipo

spray-dryer. Por fim, tem-se o armazenamento do caulim seco e pulverizado em silos de concreto. Barata (1998) apresenta na figura 11 o fluxograma simplificado do processo de beneficiamento deste tipo de indústria.

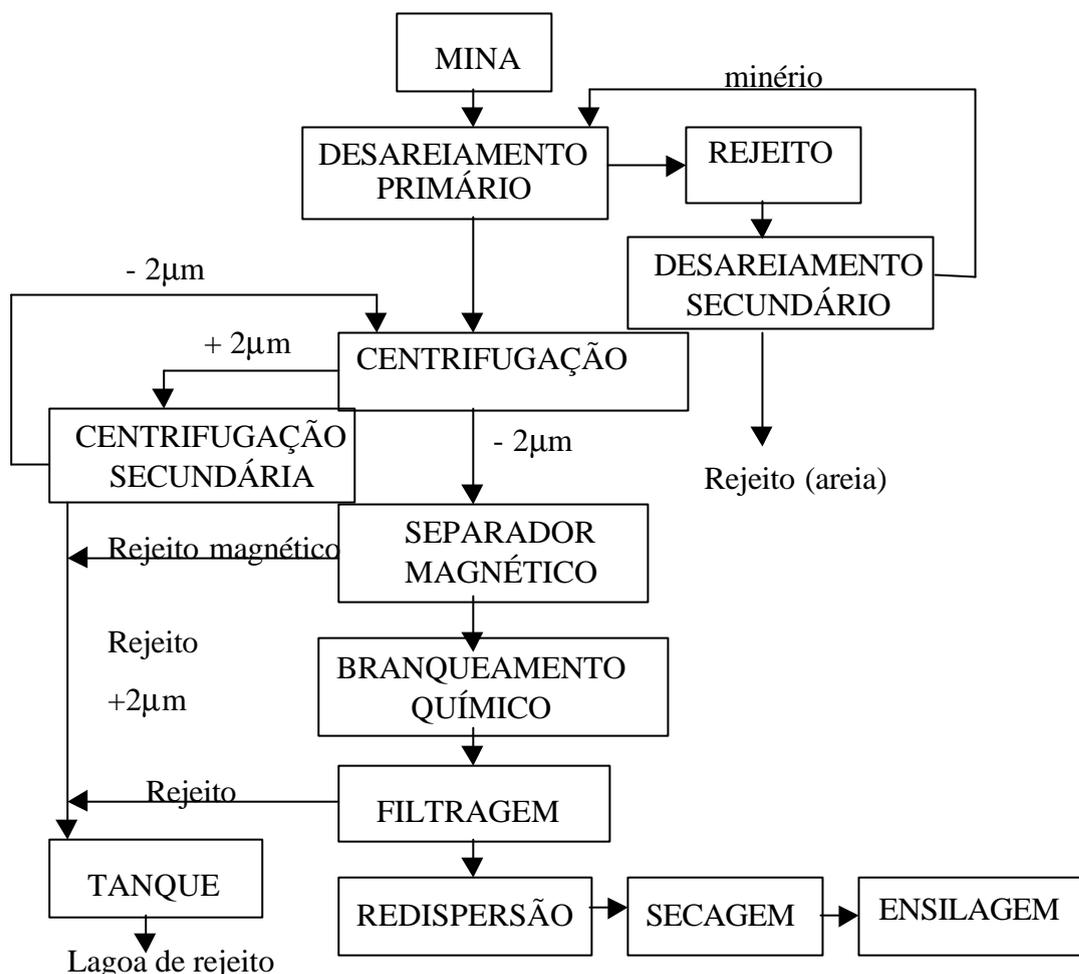


Figura 11 Fluxograma do processo de beneficiamento de uma indústria exploradora de caulim localizada na região amazônica (BARATA, 1998).

Neste processo tem-se, segundo Flores (1998), dois tipos de rejeito. O primeiro apresenta partículas grossas, formadas basicamente de quartzo na forma de areia, que é depositado no próprio local de extração. O segundo, que representa 26% do total extraído da mina, é formado por uma solução aquosa do argilomineral caulinita sob a forma de partículas empilhadas que não foram totalmente separadas durante o processo de beneficiamento. A autora acrescenta que neste segundo rejeito ainda há presença de impurezas (ferro e titânio) em teores na ordem de 5%.

Com relação a este segundo rejeito, Barata (1998) relata que devido à grande produção anual desta indústria, há a necessidade de execução de lagoas para onde são bombeadas as partículas magnéticas (óxido de ferro, titânio e caulinita com ferro na estrutura cristalina) e as partículas mais grosseiras de caulim. Com o preenchimento das lagoas com este resíduo

(polpa), há a sedimentação do caulim e a remoção da água excedente para o rio, após a correção do pH, através do tubo extravasor. Com a evaporação da água na lagoa, é depositada sobre esta área uma camada orgânica visando proporcionar o crescimento de vegetação.

Ocorre que pelo alto volume de rejeito gerado, cerca de 970 mil toneladas anuais, a execução destas lagoas está se tornando um problema ambiental, haja vista a necessidade de grande áreas para o desmatamento. Esta situação é ratificada por Flores (1998), que estimou em aproximadamente 2,7 milhões de toneladas a quantidade de rejeito depositado em lagoas. Para chegar a este valor, a autora teve como base as informações obtidas do corpo técnico da empresa, referentes à produção desde o ano de 1976 até o ano de 1997 e a porcentagem de rejeito gerado por tonelada de minério extraído da mina. Deste modo, a autora acrescenta que após 300 anos, período projetado para a exploração da jazida, haverá uma sensível alteração na paisagem, principalmente no que se refere à vegetação existente.

De acordo com Flores (1998), este rejeito é constituído basicamente pelo argilomineral caulinita com a presença de certos teores de alguns fases inertes como o quartzo, o ferro e o titânio, apresentando como característica física uma distribuição granulométrica de extrema finura, com diâmetro médio de 0,5 μm . Este conjunto de características credencia este material a ser utilizado como uma fonte alternativa para a obtenção do MCAR, evitando deste modo agressão à natureza decorrente de seu acúmulo.

Dentre os primeiros trabalhos com este tipo de rejeito destaca-se o realizado por Pera e Amrouz (1998), que obteve excelente atividade pozolânica quando calcinado com temperaturas entre 700°C e 750°C, por um período de 2 a 5 horas. Na comparação com o dois tipos de MCAR disponíveis comercialmente realizada neste trabalho, verificou-se valores superiores de consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no MCAR proveniente de rejeito. Outro trabalho com este tipo de rejeito, visando a produção do CAD, realizado por Barata (1998), ratificou o potencial pozolânico deste material.

Além deste rejeito, tem-se também a possibilidade de obtenção do MCAR através do uso de outro tipo de resíduo, proveniente de tijolos cerâmicos. Este tipo de resíduo apresenta, segundo Cordeiro et al. (2002), após o processo de moagem, uma atividade pozolânica acima do mínimo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 1992). Em argamassas, com o uso de um teor de substituição de 20%, esta atividade pode ser refletida em melhoria no vigésimo oitavo dia de idade de aproximadamente 25%, em relação à mistura de referência. No concreto, com o uso de um teor de substituição de 15%, a melhoria foi de aproximadamente 30%. Apesar da grande melhoria obtida com este resíduo, acredita-se que o seu uso como MCAR pode ser prejudicada pela grande variabilidade da qualidade do rejeito de tijolos cerâmicos, o que pode

dificultar a manutenção das contribuições obtidas pelos autores no referido trabalho, o que no entanto não impede o seu uso como uma pozolana comum.

3.7 Efeito do metacaulim de alta reatividade (MCAR) em materiais a base de cimento

3.7.1 No estado fresco

a) Consumo de água

O uso do MCAR no concreto, assim como as demais pozolanas de alta reatividade, resulta normalmente no aumento da demanda de água, quando comparado com o concreto sem o uso de adições minerais, para a obtenção da mesma consistência. Este aumento na demanda de água no concreto com uso do MCAR pode ser constatado nos trabalhos realizados por Basheer et al. (1999) e Qian e Li (2001).

Sabir et al. (1999), relatando o aumento da demanda de água em concretos com MCAR, verificou que os testes padronizados de trabalhabilidade (abatimento do tronco de cone, Vebe, fator de compactação) não foram capazes de quantificar a influência nas propriedades do estado fresco do concreto com MCAR, em especial nas misturas com baixa relação $a/(c+MCAR)$, haja vista que estas misturas, mesmo aparentando estarem relativamente secas, exibiam uma boa coesão e compacidade quando vibradas. No trabalho de Qian e Li (2001), teve-se que quanto maior o teor de aditivo, menor é a variação nos resultados obtidos no abatimento do tronco de cone em concretos com MCAR. Sabir et al. (1999) constataram, em misturas com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,45, que o emprego da cinza volante pode compensar a maior demanda de água decorrente do uso do MCAR, diminuindo com isto o consumo de aditivo superplastificante por parte do concreto.

Na comparação da demanda de água obtida com o MCAR com a obtida com as demais pozolanas de alta reatividade, observam-se poucos dados que possam fornecer uma conclusão a respeito do assunto. Caldarone et al. (1994), comparando a demanda de água de concretos com o MCAR e com a sílica ativa, constatou uma diminuição de 25% a 35% no consumo de superplastificante no concreto com o MCAR. Caldarone e Gruber (1995) também obtiveram uma redução de 28% na demanda de superplastificante no concreto com MCAR, em relação ao concreto com sílica ativa. Avaliando teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20%, Christodoulou (2000) chegou a uma redução média de 20% no consumo de superplastificante com o uso do MCAR em relação à sílica ativa.

Por outro lado, Zhang e Malhotra (1995), em outro trabalho experimental com o uso do MCAR e da sílica ativa no concreto, em teores de substituição na ordem de 10% sobre a

massa de cimento, chegaram à conclusão que o tipo de adição não resultou em variação no consumo de superplastificante. Barata (1998), estudando concretos com teores de adição de 10% tanto para a sílica ativa quanto para o MCAR, constatou que para relações $a/(c+MCAR)$ de 0,39 e 0,47 o consumo de superplastificante no concreto com MCAR diminuiu em aproximadamente 30% e 17%, respectivamente, em comparação ao obtido no concreto com a sílica ativa. Contudo, na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,64 o consumo de superplastificante no concreto com sílica ativa foi 40% do obtido com o uso do MCAR. Acredita-se que este comportamento deve-se à forma esférica da sílica ativa.

Mesmo com a ausência de resultados conclusivos, acredita-se que pelo fato da granulometria do MCAR ser, em média, dez vezes superior à da sílica ativa, a sua adoção tende a requerer um menor consumo de superplastificante, pois em poucas situações há um maior consumo deste aditivo, por parte do concreto com o MCAR.

b) Aspectos reológicos

O uso do MCAR, assim como ocorre no concreto com sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, resulta numa exsudação extremamente inferior à obtida no concreto de referência. Neste caso, tem-se novamente como origem de tal comportamento a extrema finura do MCAR, que provoca o melhor empacotamento dos grãos, reduzindo o número de canais ascendentes de água.

O comportamento da exsudação em concretos com uso do metacaulim foi estudado por Saad et al. (1982) que constataram, com teores de substituição de até 50% desta adição mineral, que a exsudação é reduzida à metade, quando comparada com a obtida no concreto de referência. Outros trabalhos, realizados por Zhang e Malhotra (1995) e Caldarone et al. (1994), utilizando misturas com o MCAR e misturas com a sílica ativa, constataram uma grande redução da exsudação quando comparado com o concreto de referência. Os pesquisadores também observaram uma maior exsudação na mistura com o MCAR, quando comparada com a obtida com a sílica ativa; contudo, o MCAR apresentou outras vantagens, como a maior facilidade de acabamento.

Basheer et al. (1999), avaliando a influência da adição de MCAR na trabalhabilidade do concreto, verificaram que mesmo com menores valores de abatimento, a mistura apresenta facilidade de lançamento e adensamento. A maior facilidade de lançamento, adensamento e acabamento evidenciada com o uso do MCAR é decorrente de sua distribuição granulométrica. Esta distribuição pode ser controlada durante a sua produção, tornando-se deste modo uma vantagem do MCAR, quando comparada com outras pozolanas de alta reatividade, como a sílica ativa, que não possuem este controle. Contudo, deve-se ressaltar

que apesar das vantagens decorrentes do controle sobre a sua distribuição granulometria, tem-se por outro lado o fato da moagem agregar custo à produção do MCAR.

c) Calor de hidratação

O calor de hidratação dos concretos com esta pozolana está diretamente relacionado às características físicas do metacaulim. Saad et al. (1982), utilizando um material com a superfície específica de 850 m²/kg na produção de concreto massa, obtiveram uma diminuição do calor de hidratação, principalmente nas primeiras horas. Os autores justificaram que este comportamento deveu-se aos altos níveis de substituição de cimento por metacaulim, adotados na ordem de 30% e 50%.

Contudo, este comportamento tende a ser diferente quando se adota o MCAR, devido à sua alta finura. Ambroise et al. (1994) verificaram aumentos, em relação à mistura de referência, de 1°C, 6°C e 8°C, em pastas com substituições de 10%, 20% e 30% de MCAR, respectivamente, confirmando deste modo o efeito acelerador desta pozolana sobre o processo de hidratação do cimento. Este comportamento também foi obtido por Bai e Wild (2002) quando do uso de teores de substituição de 10% e 15% em argamassas.

Estes resultados evidenciam um panorama semelhante ao observado quando do uso da sílica ativa, ou seja, não oferece possibilidade de diminuição do calor de hidratação. Esta situação pôde ser verificada por Zhang e Malhotra (1995), num trabalho experimental em concretos, que envolveu uma mistura com 10% de MCAR, outra com 10% de sílica ativa. Neste trabalho, cujos resultados são apresentados na figura 12, onde verifica-se temperaturas semelhantes na mistura de referência e com sílica ativa, sendo estas, um pouco inferiores as obtidas com o MCAR. Na mistura com MCAR a temperatura máxima ocorreu em torno das 15 horas de hidratação, enquanto que nas outras misturas a temperatura máxima ocorreu às 19 horas (sílica ativa) e às 20 horas (referência). As maiores temperaturas na mistura com o MCAR mantiveram-se até o fim do ensaio, ou seja, até o sexto dia. Os autores creditam estes resultados à alta reatividade do metacaulim com o Ca(OH)₂. Sabir et al. (2001), utilizando argamassas, também constataram ligeiro aumento no calor de hidratação nas argamassas com sílica ativa e MCAR, em relação à argamassa de referência.

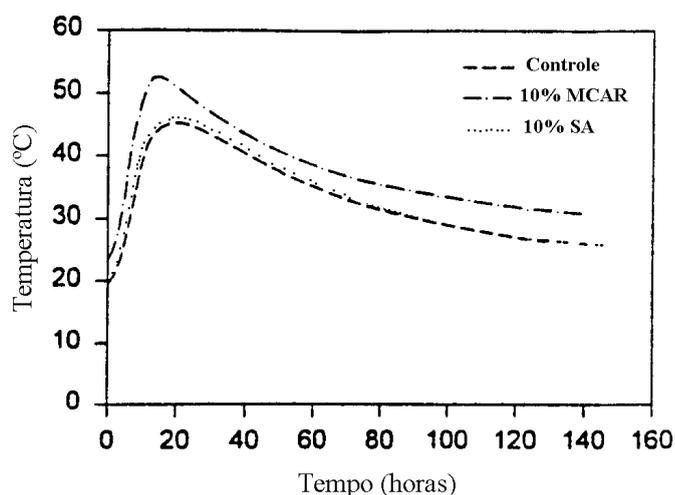


Figura 12 Comportamento do calor de hidratação em diferentes misturas (ZHANG e MALHOTRA, 1995).

A comparação entre argamassas com sílica ativa e com MCAR, em relação ao calor de hidratação, também foi o foco principal do trabalho realizado por Frias et al. (2000), onde constatou-se que as argamassa com 10% e 30% de MCAR apresentaram um incremento na temperatura de 10% a 15%, em relação à argamassa de referência, e ligeiramente superiores aos obtidos com a sílica ativa. Neste trabalho, o incremento de temperatura na argamassa com MCAR ocorreu entre a 18ª e a 30ª hora de hidratação, intervalo semelhante ao observado por Frias e Cabrera (2001). Os autores acrescentam que o MCAR é um típico exemplo onde o efeito da reação pozolânica é compensado pelo efeito de diluição, decorrente da substituição de cimento Portland.

Apesar dos resultados obtidos, os autores também relatam que é possível a obtenção de valores similares aos da argamassa de referência, em relação ao calor de hidratação relativo, usando para isto teores de substituição entre 10% e 12%. Esta possibilidade também é relatada por Rojas et al. (2000) em estudo com argamassas, onde verificaram a obtenção de valores similares ao traço de referência, quando do uso de teores de substituição na ordem de 30%. O comportamento do calor de hidratação do concreto com MCAR apresentou resultados semelhantes no trabalho realizado por Caldarone et al. (1994). Neste trabalho, os autores não constataram diferenças significativas na temperatura do concreto, quando do uso de MCAR, em teores de 5 e 10%, e do uso de sílica ativa, também em teores de 5 e 10%, em relação à mistura de referência. Esta situação foi igualmente verificada por Caldarone e Gruber (1995), utilizando teores de 8,5%, tanto para a sílica ativa quanto para o MCAR, onde obtiveram temperaturas semelhantes.

Bai e Wild (2002) obtiveram menores valores no calor de hidratação, contudo, utilizaram o MCAR em conjunto com a cinza volante. Os comportamentos discrepantes

relatados entre os diversos pesquisadores relacionados à influência do MCAR no calor de hidratação pode ser decorrente de diferenças existentes na sua pureza e na sua granulometria. Esta situação evidencia claramente a necessidade de um maior número de pesquisas visando esclarecer, de modo mais preciso, a influência das características físicas e mineralógicas do MCAR nesta propriedade.

d) Fissuração por dessecação superficial e retração plástica

Rols et al. (1999) analisaram a retração plástica em concretos de ultra-alta resistência (>100 MPa), adotando diferentes tipos de partículas de extrema finura, como MCAR, sílica ativa, cristobalita e escória de alto forno moída. Nesta propriedade, os autores iniciaram as medições com duas horas após a moldagem, estendendo-se até as primeiras 24 horas, onde concluíram que a retração plástica total neste tipo de concreto é muito alta, variando de 1170 à 1550 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os autores também constataram que a presença de partículas de extrema finura resulta em decréscimo da retração plástica autógena em comparação aos valores obtidos no concreto de referência; contudo, provocam o aumento da retração por dessecação superficial. O aumento na retração por dessecação superficial no concreto foi de 66% com sílica ativa e de 38% no concreto com MCAR. A redução da retração autógena nas primeiras 24 horas também foi constatada por Brooks e Johari (2001). Neste trabalho, a redução foi maior, quanto maior o teor de substituição de MCAR.

Por outro lado, Caldarone et al. (1994), estudando concretos com 5 e 10% de MCAR, não observaram fissuras decorrentes de retração plástica. Os diferentes comportamentos obtidos em trabalhos que focalizam esta propriedade evidenciam novamente a ausência de pesquisas que forneçam informações conclusivas sobre a influência do MCAR no concreto.

3.7.2 No estado endurecido

a) Resistência à compressão

O comportamento da resistência à compressão perante o emprego do metacaulim tem apresentado algumas variações decorrentes de suas próprias características. Quando o metacaulim apresenta altas quantidades de fases inertes, como o quartzo e a mica, e características físicas pouco apropriadas (baixa finura), as reações pozolânicas tendem a desenvolver-se lentamente, o que conseqüentemente retarda o crescimento e diminui as resistências obtidas no concreto, tendo em contrapartida, baixas taxas de liberação de calor.

Nesta situação, tem-se buscado empregar esta pozolana em estruturas de concreto massa, com elevados teores de substituição. Como exemplo, apresenta-se a construção da

barragem de Jupirá que adotou um teor de substituição de 20% de metacaulim e as barragens de Ilha Solteira, Capivara e Água Vermelha que adotaram teores de substituição de metacaulim entre 30% e 50% (SAAD et al., 1982; SOBRINHO, 1970). Nestas obras, obtiveram-se valores para a resistência à compressão semelhantes no terceiro mês e superiores após um ano, quando comparados com o concreto de referência, sem adição.

Com relação ao MCAR, que apresenta alta finura e pouca quantidade de fases inertes, o estudo visando identificar a sua influência na resistência à compressão ainda se encontra num estágio bem inferior, quando comparado com os estudos envolvendo outras pozolanas com alta reatividade, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz. Contudo, assim como na sílica ativa e na cinza de casca de arroz, as melhorias na resistência à compressão do concreto com MCAR também são decorrentes da sua ação pozolânica e do refinamento dos poros devido à sua finura.

Wild et al. (1996), utilizando a substituição parcial de cimento Portland por MCAR (superfície específica de 12000 m²/kg), em teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% na produção do concreto, constataram que até o décimo quarto dia há uma melhoria na resistência à compressão. A melhoria da resistência no primeiro dia é creditada principalmente à aceleração do processo de hidratação do cimento, combinado com a contribuição do efeito filer. Os autores acrescentam, que neste primeiro dia, o efeito pode ser diluído quando adota-se altos consumos de MCAR. Entre o sétimo e décimo quarto dia, a melhoria da resistência à compressão é influenciada pela reação pozolânica.

Verificando a resistência relativa de argamassas e pastas, relacionando a resistência da mistura com MCAR com a mistura de controle, Wild e Khatib (1997) obtiveram os melhores valores ao 14º dia com melhorias na ordem de 40%, sendo que nas outras idades também ocorreram melhorias, independente do teor de substituição. Neste trabalho, os autores constataram que após o 28º dia há a evidência, principalmente nas pastas, de reações secundárias do MCAR, sem que contudo tenha-se verificado um aumento na resistência relativa da mistura. Sabir et al. (1999), estudando misturas com 10% e 20% de MCAR, também constataram uma maior eficiência desta adição no décimo quarto dia, após este momento houve um declínio desta eficiência, chegando, após um ano, a valores semelhantes de resistência à compressão, em relação à mistura de referência. Por outro lado, no trabalho de Curcio et al. (1998), utilizando argamassas com teor de substituição de 15%, verificou-se que as melhorias na resistência estenderam-se até o vigésimo oitavo dia. Kostuch et al. (1993) também constataram melhorias após o vigésimo oitavo dia, contudo, após um ano, obtiveram resultados similares entre o concreto de referência e os com teores de substituição de 10% e 20% de MCAR.

A baixa contribuição à melhoria da resistência à compressão do concreto, após o décimo quarto dia, também foi relatada por Khatib e Wild (1996), que atribuem esta situação a dois fatores: a) formação de uma camada inibidora pelos produtos de hidratação, que envolvem as partículas de metacaulinita, impedido a sua reação pozolânica com o hidróxido de cálcio. Portanto, os grandes poros formados pela dissolução dos cristais de hidróxido de cálcio não podem ser totalmente fechados pelos produtos de hidratação posteriores; b) transformação de produtos de menor densidade, como o C_2ASH_8 e C_4AH_{13} , em hidrogranada, de maior densidade. Esta transformação está associada com a diminuição do volume de sólidos, o que resulta no aumento da porosidade e na redução da melhoria da resistência (SILVA e GLASSER, 1990). Segundo os autores do trabalho, não há motivos para que tais fatores não atuem conjuntamente; contudo, para o melhor conhecimento destes fatores há a necessidade de um maior número de pesquisas referentes ao assunto.

A temperatura em que se realiza o processo também pode ser um fator que influencie no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto com MCAR. Sabir e Wild (2000), estudando concretos com teores de substituição de 10% e de 20% de cimento por MCAR, verificaram uma melhoria em torno de 10% quando o processo se desenvolve a 35°C e uma diminuição média de 12,5% a 50°C, em relação à resistência na temperatura de referência (20°C). Segundo os autores, a diminuição da resistência, quando a cura é desenvolvida à 50°C, é creditada ao surgimento de fissuras térmicas decorrentes da aceleração da hidratação do cimento e da reação MCAR- $Ca(OH)_2$.

A comparação do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto com o MCAR em relação a outras de pozolanas de alta reatividade, também já foi foco de pesquisa. Na comparação com a sílica ativa, cujos resultados estão colocados na figura 13, Zhang e Malhotra (1995) constataram que a mistura com 10% de MCAR apresentou maiores resistências até o sétimo dia e resistências um pouco inferiores no vigésimo oitavo dia, em relação à mistura com sílica ativa. Na comparação com a mistura de referência, a mistura com MCAR manteve-se sempre com resistências superiores. Resultados semelhantes foram obtidos por Taylor e Burg (1999) ao utilizarem o teor de adição de 7%, tanto para a mistura com sílica ativa, como para a mistura com MCAR.

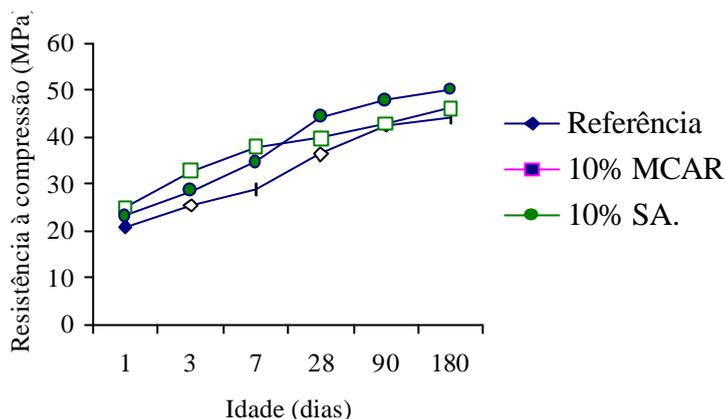


Figura 13 Comportamento da resistência à compressão, do concreto com sílica ativa e com o MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1995).

Um comportamento diferente foi identificado por Caldarone et al. (1994) na comparação entre cinco tipos de misturas: sem adição, com 5% de MCAR, com 10% de MCAR, com 5% de sílica ativa e com 10% de sílica ativa, todos com a mesma relação $a/(c+MCAR)$, igual a 0,40. Neste trabalho, cujos resultados estão colocados na figura 14, constatou-se em quase todas as idades analisadas um comportamento ligeiramente superior das misturas com MCAR em relação às misturas com sílica ativa. Na comparação com o concreto de referência, houve em todas as idades uma melhoria da resistência à compressão do concreto com MCAR, tanto para o teor de 5% quanto para o teor de 10%. Qian e Li (2001), adotando uma relação $a/(c+MCAR)$ de 0,38 em misturas com 5% e 10% de MCAR, obtiveram melhorias semelhantes às obtidos por Caldarone et al. (1994).

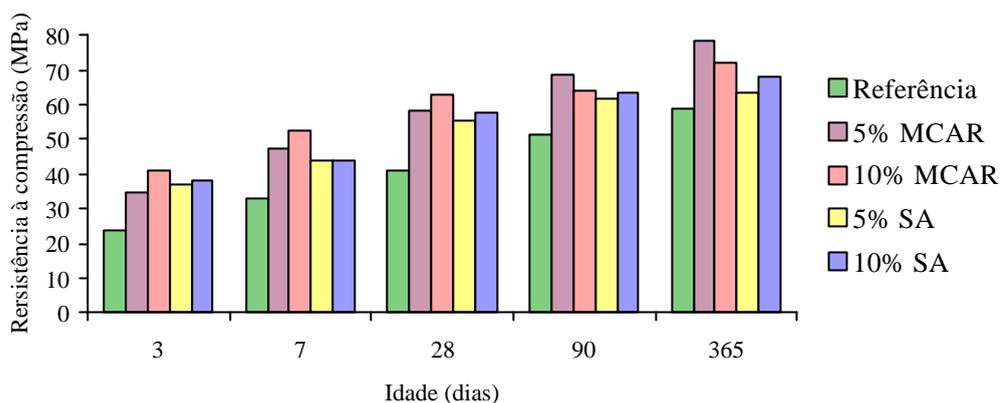


Figura 14 Comportamento da resistência à compressão do concreto com diferentes teores de sílica ativa e de MCAR (CALDARONE et al., 1994).

Os resultados obtidos por Caldarone et al. (1994) foram similares aos relatados por Wild et al. (1996). Neste trabalho os autores identificaram três fatores responsáveis pela contribuição do MCAR para a resistência do concreto. O primeiro é o efeito filer, que é imediato, o segundo é a aceleração da hidratação do cimento Portland, que ocorre nas primeiras 24 horas, o terceiro fator é a reação pozolânica que ocorre nas duas primeiras semanas. Após este período, os ganhos de resistência, segundo os autores, foram menores contudo, superiores aos ganhos do concreto de referência.

Os melhores resultados do concreto com uso do MCAR, em relação à sílica ativa, também foram constatados por Caldarone e Gruber (1995). Neste trabalho, os autores obtiveram melhorias de 13%, 6,7%, 9%, 4,5%, 4,1% e 2,8% aos 7, 28, 56, 90, 180 e 365 dias, respectivamente, em relação a mistura de referência. É interessante observar que as melhorias obtidas no concreto vão diminuindo com o aumento da idade, evidenciando novamente que os maiores ganhos na resistência do concreto com o MCAR ocorrem nas primeiras idades.

Estudos em campo, com o concreto com o MCAR, também ratificaram a melhoria obtida no concreto decorrente do uso desta pozolana. Neste estudo, Balogh (1995) relata que o concreto com teor de substituição de 9% de MCAR e com a mesma relação $a/(c+MCAR)$ do concreto sem o uso de pozolana, na ordem de 0,43, apresentou uma melhoria de 12% na resistência à compressão.

b) Resistência à tração

No caso do uso do MCAR, constata-se tanto para concreto convencional quanto para o de alta resistência, a carência de um maior número de pesquisas referentes à sua influência na resistência à tração, o que tem como consequência a ausência de resultados que possam

evidenciar com clareza o seu comportamento. Dentre estas poucas pesquisas, destacam-se as realizadas por Caldarone et al. (1994) e Zhang e Malhotra (1995).

No trabalho realizado por Caldarone et al. (1994), utilizou-se vigas de 15cm x 15cm x 51cm para obtenção da resistência à tração na flexão nas seguintes idades: 7, 28 e 90 dias. Neste trabalho, cujos os valores estão colocados na figura 15, foi comparado o desempenho da mistura com 10% de MCAR, com o obtido na mistura com 10% de sílica ativa e com a mistura sem a adição mineral. As melhorias obtidas por Caldarone et al. (1994) no ensaio de resistência à tração por flexão, realizados nas misturas com MCAR, são semelhantes às obtidas por Qian e Li (2001).

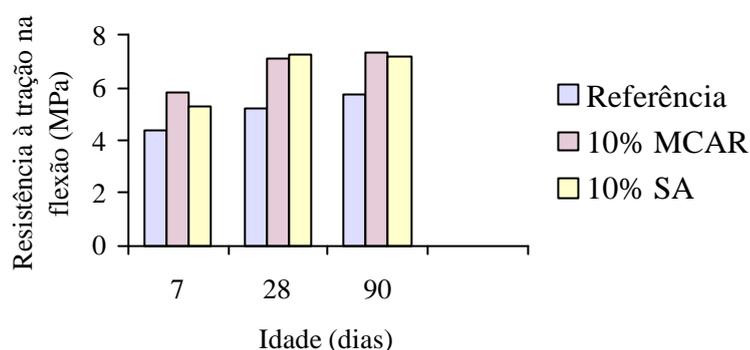


Figura 15 Comportamento da resistência à tração, em concretos com MCAR e com a sílica ativa (CALDARONE et al., 1994).

No que diz respeito aos resultados obtidos por Caldarone et al. (1994), tem-se nas misturas com a sílica ativa e com o MCAR um melhor desempenho em relação à mistura de referência. Na comparação entre os resultados obtidos com a sílica ativa e com o MCAR, constata-se que as misturas apresentaram valores semelhantes, sendo que as maiores diferenças entre os resultados foram obtidas no sétimo dia. Esta diferença se deve, possivelmente, à grande contribuição exercida pelo MCAR às propriedades mecânicas nos primeiros quatorze dias de idade do concreto.

Quanto ao trabalho realizado por Zhang e Malhotra (1995), teve-se novamente nesta pesquisa o uso de um teor de substituição de 10%, tanto para a mistura com MCAR quanto para a mistura com sílica ativa, sendo realizado o ensaio de tração por compressão diametral, através do uso corpos-de-prova cilíndricos de 15,2cm x 30,5cm, e o ensaio de tração na flexão, através do uso de vigas de 7,6cm x 10,2cm x 40,6cm. Neste trabalho, os resultados foram obtidos somente no vigésimo oitavo dia de idade e encontram-se colocados na figura 16, onde constata-se novamente os maiores valores nas misturas com a sílica ativa e com o MCAR, em relação ao concreto de referência. Na comparação do comportamento entre as

misturas com adições, verificou-se uma ligeira superioridade dos resultados obtidos com MCAR.

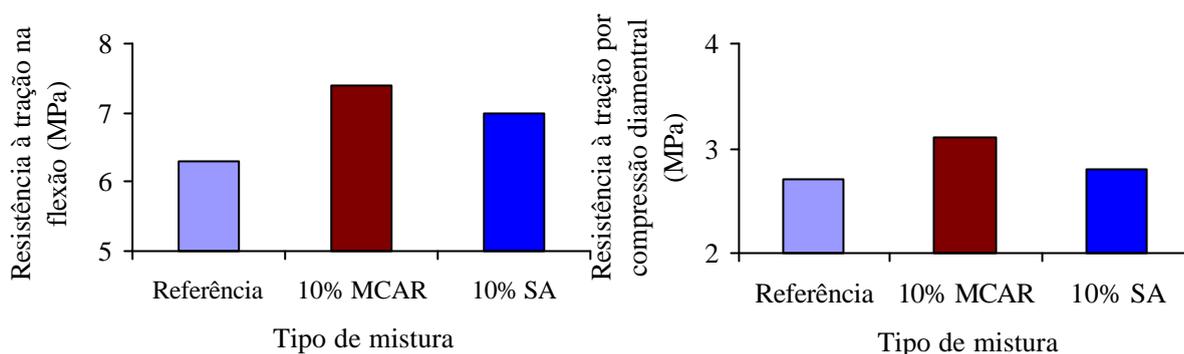


Figura 16 Comportamento da resistência à tração na flexão e na compressão diametral do concreto com sílica ativa e MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1995).

Qian e Li (2001) relatam a necessidade de variação do teor de substituição entre 10% e 15%, quando tem-se o objetivo de se obter um melhor desempenho na resistência à tração, decorrente do uso de MCAR no concreto.

c) Módulo de elasticidade

Com relação ao módulo de elasticidade, constata-se a mesma situação observada na resistência à tração, ou seja, um reduzido número de trabalhos referentes ao comportamento do concreto com MCAR. Neste contexto, apresentam-se novamente os trabalhos realizados por Caldarone et al. (1994), Qian e Li (2001) e Zhang e Malhotra (1995). Zhang e Malhotra (1995), utilizando somente um teor de substituição, obtiveram os resultados apresentados na figura 17, ligeiramente superiores nos concretos com adições, sendo que os maiores valores foram encontrados na mistura com MCAR. As melhorias obtidas nas misturas de MCAR em relação ao concreto de referência foram semelhantes às obtidas por Qian e Li (2001).

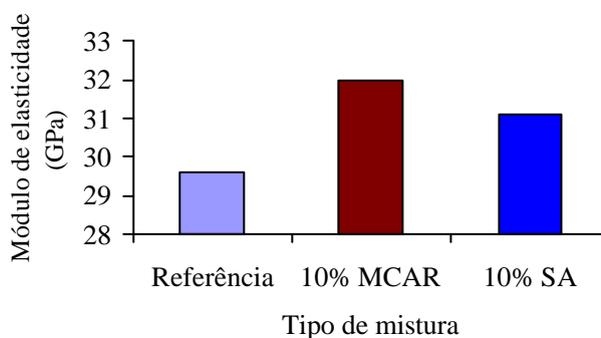


Figura 17 Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com sílica ativa e com o MCAR (ZHANG e MALHOTRA, 1994).

Caldarone et al. (1994), apesar de utilizarem dois diferentes teores e duas diferentes idades de ensaio, obtiveram em seu trabalho um comportamento semelhante ao constatado por Zhang e Malhotra (1994), conforme observado na figura 18. Em outro trabalho, utilizando o teor de adição de 7%, Taylor e Burg (1999) também observaram valores ligeiramente maiores no módulo de elasticidade do concreto com MCAR, em relação ao concreto com sílica ativa.

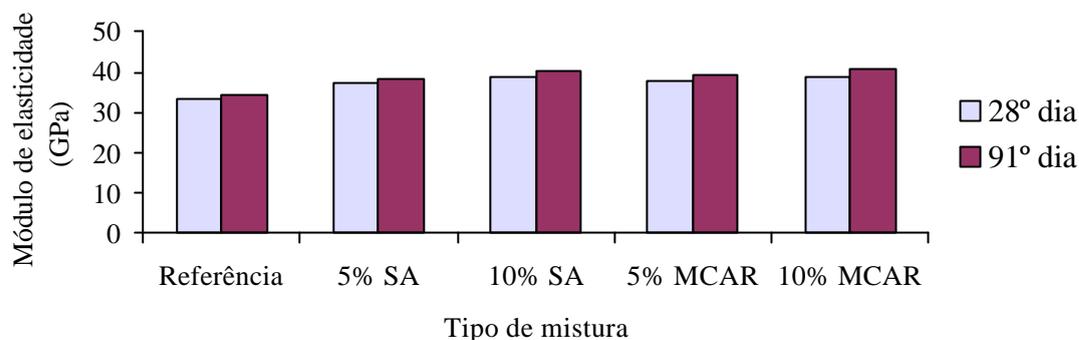


Figura 18 Comportamento do módulo de elasticidade de concretos com diferentes teores de sílica ativa e de MCAR (CALDARONE et al., 1994).

Os resultados obtidos nesta propriedade, apesar de serem poucos, evidenciam o comportamento relatado por Mehta e Monteiro (1994), onde os autores ressaltam a grande influência do agregado graúdo e a pouca influência da adição mineral no módulo de elasticidade do concreto.

a) Coeficiente de Poisson

No que se refere ao coeficiente de Poisson, não se obteve na literatura existente, dados disponíveis que verifiquem a influência do MCAR nesta propriedade do concreto.

4 Programa experimental

Para a obtenção do comportamento do concreto com o uso do MCAR, foi realizado um programa experimental, constituído das seguintes etapas:

- definição do planejamento de ensaios, principalmente no que se refere às variáveis de resposta, às variáveis de controle e ao número de corpos-de-prova necessários para se atingir os objetivos estabelecidos;
- seleção e caracterização dos materiais que atendam às exigências estabelecidas para a produção do concreto. Nesta etapa, deu-se atenção especial para a caracterização do MCAR, visto que a sua influência nas propriedades mecânicas do concreto é o foco principal desta pesquisa; e
- definição do processo de dosagem do traços.
- Realização dos ensaios mecânicos e de microestrutura, e análise dos resultados.

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, situado na cidade de Porto Alegre-RS. Visando auxiliar o estudo, utilizou-se a análise da microestrutura com o uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV), a difração de raios-x, a titulometria, a análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (TG) que também foram desenvolvidos no centro de microscopia, no laboratório de análises químicas do instituto de geociências, no laboratório de química analítica inorgânica do departamento de química e no LASID, respectivamente, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, foi realizada na Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS).

4.1 Planejamento dos ensaios

Conforme relatado no item 1.4, o estudo do comportamento do concreto com o MCAR envolveu algumas variáveis, bem como as interações entre estas variáveis, o que pode, de uma maneira ou de outra, interferir sobre as variáveis de resposta adotadas no experimento. Ocorre que, devido ao grande número de variáveis, teve-se um considerável aumento do número de combinações entre as mesmas.

Esta situação resultaria numa grande dificuldade para a execução desta pesquisa, seja por motivos econômicos, seja por motivo de prazo para executá-la. Deste modo, foi adotado para os ensaios mecânicos um projeto estatístico, que teve como método o fracionamento. Montgomery (1976) e Nanni e Ribeiro (1992) relatam que este método diminui sensivelmente o número de ensaios, sem comprometer as informações necessárias para que se atinja o

objetivo desejado. Dal Molin (1995) constatou, em longo trabalho experimental, que o uso do fracionamento em nada prejudicou as informações obtidas.

O método de fracionamento é baseado em observações (nesta pesquisa estas observações são os ensaios) realizadas em pontos específicos do espaço amostral de maneira que o comportamento das variáveis de resposta é mantido, obtendo-se as informações relevantes com um menor número de corpos-de-prova. Este projeto estatístico é explicado por Montgomery (1976), sendo definido como projeto fatorial fracionado somado a pontos axiais e centrais que proporcionam o estudo dos efeitos produzidos nas variáveis de resposta, pela mudança de nível dos fatores controláveis. Um exemplo gráfico deste projeto é colocado na figura 19, onde observa-se que os pontos formam uma estrela e um cubo, sendo que os pontos que formam a estrela possibilitam informações das interações entre os fatores e os pontos que formam o cubo identificam os efeitos de mais alta ordem.

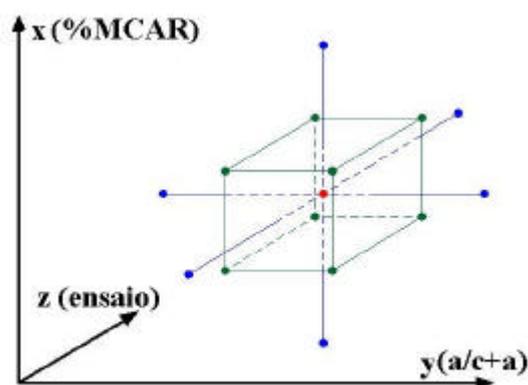


Figura 19 A estrela e o cubo do projeto estatístico fatorial fracionado.

4.1.1 Ensaios Mecânicos

Para a execução dos ensaios mecânicos (compressão simples, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade), definidos na pesquisa como variáveis de resposta, fez-se necessário a fixação de outras variáveis, definidas como variáveis independentes. Adotou-se cinco níveis de fatores controláveis para cada variável independente, conforme segue:

- **Relação água/(cimento+MCAR):** 0,25; 0,28; 0,35; 0,46; e 0,60. A obtenção destes valores foi realizada tendo-se como parâmetro a função exponencial decrescente da lei de Abrams, onde pequenas variações nos termos próximos ao ramo decrescente da curva (baixas relações a/c) resultam em mudanças consideráveis na resistência do concreto. Desta forma, seguindo o mesmo princípio adotado por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), procurou-se uma faixa de resistência que cobrisse principalmente os concretos de alta resistência, adotando para isso

uma progressão aritmética de razão igual a 0,035. A relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60, apesar de não ser adequada para a produção do CAR, fez-se necessária para que se pudesse ter uma maior variação da relação $a/(c+MCAR)$, que facilitasse a verificação da influência desta variável no concreto com o MCAR. A progressão aritmética utilizada para a obtenção dos valores de relação $a/(c+MCAR)$, apresentou-se da seguinte forma:

a: primeiro termo da progressão aritmética = 0,25

b: razão da progressão aritmética = 0,035

$a + b = 0,25 + 0,035 = 0,285 \Rightarrow$ Por aproximação tem-se o valor 0,28

$0,285 + 2b = 0,285 + 2(0,035) = 0,355 \Rightarrow$ Por aproximação tem-se o valor 0,35

$0,355 + 3b = 0,355 + 3(0,035) = 0,46 \Rightarrow 0,46$

$0,46 + 4b = 0,46 + 4(0,035) = 0,60 \Rightarrow 0,60$

- **Idade:** 1, 7, 14, 28 e 91 dias. Foram adotadas cinco idades para acompanhamento das evoluções no tempo das propriedades mecânicas do concreto com o MCAR, sendo definidas com base nas utilizadas tradicionalmente em tecnologia do concreto.

- **Teor de substituição:** 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de MCAR, em volume absoluto de cimento. A adoção destes teores tem como base os trabalhos referentes ao uso do MCAR no concreto (Wild e Khatib, 1997; Wild et al., 1996).

A tabela 8 apresenta, de maneira esquemática, as variáveis utilizadas para o desenvolvimento do programa experimental. Ressalta-se que para a obtenção do número total de corpos-de-prova, foram adotados 2 corpos-de-prova por variável analisada, provenientes de betonadas distintas.

Tabela 8 Variáveis analisadas no programa experimental dos ensaios mecânicos.

Variáveis independentes			Variáveis de resposta	Número de corpos-de-prova com projeto completo
Idade (dias)	Relação água/(c+MCAR)	Teor de MCAR (%)	Ensaio a realizar	
1	0,25	0	-Compressão simples	250
7	0,28	5	-Tração por compressão	250
14	0,35	10	diâmetro	250
28	0,46	15	- Tração por flexão	250
91	0,60	20	- Módulo de elasticidade	
Total:5	5	5	4	1000

Com a definição de todo experimento, partiu-se para o seu fracionamento, onde cada ponto do cubo e da estrela, colocados na figura 19, representam uma combinação da relação $a/(c+MCAR)$, do teor de adição de MCAR e da idade de rompimento. O fracionamento é

colocado na tabela 9, que apresenta os pontos escolhidos para a realização dos ensaios laboratoriais, sendo os demais pontos avaliados estatisticamente.

Tabela 9 Combinação dos teores de substituição e relação $a/(c+MCAR)$.

0% de MCAR	Relação $a/(c+MCAR)$				
	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	YY		XX		YY
7 dias					
14 dias	YY		XX		YY
28 dias					
91 dias	YY		XX		YY
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia					
7 dias		XX		XX	
14 dias		YY		YY	
28 dias		XX		XX	
91 dias					
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	XX		XX		XX
7 dias					
14 dias	XX		XX		XX
28 dias					
91 dias	XX		XX		XX
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia					
7 dias		XX		XX	
14 dias		YY		YY	
28 dias		XX		XX	
91 dias					
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	YY		XX		YY
7 dias					
14 dias	YY		XX		YY
28 dias					
91 dias	YY		XX		YY

Observações: 1. Cada **X** e **Y** representam um corpo-de-prova.

Observa-se pela tabela 9 que, além das combinações decorrentes do processo de fracionamento (pontos X), adotou-se outras combinações (pontos Y) visando colher o máximo possível de informações relacionadas ao comportamento do concreto com o MCAR facilitando com isto a obtenção dos modelos, sem contudo inviabilizar a sua execução. Outro ponto a ressaltar na tabela 9 é o número de 2 corpos-de-prova por variável analisada em vez de 3, número comumente adotado em pesquisas na área. A opção por um número inferior é

justificado pelo grande número de pontos ensaiados em laboratório, o que possibilita um número menor de corpos-de-prova, sem prejuízo das informações obtidas.

Com relação à configuração final do projeto fracionado, constata-se que o número de corpos-de-prova foi reduzido de 250, no projeto completo, para 78 corpos-de-prova para cada propriedade, ratificando os benefícios resultantes do uso do fracionamento. Como consequência, o número total de corpos-de-prova foi reduzido de 1000 para 312.

Com o objetivo de minimizar os efeitos das variáveis que não serão controladas, como: temperatura, operador, umidade, entre outras, foi realizada a aleatorização da ordem de execução das betonadas. Foi adotado também como critério a não repetição no dia da concretagem de traços com o mesma relação $a/(c+MCAR)$ ou com o mesmo teor de substituição. Isto fez com que houvessem três dias para a execução das concretagens, sendo rodados 5 traços nos dois primeiros dias e 3 traços no terceiro dia. Após os três dias foi concluída a primeira repetição, sendo seguido o mesmo princípio para a segunda repetição. A ordem de execução dos traços está colocada na tabela 10, onde as betonadas possuem o seguinte código: os dois primeiros números representam a relação $a/(c+MCAR)$, MC significa a pozolana utilizada no trabalho e o número final representa o teor de MCAR.

Tabela 10 Aleatorização da ordem de execução das betonadas.

Execução do traço	Betonadas
1º dia - 1ª Repetição	25MC0; 28MC5; 35MC10; 46MC15; 60MC20
2º dia - 1ª Repetição	25MC10; 28MC15; 35MC20; 46MC5; 60MC0
3º dia - 1ª Repetição	25MC20; 35MC0; 60MC10
4º dia - 2ª Repetição	25MC0; 28MC5; 35MC10; 46MC15; 60MC20
5º dia - 2ª Repetição	25MC10; 28MC15; 35MC20; 46MC5; 60MC0
6º dia - 2ª Repetição	25MC20; 35MC0; 60MC10

4.1.2 Ensaios na microestrutura

Com o objetivo de verificar o comportamento das fases (agregado, matriz e zona de transição matriz-agregado) do concreto quando do uso do MCAR, perante as diversas relações $a/(c+MCAR)$ e os diversos teores de substituição, foi realizada uma análise da microestrutura do concreto através do uso do MEV, por elétrons secundários e retro-espalhados.

As amostras para a realização da MEV foram provenientes dos próprios corpos-de-prova, sendo coletadas após a realização do ensaio mecânico, sendo preparadas com uso de álcool etílico e com uma fina película de ouro visando a obtenção de uma boa qualidade da imagem. No MEV, por elétrons retro-espalhados, adotou-se a resima para a realização do embutimento das amostras. As amostras provenientes dos corpos-de-prova também foram utilizadas para a realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Concomitantemente aos ensaios de MEV foram realizadas, em pastas, a análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (TG), a difração de raios-x e a titulometria. Nestas pastas foram adotadas as mesmas variáveis utilizadas no ensaio de MEV do concreto, sendo que na produção das pastas reduziu-se a quantidade de água a ser colocada, devido à absorção do agregado graúdo e miúdo. No caso das pastas, as amostras também foram depositadas em câmara úmida até o dia do ensaio, onde foram colocadas em álcool etílico, para posterior moagem e peneiramento.

Na a execução desta análise foi feita a opção por traços que representem o comportamento do concreto com a presença do MCAR. A opção por determinados valores de relações $a/(C+MCAR)$, teores de substituição e idades deve-se ao grande número de níveis das variáveis controladas (ou independentes) adotadas no programa experimental, o que inviabiliza um estudo da microestrutura de todos os traços rodados. É colocada na tabela 11 a programação dos ensaios para o concreto e para a pasta.

Tabela 11 Variáveis analisadas nos ensaios de microestrutura.

Teor de MCAR(%)	Relação $a/(c+MCAR)$	Idade (dias)	Ensaio Realizados	Mistura
0	0,25	1	MEV(por elétrons secundários e retro-espalhados) e porosimetria por intrusão de mercúrio.	Concreto
10	0,60	14		
20		28		
			Difração de raios-x, análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (TG) e a titulometria	Pasta

4.2 Metodologia para a realização 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 e por flexão dos concretos seguiram os procedimentos descritos na NBR 7222 (ABNT, 1994) e NBR 12142 (ABNT, 1992), respectivamente. Com relação ao módulo de elasticidade e ao coeficiente de Poisson, os procedimentos seguiram o descrito na NBR 8522 (ABNT, 1984).

4.3 Seleção e caracterização dos materiais

Os materiais usados no concreto foram oriundos da região de Porto Alegre, com exceção do MCAR utilizado como adição mineral, que é proveniente do estado do Pará.

4.3.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (ARI). A opção por este tipo de cimento é justificada pelo fato do mesmo apresentar no máximo 5% de adição de material carbonático, evitando assim que o efeito do uso do MCAR no concreto seja influenciado por outro tipo de adição pozolânica. Para a produção de todos os concretos foi adotado o mesmo cimento, proveniente do mesmo lote. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento empregado estão apresentadas na tabela 12, onde constata-se que o material utilizado atende às características da NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 12 Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.

Características	Determinações		Valores Obtidos	Especificações da NBR 5733 (ABNT, 1991)
Químicas**	Óxido de silício (SiO ₂)		19,51	-
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,17	-
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,85	-
	Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,05	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)		0,70	-
	Óxido de cálcio livre (CaO)		1,48	-
	Óxido de cálcio total (CaO)		64,32	-
	Resíduo insolúvel (% da massa)		0,46	≤ 1,0
	Perda ao fogo (% da massa)		3,73	≤ 4,5
	Óxido de magnésio (MgO) (% da massa)		1,32	≤ 6,5
	Trióxido de enxofre (SO ₃) (% da massa)		2,72	≤ 3,5
	Anidrido carbônico (CO ₂) (% da massa)		2,08	≤ 3,0
Físicas*	Finura	Resíduo na peneira 75 µm (%)	0,0	≤ 6,0
		Área específica (m ² /kg)	438,60	≥ 300
		Diâmetro médio (µm)	9,16	-
	Massa específica (NBR 6474 (ABNT, 1984))		3,09	-
Mecânicas*	Resistência à Compressão (MPa) NBR 7215 (ABNT, 1991)	1º dia	19,00	≥ 14,0
		3º dia	30,70	≥ 24,0
		7º dia	34,00	≥ 34,0

*Obtidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através de ensaios realizados no LAPROM e no laboratório do NORIE.

**Obtidos na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), através de fluorescência de raios-x.

4.3.2 Agregado miúdo

A areia utilizada foi de origem quartzosa, oriunda do rio Jacuí, cujas características estão colocadas na tabela 13. Antes de sua utilização o material foi secado e depositado em ambiente de laboratório.

Tabela 13 Características do agregado miúdo (areia).

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR 7217 (ABNT, 1987)	ABNT (mm)	Individual	acumulada
		4,8	1	1
		2,4	2	3
		1,2	7	10
		0,6	32	42
		0,3	46	88
		0,15	12	100
		< 0,15	0	100
DMC (mm)	NBR 7217 (ABNT,1987)	2,4		
Módulo de finura	NBR 7217 (ABNT, 1987)	2,43		
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR 7251 (ABNT, 1982)	1,51		
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9776 (ABNT, 1986)	2,62		
Absorção (%)	NBR 9777 (ABNT, 1987)	0,38		

4.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado foi de origem basáltica. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 1982), o material é classificado, segundo sua granulometria, como brita nº 1, com a dimensão máxima de 19mm. O material foi lavado visando a retirada do pó depositado sobre a sua superfície, sendo seco e armazenado em ambiente de laboratório. Na tabela 14 são apresentadas a distribuição granulométrica, as características físicas e a absorção do agregado graúdo empregado.

Tabela 14 Características do agregado graúdo (brita).

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR 7217 (ABNT, 1987)	ABNT (mm)	Individual	acumulada
		25	0	0
		19	4	4
		12,5	55	59
		9,52	23	82
		6,3	17	98
		< 6,3	2	100
		DMC (mm)	NBR 7217 (ABNT, 1987)	19
Módulo de finura	NBR 7217 (ABNT, 1987)	6,85		
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR 7251 (ABNT, 1982)	1,44		
Massa específica (kg/dm ³)	NBR 9937 (ABNT, 1987)	2,71		
Absorção (%)	NBR 9737 (ABNT, 1987)	0,62		

4.3.4 Água

A água empregada foi proveniente da rede de abastecimento local.

4.3.5 Metacaulim de alta reatividade (MCAR)

Conforme descrito no capítulo 3, as características mineralógicas, químicas e físicas do metacaulim exercem significativa influência no seu comportamento, quando adicionado como pozolana à produção do concreto. Assim sendo, partiu-se para a obtenção de um material que realmente apresentasse uma alta reatividade, evidenciando desta forma toda a sua potencialidade no que se refere ao seu uso como pozolana.

Para o perfeito entendimento do processo de produção do MCAR, foi realizado um estudo-piloto (descritos no anexo A) para a obtenção desta pozolana, onde adotou-se como matéria-prima uma argila caulinítica já calcinada. Neste estudo, realizou-se uma série de procedimentos relacionados a moagem do material, onde variou-se principalmente o tempo e tipo de moinho. Apesar de não se obter resultados satisfatórios no que se refere à atividade pozolânica, contudo serviram de base para o processo de produção do MCAR proveniente do rejeito da indústria do papel, que teve início após a finalização do estudo-piloto.

Conforme descrito no item 3.6, este processo industrial resulta na produção de dois tipos de rejeitos. O primeiro, oriundo do processo de desareamento primário e o segundo, oriundo da centrifugação secundária, do separador magnético e da filtragem que é depositado na lagoa. Na execução do programa experimental optou-se pelo segundo tipo de rejeito, sendo que a sua coleta ocorreu na saída da centrífuga, pelo fato de ser um ponto de mais fácil coleta. O material que sai da centrifugação secundária apresenta, segundo a indústria fornecedora, características semelhantes ao rejeito da lagoa, ou seja, ambos são basicamente constituídos do argilomineral caulinita.

As amostras do rejeito para realização deste trabalho tiveram a sua coleta e preparo realizado pela indústria papeleira, sendo constituído dos seguintes etapas:

- captação da polpa de rejeito em tanque de coleta;
- decantação do material sólido empregando uma solução de sulfato de alumínio;
- prensagem da solução decantada em filtro prensa do tipo sanfona. Após esta etapa, as partículas sólidas do rejeito tomaram a forma de placas espessas (50cm x 50cm x 5cm), com uma umidade em torno de 30%;
- secagem das placas em estufa à temperatura de 110 °C, até que as mesmas apresentassem uma consistência rígida;
- desagregação manual das placas em tamanhos menores.

A amostra do rejeito, após estas etapas, encontrava-se na forma de pequenos torrões. Assim sendo, o primeiro passo para a produção do MCAR constituiu-se do destorroamento do material, através de um moinho de rolos. Este processo foi repetido por três vezes, e teve como principal objetivo transformá-lo em pó, visando tornar o processo de calcinação mais homogêneo entre as partículas. Após esta etapa, realizou-se a caracterização física e química do rejeito, que é apresentada na tabela 15, onde também destaca-se o valor obtido na relação Al_2O_3/SiO_2 , evidenciando a grande predominância do argilomineral caulinita e o alto teor de Al_2O_3 , o que segundo alguns autores (Battagin, 1987; Ambroise et al., 1993; Salvador, 1995) resulta num material mais reativo.

Tabela 15 Características químicas e físicas do rejeito da centrífuga.

Características	Determinações	Valores obtidos
Químicas	Óxido de silício (SiO_2)	42,19 %
	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	39,24 %
	Óxido de ferro (Fe_2O_3)	1,88 %
	Óxido de cálcio (CaO)	0,02 %
	Óxido de sódio (Na_2O)	0,02 %
	Óxido de magnésio (MgO)	0,20 %
	Óxido de Titânio (TiO_2)	1,49 %
	Óxido de potássio (K_2O)	0,02 %
	Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,21 %
	Perda ao fogo	14,80 %
	Al_2O_3/SiO_2	0,93
Físicas	Massa específica	2,40 g/cm ³
	Diâmetro médio das partículas	1,85 μm
	Superfície específica	17.510 m ² /kg

Com o destorroamento concluído, realizou-se a calcinação do material através do processo de choque térmico (da temperatura de calcinação para a temperatura ambiente), com o objetivo de agilizar o processo de produção da pozolana. Assim sendo, fixou-se a temperatura de calcinação em 750°C e utilizou-se cadinhos com capacidade para aproximadamente 230 gramas de material. A adoção da temperatura de calcinação teve como base a bibliografia existente sobre o assunto (item 3.5) e o trabalho realizado por Barata (1998) com o mesmo tipo de rejeito.

Antes de se iniciar a calcinação do material, fez-se primeiramente um estudo do processo de calcinação, visando verificar o tempo ótimo de calcinação para a quantidade de material a ser calcinada. Neste estudo utilizou-se três tempos de calcinação, 30, 45 e 60 minutos, onde constatou-se, através da difração de raios-x, que o tempo de 60 minutos proporcionou os melhores resultados no que se refere à amorficidade do material, conforme apresentado na figura 20. Com relação à perda ao fogo residual do material calcinado, como

era esperado, teve-se um menor valor com o tempo de calcinação de 60 minutos. Em todas as difrações de raios-x, observou-se a predominância do argilomineral caulinita, ratificando os resultados obtidos na caracterização química do material.

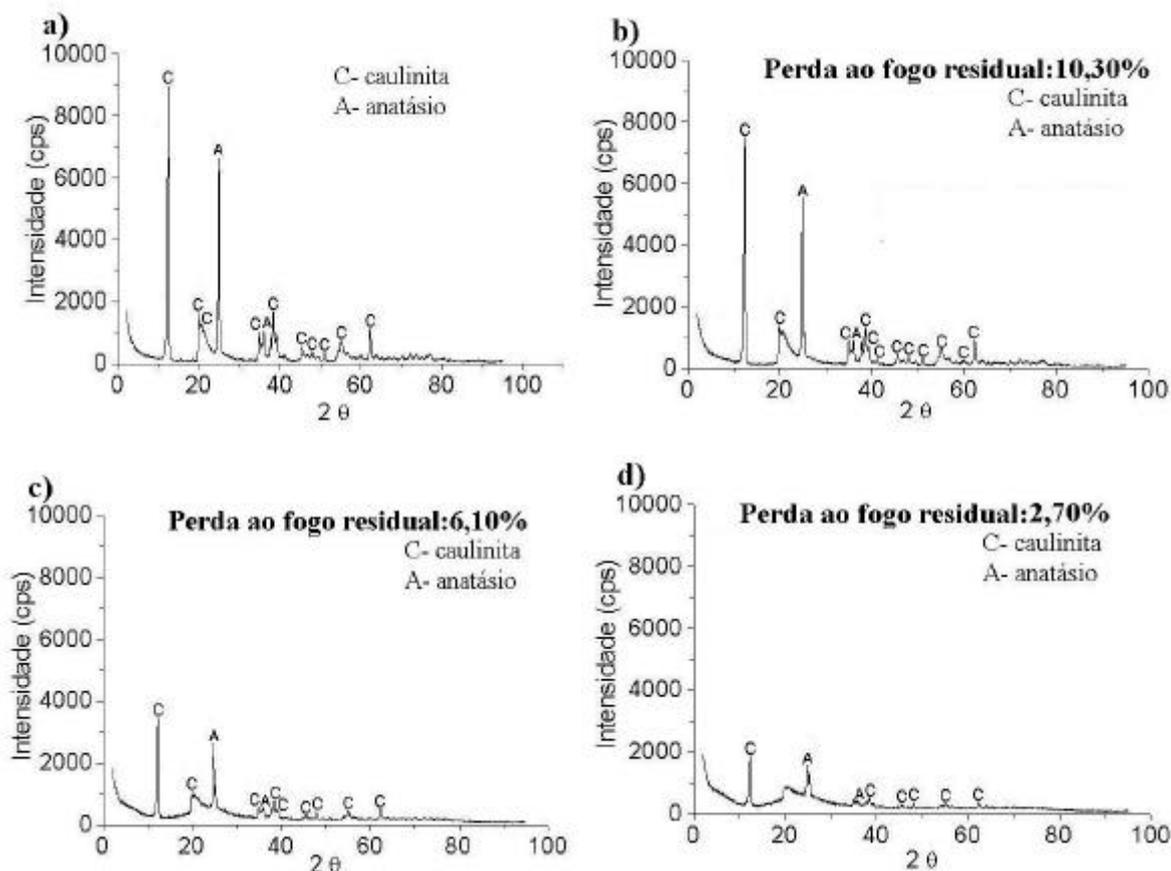


Figura 20 Difração de raios-x do rejeito: (a) Material "in natura"; (b) Calcinado por 30 minutos; (c) Calcinado por 45 minutos; (d) Calcinado por 60 minutos.

Visando ratificar o resultado do processo de calcinação, bem como verificar se o tempo de calcinação de 60 minutos não provocou uma recristalização da estrutura interna do rejeito, conforme descrito no item 3.5, foi realizado o ensaio de TG e ATD. Os resultados deste ensaio estão colocados na figura 21. Numa comparação entre os resultados obtidos antes e depois da calcinação por 60 minutos, constata-se que o pico da reação endotérmica foi praticamente extinto, evidenciando novamente a eficiência do processo de calcinação, ou seja, a mudança de fase do material. Quanto ao pico da reação exotérmica, este manteve-se inalterado nas duas situações, demonstrando que não houve, durante a calcinação, o processo de recristalização do material, que poderia provocar a diminuição da sua atividade pozolânica. Os resultados da curva TG apresentaram pequenas variações no que se refere ao resultado de perda de massa obtido no ensaio de caracterização química.

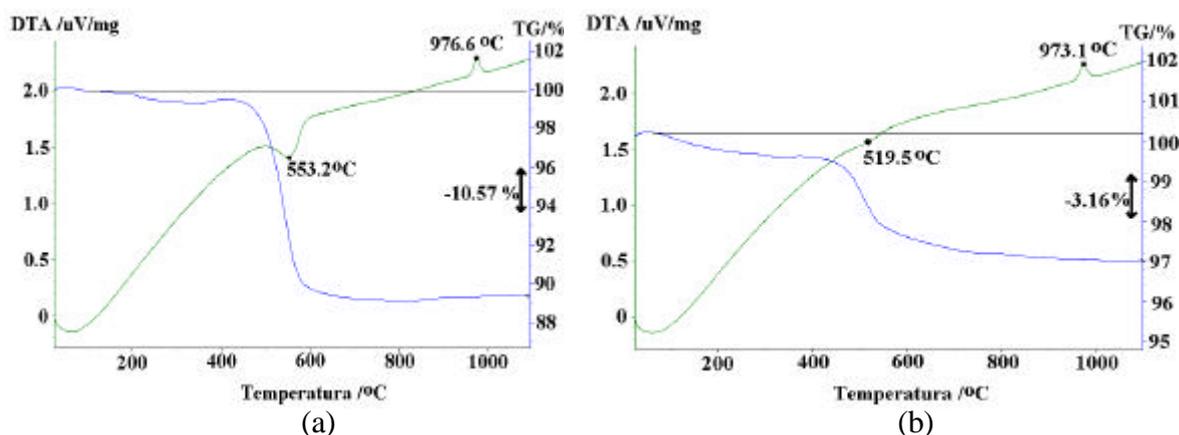


Figura 21 Curva TG e ATD do rejeito (a) antes da calcinação e (b) depois da calcinação por 60 minutos. (Condições do ensaio: atmosfera: nitrogênio, taxa de aquecimento: 10 °C/min, temperatura máxima: 1100 °C).

Com a definição do tempo de calcinação, partiu-se para a calcinação do material, onde os cadinhos eram colocados na mufla na temperatura especificada, pelo período pré-definido e resfriados ao ar livre. Como esperado, após a calcinação houve a aglomeração de suas partículas, resultando num diâmetro médio ($\phi_{50\%}$) de aproximadamente 9 μm , o que fez com que houvesse a necessidade de moagem, visando a obtenção de um $\phi_{50\%} \cong 3 \mu\text{m}$.

O processo de moagem foi iniciado com o material ainda quente, isto é, recém saído do processo de calcinação, e foi realizado no moinho de bolas por 60 minutos. A opção pela realização da moagem logo após a calcinação visou proporcionar uma maior eficiência do processo de moagem, devido à ausência de umidade no material resultante da calcinação. Contudo, esta moagem não foi suficiente pois resultou num $\phi_{50\%} = 4,96 \mu\text{m}$, necessitando desse modo de um outro estudo visando a definição do tempo extra de moagem para a obtenção da granulometria desejada. Este estudo envolveu três diferentes tempos: 30, 60 e 120 minutos, sendo que antes da moagem, o material foi seco em estufa a 100°C, para que houvesse maior eficiência deste processo.

Nesta etapa, constatou-se um comportamento bem irregular dos resultados de moagem, evidenciando novamente, assim como na moagem da argila caulínica, uma grande heterogeneidade das partículas do material resultante de moagem. Esta situação é apresentada na figura 22, que contém a curva granulométrica, o diâmetro médio ($\phi_{50\%}$) e a superfície específica dos três tempos estudados.

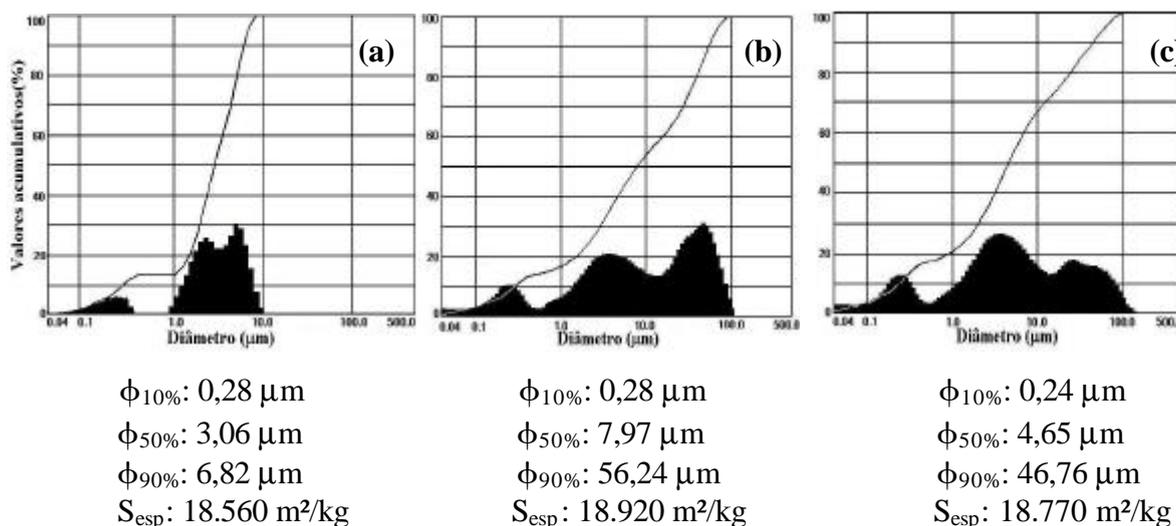


Figura 22 Curvas granulométricas, diâmetro médio e superfície específica obtidos no estudo visando a definição do tempo extra de moagem. a) Moído por 90 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 30 minutos. b) Moído por 120 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 60 minutos. c) Moído por 180 minutos: tempo inicial de 60 minutos mais o tempo extra de 120 minutos.

Em função deste comportamento, optou-se pela realização do tempo extra de moagem por um período de 120 minutos. Esta opção deveu-se principalmente a melhor distribuição granulométrica deste material, o que pode proporcionar um melhor empacotamento, haja vista que com relação ao diâmetro médio ($\phi_{50\%}$) e à superfície específica (S_{esp}), além de não se obter resultados conclusivos, teve-se pouca variação entre os tempos de moagem estudados. A adoção do tempo extra de 120 minutos fez com que o tempo total de moagem do material tenha chegado a 180 minutos. É interessante ressaltar que tanto na primeira moagem quanto na segunda moagem as variáveis mantiveram-se constantes, ou seja: relação carga/material = 5, rotação do moinho = 43 rpm e tamanho da carga (diâmetro das bolas).

Com a definição do tempo extra de moagem necessário para a obtenção do MCAR, partiu-se para a produção de todo o material necessário para o desenvolvimento do programa experimental. Com a finalização deste processo, realizou-se a caracterização física e química do MCAR, que é apresentada na tabela 16, e a comparação dos valores obtidos, no que se refere às suas características físicas e químicas, com as exigências prescritas pelas normas americana, indiana e brasileira, apresentadas na tabela 17.

Tabela 16 Características químicas e físicas do MCAR produzido.

Características	Determinações	Valores obtidos
Químicas	Óxido de silício (SiO ₂)	49,17 %
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	43,70 %
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,06 %
	Óxido de cálcio (CaO)	0,01 %
	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,11 %
	Óxido de magnésio (MgO)	0,23 %
	Óxido de Titânio (TiO ₂)	1,82 %
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,03 %
	Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,25 %
	Perda ao fogo	2,70 %
	Al ₂ O ₃ / SiO ₂	0,89
Físicas	Massa específica	2,49 g/cm ³
	Diâmetro médio das partículas	4,65 μm
	Superfície específica	18.770 m ² /kg

Tabela 17 Comparação das características químicas e físicas do MCAR, com as exigências normativas.

Determinações	IS 1344 (1968)	ASTM C 618 (1991)	NBR 12653 (ABNT, 1992)	MCAR
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ - mín. (%)	70	70	70	94,93
SiO ₂ – mín. (%)	40	-	-	43,70
Diâmetro médio (μm)	-	-	-	4,65
Partículas maiores de 45 μm-máx. (%)	12	34	34	10,59
Superfície específica-mín. (m ² /kg)	320	-	-	18.770
Perda ao fogo – máx. (%)	5	10	10	2.7*

* Perda ao fogo residual.

Com a finalização do processo de produção do MCAR, partiu-se para a execução dos ensaios de pozolanicidade com a cal e com o cimento Portland, seguindo os procedimentos descritos na NBR 5751 (ABNT, 1992) e na NBR 5752 (ABNT, 1992), respectivamente. No anexo D constam os quantitativos de materiais e os resultados de consistência e de resistência à compressão dos corpos-de-prova. Na tabela 18 é realizada uma comparação dos resultados obtidos com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 1992), onde constata-se excelente atividade pozolânica por parte deste material, fato que o qualifica como pozolana de alta reatividade para a produção do concreto.

Tabela 18 Atividade pozolânica do MCAR proveniente do rejeito.

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Valor obtido	Exigência normativa NBR 12653 (ABNT, 1992)
Atividade pozolânica com a cal	NBR 5751 (ABNT, 1992)	7	16MPa	≥ 6,0 MPa
Atividade pozolânica com o cimento Portland	NBR 5752 (ABNT, 1992)	28	94,15%	≥ 75%
Atividade pozolânica com o cimento Portland*	NBR 5752 (ABNT, 1992)*	28	140,71%	-

* Neste ensaio adotou-se o uso de aditivo superplastificante para a obtenção da mesma consistência da argamassa de referência, em vez do acréscimo de água.

Apesar dos excelentes resultados no ensaio de pozolanicidade com o cimento Portland, a quantidade de água requerida pela argamassa com MCAR foi 23% superior à obtida na argamassa de referência, maior que o valor máximo de 15%, exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para o uso de argilas calcinadas (valores colocados no anexo D). Estes resultados devem ser creditados à elevada finura do MCAR, o que faz com que seja necessária uma maior quantidade de água para que a argamassa possa atingir a consistência definida por norma (225 ± 5 mm). A excessiva necessidade de água prejudicou a obtenção de melhores resultados, fato que pode ser ratificado quando do uso de aditivo superplastificante no ensaio de pozolanicidade, o que evidencia novamente a vinculação do emprego desta pozolana ao uso de aditivos plastificantes e superplastificantes.

4.3.6 Aditivo Superplastificante

Foi empregado o aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonato, constituído de 37% à 39% de sólidos, densidade de $1,2 \text{ kg/m}^3$ e com a dosagem recomendada pelo fabricante variando de 0,7 a 2,0 litros/100 kg de cimento. Para a determinação da quantidade final de água a ser adicionado à mistura, foi adotado o valor de 38% de sólidos.

4.4 Dosagem dos materiais

Foi adotado o procedimento de dosagem do concreto proposto por Mehta e Aïtcin (1990). A opção por este método foi baseada no estudo realizado por Alves (2000), que comparou diversos procedimentos de dosagem para a obtenção do CAR, onde constatou neste método consumos de cimento bem inferiores aos obtidos nos outros métodos de dosagem. A autora acrescenta ainda que o referido método de dosagem se mostrou de fácil desenvolvimento e execução, sendo bastante prático para o uso em obra.

Deste modo, partiu-se primeiramente para o proporcionamento teórico das misturas sem o MCAR para as diferentes relações água/cimento, tendo-se o cuidado que as mesmas

seguissem os valores fixados no item 4.1.1. Seguindo este mesmo princípio, partiu-se para o proporcionamento teórico das misturas com os teores de substituição de cimento Portland por MCAR, com o mesmo cuidado em obedecer os teores de substituição. Conforme descrito no método de dosagem, o processo de substituição foi realizado em volume absoluto de cimento.

Nas misturas com MCAR, devido a menor massa específica deste material em relação à massa específica do cimento, conforme se aumentava o teor de substituição, havia a necessidade de se ajustar as relações $a/(c+MCAR)$, visando obedecer aos valores pré-determinados. Esta situação pode ser exemplificada pelo traço com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 e com o teor de 20% de substituição, que pelo processo de dosagem necessitaria de consumo de água de 214 l/m³. Contudo, este valor foi reduzido para 208 l/m³, para que se mantivesse a relação $a/(c+MCAR)$ pré-estabelecida.

Para a realização do controle da trabalhabilidade, foi adotado o valor de 120 ± 20 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 aditivo, que foi realizado durante os ajustes finais. Além do controle da trabalhabilidade, realizou-se também a massa específica no estado fresco pela NBR 9833 (ABNT, 1987) e o ensaio de mesa de Graff, pela NBR NM68 (ABNT, 1998). Um resumo do proporcionamento dos materiais utilizados para a produção do concreto é apresentado na tabela 19. É interessante ressaltar que a quantidade de água definida na tabela 19 foi reduzida, devido à compensação decorrente da presença de água no aditivo.

Tabela 19 Proporcionamento dos materiais para a produção do concreto.

Relação $a/(c+MCAR)$	MCAR %	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	MCAR (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado gráudo (kg/m ³)
0,25	0	144	575	-	654	1085
	10	143	517	46	654	1085
	20	140	460	93	654	1085
0,28	5	153	520	22	669	1069
	10	152	492	44	669	1069
	15	151	465	66	669	1069
0,35	0	171	491	-	700	1038
	10	171	442	40	700	1038
	20	167	393	79	700	1038
0,46	5	193	399	17	739	997
	10	191	378	34	739	997
	15	189	357	51	739	997
0,60	0	214	358	-	773	962
	10	210	323	29	773	962
	20	208	287	58	773	962

4.5 Produção e preparo dos corpos-de-prova

Para a produção do concreto foi empregada uma betoneira de eixo vertical, após a imprimação com argamassa do mesmo traço do concreto. A colocação dos materiais transcorreu com a mesma em movimento, seguindo a seguinte ordem:

- 100% de agregado graúdo mais 20% de água;
- 100% de cimento mais 30% de água;
- 100% de MCAR mais 50% de água com três quartos ($\frac{3}{4}$) do aditivo superplastificante;
- 100% de areia;
- Um quarto ($\frac{1}{4}$) do aditivo superplastificante (ou a quantidade necessária para a obtenção do abatimento de 120 ± 20 mm).

Com a colocação de todos os materiais, foi realizada a mistura por aproximadamente 5 minutos. Após este período, foi feita a medição do abatimento do tronco de cone, com o objetivo de verificar a obtenção do valor pré-definido.

Seguindo as diretrizes estabelecidas anteriormente, foram moldados dois corpos-de-prova para cada variável analisada. A moldagem e o processo de cura seguiram a NBR 5738 (ABNT, 1994), sendo que os corpos-de-prova foram ensaiados nas idades fixadas no item 4.1.1. Para os ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram adotados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10cm x 20cm. Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 10cm x 10cm x 35cm.

Para a execução da moldagem foi utilizado o adensamento mecânico, com uso do vibrador de imersão. Após o procedimento de moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos foram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas. Após as primeiras 24 horas, os corpos-de-prova foram retirados das formas e colocados na câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, até o momento de realização de cada ensaio. Para o rompimento dos corpos-de-prova, visando a determinação da resistência à compressão e o módulo de elasticidade, foram utilizados argamassa e enxofre para o capeamento dos mesmos.

5 Apresentação e análise dos resultados obtidos

5.1 Concreto no estado fresco

No estado fresco, realizou-se a caracterização de algumas propriedades das misturas executadas, através de diferentes ensaios, visando com isso avaliar o comportamento do concreto com o MCAR, cujos resultados estão colocados na tabela 20.

Tabela 20 Valores obtidos no estado fresco.

0% de MCAR	Relações a/(c+MCAR)				
	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
Teor de umidade (%)	6,20		7,70		10,30
Teor de aditivo (%)	3,56		0,75		0,00
Abatimento (cm)*	2,50		13,00		21,50
Massa específica (kg/m ³)*	2481,33		2408,66		2355,66
Mesa de Graff (cm)*	28,60		41,10		53,50
Fluidez*	1,43		2,05		2,67
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
Teor de umidade (%)		6,50		8,60	
Teor de aditivo (%)		2,94		0,19	
Abatimento (cm)*		12,00		10,00	
Massa específica (kg/m ³)*		2461,66		2364,33	
Mesa de Graff (cm)*		35,40		36,10	
Fluidez*		1,77		1,80	
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
Teor de umidade (%)	6,20		7,70		10,30
Teor de aditivo (%)	4,32		1,39		0,00
Abatimento (cm)*	4,00		12,00		15,00
Massa específica (kg/m ³)*	2486,00		2401,67		2313,33
Mesa de Graff (cm)*	26,40		35,30		43,80
Fluidez*	1,32		1,76		2,19
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
Teor de umidade (%)		6,50		8,60	
Teor de aditivo (%)		4,00		0,73	
Abatimento (cm)*		12,50		11,00	
Massa específica (kg/m ³)*		2466,66		2351,33	
Mesa de Graff (cm)*		36,30		35,00	
Fluidez*		1,81		1,75	
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
Teor de umidade (%)	6,20		7,70		10,30
Teor de aditivo (%)	5,51		1,98		0,27
Abatimento (cm)*	3,00		13,50		10,50
Massa específica (kg/m ³)*	2477,00		2402,66		2310,33
Mesa de Graff (cm)*	27,90		35,10		37,00
Fluidez*	1,39		1,76		1,85

* Valores referentes à média das duas repetições.

Os valores de abatimento do tronco de cone via de regra mantiveram-se dentro do intervalo pré-estabelecido, não se confirmando apenas em alguns traços com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60. Nos traços com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 o valor obtido no abatimento foi decorrente da alta relação água/materiais secos, contudo, a inclusão do MCAR fez com que houvesse uma diminuição desta relação, fazendo com que os traços com teores de substituição de 20% apresentassem um abatimento dentro do intervalo esperado. Devido ao processo de dosagem adotado, não foi possível ajustar os teores de areia e de brita visando a obtenção do abatimento dentro do intervalo pré-estabelecido. Nos traços com baixa relação $a/(c+MCAR)$ a não obtenção do abatimento pré-determinado deveu-se principalmente ao limite de eficiência do aditivo adotado, visto que na ocasião da execução das misturas não se tinha no mercado a terceira geração de aditivos, que poderiam facilitar a obtenção do abatimento pré-estabelecido.

Com relação ao teor de aditivo, na maioria das misturas os valores empregados encontraram-se dentro do recomendado pelo fabricante, excetuando-se principalmente os traços com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25. Nas misturas com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25, mesmo apresentando teores superiores ao recomendado pelo fabricante, não se constatou problemas relacionados ao retardamento de pega. Nas misturas com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,35 verificou-se um aumento de 85% e de 164% no teor de aditivo, quando empregou-se teores de substituição de 10% e 20%, respectivamente, em relação ao traço de referência. De um modo geral, como era esperado, houve um aumento do teor de aditivo com o aumento do teor de substituição, decorrente principalmente da alta superfície específica do MCAR.

Quanto aos resultados obtidos na mesa de Graff e conseqüentemente de fluidez, teve-se novamente valores dentro do esperado, pois constatou-se uma tendência de diminuição com o aumento do teor de substituição de MCAR. Esta tendência de diminuição é um reflexo da maior coesão das misturas com MCAR, tendo novamente como causa a alta superfície específica desta pozolana de alta reatividade. Contudo, teve-se na mesa de Graff uma menor variação de valores em relação aos obtidos no ensaio de abatimento, o que pode ser um indicador da melhor adequação da mesa de Graff aos concretos com alta coesão, no que se refere ao processo de controle do estado fresco.

Os valores de massa específica apresentaram um comportamento dentro do esperado, ratificando a inexistência de influência deste tipo de pozolana na massa do concreto fresco e mostrando a diminuição da massa específica com o aumento da relação água/aglomerante.

5.2 Concreto no estado endurecido

Conforme definido no capítulo anterior, optou-se no planejamento do programa experimental por um projeto estatístico fracionado, tendo como finalidade a diminuição do número de corpos-de-prova sem prejuízo das informações necessárias para a obtenção do objetivo especificado no trabalho. Desse modo, empregou-se um modelo de regressão múltipla ponderada que representasse um bom ajuste dos dados experimentais, em cada uma das variáveis de resposta utilizadas. Para a execução desta análise foi adotado o programa Statgraph, visto que o mesmo fornece as equações ajustadas de cada modelo testado, fornecendo também os valores de r^2 (coeficiente de determinação) de cada modelo e uma avaliação da significância de cada parâmetro, empregando os valores de p (valor utilizado para medir a significância do parâmetro).

É interessante ressaltar que para a criação dos modelos fez-se necessário que as variáveis controladas (relação água/(c+MCAR), teor de substituição e idade de rompimento) deste experimento fossem codificadas para níveis entre -1 e 1, para que as constantes das equações a serem obtidas apresentassem a mesma ordem de grandeza. Contudo, face à possibilidade de se ter valores iguais a zero no denominador, ajustou-se os níveis codificados de cada um dos parâmetros empregados, para valores entre 0,5 e 1,5. Na tabela 21 são colocados os níveis reais e codificados de cada variável.

Tabela 21 Níveis reais e codificados das variáveis independentes utilizadas

Relação a/(c+MCAR)	Nível Real	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
	Nível codificado	0,50	0,585	0,785	1,10	1,50
Idade (dias)	Nível Real	1	7	14	28	91
	Nível codificado	0,50	0,565	0,645	0,80	1,50
Teor de substituição (%)	Nível Real	0	5	10	15	20
	Nível codificado	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50

Assim sendo, são apresentados a seguir os resultados e a análise para cada uma das propriedades estudadas dentro do desenvolvimento do programa experimental. Neste contexto, foram gerados modelos matemáticos que evidenciam a forma como as propriedades do concreto são influenciadas pelas variáveis independentes. Na comparação dos resultados obtidos com esses modelos com os relatados para outras pozolanas de alta reatividade, foi dado ênfase aos trabalhos realizados por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), visto que esses trabalhos utilizaram metodologia, materiais, variáveis controladas e modo de execução

semelhantes para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, respectivamente.

5.2.1 Resistência à compressão axial

Nesta propriedade, constatou-se que, de um modo geral, os valores obtidos foram diretamente proporcionais à idade e ao teor de substituição de MCAR e inversamente proporcionais à relação água/(c+MCAR), como era esperado. Os resultados obtidos para resistência à compressão estão colocados na tabela 22.

Tabela 22 Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, em MPa.

0% de MCAR	Relação a/(c+MCAR)				
	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	55,80		35,27		11,64
	51,50		39,08		11,08
14 dias	70,33		48,89		31,88
	63,98		49,38		27,09
91 dias	88,11		53,89		29,06
	70,12		50,58		35,48
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 dias		67,44		38,37	
		56,57		39,43	
14 dias		61,79		44,86	
		73,79		45,01	
28 dias		75,13		48,46	
		74,00		45,15	
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	41,83		34,28		11,43
	47,05		38,02		10,65
14 dias	70,26		64,62		36,05
	66,66		54,46		33,01
91 dias	80,84		66,10		34,85
	91,92		52,62		38,37
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 dias		64,05		37,88	
		71,81		39,50	
14 dias		72,16		46,49	
		62,15		45,71	
28 dias		77,17		46,91	
		62,29		52,34	
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	45,36		34,99		12,84
	50,23		32,31		8,96
14 dias	76,61		59,33		34,28
	81,12		61,37		38,23
91 dias	83,24		67,93		37,10
	80,35		61,87		47,47

A expressão do modelo para a obtenção das curvas de comportamento desta propriedade está colocado na equação 1. Neste modelo, o valor de r^2 é de 94,33%, sendo deste modo estatisticamente consistente, pois demonstra que 94% da variabilidade dos resultados é decorrente da relação $a/(c+MCAR)$, do teor de substituição, da idade e da interação entre estas variáveis, fazendo com que os valores obtidos neste modelo ficassem muito próximos dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial. Os valores de resistência à compressão obtidos com este modelo estão colocados no anexo E.

$$F_c = 22,374 - 0,189107 * Teor / Idade^6 - 0,0018724 / (Idade * AC)^6 + 51,9528 * Teor^{0,17} + 3,86101 / AC^{2,34} - 25,7981 * Teor^{0,01} * AC - 0,0119877 / Idade^{10} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

f_c : resistência à compressão, em MPa;

AC: valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$, conforme tabela 21;

Teor: valor codificado do teor de substituição de MCAR, conforme tabela 21; e

Idade: valor codificado da idade de rompimento, conforme tabela 21.

Neste modelo verifica-se, conforme a tabela 23, que os parâmetros da equação colocados na análise de regressão múltipla apresentam valores-p reduzidos, onde se tem que o maior valor obtido foi de 0,0434. Assim sendo, como os valores-p ficaram em patamares inferiores a 0,05, tem-se que o modelo proposto é estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95%, não sendo aconselhável suprimir nenhuma das variáveis empregadas. Os termos do modelo da tabela 23 estão por ordem de significância.

Tabela 23 Valor-p dos termos do modelo para a resistência à compressão.

Nº	Termo do modelo	Valor-p	Nº	Termo do modelo	Valor-p
1	$-25,7981 * (Teor^{0,01}) * AC$	0,0000	5	$-0,0119877 / (Idade)^{10}$	0,0006
2	$+3,86101 / AC^{2,34}$	0,0000	6	$-0,0018724 / (Idade * AC)^6$	0,0156
3	$+51,9528 * (Teor^{0,17})$	0,0000	7	22,374	0,0434
4	$-0,189107 * Teor / (Idade^6)$	0,0004			

A análise de variância do modelo é apresentada na tabela 24, onde constata-se que o alto valor de F obtido, em relação ao valor de F calculado, faz com que seja rejeitada a hipótese nula, de que não existe relação entre as variáveis independentes e a resposta considerada. Outro ponto importante desta análise é o valor-p igual a zero, o que indica que o

modelo é significativo, isto é, há uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis independentes e a resposta considerada.

Tabela 24 Análise de variância do modelo para a resistência à compressão.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{obtido}	F _{calculado}	Valor-p
Modelo	27671,8	6	4611,97	214,37	2,24	0.0000
Residual	1527,52	71	21.5144			
Total	29199,4	77				

a) Efeito dos fatores $a/(c+MCAR)$ e idade (grau de hidratação) na resistência à compressão do concreto.

A relação $a/(c+MCAR)$ e a idade (grau de hidratação) são fatores de extrema influência na resistência à compressão do concreto. Na figura 23 tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da relação $a/(c + MCAR)$ e do efeito isolado da idade, respectivamente, na resistência à compressão. Os gráficos foram obtidos por intermédio do modelo, colocado na equação 1, variando os valores codificados do efeito focalizado e mantendo-se as demais variáveis da equação no ponto médio do intervalo codificado de cada uma delas.

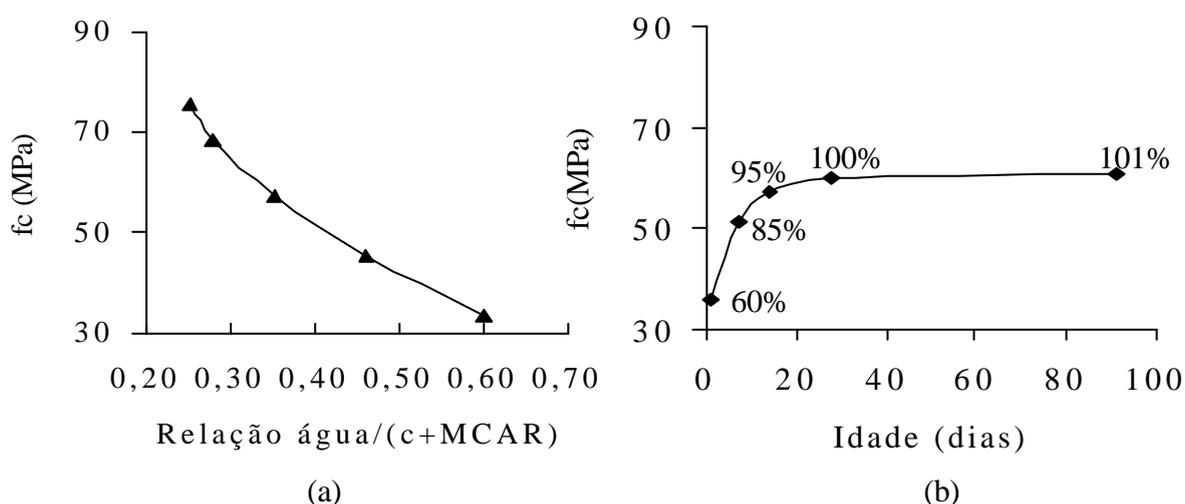


Figura 23 Resistência à compressão em função do efeito isolado da: a) relação água/(c+MCAR) b) Idade de rompimento.

Na figura 23a do efeito isolado da relação $a/(c+MCAR)$, constata-se que os valores de resistência à compressão vão diminuindo conforme aumenta-se os valores da relação $a/(c+MCAR)$. Esta situação evidencia as leis de comportamento do concreto, de que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação $a/(c+MCAR)$, ratificando o

fato desta relação ser consenso entre o meio técnico. Este comportamento é decorrente do aumento da porosidade da matriz do concreto pela maior presença de água, sendo interessante ressaltar que o nível de diminuição apresentado pelo gráfico tende a variar em decorrência de outras variáveis, como o teor de substituição de MCAR e a idade, que serão analisados adiante.

Com relação a figura 23b, referente ao efeito isolado da idade de rompimento, constatou-se que os resultados também estão dentro do esperado, ou seja, os valores de resistência à compressão vão aumentando conforme aumenta-se a idade de rompimento. No gráfico tem-se os percentuais de crescimento da resistência à compressão, em relação ao vigésimo oitavo dia, onde verifica-se que grande parte do aumento se dá entre o primeiro e o sétimo dia. Após o vigésimo oitavo dia a taxa de crescimento da resistência é bem reduzida. A alta taxa de crescimento até o sétimo dia, tem como uma das causas, o fato de se ter utilizado o cimento CPV-ARI. De um modo geral, os valores obtidos de taxa de crescimento da resistência encontraram-se dentro do esperado e similares aos obtidos em trabalhos anteriores (DAL MOLIN, 1995; CARETTE e MALHOTRA, 1992) e ao modelo de comportamento proposto pelo CEB (1990) para este tipo de cimento. Também neste caso ressalta-se que a taxa de crescimento apresentada no gráfico tende a variar em decorrência de outras variáveis, como o teor de substituição de MCAR e a relação $a/(c+MCAR)$, que serão analisados adiante.

Para a verificação da interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade de rompimento, foi necessária a manutenção da outra variável (teor de substituição) da equação 1 no ponto médio. Esta interação foi colocada na figura 24, onde observa-se que os valores de resistência à compressão em relação à idade tende a variar de acordo com a relação $a/(c+MCAR)$.

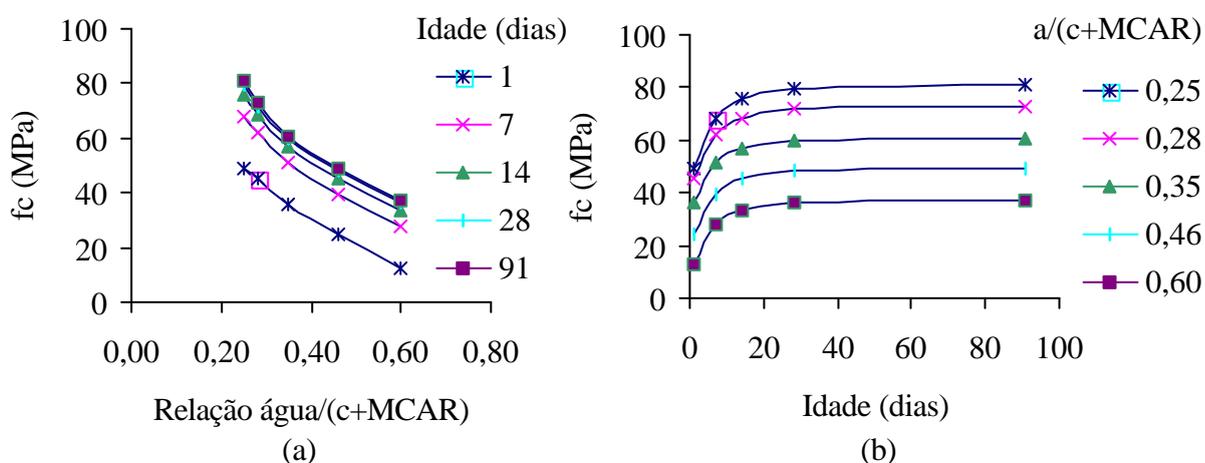


Figura 24 Resistência à compressão em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico f_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico f_c (idade de rompimento).

Nesta interação tem-se, segundo os gráficos colocados na figura 24, um crescimento mais lento da resistência à compressão nas primeiras idades quando adota-se maiores valores de relação $a/(c+MCAR)$. Por outro lado, nas baixas relações $a/(c+MCAR)$, o crescimento da resistência tende a ser ligeiramente maior nas primeiras idades. Nas duas situações tem-se um crescimento muito reduzido da resistência à compressão após o vigésimo oitavo dia.

A influência desta interação na resistência à compressão também foi constatada por Dal Molin (1995) no estudo de concretos de alta resistência com a sílica ativa. Mesmo com a constatação da significância estatística desta interação, este efeito é menos visível que o constatado por Dal Molin (1995) no estudo do concreto de alta resistência com a sílica ativa. Esta diferença pode ser justificada pelo maior diâmetro médio do MCAR, que tende a produzir um início de reação mais lento desta pozolana, e pelo fato da autora ter adotado a adição em vez da substituição de sílica ativa. Sensale (2000), em trabalho com a cinza de casca de arroz, não constatou a influência desta interação na resistência à compressão.

b) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade na resistência à compressão do concreto.

Com base nos resultados apresentados na tabela 22, tem-se evidente que o aumento do teor de substituição resulta em aumento na resistência à compressão dos concretos. Este comportamento é ratificado com a presença deste efeito no modelo (equação 1).

Para a obtenção da contribuição de cada teor de substituição na resistência à compressão, colocada na figura 25, foi fixada a idade de rompimento no vigésimo oitavo dia, para que se pudesse obter a contribuição média entre as relações $a/(c+MCAR)$ estudadas. Constata-se um valor crescente da contribuição do MCAR na resistência à compressão. Contudo, deve-se ressaltar que tal melhoria não se mantém para as demais idades estudadas, e tende a variar entre cada relação $a/(c+MCAR)$, conforme apresentado a seguir. A não manutenção da melhoria observada na figura 25 demonstra que interações como teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$ e teor de substituição x idade, também são importantes para o comportamento desta propriedade.

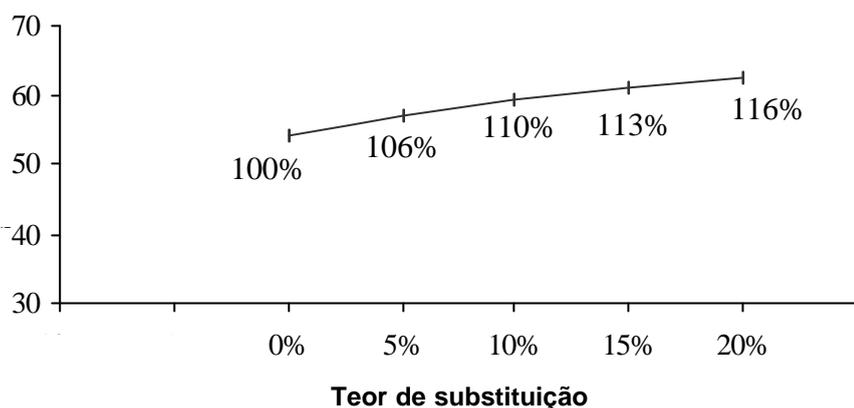


Figura 25 Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição.

A relação diretamente proporcional constatada entre o teor de substituição e a resistência à compressão do concreto vai ao encontro dos resultados obtidos por outros pesquisadores, tais como Caldarone et al. (1994) adotando teores de adição de 5 e 10%, e Wild et al. (1996) e Qian e Li (2001) adotando teores de substituição entre 5% e 20%. Apesar do comportamento semelhante, tem-se uma variação da melhoria obtida, visto que geralmente teve-se nessas pesquisas um efeito muito maior do que o obtido neste trabalho. Acredita-se que tais diferenças entre as pesquisas têm como origem a forma de dosagem do MCAR, a variação da relação $a/(c+MCAR)$ e a variação das características físicas, químicas e mineralógicas do MCAR, ratificando a grande importância destas propriedades para o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, bem como o tipo de cimento adotado, haja vista que o mesmo tende a influir na produção do $Ca(OH)_2$ devido a maior ou menor quantidade das fases de C_3S e C_2S presentes.

No que se refere à comparação destes valores com os resultados obtidos com o uso de outras pozolanas de alta reatividade, verifica-se que o MCAR tende a confirmar novamente a condição de pozolana de alta reatividade. Em relação a sílica ativa, esta situação pode ser exemplificada pelos resultados obtidos por Dal Molin (1995) que, adotando um teor de adição de 10% de sílica ativa, chega a uma melhoria média entre as diversas relações $a/(c+sa)$, de 13,5% no 28º dia, em relação ao concreto de referência. Esta melhoria tende a ser semelhante ao valor obtido com o MCAR, visto que a autora adotou a sílica ativa como adição, enquanto que o uso do MCAR ocorreu através da substituição.

No caso da cinza de casca de arroz tem-se, segundo Sensale (2000), a inexistência do efeito isolado deste material. Apesar da inexistência deste efeito, constata-se, com base nos resultados obtidos por Sensale (2000) e Malhotra e Mehta (1996), que sob condições semelhantes, no que se refere ao teor de substituição, à relação $a/(c+CCA)$ e à idade de rompimento (28 dias), as melhorias obtidas com o uso deste material são inferiores às

constatadas no concreto com uso de MCAR. Contudo, é interessante ressaltar, que no caso da cinza tem-se normalmente verificado grandes melhorias após o 28º dia. Este comportamento pode ser observado nos resultados obtidos por Sensale (2000), onde tem-se no 91º uma melhoria média similar à obtida pelo MCAR e pela sílica ativa.

c) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da relação $a/(c+MCAR)$, na resistência à compressão do concreto.

Para a construção dos gráficos referentes ao comportamento da resistência à compressão em função da interação entre o teor de substituição e a relação $a/(c+MCAR)$ adotou-se a equação 1, onde foram variados os valores codificados do teor de substituição para cada valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$, mantendo-se a outra variável (idade de rompimento) da equação no ponto médio (14 dias). Os gráficos obtidos com este procedimento estão colocados na figura 26.

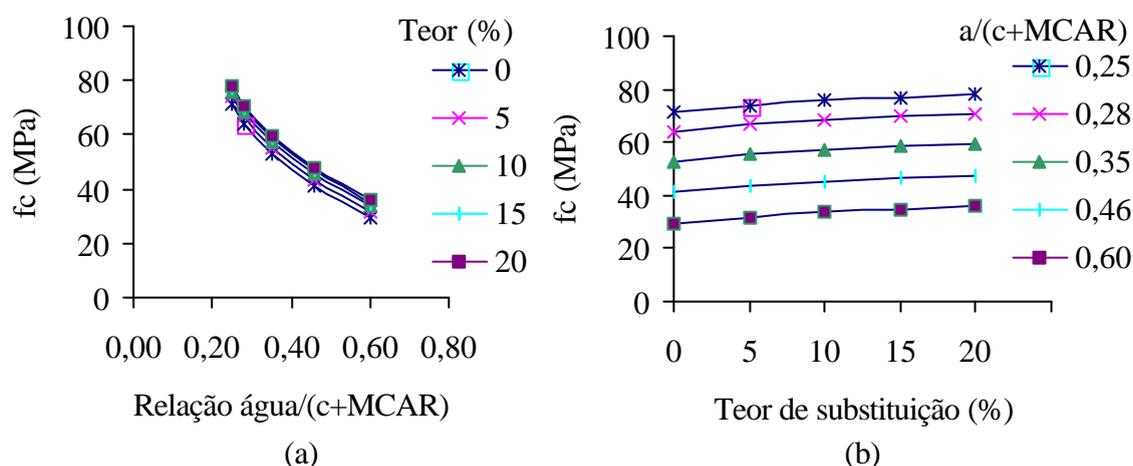


Figura 26 Resistência à compressão em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico f_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico f_c (teor de substituição).

Com base no comportamento colocado na figura 26, verifica-se que mesmo apresentando uma eficiência diferenciada entre as várias relações $a/(c+MCAR)$, tem-se em todas as misturas um melhor desempenho quando do uso do MCAR. Desta forma, verifica-se que para baixa relação $a/(c+MCAR)$ houve um pequeno aumento da resistência à compressão conforme aumenta-se o teor de substituição, ou seja, de 9% quando compara-se teores de substituição de 0% e 20% para a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25, enquanto que para as maiores relações $a/(c+MCAR)$ esta melhoria na resistência à compressão é superior, ou seja, de 22% quando compara-se teores de substituição de 0% e 20% para a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60. De um modo geral, esta eficiência variou de aproximadamente 4% a 22%, em relação ao concreto de referência, sendo que nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ teve-se uma maior

variação da eficiência entre os teores de substituição. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que nas maiores relações $a/(c+MCAR)$, tem-se uma maior porosidade, que ocasiona uma maior eficiência do efeito pozolânico pelo preenchimento dos vazios da mistura, bem como pelo efeito filler.

A comparação dos resultados obtidos com a bibliografia referente à influência da relação $a/(c+MCAR)$ na eficiência do MCAR na resistência à compressão do concreto é prejudicada pela quase inexistência de dados. Barata (1998), adotando três relações $a/(c+MCAR)$, também constatou, no vigésimo oitavo dia de idade, uma maior contribuição do MCAR nas maiores relações $a/(c+MCAR)$, na ordem de 43% em relação à mistura de referência, sendo, deste modo, maior que a obtida nesta pesquisa. Este comportamento também foi verificado por Vu et al. (2001), onde foram adotadas três relações $a/(c+MCAR)$ e teores de substituição de 0, 10, 20 e 30%, onde se obteve, principalmente nas primeiras idades e nas menores relações $a/(c+MCAR)$, resultados inferiores de resistência à compressão nas misturas com MCAR em comparação ao concreto de referência.

Na comparação com outras pozolanas de alta reatividade, pode-se considerar que os resultados obtidos neste trabalho estão dentro do esperado. Dal Molin (1995) e Sensale (2000) também verificaram a influência desta interação na resistência à compressão, quando do uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, respectivamente. No caso da sílica ativa, não ficou clara a lei que rege o comportamento desta interação, contudo, quando do uso da cinza de casca de arroz, teve-se um comportamento semelhante ao MCAR, ou seja, as maiores contribuições ocorreram nas maiores relações água/aglomerante. Mesmo com a presença desta interação com o uso da sílica ativa e com o uso da cinza de casca de arroz, tem-se aparentemente uma maior significância quando do uso do MCAR.

Outros resultados, obtidos por Malhotra e Carette (1983) com a sílica ativa e por Santos (1997), com a cinza de casca de arroz, mesmo não focalizando esta interação, também evidenciam a sua presença, quando do uso destas pozolanas de alta reatividade. Contudo, nesses trabalhos, principalmente nos referentes ao uso da sílica ativa, não se apresentou conclusiva em relação a forma que a variação na relação $a/(c+sa)$ influencia na contribuição decorrente do uso desta pozolana de alta reatividade.

É interessante ressaltar que a colocação da idade no ponto médio fez com que os valores colocados nos gráficos da figura 26 sejam referentes ao décimo quarto dia de hidratação do concreto. Para as menores ou maiores idades este comportamento é diferente, conforme verificado na interação entre o teor de substituição de MCAR e a idade de rompimento, colocada a seguir.

d) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da idade, na resistência à compressão do concreto.

No gráfico referente ao comportamento da resistência à compressão em função da interação entre o teor de substituição e a idade, adotou-se novamente a equação 1, onde variou-se os valores codificados do teor de substituição para cada valor codificado da idade, mantendo-se a outra variável da equação no ponto médio (relação $a/(c+MCAR)$ de 0,35). Os gráficos obtidos com este procedimento estão colocados na figura 27.

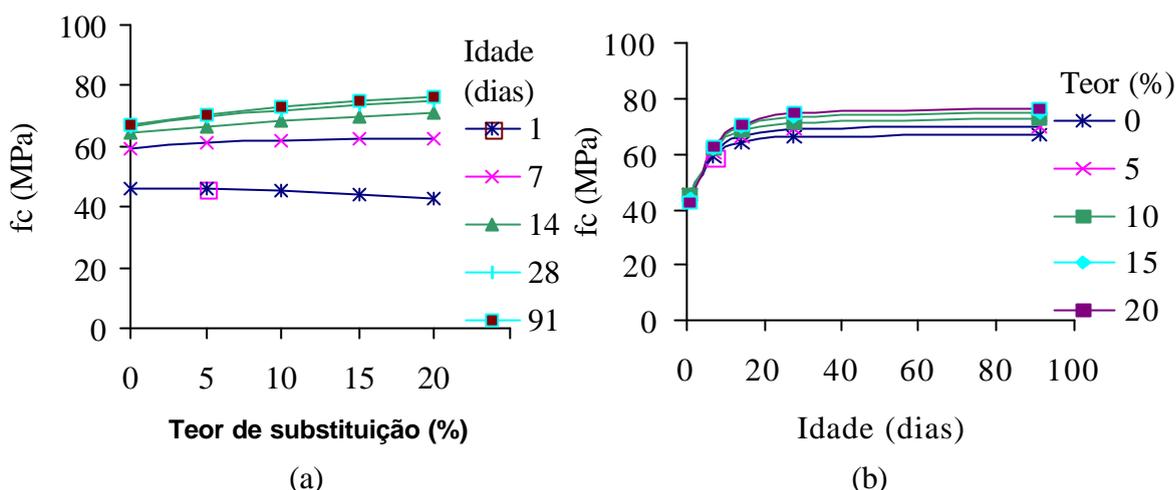


Figura 27 Resistência à compressão em função da interação teor de substituição x idade de rompimento: a) gráfico f_c (teor de substituição) b) gráfico f_c (idade de rompimento).

Na figura 27a, pode-se verificar a variação de eficiência do MCAR na resistência à compressão para cada idade de rompimento, pela falta de paralelismo existente entre as curvas. Comportamento similares foram obtidos por Wild et all. (1996), Caldarone et all. (1994) e Zhang e Malhotra (1995), com exceção dos valores obtidos ao primeiro dia. A diferença de crescimento constatada no primeiro dia normalmente é decorrente principalmente do uso de diferentes tipos de cimento e da finura do MCAR.

Em relação ao concreto de referência, as melhorias, com exceção da constatada no primeiro dia, foram diretamente proporcionais ao teor de substituição e tiveram valores médios de aproximadamente 6%, 9%, 11% e 12% nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias, respectivamente. No primeiro dia, teve-se uma diminuição dos valores de resistência à compressão com o aumento do teor de substituição, resultado da maior lentidão da reação pozolância do MCAR, bem como da incapacidade do efeito microfíler do MCAR em compensar a retirada de cimento dos concretos. As melhorias obtidas com o MCAR, em relação ao concreto de referência, foram inferiores aos valores relatados por Wild et all. (1996), Caldarone et all. (1994), Zhang e Malhotra (1995) e Qian e Li (2001). Esta variação pode ser creditada às diferenças existente no MCAR usado nos trabalhos referenciados, tais

como finura e teores de Al_2O_3 , que exercem grande influência nos efeitos filer e pozolânico, respectivamente, bem como o tipo de cimento adotado.

Na comparação com outras pozolanas de alta reatividade tem-se, também, segundo Dal Molin (1995) e Sensale (2000), a significância desta interação quando do uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, respectivamente, na resistência à compressão. No caso da sílica ativa, tem-se um comportamento semelhante ao constatado com o uso do MCAR, devido à baixa contribuição na resistência à compressão, após o 28º dia. Contudo, esta semelhança de comportamento não se reflete para todas as idades, visto que com o uso da sílica ativa tem-se uma melhoria da resistência à compressão já no primeiro dia, enquanto que com o uso do MCAR esta melhoria tende a ser evidenciada apenas no terceiro dia de idade. Este comportamento diferenciado tem como causa principal a maior dimensão da partículas do MCAR, que tende a diminuir a velocidade das reações químicas, bem como o fato de se ter utilizado a adição em vez da substituição quando do uso da sílica ativa.

Em relação à cinza de casca de arroz, o comportamento obtido pelo MCAR tende a ser diferente do observado por Sensale (2000), Malhotra e Mehta (1996) e por Zhang et al. (1996) quando do uso desta pozolana de alta reatividade, devido a sua contribuição na resistência à compressão, após o 28º dia. Como ponto em comum, tem-se a diminuição dos valores de resistência à compressão no primeiro dia de idade, em relação ao constatado com o uso da sílica ativa. Contudo, a queda na resistência à compressão, via de regra, é muito maior quando do uso da cinza de casca de arroz, decorrente principalmente da sua maior dimensão, em relação ao MCAR. Este comportamento faz com que se tenha aparentemente uma maior significância desta interação quando do uso da cinza de casca de arroz, em comparação às outras pozolanas de alta reatividade.

Novamente é interessante ressaltar que a colocação de uma variável, neste caso a relação $a/(c+MCAR)$, no ponto médio fez com que os valores colocados nos gráficos da figura 27 sejam referentes à relação $a/(c+MCAR)$ de 0,35. Para as menores ou maiores relações $a/(c+MCAR)$ este comportamento pode ser diferente, conforme verificado anteriormente na interação entre o teor de substituição e a relação $a/(c+MCAR)$.

De um modo geral, observa-se que sempre houve um crescimento da resistência com o aumento do teor de substituição do MCAR, o que pode evidenciar que o teor ótimo de substituição possa ser superior ao máximo valor colocado neste trabalho, sendo portanto diferente do teor ótimo indicado por Vu et al. (2001), que se encontrava na faixa de 10 a 20%. Esta situação faz com que o teor ótimo desta pozolana possa ser superior ao colocado para as outras pozolanas de alta reatividade, tais como a sílica ativa, onde diversos autores (MALHOTRA e MEHTA, 1996; AİTCIN, 1998, entre outros) indicam um teor ótimo

variando de 7% a 15%. No caso do MCAR, tendo-se como base os resultados obtidos e como foco principal somente a resistência à compressão, teores superiores a 20% podem melhorar ainda mais a eficiência das misturas com o MCAR. A adoção destes teores não representa necessariamente um aumento no calor de hidratação, um dos grandes problemas do uso de pozolanas de alta reatividade, visto que nos resultados obtidos por alguns autores, como Frias et all. (2000), o aumento de calor proveniente do uso de altos teores é compensado pelo efeito diluição, decorrente da substituição do cimento Portland.

5.2.2 Resistência à tração

Para a verificação do comportamento da resistência à tração do concreto com a inclusão do MCAR, foram utilizados dois diferentes ensaios, o ensaio de resistência à tração por flexão (f_F) em corpos-de-prova prismáticos e de resistência à tração por compressão diametral (f_D) em corpos-de-prova cilíndricos. Os valores obtidos estão colocados na tabela 25, onde se constata novamente um comportamento diretamente proporcional à idade e ao teor de substituição de MCAR e inversamente proporcional à relação $a/(c+MCAR)$.

Tabela 25 Valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}) e resistência à tração por flexão (f_{tF}), em MPa.

Propriedade	f_{tF}	f_{tD}	f_{tF}	F_{tD}	f_{tF}	f_{tD}	f_{tF}	f_{tD}	f_{tF}	f_{tD}
0% de MCAR	Relação a/(c+MCAR)									
	0,25		0,28		0,35		0,46		0,60	
1 dia	5,04 6,15	3,43 3,35			4,74 4,20	2,93 2,77			1,98 2,51	1,17 0,99
14 dias	7,98 9,06	5,36 4,78			6,15 7,05	3,74 3,50			4,20 4,65	2,88 2,93
91 dias	10,80 9,63	6,57 6,12			8,43 6,00	4,82 3,80			4,17 4,83	3,37 3,39
5% de MCAR	0,25		0,28		0,35		0,46		0,60	
7 dias			7,74 7,56	4,96 3,70			4,50 4,59	3,12 3,51		
14 dias			8,85 8,51	4,00 3,88			5,43 5,49	3,89 3,54		
28 dias			9,45 10,20	4,12 4,81			6,51 5,78	3,59 4,15		
10% de MCAR	0,25		0,28		0,35		0,46		0,60	
1 dia	5,40 5,84	3,41 3,54			4,65 4,23	2,93 3,07			2,10 1,98	1,21 1,03
14 dias	8,49 9,51	5,06 5,26			7,70 7,26	4,59 3,64			4,05 4,47	3,02 2,87
91 dias	6,81 9,90	6,06 5,56			6,87 7,83	4,80 3,98			4,92 4,20	2,61 3,32
15% de MCAR	0,25		0,28		0,35		0,46		0,60	
7 dias			9,06 8,49	5,26 4,84			4,08 4,38	3,65 3,30		
14 dias			9,54 9,30	4,61 5,13			6,80 4,92	3,33 3,17		
28 dias			10,68 10,34	4,42 4,52			6,03 6,33	3,87 3,55		
20% de MCAR	0,25		0,28		0,35		0,46		0,60	
1 dia	5,61 4,71	3,46 3,50			3,99 3,69	2,44 2,91			1,59 1,86	1,00 1,09
14 dias	9,63 9,66	4,68 5,05			7,35 7,98	4,63 4,85			3,89 4,22	3,41 3,44
91 dias	9,33 9,36	6,70 5,26			8,37 8,61	5,15 5,87			4,95 4,80	3,69 3,83

No modelo matemático ajustado aos resultados do ensaio de tração por flexão, o coeficiente de determinação (r^2) é de 93,20%, enquanto que no referente aos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral o coeficiente de determinação (r^2) é de 86,49%. Esses valores evidenciam que os modelos obtidos são estatisticamente consistentes, visto que demonstram que 93% e 86% da variabilidade dos resultados nos ensaios de tração por flexão e tração por compressão diametral, respectivamente, são decorrentes da relação $a/(c+MCAR)$, do teor de substituição, da idade e da interação entre

estas variáveis, fazendo com que os valores obtidos nestes modelos ficassem muito próximos dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração.

A expressão dos modelos responsáveis pela formação das curvas de comportamento para os resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão (equação 2) e para os dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (equação 3) estão colocados abaixo. Os valores de resistência à tração obtidos com esses modelos estão colocados no anexo F e G.

$$f_{tF} = 1,56432 - 0,000339423 * Teor^4 / Idade^9 + 0,00111823 * AC / Idade^{10} + 1,9438 * Teor^{0,3} + 2,79714 / AC^{1,8} - 0,00746805 * Teor^{0,1} / AC^9 - 0,0162438 / Idade^8 \quad \text{(equação 2)}$$

$$f_{tD} = 6,94984 - 0,000000158967 * Teor^{13} / Idade^{14} - 1,25903 / (Idade * AC)^{0,3} + 1,36972 * Teor^{0,5} + 0,00771719 / AC^6 - 2,81763 * Teor^{0,1} * AC^{0,8} - 0,0235609 / Idade^{6,01} \quad \text{(equação 3)}$$

Onde:

f_{tF} : resistência à tração por flexão, em MPa;

f_{tD} : resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

AC : valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$, conforme tabela 21;

$Teor$: valor codificado do teor de substituição de MCAR, conforme tabela 21; e

$Idade$: valor codificado da idade de rompimento, conforme tabela 21.

Verifica-se, conforme a tabela 26, tanto para o ensaio de tração por flexão quanto para o ensaio de tração por compressão diametral, que os parâmetros das equações, colocados na análise de regressão múltipla, apresentam valores-p reduzidos, onde tem-se que o maior valor obtido no ensaio de tração por flexão foi de 0,0424 e no ensaio de tração por compressão diametral foi de 0,0497. Assim sendo, como os valores-p ficaram em patamares inferiores a 0,05, tem-se que os modelos propostos são estatisticamente significativos para um nível de confiança de 95%, não sendo aconselhável suprimir nenhuma das variáveis empregadas. Os termos do modelo da tabela 26 estão por ordem de significância.

Tabela 26 Valor-p dos termos dos modelos para a resistência à tração.

Nº	Tração por flexão		Tração por compressão diametral	
	Termo do modelo	Valor-p	Termo do modelo	Valor-p
1	$+2,79714/AC^{1,8}$	0,0000	6,94984	0,0000
2	$-0,00746805*Teor^{0,1}/AC^9$	0,0000	$-2,81763*Teor^{0,1}*AC^{0,8}$	0,0000
3	$-0,0162438/Idade^8$	0,0000	$-0,0235609/Idade^{6,01}$	0,0000
4	$+0,00111823*AC/Idade^{10}$	0,0071	$+1,36972*Teor^{0,5}$	0,0001
5	$+1,9438*Teor^{0,3}$	0,0098	$+0,00771719/AC^6$	0,0159
6	$-0,000339423*Teor^4/Idade^9$	0,0345	$-1,25903/(Idade*AC)^{0,3}$	0,0442
7	1,56432	0,0424	$-0,0000001,58967*Teor^{13}/Idade^{14}$	0,0497

A análise de variância dos dois modelos são colocadas nas tabelas 27 e 28, onde constata-se que o alto valor de F obtido, em relação ao valor de F calculado, fez com que seja rejeitada a hipótese nula, de que não existe relação entre as variáveis independentes e a resposta considerada. Outro ponto importante desta análise é o valor-p igual a zero, para os dois modelos, o que indica que os mesmos são significativos, isto é, há uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis independentes e a resposta considerada.

Tabela 27 Análise de variância do modelo para o ensaio de resistência à tração por flexão.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos Quadrados	F _{Obtido}	F _{calculado}	Valor-p
Modelo	418,744	6	69,7907	177,02	2,24	0,0000
Residual	27,9917	71	0,394249			
Total	446,736	77				

Tabela 28 Análise de variância do modelo para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{Obtido}	F _{calculado}	Valor-p
Modelo	104,082	6	17,347	83,12	2,24	0,0000
Residual	14,8171	71	0,208691			
Total	118,899	77				

a) Efeito dos fatores $a/(c+MCAR)$ e idade (grau de hidratação) na resistência à tração do concreto.

Assim como na resistência à compressão, a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade (grau de hidratação) são fatores de extrema influência na resistência à tração do concreto. Na figura 28 são colocados os gráficos (a) e (b) que apresentam o comportamento do efeito isolado da relação $a/(c+MCAR)$ e do efeito isolado da idade de rompimento, respectivamente, nesta propriedade. Os gráficos foram obtidos por intermédio dos dois modelos (equações 2 e 3) relacionados a esta propriedade, variando os valores codificados do efeito focalizado e mantendo-se as demais variáveis das equações no ponto médio do intervalo codificado de cada uma delas.

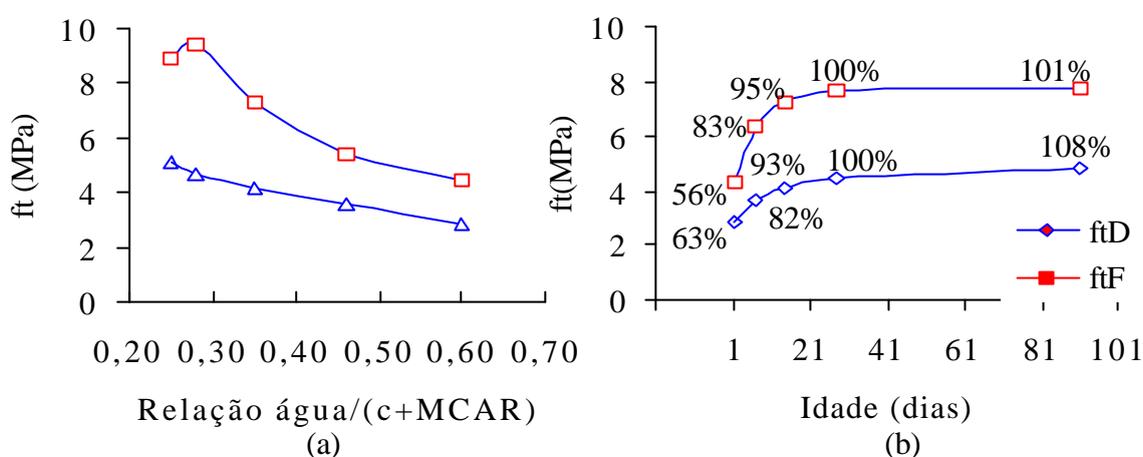


Figura 28 Resistência à tração em função do efeito isolado da: a) relação $a/(c+MCAR)$ b) idade de rompimento.

Nos dois gráficos colocados na figura 28, tem-se que os resultados obtidos na resistência à tração por flexão são superiores aos obtidos no ensaio de tração por compressão diametral. Este comportamento vai ao encontro do obtido por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), contudo teve-se no presente trabalho uma melhoria média dos resultados de flexão, em relação aos de compressão diametral, um pouco superiores aos colocados nos trabalhos acima citados. A diferença entre os resultados tem como causa o fato que na compressão diametral tem-se somente a tensão tração ao longo do diâmetro vertical, enquanto que na flexão, tem-se tensão de tração na parte inferior e de compressão na parte superior do corpo-de-prova, proporcionando um aumento nos valores de resistência à tração deste ensaio.

No gráfico do efeito isolado da relação $a/(c+MCAR)$ na figura 28a, constata-se que os valores vão diminuindo com o aumento da relação $a/(c+MCAR)$, conforme esperado. Comparando os dois tipos de ensaios utilizados para a mensuração da resistência à tração, verifica-se que no ensaio de tração na flexão os efeitos decorrentes do aumento da relação $a/(c+MCAR)$ foram muito mais acentuados; contudo, nos dois tipos de ensaios, os resultados

obtidos estiveram de acordo com a lei que rege a influência da relação $a/(c+MCAR)$ nesta propriedade. Dal Molin (1995) e Sensale (2000), verificando a influência da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, respectivamente, na resistência à tração também constataram a significância desta variável e apresentaram um comportamento semelhante aos obtidos nas misturas realizadas nesta pesquisa.

No caso do gráfico da figura 28b, que apresenta o efeito isolado da idade de rompimento, os resultados também foram ao encontro do esperado, visto que os valores de resistência à tração vão aumentando conforme aumenta-se a idade de rompimento, independente do ensaio realizado. Quanto ao crescimento dos valores de resistência à tração, constata-se que o maior percentual de crescimento se dá novamente até o 14º dia, sendo que após o 28º dia o crescimento da resistência é bem reduzido ou inexistente. O uso do cimento CPV-ARI apresenta-se, assim como na resistência à compressão, como a causa principal para a alta taxa de crescimento nos primeiros dias. A significância deste efeito também foi verificada quando do uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), respectivamente.

Conforme observado nas equações 2 e 3, a interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade de rompimento também foi considerada significativa, mostrando que o crescimento da resistência à tração com a idade varia em função da relação $a/(c+MCAR)$. Esta interação está colocada na figura 29, com a manutenção da outra variável no ponto médio, onde se verifica que os valores de resistência à tração não se desenvolvem da mesma forma para todas as relações $a/(c+MCAR)$.

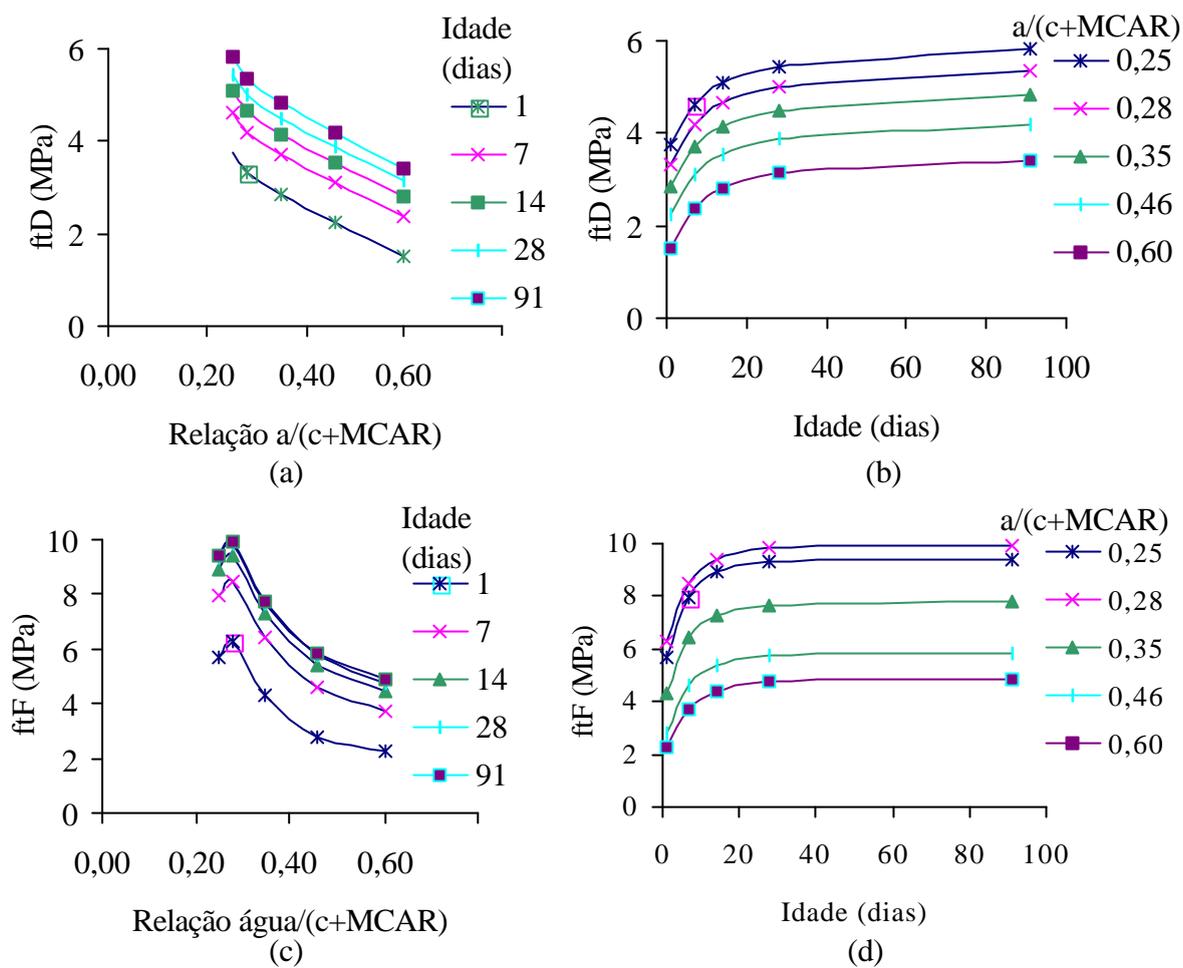


Figura 29 Resistência à tração por compressão diametral em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico ftD (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico ftD (idade de rompimento) c) gráfico ftF (relação $a/(c+MCAR)$) d) gráfico ftF (idade de rompimento).

Nesta interação tem-se, segundo os gráficos colocados na figura 29, um crescimento mais lento das resistências à tração nas primeiras idades quando adota-se maiores valores de relação $a/(c+MCAR)$, enquanto que nas menores relações $a/(c+MCAR)$, o crescimento da resistência tende a ser maior nas primeiras idades. O crescimento da resistência após o vigésimo oitavo dia de idade, independente da relação $a/(c+MCAR)$, é reduzido, sendo que no ensaio de tração por flexão esta redução ainda é mais acentuada. A influência desta interação na resistência à tração também foi constatada por Dal Molin (1995) no estudo com a sílica ativa, e apresentou aparentemente uma significância similar à obtida com o MCAR. Sensale (2000), em trabalho com a cinza de casca de arroz, não constatou a influência desta interação na resistência à tração.

b) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade na resistência à tração do concreto.

Mesmo tendo adotado um projeto estatístico fracionado para o desenvolvimento deste trabalho, pode-se verificar pelos resultados obtidos nos dois tipos de ensaios realizados, colocados na tabela 25, que o uso do MCAR contribui para a melhoria desta propriedade. Esta contribuição tende a aumentar conforme eleva-se o teor de substituição de MCAR nas misturas, o que ratifica a presença deste efeito no modelo (equações 2 e 3).

Na figura 30 tem-se, para todos os teores de substituição estudados, a contribuição média obtida, dentre as relações água/(c+MCAR) empregadas, no 28º dia de idade dos concretos. Nesta propriedade, tanto para o ensaio de compressão diametral quanto para o de flexão, tem-se um valor crescente da contribuição do MCAR. Contudo, esta contribuição tende a variar com a relação $a/(c+MCAR)$ e com a idade de rompimento, demonstrando que interações como teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$ e teor de substituição x idade de rompimento, são significativas no comportamento desta propriedade.

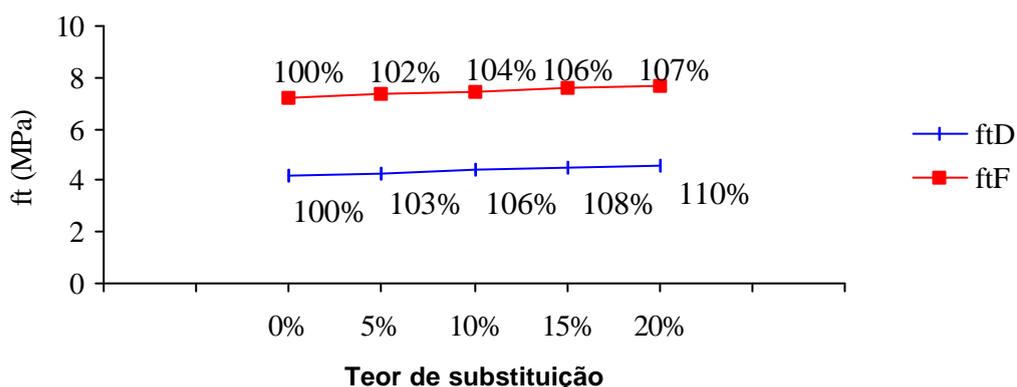


Figura 30 Resistência à tração em função do efeito isolado do teor de substituição.

As contribuições obtidas com o uso do MCAR nesta propriedade foram inferiores às obtidas na resistência à compressão. A diferença de contribuição tem como causa principal a pouca contribuição do efeito filer do MCAR nesta propriedade. Esta situação ainda é reforçada pela maior contribuição constatada no ensaio de compressão diametral, em relação ao de flexão, visto que tem-se no segundo uma menor área sujeita à tração. Este comportamento vai ao encontro do relatado por Mehta e Monteiro (1994), que afirmam que o efeito filer, proporcionalmente, é maior na resistência à compressão que na resistência à tração.

O comportamento obtido na resistência à tração decorrente do teor de substituição de MCAR vai também ao encontro dos resultados obtidos, quando do uso do ensaio de flexão, por outros pesquisadores, tais como Caldarone et al. (1994) adotando teores de adição de

MCAR de 5 e 10% e Zhang e Malhotra (1995) e Qian e Li (2001) adotando teores de substituição entre 5% e 20%. Mesmo apresentando a mesma tendência, com relação à melhoria da contribuição decorrente do uso do MCAR, teve-se novamente uma menor eficiência em comparação com os trabalhos citados. Assim como na resistência à compressão, acredita-se também que nesta propriedade, tais diferenças têm como origem a forma de dosagem do MCAR, os valores da relação $a/(c+MCAR)$ e as variações das características físicas e químicas do MCAR, ratificando a grande importância destas propriedades para o desenvolvimento da resistência à tração, além do tipo de cimento adotado.

Na comparação da contribuição obtida com o uso do MCAR com os resultados obtidos com o uso de outras pozolanas de alta reatividade, verifica-se que o uso do MCAR, também nesta propriedade, tende novamente a confirmar a condição de pozolana de alta reatividade. Contudo, não se observou quando do uso do MCAR uma maior contribuição na resistência à tração em relação à contribuição obtida na resistência à compressão, o que difere, segundo Almeida (1990) e Loland e Hustad (1981), do constatado quando do uso da sílica ativa.

No caso da sílica ativa, tem-se, segundo Dal Molin (1995), tanto para o ensaio de compressão diametral quanto no de flexão, a significância da adição mineral em relação a esta propriedade. No ensaio de tração por flexão, Dal Molin (1995), adotando um teor de adição de 10% de sílica ativa, obteve no 28º dia uma contribuição média, dentre as relações $a/(c+MCAR)$ empregadas, de 4%, que é igual à contribuição obtida no presente trabalho, mesmo tendo-se empregado o MCAR por meio de substituição. Para teores superiores a 10% de sílica ativa, tem-se, segundo Moraes (1990), um decréscimo nos valores de resistência, diferentemente do constatado com o uso do MCAR.

No ensaio de compressão diametral Dal Molin (1995), nas mesmas condições colocadas anteriormente, obteve uma melhoria de aproximadamente 22%, superior à melhoria de 6% obtida com o uso do MCAR. A diferença de comportamento, na comparação entre esses dois materiais, pode ser creditada principalmente a maior pozalanicidade da sílica ativa, decorrente da sua menor granulometria, e ao fato de se ter adotado a sílica ativa como adição.

Quanto à cinza de casca de arroz, constata-se que Sensale (2000) não verificou a significância do efeito isolado da adição mineral. Contudo, com base nos resultados colocados pela autora, verifica-se que em condições semelhantes, a melhoria com o uso da cinza de casca de arroz em relação à obtida com o MCAR, variou com o tipo de ensaio adotado. Nestes ensaios, verificou-se que no 28º dia de idade dos concretos, a contribuição média obtida dentre as relações $a/(c+MCAR)$ empregadas foi negativa no ensaio de compressão diametral e nula no ensaio de flexão. Estes resultados foram inferiores aos obtidos com o MCAR, haja

vista que para todos os teores empregados, teve-se no ensaio de compressão diametral e no ensaio de flexão, um aumento da melhoria média com o aumento do teor de substituição, conforme a figura 30. É interessante ressaltar que no caso da cinza de casca de arroz, tem-se normalmente que as melhorias obtidas no concreto ocorrem após o vigésimo oitavo dia de idade, resultando em contribuições similares entre estas pozolanas, após esta período. Por outro lado, teve-se no trabalho realizado por Malhotra e Mehta (1996), com o uso da cinza de casca de arroz, uma melhoria semelhante à obtida com o MCAR, no vigésimo oitavo dia de idade.

c) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da relação $a/(c+MCAR)$, na resistência à tração do concreto.

Para a verificação desta interação na resistência à tração, adotou-se novamente a equação 2 para o ensaio de tração por flexão e a equação 3 para o ensaio de tração por compressão diametral, onde se variou os valores codificados do teor de substituição para cada valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$, mantendo-se a outra variável das equações no ponto médio (14 dias). Os gráficos obtidos com este procedimento estão colocados na figura 31.

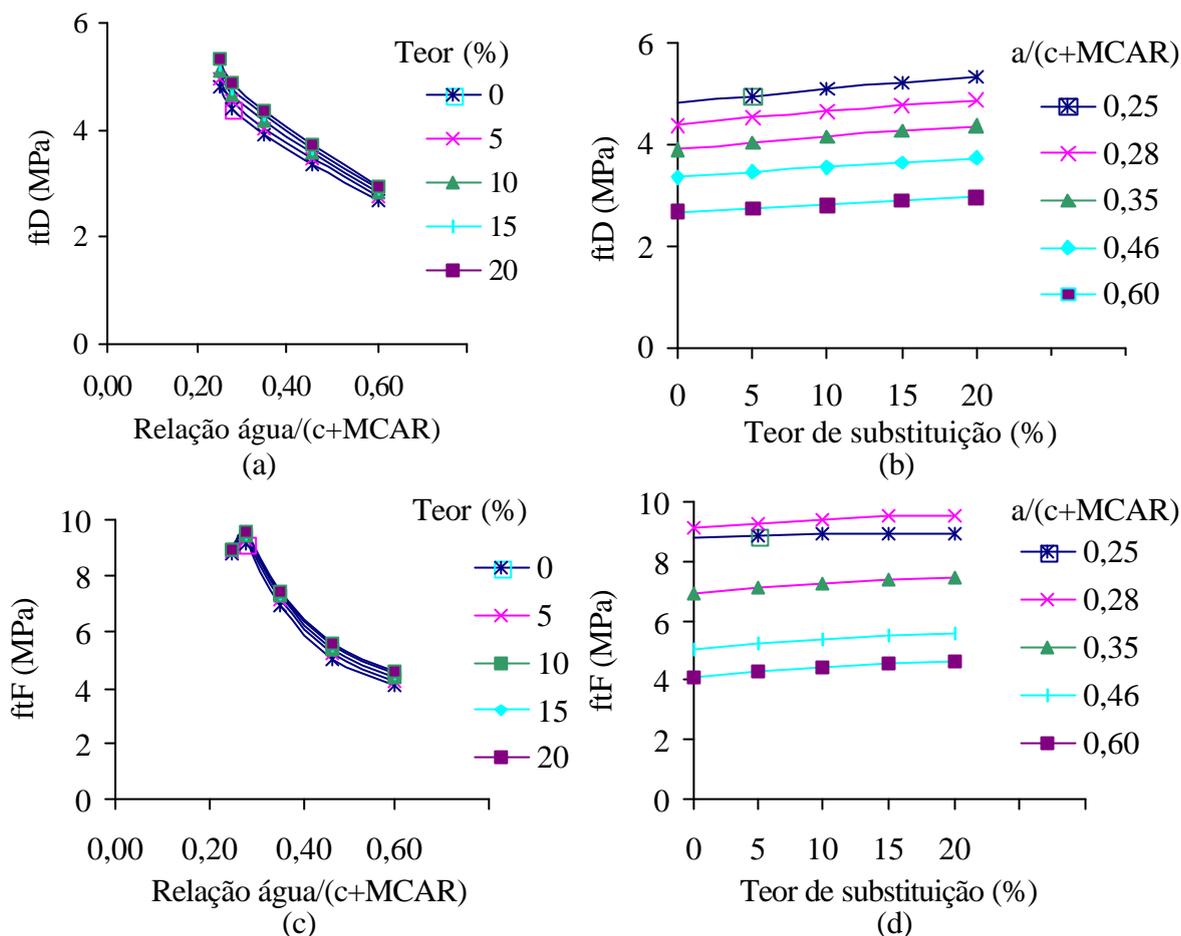


Figura 31 Resistência à tração em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico ftD (relação $a/(c+MCAR)$); b) gráfico ftD (teor de substituição); c) gráfico ftF (relação $a/(c+MCAR)$); d) gráfico ftF (teor de substituição).

Na figura 31, verifica-se tanto no ensaio de tração por flexão quanto no ensaio de tração por compressão diametral, que a contribuição do MCAR tende a variar de acordo com a relação $a/(c+MCAR)$. No ensaio de compressão diametral, constata-se nas menores relações $a/(c+MCAR)$ uma contribuição ligeiramente superior às constatadas nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Contudo, tem-se em todas as misturas um melhor desempenho quando do uso do MCAR, sendo esta melhoria diretamente proporcional ao teor de substituição. A ligeira superioridade das contribuições nas menores relações $a/(c+MCAR)$, diferente do que se esperava, pode ser creditada ao tipo de ensaio, que via de regra produz uma alta variabilidade dos resultados, bem como a falta de consenso em relação ao efeito desta interação na resistência à tração, conforme relatado anteriormente.

No ensaio de resistência à tração por flexão, cujos resultados também estão na figura 31 no gráfico (c) e (d), o efeito da relação $a/(c+MCAR)$ foi mais acentuado, sendo que as maiores contribuições foram obtidas nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Contudo, neste

ensaio, teve-se na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 menores valores que os obtidos na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,28. Este comportamento pode ser creditado à dificuldade de execução da moldagem das vigas utilizadas no ensaio, devido à baixíssima relação $a/(c+MCAR)$ e elevada coesão, pelo aumento do consumo de cimento e MCAR.

De um modo geral, tem-se na figura 31 que a eficiência variou de aproximadamente 3% a 11% e de 1% a 13% nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e por flexão, respectivamente, em relação ao concreto de referência, o que evidencia melhorias similares nesta propriedade, independente do ensaio realizado. Nos dois ensaios, constatou-se nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ uma maior variabilidade desta eficiência entre os teores de substituição do que o constatado nas menores relações $a/(c+MCAR)$. Acredita-se que este comportamento também tenha como causa a maior presença de vazios e menor número de reações pozolânicas nas misturas com maiores relações $a/(c+MCAR)$.

A comparação dos resultados obtidos com a bibliografia referente à influência desta interação na resistência à tração do concreto é dificultada pela inexistência de dados relacionados ao uso do MCAR. Com relação às outras pozolanas de alta reatividade, constata-se que os resultados obtidos neste trabalho estão dentro do esperado. Dal Molin (1995), utilizando a sílica ativa, e Sensale (2000), utilizando a cinza de casca de arroz, também constataram um efeito significativo desta interação nos dois tipos de ensaio, onde via de regra, houve também uma maior contribuição da pozolana de alta reatividade nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Em outro trabalho com a sílica ativa, realizado por Lopes (1999), mesmo não sendo focalizada a influência desta interação, tem-se também evidenciado pelos resultados apresentados, uma melhor eficiência com o aumento da relação $a/(c+MCAR)$, no ensaio de tração por compressão diametral. Mesmo com a presença desta interação na resistência à tração, teve-se aparentemente uma maior significância quando do uso do MCAR, em relação às outras pozolanas de alta reatividade.

Assim como na resistência à compressão, a colocação da idade no ponto médio fez com que os valores colocados nos gráficos da figura 31 sejam referentes ao décimo quarto dia de hidratação do concreto. Para as menores ou maiores idades este comportamento pode ser diferente, conforme verificado na interação entre o teor de substituição de MCAR e a idade de rompimento, colocado a seguir.

d) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da idade, na resistência à tração do concreto.

As equações 2 e 3 foram novamente utilizadas para a verificação desta interação na resistência à tração do concreto, onde se variou os valores codificados do teor de substituição

para cada valor codificado da idade, mantendo-se a outra variável das equações no ponto médio (relação $a/(c+MCAR)$ de 0,35). Os gráficos obtidos com este procedimento estão colocados na figura 32.

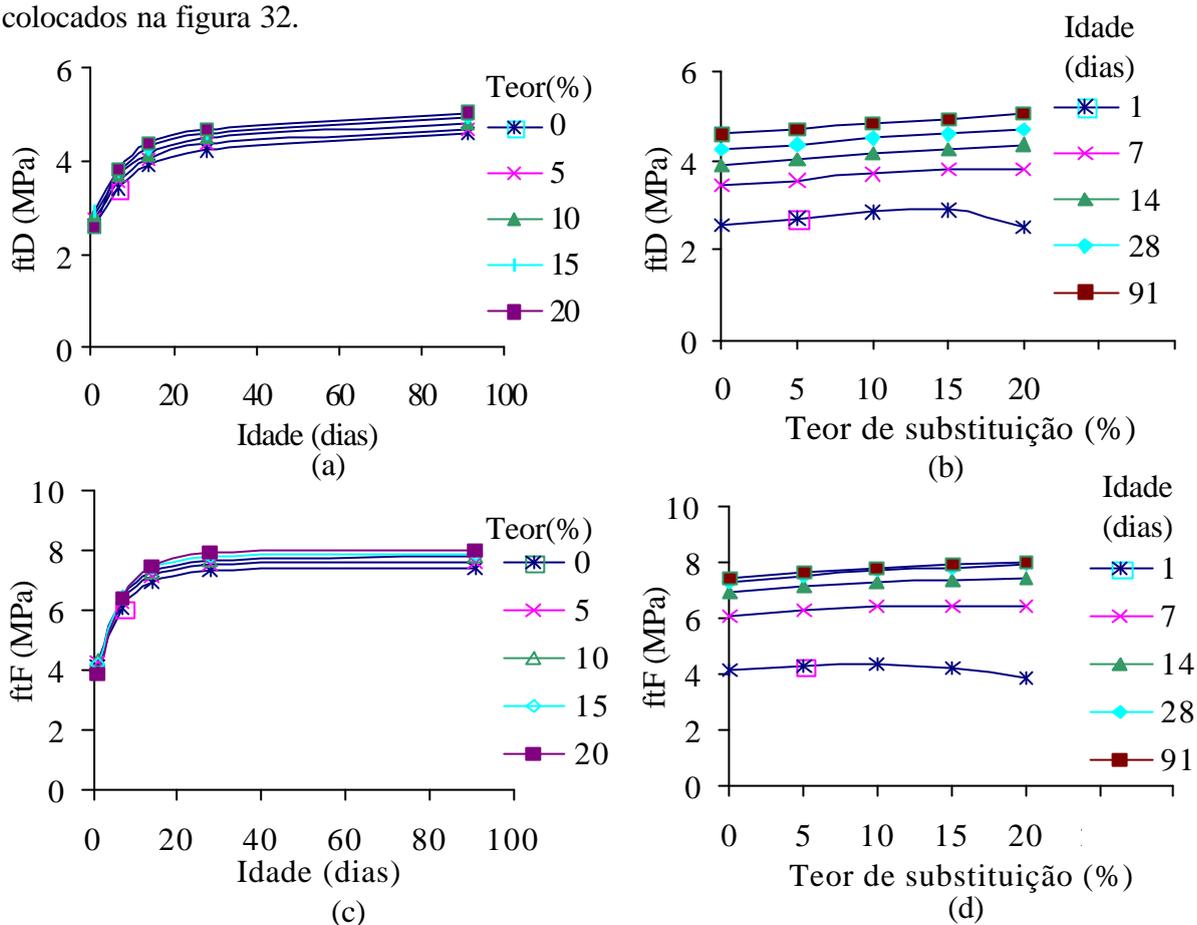


Figura 32 Resistência à tração em função da interação teor de substituição x idade a) gráfico ftD (idade); b) gráfico ftD (teor de substituição); c) gráfico ftF (idade); d) gráfico ftF (teor de substituição).

Na figura 32, verifica-se um comportamento semelhante entre os resultados obtidos nos ensaios por compressão diametral e por flexão, com relação à eficiência do uso do MCAR na resistência à tração para cada idade de rompimento estudada. Nesses ensaios tem-se no primeiro dia pouca melhoria nos resultados, sendo que com o aumento do teor de substituição há uma redução nos valores de resistência à tração. Nos demais dias analisados, observa-se uma ligeira tendência ao paralelismo entre as curvas obtidas, sendo que em todas houve uma melhoria dos valores de resistência à tração com o aumento do teor de substituição. De um modo geral, observa-se que a contribuição obtida com o MCAR parece parar no vigésimo oitavo dia no ensaio de flexão e estende-se até o nonagésimo primeiro dia no ensaio de compressão diametral.

Em relação ao concreto de referência, as melhorias obtidas variaram de acordo com o ensaio realizado. No ensaio de compressão diametral, de acordo com a figura 32, as melhorias variaram em relação ao aumento do teor de substituição e tiveram valores médios de 6,1%,

7,8%, 7,6%, 6,8% e 6,5% para as idades de 1,7, 14, 28 e 91 dias, respectivamente. No ensaio de flexão, teve-se como valores médios de melhoria da mistura do concreto com MCAR em relação ao concreto de referência, de 1% para o primeiro dia e de aproximadamente 5% para as idades 7, 14, 28 e 91 dias.

Na comparação dos dados obtidos com outros trabalhos que focalizaram o uso do MCAR, constatou-se apenas resultados relacionados ao ensaio de tração por flexão. Nesse contexto, Caldarone et al. (1994), Zhang e Malhotra (1995) e Qian e Li (2001) obtiveram um comportamento semelhante, sendo que novamente observou-se que essas contribuições foram superiores às obtidas no presente trabalho. Essas diferenças podem ser novamente creditadas às diferenças existentes no MCAR usado nos trabalhos referenciados, tais como finura e teores de Al_2O_3 , que tendem a acelerar a reação pozolânica, conforme verificado nos itens 3.3 e 3.4, bem como o tipo de cimento usado.

Quanto aos resultados obtidos com o uso de outras pozolanas de alta reatividade, observa-se que esta interação foi constatada por Dal Molin (1995) quando do uso da sílica ativa. Neste trabalho, tem-se para teores de 10% a obtenção de contribuições similares no ensaio de tração por flexão, contudo, tem-se com o uso do MCAR uma contínua melhoria até o 91º dia, enquanto que na sílica ativa, esta melhoria vai até o 7º dia. O maior período de contribuição do MCAR tem como causa principal a menor granulometria da sílica ativa, o que proporciona uma maior velocidade na reação pozolânica deste material.

No ensaio de compressão diametral, tem-se também um comportamento similar desta interação, sendo que neste caso os valores obtidos com o uso da sílica ativa por Dal Molin (1995) foram bem superiores aos valores obtidos com o uso do MCAR. As diferenças constatadas neste tipo de ensaio também podem ser creditadas à grande pozolanicidade da sílica ativa, decorrente principalmente da menor granulometria de suas partículas, visto que, segundo Dal Molin (1995), a maior contribuição das adições para a resistência à tração decorre do efeito químico. Apesar das diferenças de resultados entre os ensaios realizados, tem-se aparentemente uma significância similar desta interação, quando do uso da sílica ativa e do MCAR.

Com relação à cinza de casca de arroz, tem-se segundo os resultados obtidos por Sensale (2000), a significância desta interação quando da realização do ensaio de compressão diametral, onde constata-se que nas primeiras idades há diminuição crescente dos valores de resistência à tração com o aumento do teor de substituição. Esta situação é atenuada após o 28º dia, onde já se constata uma melhoria dos resultados com o aumento do teor de substituição. No 91º dia, tem-se uma contribuição semelhante à constatada com o MCAR quando do uso de teores de substituição na ordem de 5% e 10%. Para maiores teores (15% e

20%) tem-se uma maior contribuição com o uso da cinza de casca de arroz. No ensaio de flexão a autora não estudou a significância desta interação. Contudo, na comparação dos resultados obtidos no 28º dia, verifica-se que os mesmos são inferiores aos obtidos com o uso do MCAR. A menor eficiência da cinza de casca de arroz, em relação ao MCAR, deve-se também a maior dimensão média da primeira que torna mais lento o seu processo de reação com o Ca(OH)_2 produzido durante o processo de hidratação.

Também nesta interação, os gráficos colocados na figura 32 foram referentes à relação $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,35, em função desta variável ter sido fixada no ponto médio. Nas menores ou maiores relações $a/(c+\text{MCAR})$ este comportamento tende ser diferente, devido à interação do teor de substituição com a relação $a/(c+\text{MCAR})$, conforme colocado anteriormente.

Em função dos resultados obtidos com o uso do MCAR, acredita-se que o teor ótimo de substituição, quando objetiva-se a melhoria desta propriedade, deva ser maior que os teores pesquisados neste trabalho, haja vista que nos dois tipos de ensaios realizados, evidenciou-se uma tendência de aumento da eficiência quando do aumento do teor de substituição, indo ao encontro do comportamento indicado por Qian e Li (2001) para o MCAR, quando focalizado esta propriedade. Assim sendo, tem-se que o teor ótimo desta pozolana é superior ao colocado para as outras pozolanas de alta reatividade, tais como a sílica ativa, onde autores (MORAES, 1990 e SABIR, 1995) indicam um teor ótimo variando de 10% a 15%. No caso da cinza de casca de arroz, não se constatou na bibliografia existente um indicativo relacionado ao teor ótimo deste material. Contudo, trabalhos como o realizado por Sensale (2000), com variação de teores entre 5% e 20%, não apresentaram uma redução na contribuição, o que também pode indicar que o teor ótimo deva ser superior a 20%, para o uso da cinza de casca de arroz.

e) Relação entre a resistência 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 a conclusão 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.

Adotando os modelos das equações 1, 2 e 3, tem-se a relação entre estas propriedades na tabela 29, para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e por flexão. Nesta tabela, a relação entre estas duas propriedades comporta-se como era esperado, ou seja, apesar da ausência de proporcionalidade constata-se o aumento do quociente para as maiores

relações $a/(c+MCAR)$, tanto no ensaio de resistência à tração por compressão diametral quanto no ensaio de tração por flexão.

Tabela 29 Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão.

Relação	ftD/fc					ftF/fc				
	Relação $a/(c+MCAR)$					Relação $a/(C+MCAR)$				
0% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 Dia	0,07	0,07	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,11	0,10	0,15
7 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
14 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
28 Dias	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,13	0,13	0,14
91 Dias	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,13	0,13	0,14
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 Dia	0,07	0,07	0,07	0,09	0,11	0,12	0,14	0,12	0,11	0,16
7 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
14 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
28 Dias	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
91 Dias	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 Dia	0,08	0,07	0,08	0,09	0,12	0,12	0,14	0,12	0,11	0,18
7 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14
14 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
28 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
91 Dias	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 Dia	0,08	0,08	0,08	0,10	0,13	0,11	0,14	0,12	0,11	0,18
7 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14	0,12	0,12	0,13
14 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
28 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,12	0,14	0,13	0,12	0,13
91 Dias	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,11	0,13	0,13	0,12	0,13
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 Dia	0,08	0,07	0,08	0,09	0,11	0,11	0,13	0,12	0,11	0,17
7 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11	0,14	0,12	0,11	0,13
14 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,13	0,13	0,12	0,13
28 Dias	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,13	0,13	0,12	0,13
91 Dias	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,11	0,13	0,12	0,12	0,13

O comportamento dos resultados obtidos neste trabalho com o MCAR é semelhante aos obtidos por Dal Molin (1995) e Sensale (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 $a/(c+MCAR)$, não tendo, deste modo, grande influencia deste tipo de adição mineral no concreto.

O intervalo de variação obtido para o ensaio de compressão diametral ficou entre 0,7 e 0,13, e para o ensaio de tração por flexão ficou entre 0,10 e 0,18. Estes valores não diferem muito do intervalo especificado por Mehta e Monteiro (1994), para concretos com resistências semelhantes às alcançadas neste trabalho.

Desta forma, tendo como base os resultados adquiridos através das equações 1, 2 e 3, para a resistência à compressão, para a resistência à tração por flexão e para a resistência à tração por compressão diametral, respectivamente, obteve-se as equações, colocadas abaixo, junto com o seu coeficiente de determinação, válidas para o intervalo de $10 < f_c < 90$ MPa.

Para a resistência à tração na flexão (MPa):

$$F_{tF}: 0,1733 \times f_c^{0,9191}, r^2: 95,26\% \quad (\text{equação 4})$$

Para a resistência à tração na compressão diametral (MPa):

$$F_{tD}: 0,2122 \times f_c^{0,7405}, r^2: 95,97\% \quad (\text{equação 5})$$

Na figura 33, tem-se a comparação da relação obtida entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão com o uso do MCAR com a proposta pelo ACI 363 (1991), pela NBR 6118 (ABNT, 2001) e com a obtida com a sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), respectivamente.

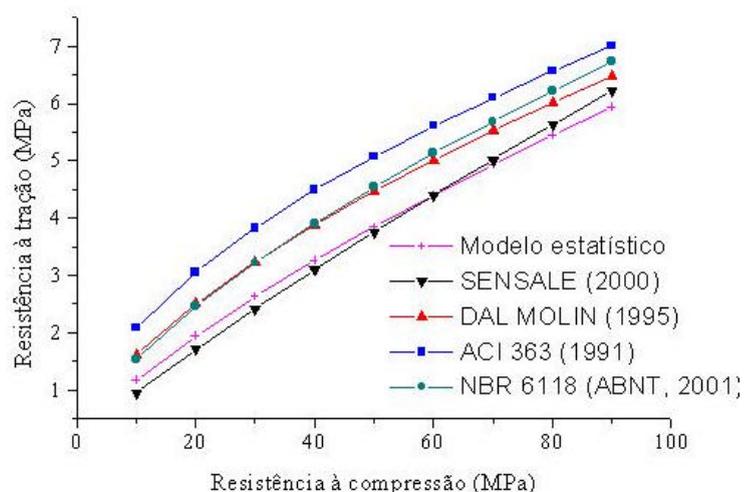


Figura 33 Comparação da relação f_{tD}/f_c obtida neste trabalho, com a obtida por outros pesquisadores e recomendada por algumas normas.

De acordo com as curvas apresentadas na figura 33, constata-se valores semelhantes entre a cinza de casca de arroz e o MCAR, e inferiores aos obtidos com a sílica ativa. Esta situação é um reflexo pozolanicidade um pouco superior da sílica ativa em relação as 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 filer. A curva obtida com o MCAR foi inferior às curvas obtidas com a relação proposta pelo ACI 363 (1991) e pela NBR 6118 (ABNT, 2001).

5.2.3 Módulo de elasticidade

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade, obtidos com o LVDT (transformador diferencial variável linear), estão apresentados na tabela 30. Constata-se, de um modo geral, que o comportamento das misturas tendem novamente a aumentar com a idade, com o teor de substituição e com a diminuição da relação $a/(c+MCAR)$.

Tabela 30 Valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade, em GPa.

0% de MCAR	Relação $a/(c+MCAR)$				
	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	36,5		31,2		14,9
	40,7		32,7		14,7
14 dias	44,0		40,1		27,2
	43,4		38,6		27,5
91 dias	45,4		40,2		29,9
	41,7		39,6		32,6
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 dias		40,1		30,8	
		38,3		29,7	
14 dias		42,5		34,8	
		41,3		35,4	
28 dias		44,3		35,1	
		43,9		35,5	
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	26,0		32,6		13,7
	27,9		29,3		13,6
14 dias	29,0		41,8		33,3
	40,2		39,0		34,4
91 dias	48,4		40,5		37,1
	47,6		43,0		31,4
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 dias		39,8		31,8	
		42,3		30,3	
14 dias		41,1		38,6	
		44,4		42,6	
28 dias		46,3		36,9	
		46,4		35,9	
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	35,1		31,1		12,6
	35,1		28,3		14,9
14 dias	46,4		41,3		33,0
	45,0		40,3		36,4
91 dias	44,1		44,0		31,6
	48,4		40,9		32,4

As curvas de comportamento desta propriedade foram obtidas através do modelo apresentado na equação 6. Neste modelo, o coeficiente de determinação (r^2) é de 88,70%,

sendo deste modo estatisticamente consistente, visto que demonstra que aproximadamente 89% da variabilidade dos resultados desta propriedade são decorrentes da relação $a/(c+MCAR)$, do teor de substituição, da idade e da interação entre estas variáveis, fazendo com que os valores obtidos neste modelo ficassem muito próximos dos resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade. Os valores de módulo de elasticidade obtidos com este modelo estão colocados no anexo H.

$$E_c = 14,1332 + 0,00163592/(Teor^4 * Idade^8) - 0,00496357 * AC^3 / Idade^9 + 17,3975 * Teor^{0,2} + 9,76265 / AC^{0,5} - 1,83621 * Teor^{0,01} * AC^3 - 0,0496533 / Idade^8 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

E_c : módulo de elasticidade, em GPa;

AC : valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$, conforme tabela 21;

$Teor$: valor codificado do teor de substituição de MCAR, conforme tabela 21; e

$Idade$: valor codificado da idade de rompimento, conforme tabela 21.

Neste modelo verifica-se, conforme a tabela 31, que os parâmetros da equação colocados na análise de regressão múltipla apresentam valores-p reduzidos, onde tem-se que o maior valor obtido foi de 0,0351. O maior valor obtido encontra-se novamente em patamar inferior a 0,05, demonstrando que o modelo proposto é estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95%, não sendo aconselhável suprimir nenhuma das variáveis empregadas. Os termos do modelo da tabela 31 estão por ordem de significância.

Tabela 31 Valor-p dos termos do modelo para o módulo de elasticidade.

Nº	Termo do modelo	Valor-p	Nº	Termo do modelo	Valor-p
1	$-0,0496533/Idade^8$	0,0000	5	$-1,83621 * Teor^{0,01} * AC^3$	0,0042
2	$-0,00496357 * AC^3 / Idade^9$	0,0000	6	$+9,76265 / AC^{0,5}$	0,0040
3	$+0,00163592 / (Teor^4 * Idade^8)$	0,0004	7	14,1332	0,0351
4	$+17,3975 * Teor^{0,2}$	0,0010			

Na tabela 32 tem-se a análise de variância do modelo do módulo de elasticidade, onde constata-se que o alto valor de F obtido, em relação ao valor de F calculado, fez com que seja novamente rejeitada a hipótese nula, de que não existe relação entre as variáveis independentes e a resposta considerada. Outro ponto importante desta análise é o valor-p igual a zero, o que indica que o modelo é significativo, isto é, há uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis independentes e a resposta considerada.

Tabela 32 Análise de variância do modelo para o módulo de elasticidade.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{Obtido}	F _{Calculado}	Valor-p
Modelo	5005,97	6	834,328	101,72	2,24	0.0000
Residual	582,35	71	8,20212			
Total	5588,32	77				

a) Efeito dos fatores $a/(c+MCAR)$ e idade (grau de hidratação) no módulo de elasticidade do concreto.

Na figura 34 tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da relação $a/(c+MCAR)$ e do efeito isolado da idade de rompimento, respectivamente, no módulo de elasticidade do concreto. Os gráficos foram obtidos por meio do modelo colocado na equação 6, variando os valores codificados do efeito focalizado e mantendo-se as demais variáveis no ponto médio do intervalo codificado de cada uma delas.

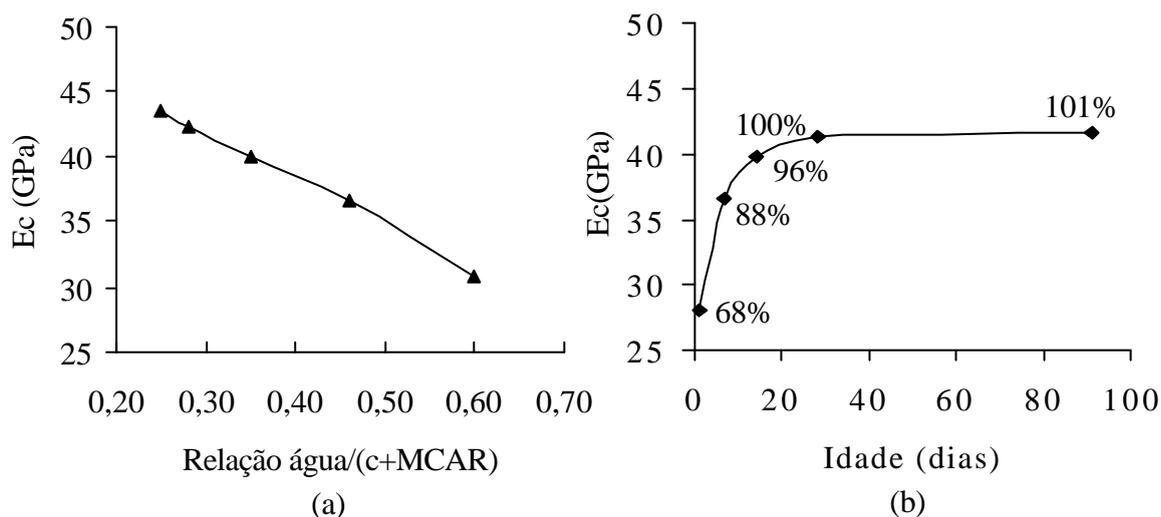


Figura 34 Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da: a) relação $a/(c+MCAR)$ b) Idade de rompimento.

Como era esperado, o gráfico do efeito isolado da relação $a/(c+MCAR)$ da figura 34 apresenta uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade conforme aumenta-se os valores da relação. Nessas maiores relações $a/(c+MCAR)$, tem-se um maior afastamento dos grãos de cimento fazendo que haja uma maior presença, principalmente na zona de transição, dos cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, resultando num enfraquecimento das ligações no concreto endurecido. O comportamento dos resultados apresentados neste gráfico mostra uma grande variação quando altera-se a relação $a/(c+MCAR)$. Trabalhos como os de

Dal Molin (1995) e de Sensale (2000), utilizando a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, respectivamente, também constataram a significância deste fator e obtiveram um comportamento semelhante, porém, com uma menor variação entre os resultados obtidos.

Com relação ao gráfico referente ao efeito isolado da idade de rompimento, também contido na figura 34, tem-se novamente que os resultados encontraram-se dentro do esperado, ou seja, aumentaram com o aumento da idade de rompimento. Neste gráfico, verifica-se que a taxa de evolução do módulo de elasticidade é acentuada, chegando-se a obter no primeiro dia 68% do valor atingido ao vigésimo oitavo dia. A significância deste efeito no módulo de elasticidade também foi constatada por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), sendo que somente com a sílica ativa, teve-se um crescimento mais acentuado no primeiro dia. Novamente, é interessante ressaltar que o comportamento apresentado nos gráficos colocados na figura 34 tendem a variar em decorrência de outras variáveis, como o teor de substituição de MCAR.

Na verificação da interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade de rompimento, foi necessária a manutenção da outra variável no ponto médio. Assim sendo, esta interação foi colocada na figura 35, onde observa-se que os valores do módulo de elasticidade em relação à idade tende a variar de acordo com a relação $a/(c+MCAR)$.

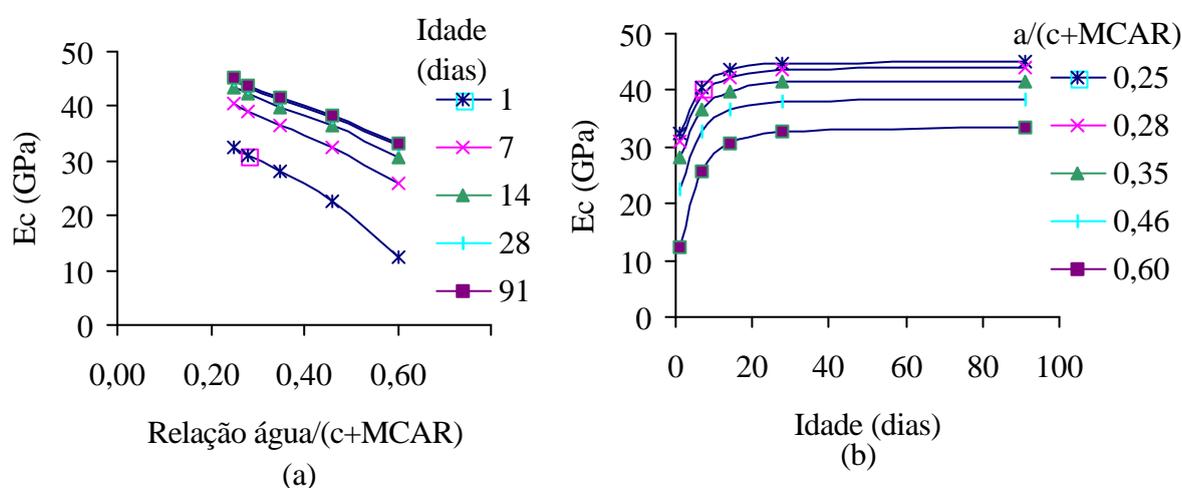


Figura 35 Módulo de elasticidade em função da interação relação $a/(c+MCAR)$ x idade de rompimento: a) gráfico E_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico E_c (idade de rompimento).

Com relação a esta interação, tem-se, segundo os gráficos colocados na figura 35, um crescimento mais lento do módulo de elasticidade nas primeiras idades quando adota-se maiores valores de relação $a/(c+MCAR)$. Por outro lado, nas baixas relações $a/(c+MCAR)$, o crescimento dos valores de módulo de elasticidade tende a ser maior nas primeiras idades. Nas duas situações tem-se um crescimento muito reduzido após o 28º dia, o que assemelha este comportamento ao constatado na resistência à compressão.

Novamente, teve-se a constatação da influência desta interação nesta propriedade por Dal Molin (1995), no estudo de concretos com a sílica ativa. Mesmo com a constatação desta interação, tem-se aparentemente neste trabalho uma maior significância desta interação quando comparado com o trabalho realizado por Dal Molin (1995). Sensale (2000), em trabalho com a cinza de casca de arroz, não constatou a influência desta interação.

b) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade no módulo de elasticidade do concreto.

Utilizando o modelo colocado na equação 6, é apresentado na figura 36 o efeito isolado do teor de substituição de MCAR no módulo de elasticidade. Nesta figura tem-se a contribuição média obtida, dentre as relações água/(c+MCAR) empregadas, no vigésimo oitavo dia de idade dos concretos, para todos os teores de substituição estudados. Mesmo com a melhoria dos resultados obtidos, com o aumento do teor de substituição de MCAR, deve-se ressaltar que esta situação não se mantém constante para as demais idades estudadas, e está relacionada à média das relações água/(c+MCAR) empregadas. A não manutenção da melhoria observada na figura 36 demonstra que interações como teor de substituição x relação água/(c+MCAR) e teor de substituição x idade são importantes para o comportamento desta propriedade.

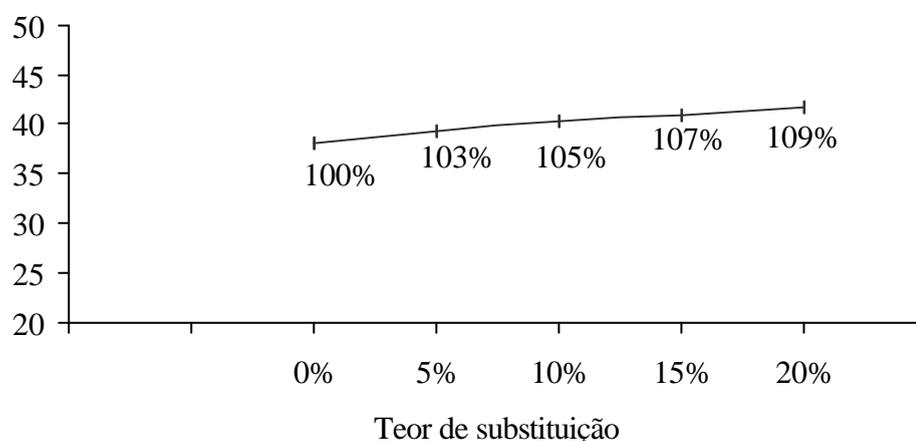


Figura 36 Módulo de elasticidade em função do efeito isolado do teor de substituição.

De acordo com os valores colocados na figura 36, tem-se uma melhoria desta propriedade com o aumento do teor de substituição de MCAR no concreto. A contribuição decorrente do uso do MCAR é semelhante à obtida por Qian e Li (2001) e Zhang e Malhotra (1995), e inferior aos valores colocados por Caldarone et al. (1994). Estas diferenças podem ser creditadas novamente às variações das características físicas e químicas do MCAR.

Na comparação das melhorias obtidas com o MCAR com as de outras pozolanas de alta reatividade, constata-se um desempenho diferenciado dos resultados obtidos neste trabalho. No caso da sílica ativa, Dal Molin (1995) também constatou a significância desta variável, onde obteve ao vigésimo oitavo dia, com um teor de adição de 10%, uma melhoria média, dentre as várias relações $a/(c+sa)$ utilizadas, de aproximadamente 4% em relação ao concreto de referência, um pouco inferior à melhoria obtida no presente trabalho, mesmo tendo-se empregado o MCAR por meio de substituição.

Quanto a cinza de casca de arroz, tem-se, segundo Sensale (2000), a falta de significância do teor de substituição nos resultados do módulo de elasticidade. Apesar de não ser constatado pela pesquisadora a significância de tal variável, pode-se verificar, através da curva de comportamento obtida naquele trabalho, que no vigésimo oitavo dia tem-se uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade, sendo que esta diminuição aumenta com o aumento do teor de substituição. Após esta idade este comportamento tende-se a alterar, chegando-se a obter, no nonagésimo primeiro dia, um aumento dos valores de módulo, em relação ao concreto de referência, com o aumento do teor de substituição. Apesar deste aumento para as maiores idades, a contribuição média obtida pela pesquisadora ainda foi menor que a obtida neste trabalho com o uso do MCAR, no 91º dia.

De um modo geral, constata-se pelas melhorias obtidas com o uso do MCAR, que o uso deste material tende a ter maior influência quando comparado com os valores obtidos com a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

c) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da relação $a/(c+MCAR)$, no módulo de elasticidade do concreto.

Na figura 37 pode ser visualizado o efeito da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$ sobre o módulo de elasticidade. Os valores para a montagem dos gráficos foram obtidos a partir da equação 6, sendo que no gráfico do módulo de elasticidade em função da relação $a/(c+MCAR)$, variou-se os valores codificados da relação $a/(c+MCAR)$ para cada valor codificado do teor de substituição, mantendo-se a outra variável no ponto médio (14 dias).

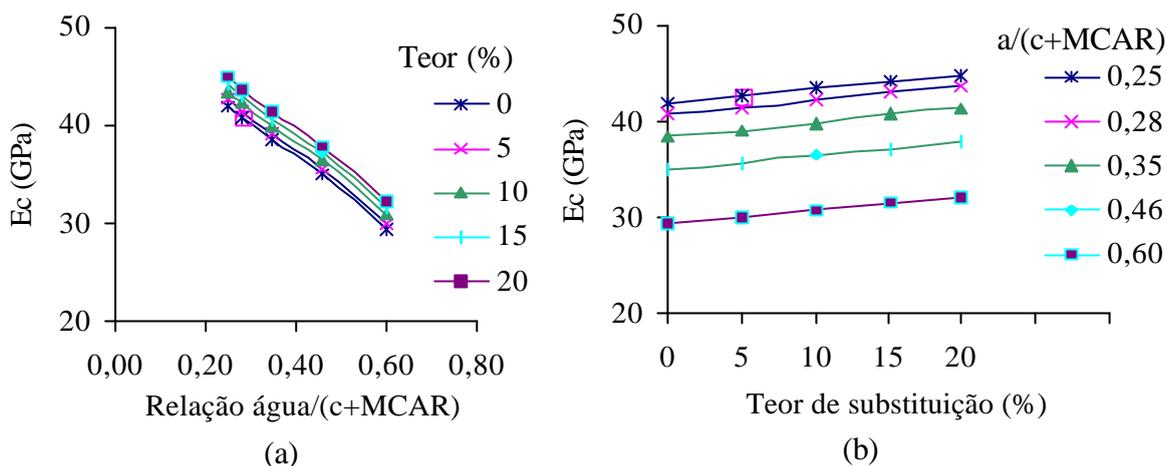


Figura 37 Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$: a) gráfico E_c (relação $a/(c+MCAR)$) b) gráfico E_c (teor de substituição).

Segundo a figura 37, constata-se nesta propriedade, assim como na maioria das demais propriedades já analisadas neste trabalho, um comportamento semelhante em relação à interação teor de substituição x relação $a/(c+MCAR)$, ou seja, tem-se uma melhor eficiência do MCAR quando do uso de maiores relações $a/(c+MCAR)$. Esta situação tem como causa os mesmos fatores apontados na análise desta interação, quando focalizou-se as outras propriedades estudadas neste trabalho. No comportamento do módulo de elasticidade colocado na figura 37, verifica-se que esta eficiência variou de aproximadamente 1% a 11%, em relação ao concreto de referência.

A comparação dos resultados com os resultados de outros trabalhos que focalizaram o uso do MCAR fica dificultada pela inexistência de trabalhos que abordem esta interação em relação ao módulo de elasticidade. No caso de outras pozolanas de alta reatividade, tem-se nos trabalhos realizados por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), empregando a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, respectivamente, comportamentos diferenciados em relação ao obtido neste trabalho. No caso da sílica ativa, esta interação não foi significativa. Por outro lado, com o uso da cinza de casca de arroz, teve-se a presença desta interação, tendo-se aparentemente uma significância similar à obtida com o MCAR, sendo também constatado uma maior contribuição nas misturas com maiores relações $a/(c+cca)$.

A diferença de comportamento obtido entre as pozolanas de alta reatividade pode ser decorrente da finura da sílica ativa em relação ao MCAR e à cinza de casca de arroz. Esta situação faz com que as partículas do MCAR e da cinza de casca de arroz, proporcionem a atuação destes materiais não só como fíler, mas também como micro-agregados nas misturas. No caso do MCAR, o melhor desempenho também pode ter como causa um maior efeito

nesta propriedade, dos produtos resultantes da reação pozolânica deste material, como por exemplo a gelenita.

Como nas demais propriedades analisadas, a colocação da idade no ponto médio fez com que os valores colocados na figura 37 sejam referentes ao décimo quarto dia. Nas menores ou maiores idades este comportamento pode ser diferente, conforme constatado na interação teor de substituição de MCAR x idade de rompimento, colocada a seguir.

d) Efeito da adição de metacaulim de alta reatividade em função da idade, no módulo de elasticidade do concreto.

Os gráficos da figura 38, que representam o comportamento do módulo de elasticidade em função do teor de substituição, foram também obtidos a partir da equação 6, variando os valores codificados do teor de substituição para cada valor codificado da idade, mantendo-se a outra variável no ponto médio (relação $a/(c+MCAR)$ de 0,35).

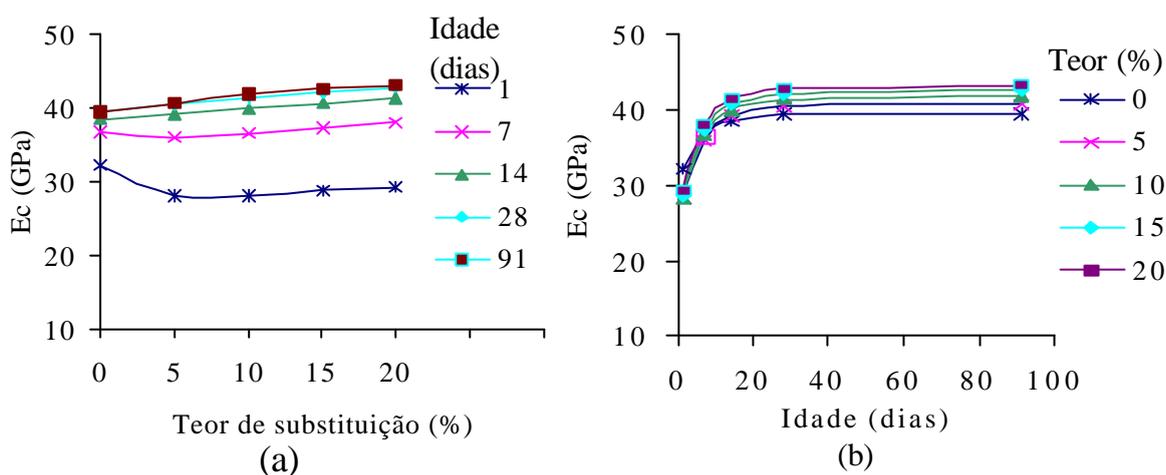


Figura 38 Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição x idade de rompimento: a) gráfico E_c (teor de substituição) b) gráfico E_c (idade).

Nesta interação constata-se na figura 38 que o aumento do teor de substituição provocou a redução dos valores de módulo apenas nas primeiras idades. Após o décimo quarto dia, o crescimento dos valores permaneceu praticamente inalterada, independente do teor de substituição adotado. Assim sendo, teve-se nas misturas com MCAR um crescimento médio dos valores de módulo, em relação ao 28º dia, de 69% e 89%, para as idades de 1 e 7 dias, enquanto que nas misturas sem MCAR o crescimento foi de 82% e 93% para as referidas idades. Nas demais idades, o crescimento médio foi de 97% e 101% para as idades de 14 e 91 dias, respectivamente, independente do teor de substituição. Este comportamento é semelhante ao obtido por Caldarone et al. (1994) e Qian e Li (2001).

Em relação ao concreto de referência, observa-se que nas primeiras idades a substituição de cimento por MCAR tende a provocar uma diminuição dos valores de módulo. Esta diminuição tende a ser novamente resultado da insuficiência do efeito microfíler em compensar a retirada de cimento, bem como a maior lentidão da reação pozolânica do MCAR. No décimo quarto dia, já se observa um crescimento dos valores de módulo com o aumento do teor de substituição, onde se verificou melhorias médias de 5%, 6% e 7% para as idades de 14, 28 e 91 dias, respectivamente. Zhang e Malhotra (1995) e Qian e Li (2001) obtiveram melhorias semelhantes, principalmente para a idade de 28 dias, com o uso do MCAR. Outro trabalho realizado por Caldarone et al. (1994) também constatou a melhoria nesta propriedade, contudo, observa-se que as melhorias em relação ao concreto de referência foram de 35%, 36% e 27%, para as idades de 7, 28 e 90 dias, respectivamente, ou seja, maiores que os obtidos nesta pesquisa. Esta variação pode ter como causa os mesmos fatores apontados quando da análise desta interação, em outras propriedades.

Na comparação com outras pozolanas de alta reatividade, constata-se que tanto Dal Molin (1995) quanto Sensale (2000) verificaram a presença desta interação, quando do uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, respectivamente, tendo-se aparentemente uma significância semelhante entre estas pozolanas de alta reatividade nesta propriedade. Nesta comparação constata-se que o uso da sílica ativa e do MCAR evidenciam uma maior contribuição a partir do 28º dia, enquanto que com o uso da cinza de casca de arroz, esta melhoria só ocorre após 60 dias. Com base no modelo apresentado por Sensale (2000), tem-se que o aumento do teor de cinza resulta na diminuição dos valores nas primeiras idades, sendo este comportamento invertido para últimas idades, isto é, um aumento da contribuição com o aumento do teor de substituição. Esta situação faz com que o uso da cinza apresente um comportamento semelhante ao obtido com o MCAR, diferenciando a idade em que ocorre esta inversão e a intensidade da redução nas primeiras idades.

No módulo de elasticidade, assim como na resistência à compressão, tem-se pelos resultados obtidos que o teor ótimo de substituição possa ser superior ao máximo valor colocado neste trabalho. Este comportamento também foi evidenciado com o uso da cinza de casca de arroz, por Sensale (2000), sendo desta forma superior ao teor ótimo colocado para a sílica ativa, onde segundo Sabir (1995), este deve ser inferior a 16%, quando se focaliza a melhoria no módulo de elasticidade. Com a colocação da relação $a/(c+MCAR)$ no ponto médio, os valores colocados na figura 38 foram referentes à relação de 0,35. Para as menores ou maiores relações $a/(c+MCAR)$ este comportamento pode ser diferente.

e) Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade

Como verificado entre a resistência à tração e a resistência à compressão, tem-se também uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Esta relação tende a se tornar uma ferramenta de grande importância para a execução de projetos estruturais, principalmente quando do uso de concretos com emprego de novos materiais, como o MCAR.

Desta forma, tendo como base os dados obtidos com os modelos (equações 1 e 6), chegou-se a uma relação entre essas propriedades, válidas para o intervalo de resistência à compressão de $10 < f_c < 90$ Mpa, conforme segue: $E_c: 3776,1 \times f_c^{0,5781}$, $r^2: 92,74\%$.

Na figura 39 é realizada uma comparação da curva obtida com os modelos matemáticos, com as curvas recomendadas pelo ACI 363 (1991), pela NBR 6118 (ABNT, 1991) e com a obtida com a sílica ativa e com a cinza de casca de arroz, por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), respectivamente. Na figura 39 também foram plotados os valores obtidos experimentalmente na realização deste trabalho.

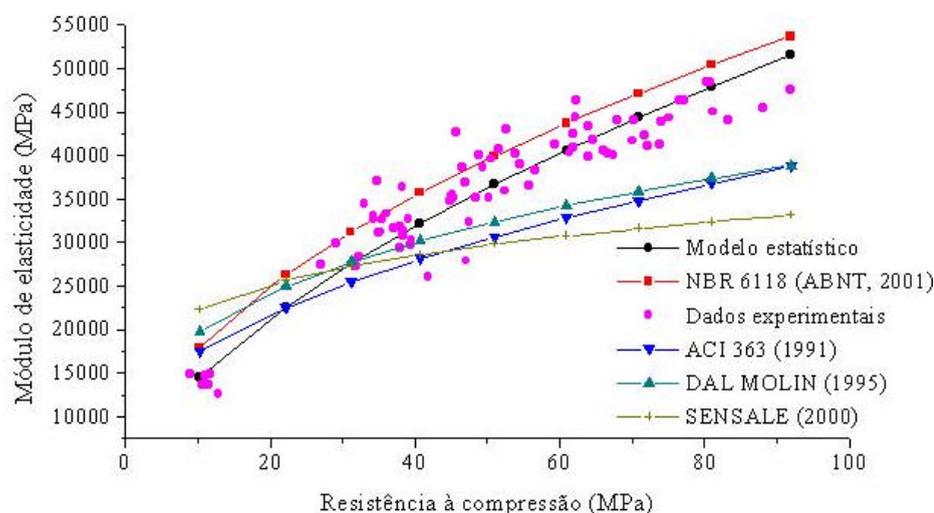


Figura 39 Relação entre os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Conforme observado na figura 39, tem-se que o comportamento da curva oriunda dos modelos matemáticos foi semelhante ao relatado por Dal Molin (1995) e Sensale (2000), ou seja, inferiores aos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2001), evidenciando novamente que esta norma não está ajustada para o CAR. Apesar do comportamento semelhante entre esses trabalhos, verificou-se, principalmente nas maiores resistências, uma maior diferença dos valores de módulo de elasticidade obtidos neste trabalho com os obtidos pelos referidos autores, o que pode ser justificado pela maior influência do uso do MCAR nesta propriedade. A curva oriunda dos modelos matemáticos também apresentou valores de módulo de elasticidade superiores aos obtidos com a curva proposta pelo ACI 363 (1991).

5.2.4 Coeficiente de Poisson

Os resultados desta propriedade foram obtidos através do uso do LVDT (transformador diferencial variável linear) e constam na tabela 33. Nesta propriedade, diferente das outras avaliadas neste trabalho, não foi realizado um tratamento estatístico, visto que os resultados obtidos não apresentaram uma lei de comportamento definida.

Tabela 33 Valores obtidos para o coeficiente de Poisson.

0% de MCAR	Relação $a/(c+MCAR)$				
	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 d.	0,16		0,13		0,25
	0,15		0,13		0,12
14 d.	0,21		0,17		0,23
	0,22		0,19		0,22
91 d.	0,16		0,23		0,16
	0,12		0,15		0,22
5% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 d.		0,12		0,28	
		0,14		0,24	
14 d.		0,17		0,16	
		0,13		0,15	
28 d.		0,19		0,16	
		0,18		0,19	
10% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 d.	0,21		0,08		0,19
	0,20		0,18		0,12
14 d.	0,19		0,16		0,22
	0,19		0,18		0,16
91 d.	0,15		0,12		0,24
	0,17		0,15		0,15
15% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
7 d.		0,18		0,16	
		0,16		0,12	
14 d.		0,16		0,17	
		0,22		0,22	
28 d.		0,16		0,22	
		0,16		0,17	
20% de MCAR	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 d.	0,16		0,16		0,15
	0,19		0,20		0,14
14 d.	0,16		0,17		0,13
	0,14		0,22		0,19
91 d.	0,14		0,17		0,16
	0,16		0,16		0,17

De um modo geral, tem-se, pelos valores obtidos, que o coeficiente de Poisson não apresenta uma tendência clara de comportamento em relação às variáveis adotadas neste trabalho. Este comportamento também foi constatado por Dal Molin (1995), em concretos

com o uso da sílica ativa, ratificando a falta de relação do seu valor com variáveis como: relação água/(c+MCAR), grau de hidratação e adição de pozolanas altamente reativas, conforme descrito por Mehta e Monteiro (1994).

Mesmo com a dispersão dos resultados obtidos, verifica-se que para resistências superiores a 40 MPa, tem-se um valor médio de 0,17 para o coeficiente de Poisson, enquanto que para resistências inferiores a 40 MPa, o valor médio sobe para 0,18. O valor para o concreto de alta resistência foi próximo ao valor de 0,19 obtido por Dal Molin (1995), para este tipo de concreto com uso de sílica ativa. Apesar de pequena, a tendência de diminuição com o aumento da resistência vai ao encontro dos relatos de Mehta e Monteiro (1994) e Persson (1999), em relação a este coeficiente.

5.3 Análise da microestrutura das misturas com MCAR

Nesta segunda etapa da análise, buscou-se técnicas que auxiliassem o estudo da microestrutura do concreto, bem como a verificação de como se comportam as reações de hidratação quanto do uso do metacaulim de alta reatividade (MCAR). Assim sendo, fez-se uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV), da difração de raios-x, da titulometria e da porosimetria por intrusão de mercúrio.

5.3.1 Análise em MEV

O emprego desta técnica de observação direta com microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi realizado de duas formas: por elétrons secundários e por elétrons retroespalhados. A análise em MEV com emprego de elétrons secundários teve como objetivo o estudo da morfologia da estrutura cristalina das misturas de concreto, pois se pode obter um efeito de terceira dimensão de superfícies irregulares, decorrente da excelente profundidade de foco desta técnica.

Na análise em MEV com o emprego de elétrons retroespalhados, obteve-se informações da estrutura interna do concreto, tais como distribuição mineralógica e presença de vazios. Nesta análise, as fases do concreto são identificadas pelo aumento da intensidade dos elétrons retroespalhados devido ao aumento do número atômico do elemento químico presente. Esta forma de identificação é descrita por Monteiro citado por Dal Molin (1995) da seguinte forma “*os grãos anidros de cimento aparecem mais claros, o hidróxido de cálcio cinza claro, o C-S-H cinza escuro e os vazios pretos*”.

Durante a realização das micrografias, tanto com emprego de elétrons secundários quanto elétrons retro-espalhados, verificou-se em algumas amostras o aparecimento de fissuras, sendo deste modo interessante ressaltar que as mesmas podem ter sua origem na

preparação das amostras. Nas duas formas de emprego do MEV, adotou-se quatro magnitudes (100x, 500x, 1000x e 2000x) para a realização das observações.

De um modo geral, verificou-se em todas as propriedades estudadas uma diminuição da resistência com o aumento da relação $a/(c+MCAR)$. Esta situação pode ser justificada pelas micrografias com emprego de elétrons secundários, colocadas nas figuras 40 e 41, para as idades de 1 e 28 dias. Na figura 40, verifica-se nas misturas com a relação 0,60 uma estrutura de baixa densidade, onde destaca-se o maior número de vazios, enquanto que na relação 0,25 tem-se uma maior densificação desta matriz.

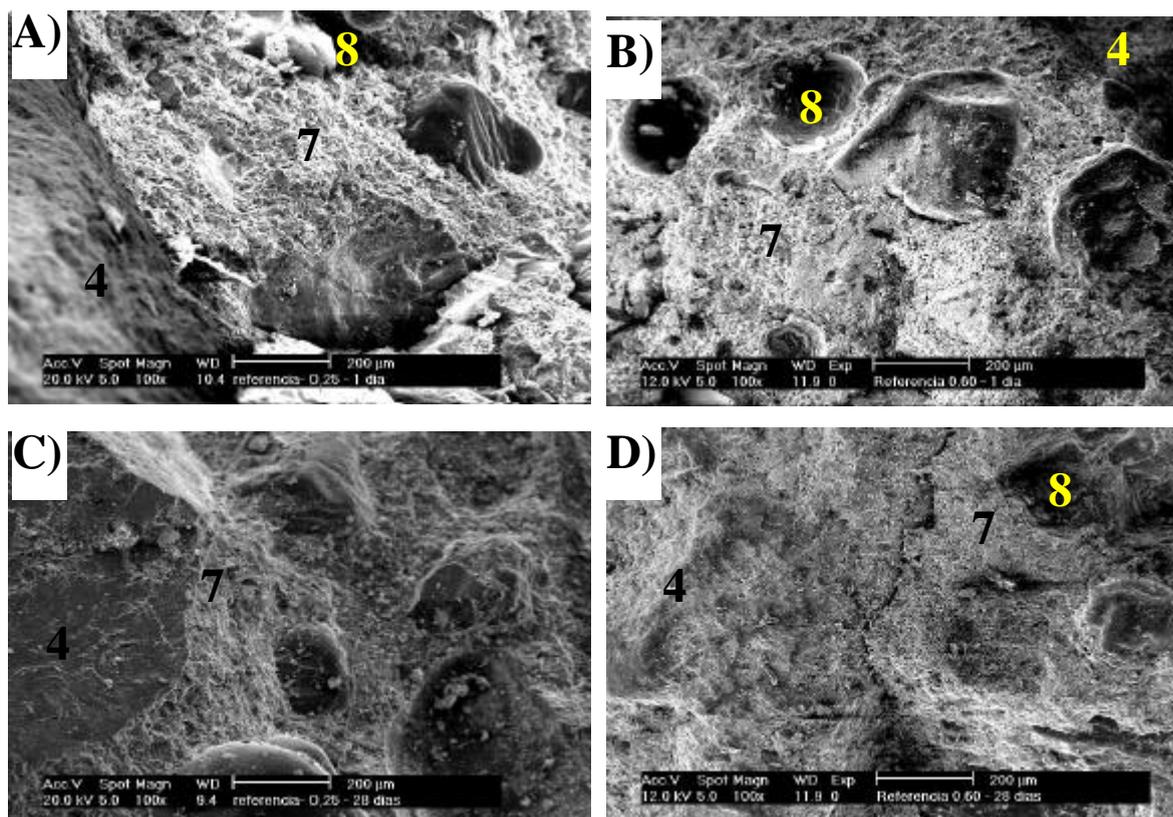


Figura 40 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 100x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 b) À 1 dia, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 c) Aos 28 dias, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 d) Aos 28 dias, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 (4⇒ agregado; 7⇒pasta; 8⇒vazio).

Na figura 41, com uma maior magnitude, teve-se novamente a comparação entre as duas relações $a/(c+MCAR)$ estudadas, onde constata-se na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 uma maior presença e maior dimensão dos cristais de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), em relação ao observado na amostra com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25. A maior densidade e a menor presença de cristais de $Ca(OH)_2$, na pasta e na zona de transição entre a pasta e o agregado, são os principais responsáveis pelos melhores resultados obtidos nas propriedades mecânicas estudadas, quando da utilização de menores relações $a/(c+MCAR)$.

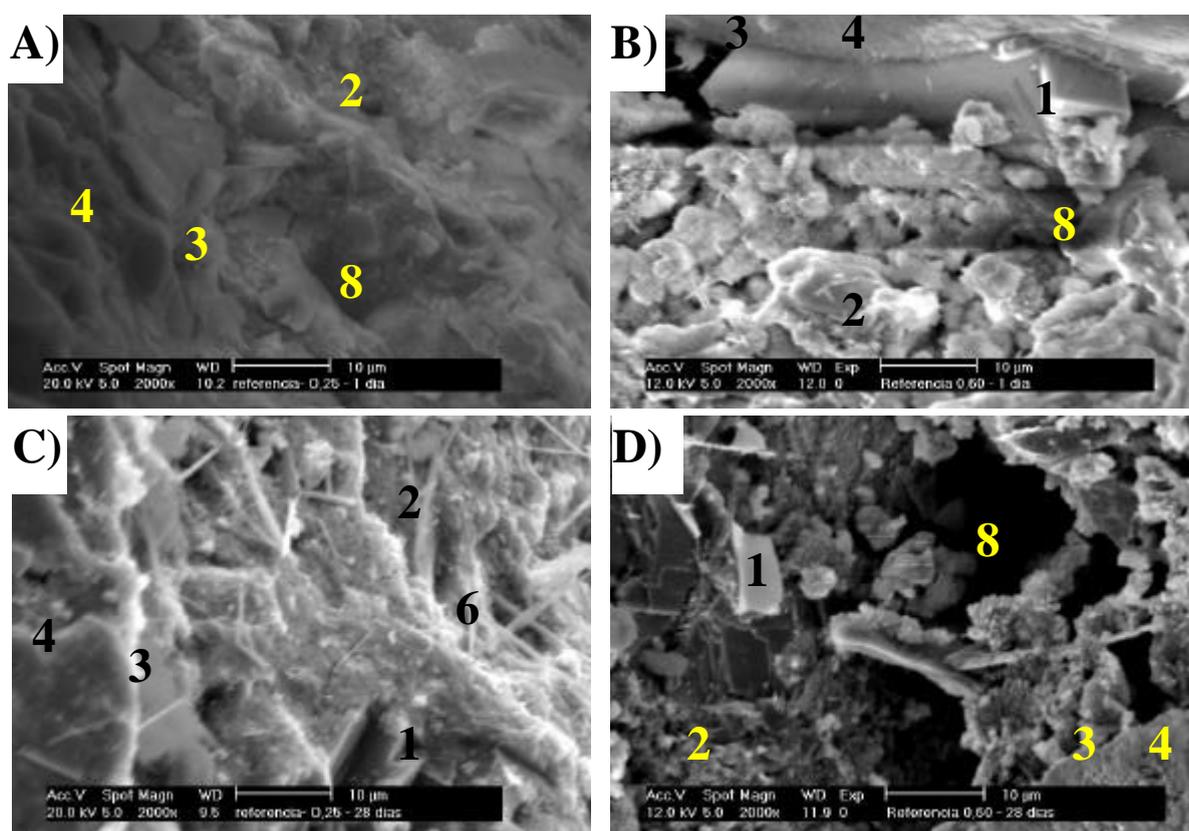


Figura 41 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com a/c de 0,25 b) À 1 dia, com a/c de 0,60 c) Aos 28 dias, com a/c de 0,25 d) Aos 28 dias, com a/c de 0,60 (1⇒Ca(OH)₂; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 6⇒etringita; 8⇒vazio).

A comparação das misturas com diferentes relações $a/(c+MCAR)$ também foi focalizada nas micrografias obtidas com o emprego do MEV por elétrons retro-espalhados, colocadas na figura 42, onde constata-se, principalmente nas relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25, uma grande quantidade de grãos não hidratados (grãos mais claros), tanto no primeiro quanto no vigésimo oitavo dia. A baixa relação $a/(c+MCAR)$ nestas misturas faz com que haja uma melhoria de sua qualidade. Esta situação ratifica o relatado por outros pesquisadores, como Mehta e Monteiro (1994), que afirmam ser necessário, no mínimo, uma relação $a/(c+MCAR)$ em torno de 0,40 para que se possa ter a total hidratação do cimento contido na mistura. Por outro lado, tem-se na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60, a água necessária para a total hidratação das partículas de cimento, contudo, como se observa nas micrografias, mesmo na idade de 28 dias, ainda há presença de grãos anidros, o que aumenta a presença de água livre nessas misturas. A presença de água livre nesta mistura, seja decorrente da não hidratação do cimento ou da sua colocação em excesso na mistura, resulta numa maior porosidade desta matriz, o que consequentemente piora suas propriedades mecânicas.

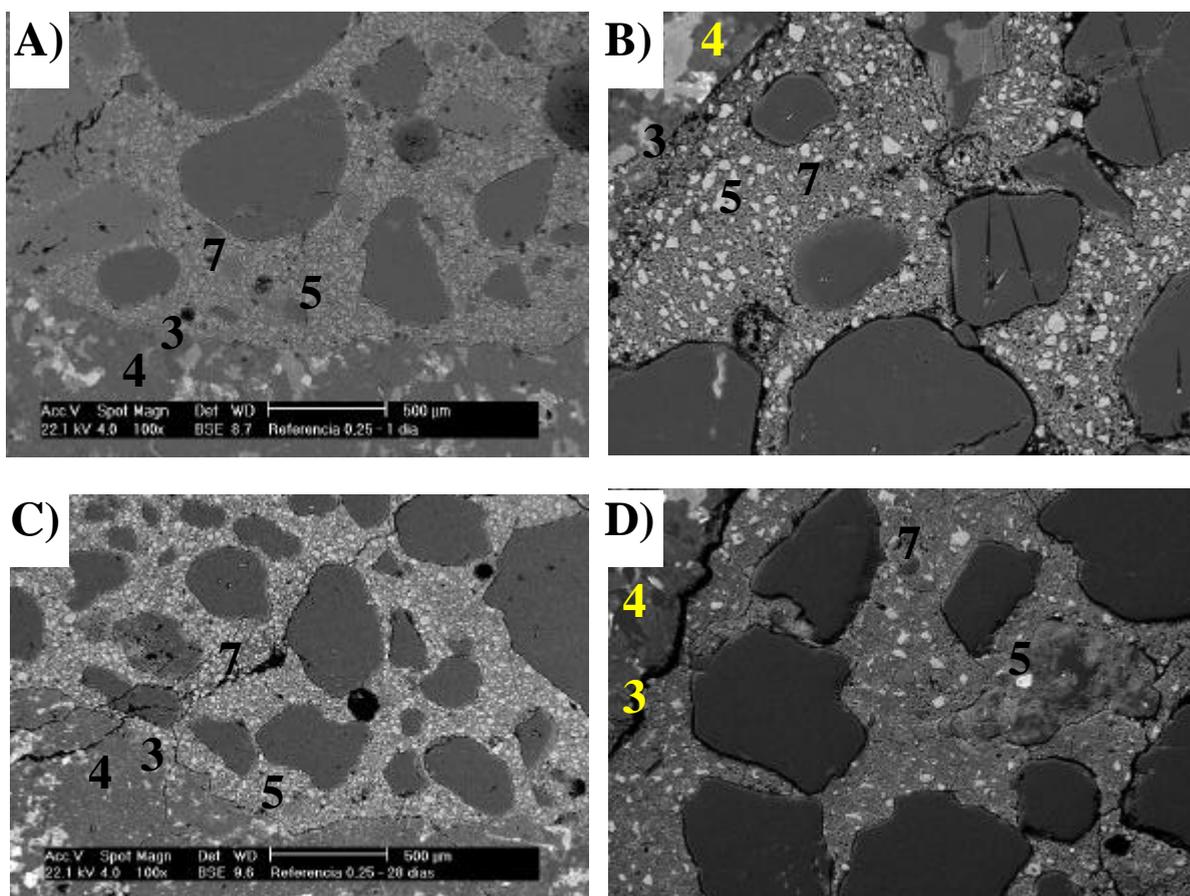


Figura 42 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 100x, do concreto sem MCAR: a) À 1 dia, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 b) À 1 dia, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 c) Aos 28 dias, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 d) Aos 28 dias, com a relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒ pasta).

Com relação às misturas com MCAR, observou-se nos ensaios mecânicos que normalmente o seu uso resultou em melhoria das propriedades estudadas. Estas melhorias podem ser justificadas nas micrografias por elétrons secundários, colocadas nas figuras 43 e 44, referente às relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e de 0,60, respectivamente. Nessas micrografias observa-se claramente uma estrutura mais densa e homogênea do concreto com o aumento do teor de substituição, evidenciando os efeitos filler e químico decorrente da inclusão do MCAR. Nessas micrografias tem-se também verificado nas misturas com MCAR uma redução de compostos como a etringita e os cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em relação às misturas de referência. A menor presença desses compostos proporciona uma melhoria da estrutura interna do concreto, tanto no aspecto mecânico quanto no de durabilidade.

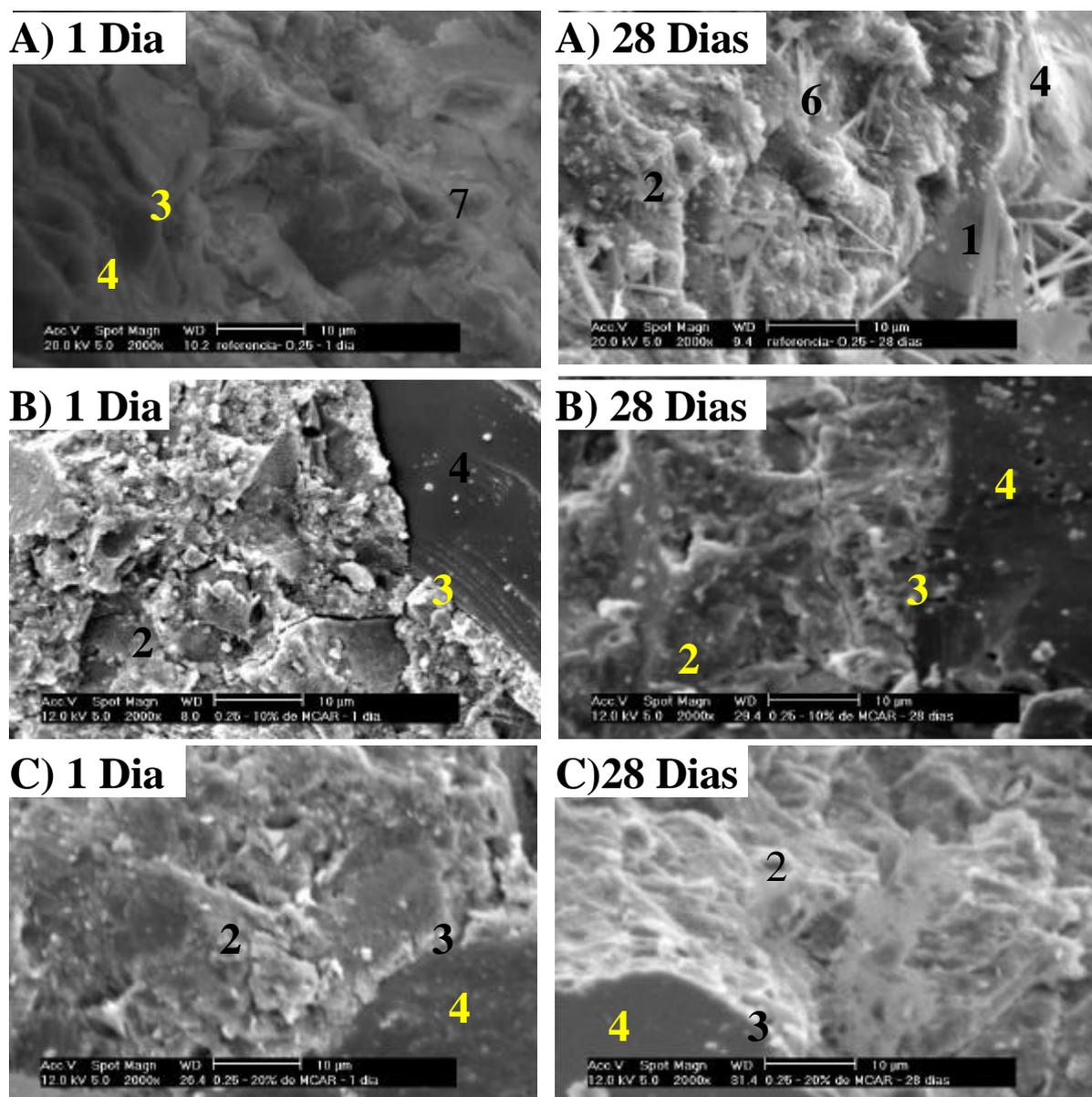


Figura 43 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,25 e teor de substituição de MCAR de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH)₂; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 6⇒etringita).

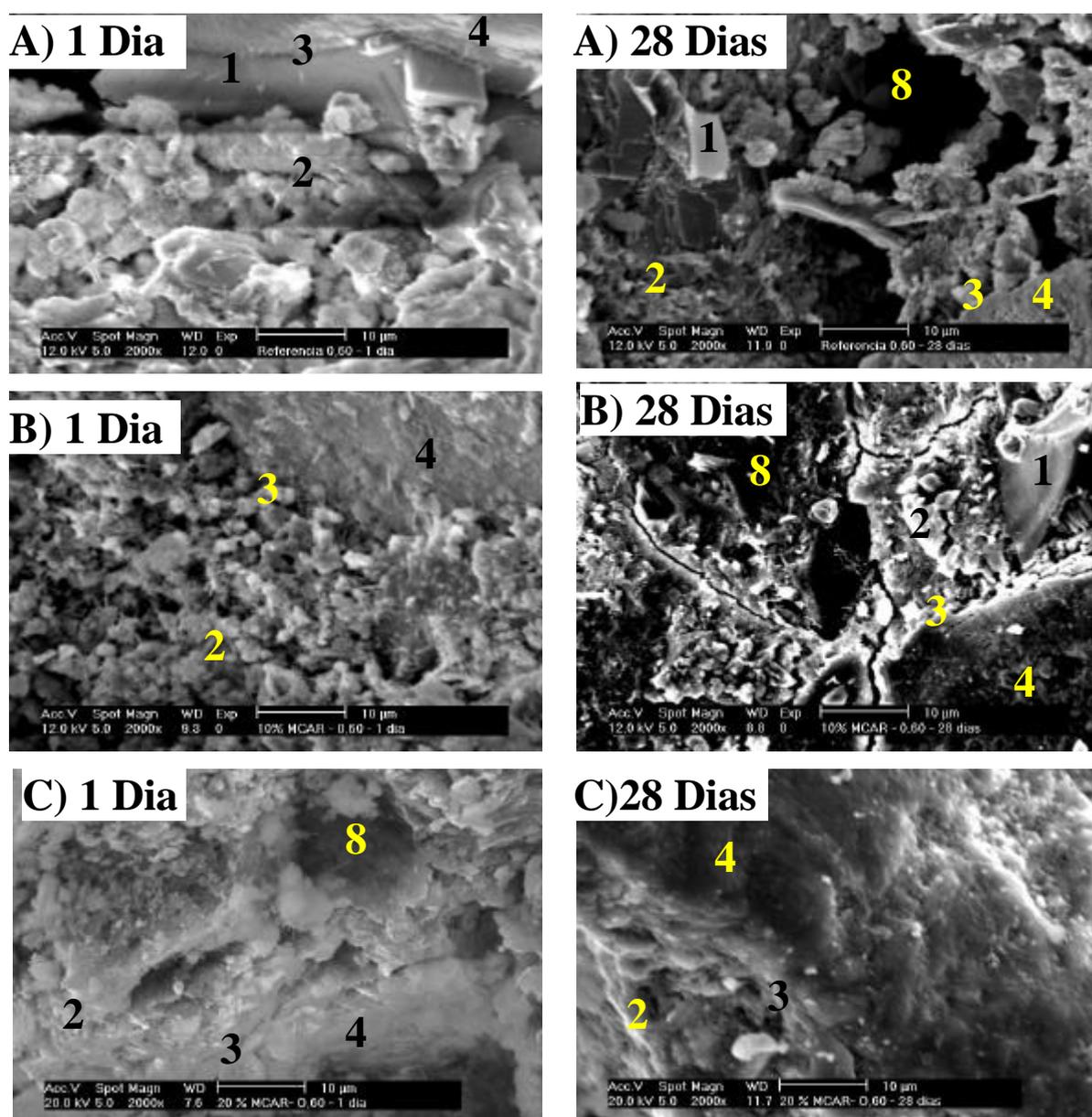


Figura 44 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 e teor de substituição de MCAR de: a) 0% b) 10% c) 20% (1 \Rightarrow Ca(OH)₂; 2 \Rightarrow C-S-H; 3 \Rightarrow Zona de transição; 4 \Rightarrow agregado; 8 \Rightarrow vazios).

Nas figuras 45 e 46 teve-se também, através do uso da microscopia por elétrons retro-espalhados, focalizado o efeito do MCAR nas misturas com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60, respectivamente. Nessas micrografias, em especial as referentes a $a/(c+MCAR)$ de 0,60, tem-se também constatado a maior densificação da matriz com o aumento do teor de substituição de MCAR. Mesmo com a dificuldade de observar a redução do Ca(OH)₂ e o aumento do C-S-H com o aumento do teor de MCAR neste tipo de micrografias, tem-se aparentemente uma confirmação deste comportamento, pelo maior tonalidade cinza escuro nas micrografias. As alterações observadas, através do MEV por elétrons secundários e retro-

espalhados, nas misturas com o MCAR, via de regra tendem a melhorar o seu desempenho, ratificando deste modo os resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

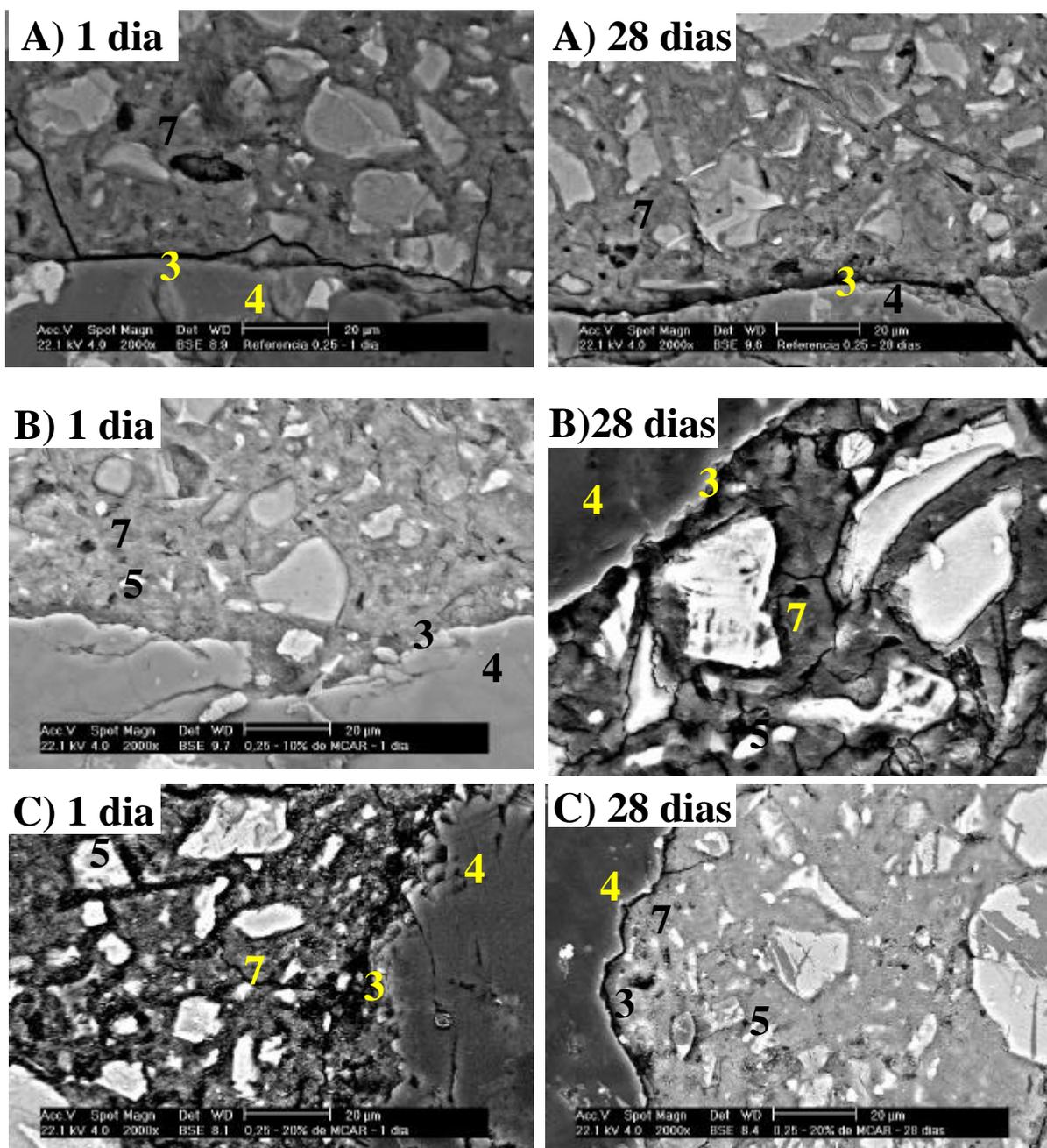


Figura 45 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação a/(c+MCAR) de 0,25 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒ pasta).

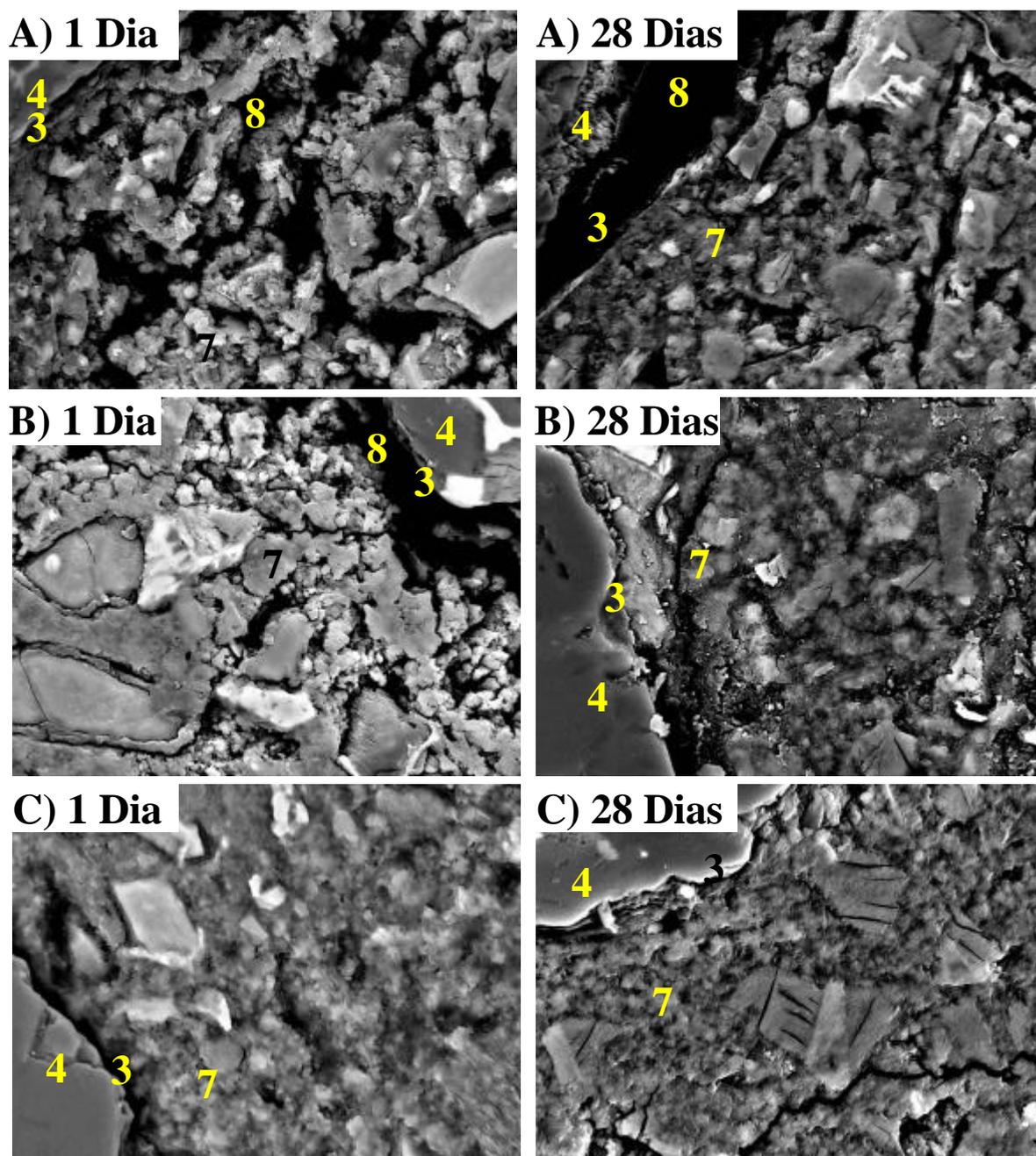


Figura 46 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 2000x, do concreto com 1 e 28 dias, relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 7⇒pasta; 8⇒vazio).

Outro aspecto verificado nos ensaios foi a melhoria dos resultados com a idade. Esta melhoria tem como causa principal o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento e das reações pozolânicas do MCAR. As micrografias, referentes ao primeiro dia de idade, estão colocadas nas figuras 47 e 48, através do uso de elétrons secundários e retroespalhados, respectivamente, onde tem-se bem evidente uma maior densificação da matriz com o aumento do teor de MCAR. Tem-se também uma maior presença de cristais de $Ca(OH)_2$ nas misturas de referência em relação às misturas com MCAR, próximo à zona de transição que são muito

comuns principalmente nas primeiras idades. A diminuição desses cristais evidencia o início da atividade pozolânica, justificando as melhorias obtidas na resistência à tração decorrente do MCAR, onde esta atividade é mais influente. Por outro lado, apesar desta aparente alteração, teve-se uma diminuição dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, o que pode ser decorrente da maior lentidão das reações pozolânicas e insuficiente do MCAR em suprir a retirada do cimento, conseqüente da maior granulometria das partículas desta pozolana.

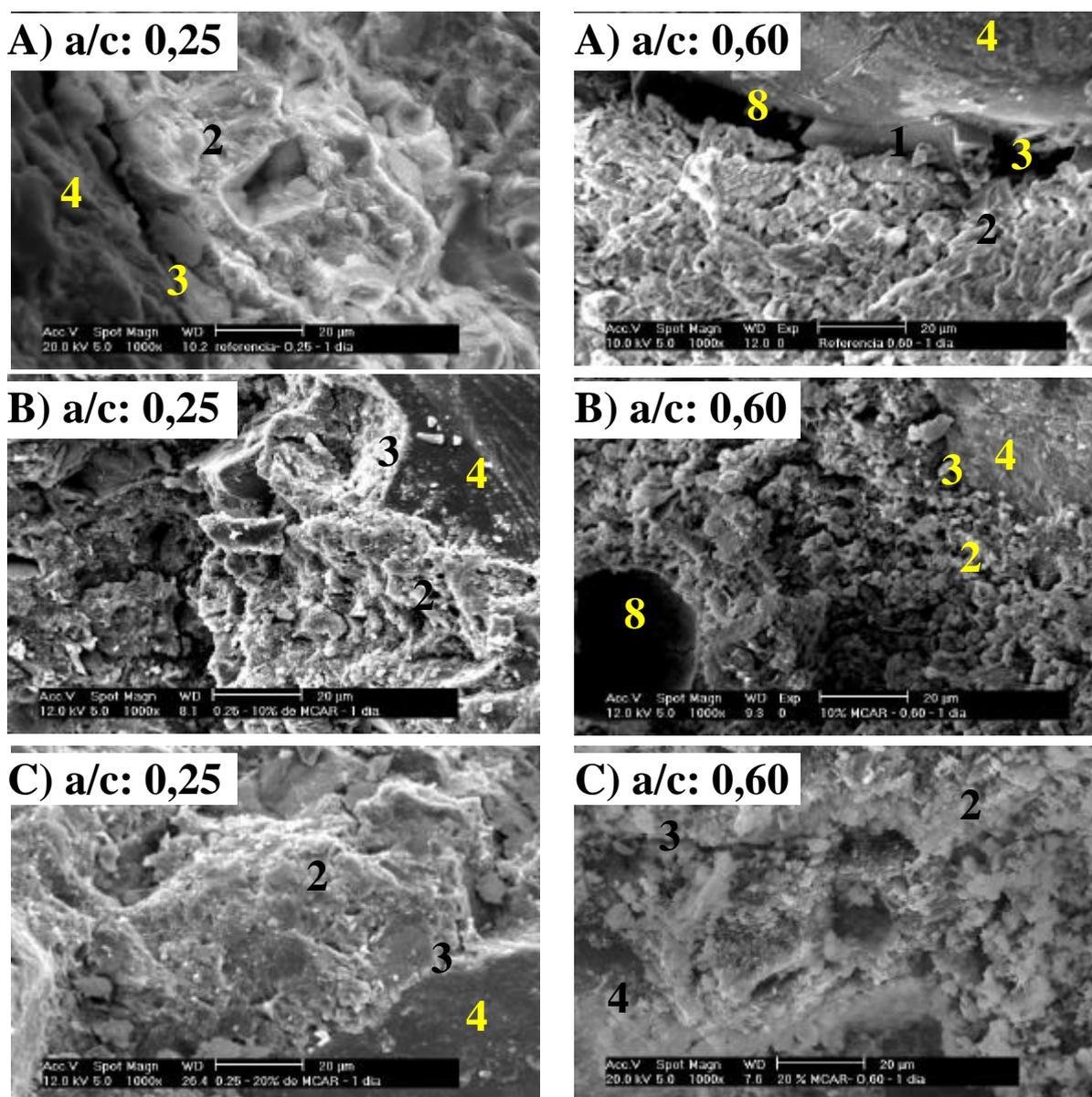


Figura 47 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 1 dia, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH)₂; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 8⇒ vazios).

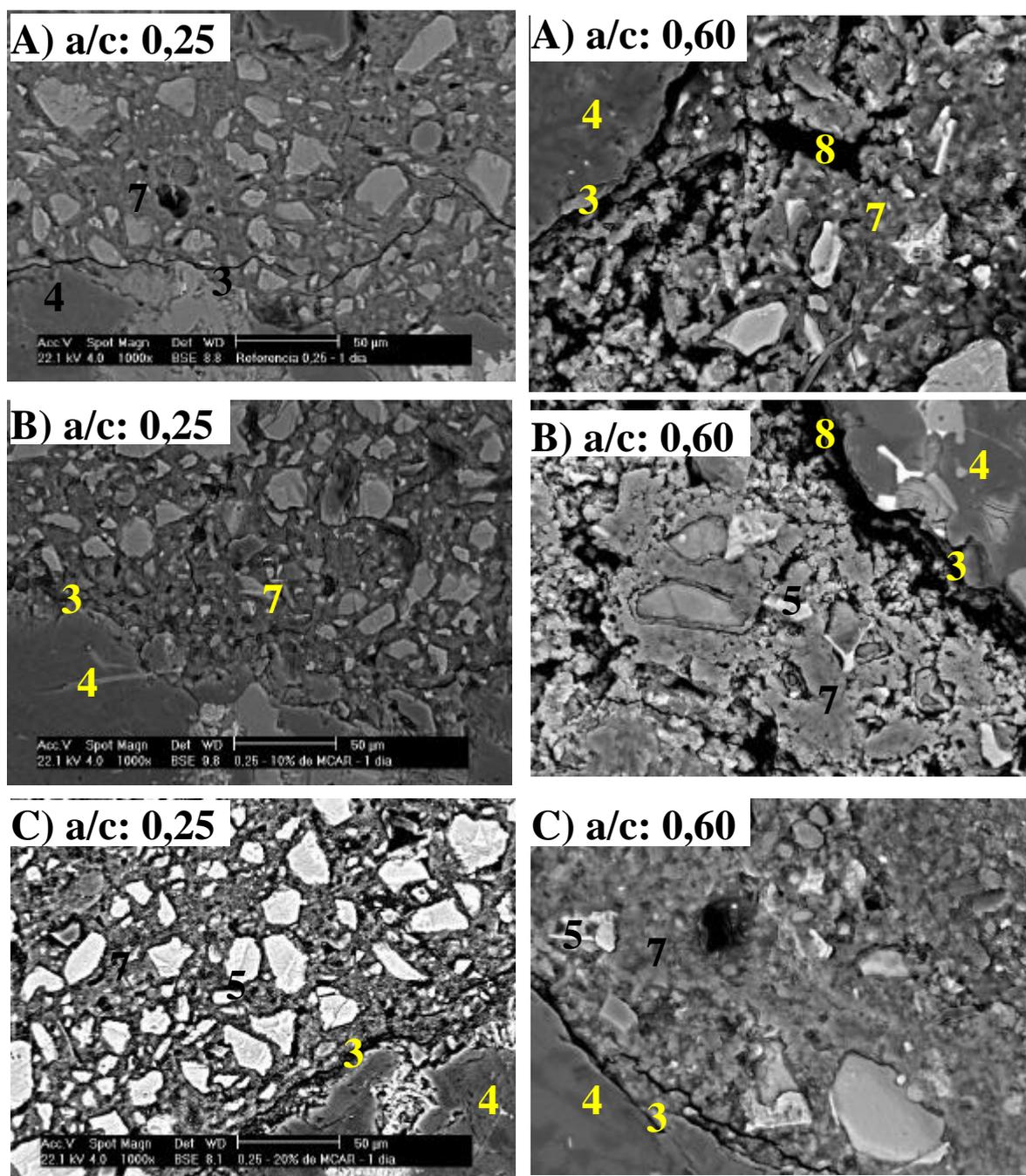


Figura 48 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 1 dia, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒ pasta; 8⇒vazios).

Com relação ao décimo quarto dia de idade, tem-se as micrografias colocadas nas figuras 49 e 50, obtidas através do uso de elétrons secundários e retroespalhados, respectivamente. Nesta idade, já se verifica uma maior influência do uso do MCAR nas misturas analisadas, refletida principalmente no aumento da densidade da misturas com esta pozolana e na redução da presença e/ou tamanho do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A redução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nas

micrografias por retroespalhadas, é evidenciada novamente pelo aparente aumento da tonalidade cinza escuro na pasta.

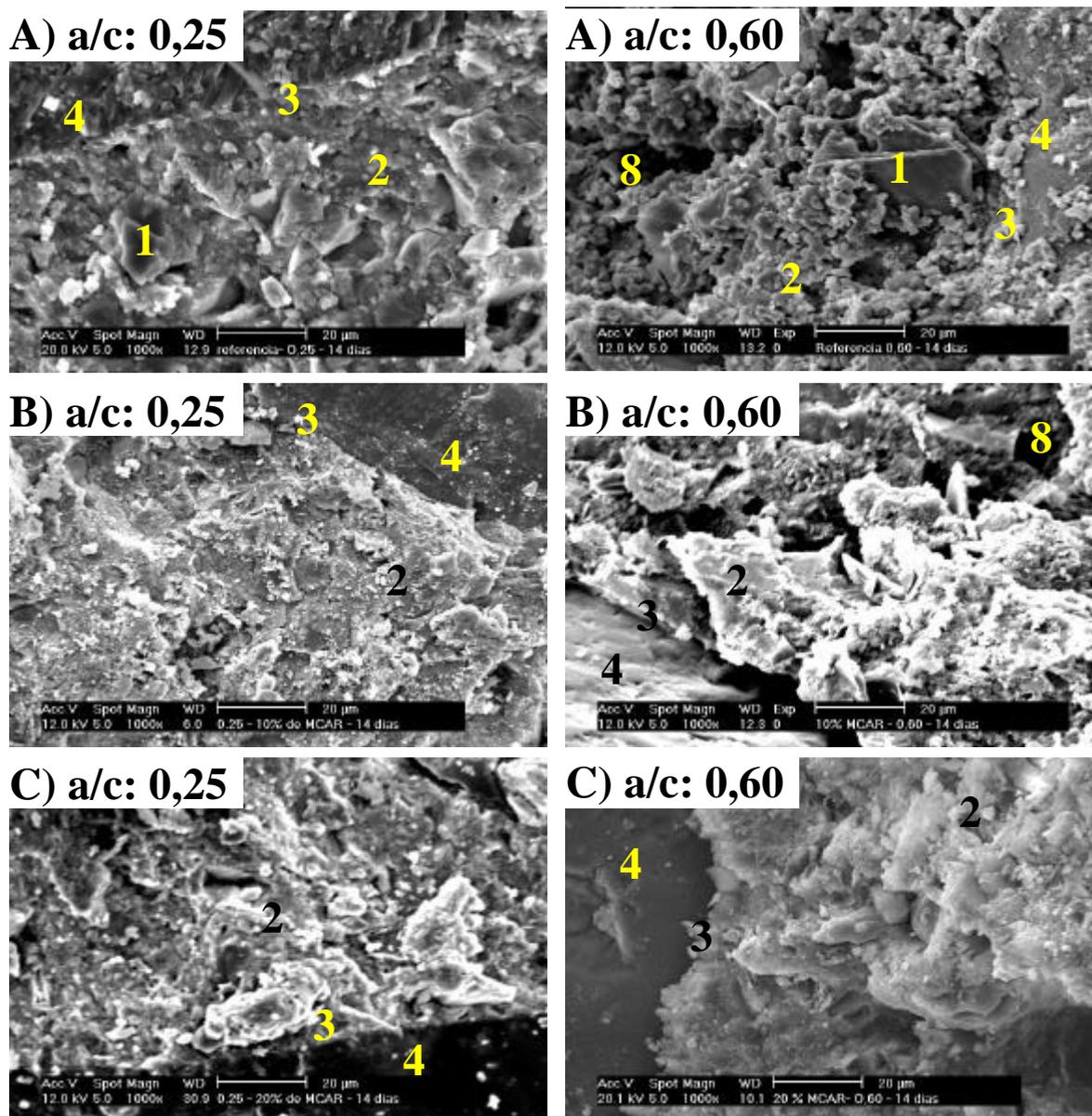


Figura 49 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 14 dias, relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1 \Rightarrow Ca(OH)₂; 2 \Rightarrow C-S-H; 3 \Rightarrow Zona de transição; 4 \Rightarrow agregado; 8 \Rightarrow vazios).

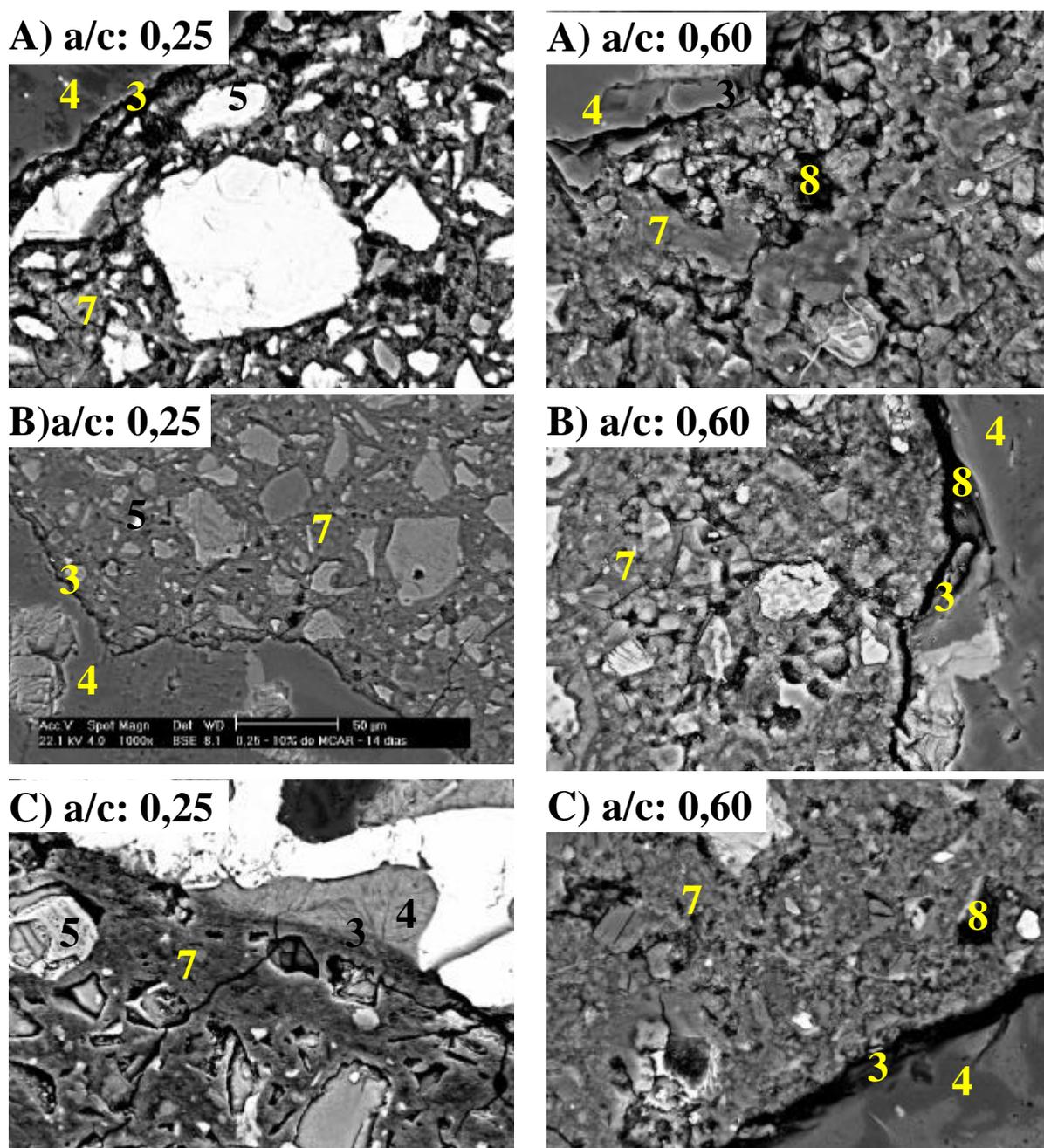


Figura 50 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 14 dias, relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒Pasta; 8⇒vazio).

Por fim, pode se verificar o comportamento das misturas no vigésimo oitavo dia, onde as micrografias referentes à esta idade estão colocadas nas figuras 51 e 52, obtidas através do uso de elétrons secundários e retroespalhados, respectivamente. Nesta idade, teve-se um comportamento semelhante ao observado no décimo quarto dia, contudo, tem-se aparentemente um maior efeito do uso do MCAR nas misturas, principalmente nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Outra consequência observada nesta idade, decorrente do uso do

MCAR, foi a menor presença de etringita, em relação à mistura de referência, resultado principalmente da redução das reações de hidratação, pelo menor consumo de cimento decorrente de sua substituição por MCAR.

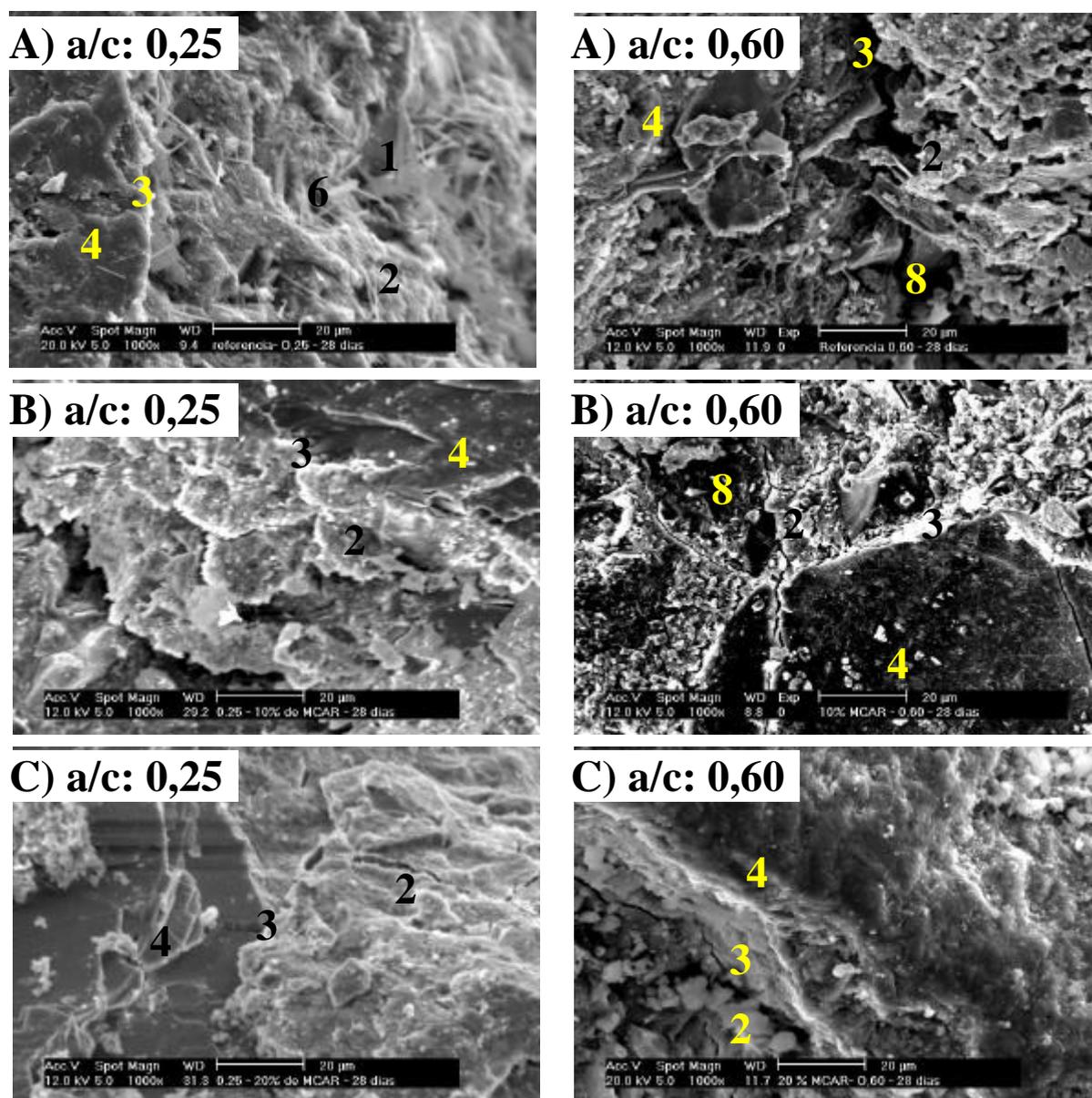


Figura 51 Micrografias por elétrons secundários, ampliadas 1000x, do concreto com 28 dias, relações a/(c+MCAR) de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (1⇒Ca(OH)₂; 2⇒C-S-H; 3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 6⇒etringita; 8⇒vazio).

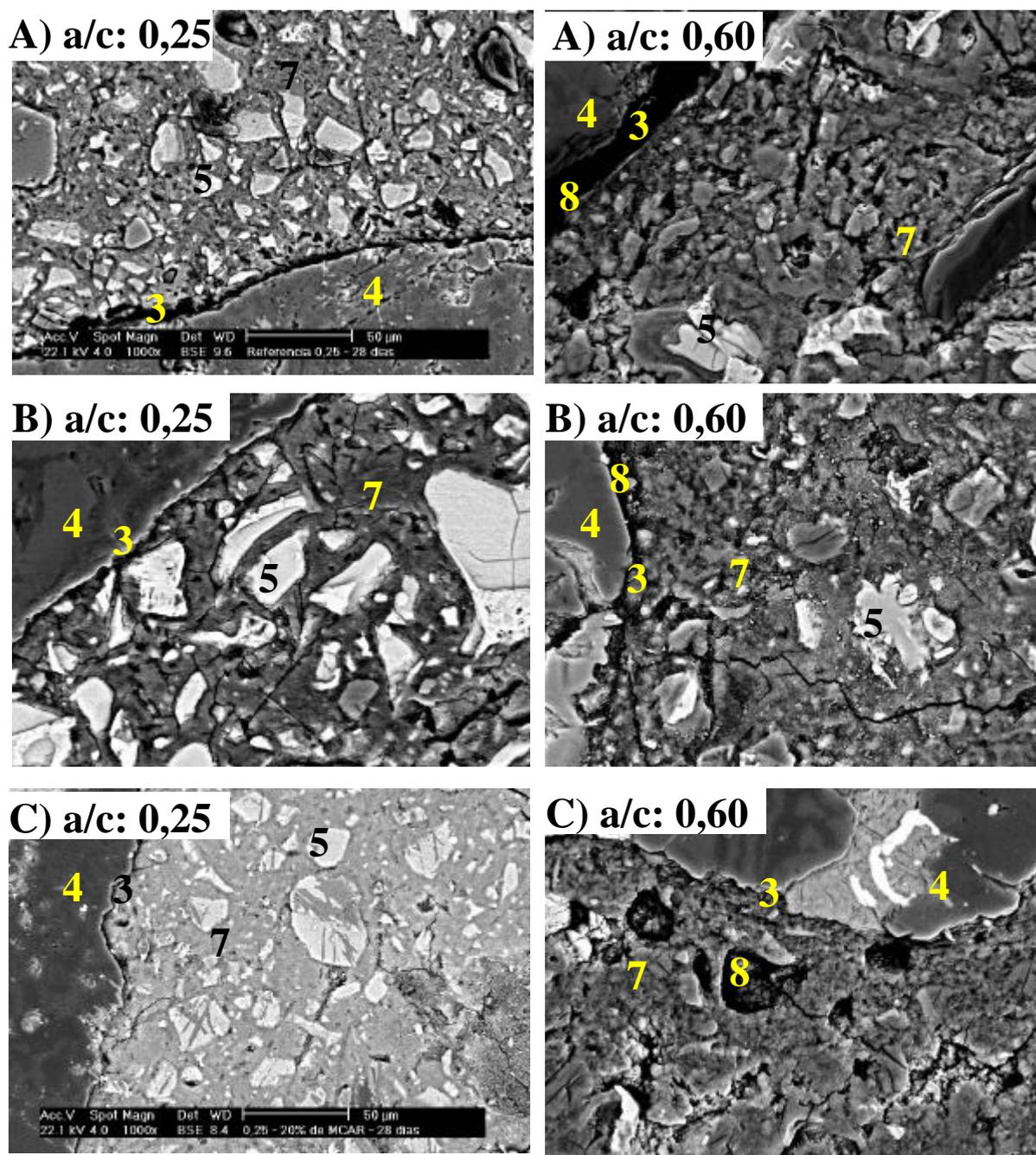


Figura 52 Micrografias por elétrons retroespalhados, ampliadas 1000x, do concreto com 28 dias, relações $a/(c+MCAR)$ de 0,25 e 0,60 e teor de substituição de: a) 0% b) 10% c) 20% (3⇒Zona de transição; 4⇒ agregado; 5⇒grão cimento anidro; 7⇒Pasta; 8⇒vazio).

5.3.2 Difração de raios-x.

Conforme descrito no item 4.1.2, adotou-se neste estudo pastas com as mesmas variáveis das amostras definidas para a observação no MEV. Para a realização deste estudo adotou-se o difratômetro D5000, marca Siemens, tipo Kristaloflex (radiação $CuK\alpha$, corrente de 30 ma e voltagem 40 Kv), varredura com passo de 0,02 e tempo de coleta de 1 segundo por passo. O emprego desta técnica, definida como de interpretação indireta, visa obter informações sobre a mineralogia dos produtos formados no processo de hidratação das

misturas com e sem o MCAR. Os difratogramas obtidos nesta análise estão colocados na figura 53.

- 1- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
 2- Hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂)
 3- Caulinita
 4- Larnita (C₃S)
 5- Halóisita
 6- Etringita
 7- Gelenita (C₂ASH₃)
 8- C₄AH₁₃
 9- Bassanita
 10- Gesso

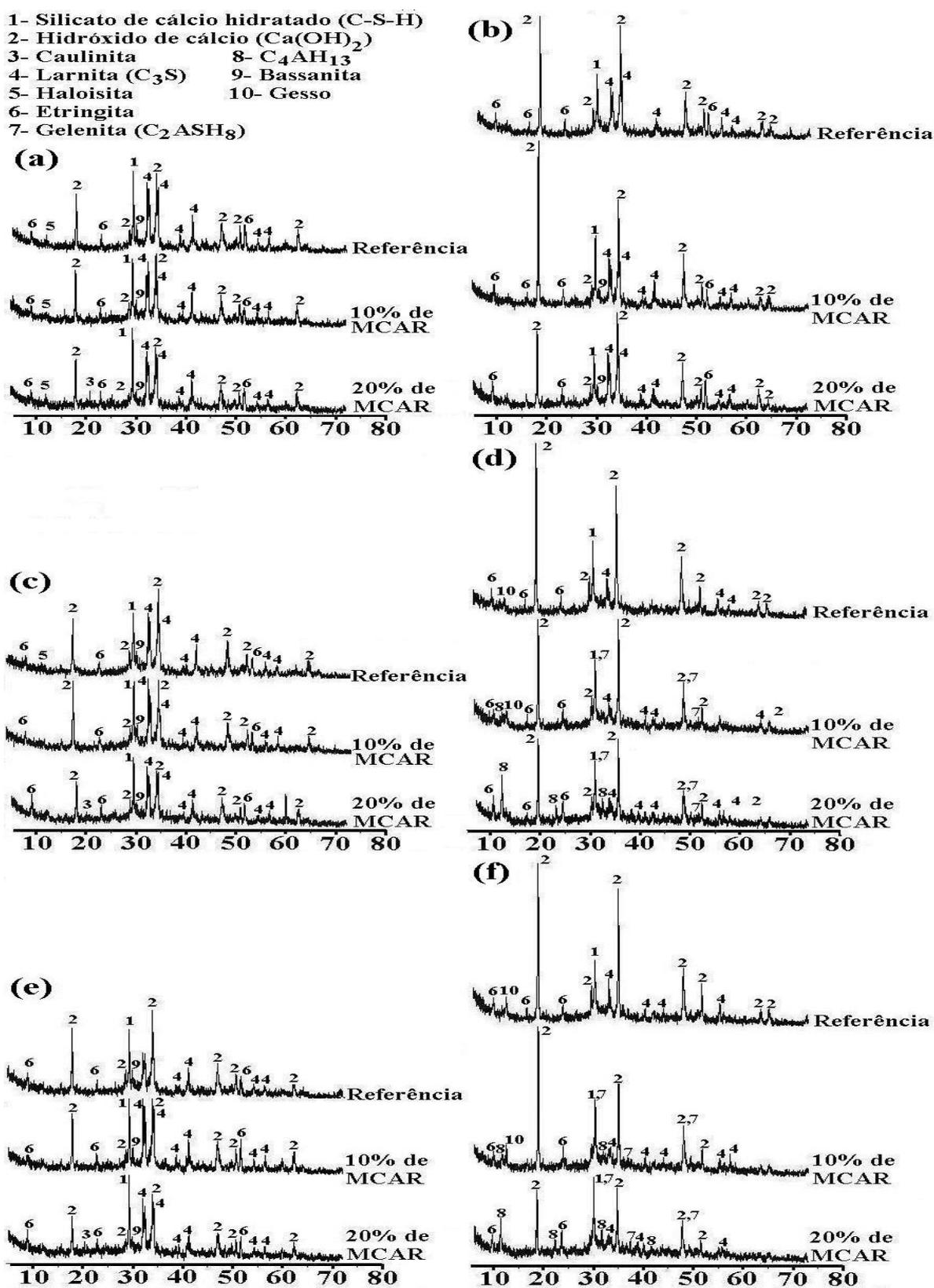


Figura 53 Difratogramas das pastas: (a)a/(c+MCAR) de 0,25 ao 1º dia; (b)a/(c+MCAR) de 0,60 ao 1º dia; (c)a/(c+MCAR) de 0,25 ao 14º dia; (d)a/(c+MCAR) de 0,60 ao 14º dia; (e)a/(c+MCAR) de 0,25 ao 28º dia; (f)a/(c+MCAR) de 0,60 ao 28º dia.

Em todos os difratogramas colocados na figura 53, verifica-se uma maior intensidade dos picos referentes ao Ca(OH)_2 nas misturas com maior relação $a/(c+\text{MCAR})$, o que reflete a maior dimensão desses compostos decorrente da maior relação água/sólidos nestas misturas no estado fresco, que possibilita o maior crescimento e uma maior perfeição da superfície dos cristais de Ca(OH)_2 . Paralelo a esta situação, tem-se também constatado a maior presença de compostos constituintes do cimento anidro nas misturas com menores relações $a/(c+\text{MCAR})$, como o C_2S (Iarnita), a haloisita e a bassanita, decorrente da não hidratação desses compostos, pela falta de água nestas misturas.

No que se refere à influência do uso do MCAR no processo de hidratação das misturas, verifica-se que as alterações decorrentes do uso desta pozolana de alta reatividade se apresentam de maneira diferente nas idades estudadas. No primeiro dia, para as duas relações $a/(c+\text{MCAR})$, tem-se pouca alteração na mineralogia das misturas, independente do teor de substituição, indicando novamente o lento início da reação pozolânica. O pouco efeito pozolânico nesta idade apresenta-se como uma das causas da diminuição dos resultados obtidos nesta idade, com o aumento do teor de substituição, na maioria dos ensaios realizados.

No décimo quarto dia já se verifica, nas relações $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,25 e de 0,60, alterações no processo de hidratação das misturas, pela diminuição da intensidade dos picos do Ca(OH)_2 e pelo aumento dos picos do C-S-H, bem como do aparecimento de outros compostos, tais como a gelenita hidratada (C_2ASH_8) e o C_4AH_{13} . No vigésimo oitavo dia tem-se aparentemente um comportamento semelhante ao constatado no décimo quarto dia, sendo que nesta idade já se constata uma maior intensidade dos picos referentes aos novos compostos. A pouca alteração entre o décimo quarto e o vigésimo oitavo dia justifica o pouco aumento da melhoria decorrente do MCAR, entre essas duas datas, verificado na maioria dos ensaios realizados. Em todas as idades, as alterações mostravam-se mais evidentes com o aumento do teor de substituição e da relação $a/(c+\text{MCAR})$.

As alterações evidenciadas, principalmente no décimo quarto e no vigésimo oitavo dia, são juntamente com efeito filer responsáveis pela densificação da matriz, que resulta no aumento dos valores obtidos nas propriedades mecânicas dos concretos com MCAR, em relação à mistura de referência, avaliados anteriormente. Esta melhoria nas propriedades mecânicas ainda apresenta, como causa, a presença da gelenita hidratada nas misturas com MCAR, que segundo Taylor (1992), é mais resistente que o C-S-H.

Outro ponto importante, referente ao uso do MCAR, está relacionado aos compostos formados com a reação pozolânica deste material. Neste contexto, pode-se verificar que normalmente não foi identificada a presença da gelenita hidratada e do C_4AH_{13} no primeiro

dia. A presença destes compostos só foi evidenciada no décimo quarto dia. Quanto à hidrogranada, não foi constatado a presença deste composto.

De um modo geral, observa-se pela redução dos picos de Ca(OH)_2 , aumento dos picos do C-S-H e pela presença de novos compostos, que a ação pozolânica foi mais eficiente nas maiores relações água/aglomerante. Este comportamento justifica a melhoria das contribuições com o aumento das relações água/aglomerante, verificado na maioria dos ensaios realizados.

Com relação ao C-S-H e à gelenita hidratada, constata-se que a identificação mostrou-se um pouco prejudicada pelo fato desses compostos se apresentarem com pouca cristalinidade. Segundo Frias e Cabrera (2001), esta situação faz com que esses compostos não se apresentem em picos precisos, quando expostos aos raios-x. Além disto, teve-se os picos referente a estes compostos coincidindo com outros picos. Segundo a American Public Health Association (1985), esta coincidência faz com que a difração de raios-x não possibilite a perfeita identificação desses compostos. Esses fatores indicaram a necessidade de outras formas de identificação, tais como a análise termodiferencial (ATD), que pudessem constatar, de forma mais clara, a presença do C-S-H e o aparecimento da gelenita hidratada.

5.3.3 Análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)

Esta análise também teve o objetivo de verificar a influência do MCAR no processo de hidratação do cimento, bem como ratificar a presença dos compostos e do comportamento evidenciado nos difratogramas de raios-x. Para a realização da análise, utilizou-se a termobalança NETZSCH, modelo STA 409C e cadinhos de alumina para as amostras, e empregou-se como parâmetros para a sua realização as mesmas condições especificadas na figura 21, adotando nas pastas analisadas as mesmas variáveis utilizadas no ensaio de difração de raios-x. Os resultados da análise termodiferencial (ATD) estão colocados na figura 54.

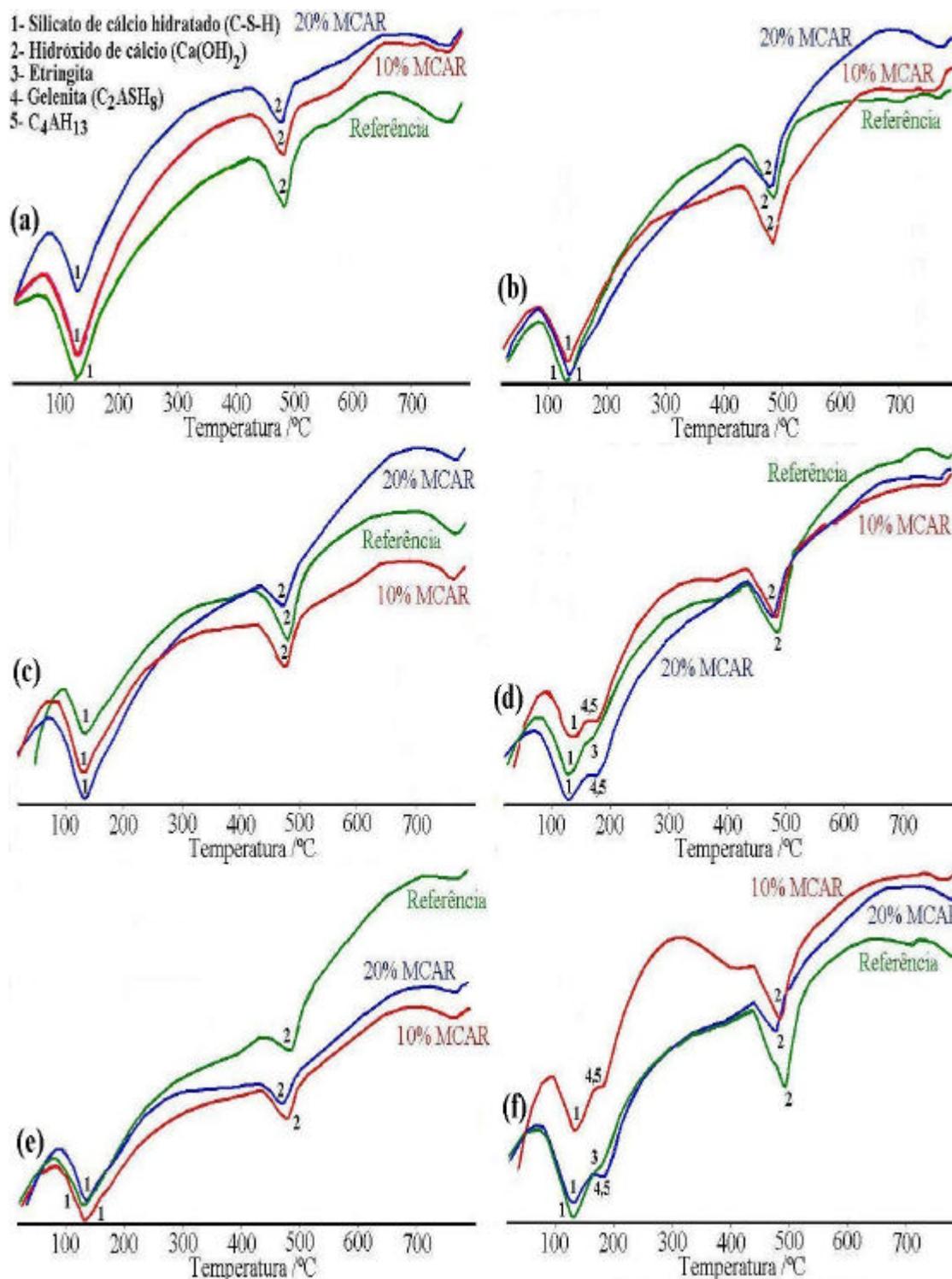


Figura 54 ATD das pastas: (a) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 1º dia; (b) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 1º dia; (c) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 14º dia; (d) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 14º dia; (e) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 28º dia; (f) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 28º dia.

A figura 54 apresenta a evolução da análise termodiferencial com o processo de hidratação das misturas, onde novamente constata-se diferenças nos resultados oriundos das alterações do teor de substituição, da relação a/(c+MCAR) e da idade (grau de hidratação). Teve-se, em todas as misturas, a presença de dois picos endotérmicos aparecendo em torno de 130°C e de 480°C, referentes à presença do C-S-H e do Ca(OH)₂, respectivamente. Nesta

análise também observa-se novamente uma maior intensidade dos picos de Ca(OH)_2 nas misturas com maior relação $a/(c+\text{MCAR})$, evidenciado novamente uma maior presença deste composto. Em relação às idades analisadas, tem-se na sua maioria um aumento do pico do C-S-H e diminuição do pico do Ca(OH)_2 , nas duas relações $a/(c+\text{MCAR})$, com o teor de substituição de MCAR, ratificando o seu efeito pozolânico.

O comportamento dos picos do C-S-H e do Ca(OH)_2 foram semelhantes ao evidenciado nos difratogramas de raios-x, ratificando o efeito pozolânico do MCAR na microestrutura do concreto, que via de regra resultou no aumento dos valores obtidos nos ensaios mecânicos.

Além do C-S-H e do Ca(OH)_2 teve-se também verificada a presença da etringita nas misturas de referência e a presença da gellenita (C_2ASH_8) e do C_4AH_{13} nas misturas com MCAR. Contudo, a presença desses compostos nas misturas com MCAR ocorreu, assim como evidenciado nos difratogramas, somente nas misturas com maior relação $a/(c+\text{MCAR})$. Com relação à gellenita, verifica-se a presença deste composto somente no décimo quarto dia, o que vai ao encontro do relatado por Frias e Cabrera (2001), contudo, difere do relatado por Ambroise et al. (1994), que só identifica esta fase em idades superiores a 28 dias e com teores de substituição de 20% e 25%. Em relação ao C_4AH_{13} , teve-se a constatação deste composto somente no vigésimo oitavo dia, indo de encontro ao relatado por Frias e Cabrera (2001), que identifica este composto apenas em maiores idades. Acredita-se que as diferenças relacionadas ao período de aparecimento de certos compostos podem ter como causa fatores como: condições de realização do ensaio e a composição do MCAR, do cimento e temperatura, que podem acelerar ou diminuir o processo de hidratação e das reações pozolânicas. Em todas as misturas com MCAR, assim como nos difratogramas, não se constatou a presença da hidrogranada.

Em relação à análise termogravimétrica, os gráficos obtidos estão colocados na figura 55 e a quantificação percentual da perda de massa consta na tabela 34. A quantificação foi realizada no intervalo de temperatura onde encontra-se localizado o C-S-H (100°C a 200°C) e o Ca(OH)_2 (440°C a 500°C). Verifica-se, como era esperado, a perda de massa em todas as misturas. Contudo, a perda de massa, em especial do C-S-H e do Ca(OH)_2 , foi mais intensa nas maiores relações $a/(c+\text{MCAR})$ e idades, refletindo o aumento da presença desses compostos com o aumento destas variáveis. Verifica-se nesta análise, que em todas as idades tem-se normalmente um aumento do C-S-H e uma diminuição do Ca(OH)_2 , com o aumento do teor de substituição, ratificando também nesta análise a ação pozolânica do MCAR. No primeiro dia este comportamento foi menos intenso, o que aparentemente tem como causa a pequena atividade pozolânica nesta idade.

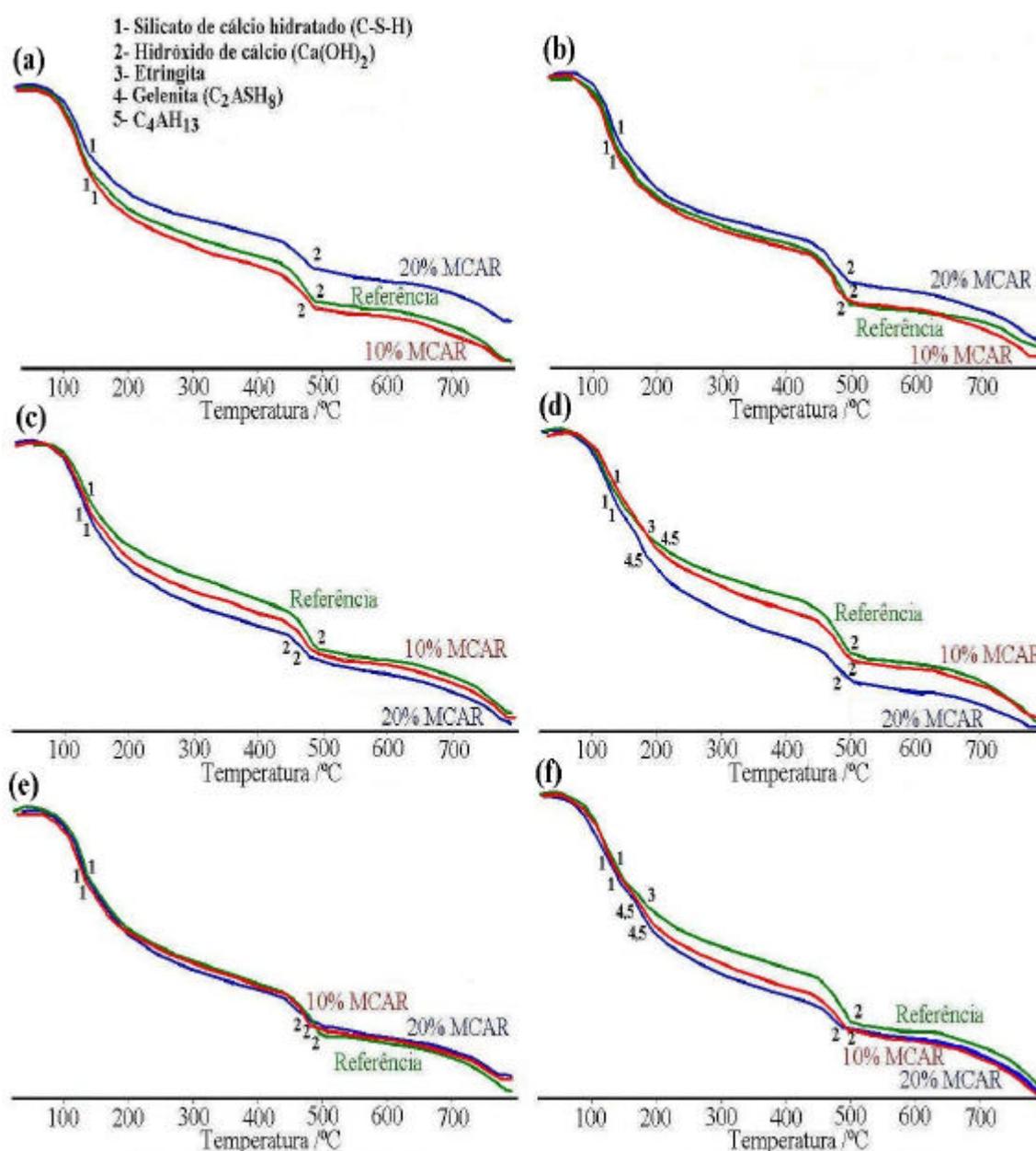


Figura 55 TG das pastas. (a) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 1º dia; (b) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 1º dia; (c) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 14º dia; (d) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 14º dia; (e) a/(c+MCAR) de 0,25 ao 28º dia; (f) a/(c+MCAR) de 0,60 ao 28º dia.

Tabela 34 Perda de massa dos principais compostos das pastas estudadas.

Idade	Teor de Substituição	Perda de Massa (%)			
		a/(c+MCAR)=0,25		a/(c+MCAR)=0,60	
		C-S-H	Ca(OH) ₂	C-S-H	Ca(OH) ₂
1 Dia	Referência	5,21	2,05	6,09	3,09
	10% MCAR	5,75	1,76	6,23	2,72
	20% MCAR	4,83	1,45	6,23	2,27
14 Dias	Referência	5,32	2,43	7,26	3,73
	10% MCAR	5,86	1,90	7,86	3,12
	20% MCAR	6,30	1,60	8,82	2,67
28 Dias	Referência	5,92	2,44	8,10	3,90
	10% MCAR	6,26	1,98	8,92	2,86
	20% MCAR	6,47	1,56	8,80	2,15

5.3.4 Titulometria

A realização deste ensaio teve o objetivo de quantificar uma das conseqüências decorrentes da reação pozolânica do MCAR, apresentadas na difração de raios-x e na análise termodiferencial, em relação ao consumo de hidróxido de cálcio, ou seja, diminuição deste composto devido à reação pozolânica do MCAR. Na realização deste ensaio, teve-se como base a extração dos álcalis com água destilada, pelo período de aproximadamente 48 horas, e titulação com ácido de concentração conhecida. Os teores de Ca(OH)_2 , nas misturas com relação $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,25 e 0,60, estão colocados na figura 56.

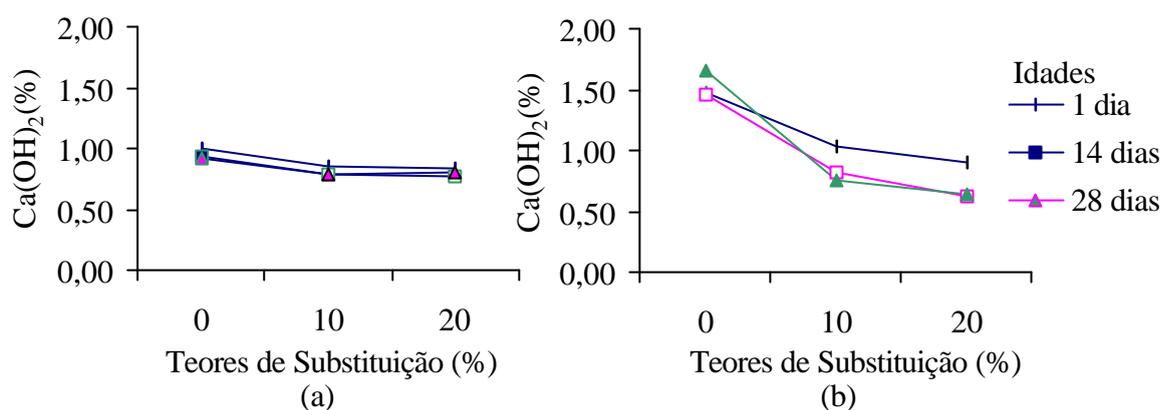


Figura 56 Consumo do Ca(OH)_2 nas misturas com: (a) relação $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,25 (b) relação $a/(c+\text{MCAR})$ de 0,60.

Com base nos valores apresentados na figura 56, tem-se novamente ratificadas algumas evidências colocadas na análise de difração de raios-x. Quanto ao teor de Ca(OH)_2 , verificou-se que realmente houve uma maior produção deste composto nas maiores relações $a/(c+\text{MCAR})$, que teve como causa as justificativas colocadas nos itens 5.3.2 e 5.3.3.

Com relação ao efeito pozolânico do MCAR, este foi quantificado com a diminuição dos teores de Ca(OH)_2 , que via de regra diminuíram com o aumento do teor de substituição do MCAR e da idade de análise. Apesar desta diminuição, verificou-se diferenças em relação ao relatado por outras referências, no que se refere ao consumo de Ca(OH)_2 , visto que Kostuch et al. (2000) constatou o consumo total deste composto ao vigésimo oitavo dia, quando do uso do teor de substituição de 20%.

O efeito pozolânico mostrou-se novamente mais intenso nas maiores relações $a/(c+\text{MCAR})$, sendo que nas duas relações estudadas, teve-se a maior intensidade do efeito pozolânico nos primeiros quatorze dias, o que vai ao encontro do descrito por Khatib e Wild (1996), no que se refere ao período de reação pozolânica deste material e justifica de maneira clara o comportamento obtido nos ensaios mecânicos, onde constatou-se pouca contribuição decorrente do MCAR após o décimo quarto dia.

Na comparação com os valores obtidos por outras pozolanas, pode-se verificar pelos resultados relatados por Seidler (1999) um comportamento semelhante quando comparado com os obtidos com a sílica ativa e com a cinza de casca de arroz. Apesar da constatação da semelhança de comportamento, teve-se neste trabalho um maior teor de Ca(OH)_2 , que pode ser conseqüência de diferenças entre os cimentos utilizados, visto que adotou-se o CPV-ARI que tende a produzir maior teor de Ca(OH)_2 pela maior presença de C_3S , em relação ao CP-I, adotado por Seidler. As diferenças de valores também podem ter como causa os procedimentos de ensaio adotados, em relação ao período de exposição da amostra para a extração do álcalis.

Outro ponto analisado na titulometria, foi a influência do uso do MCAR na alcalinidade das misturas. Esta análise teve o objetivo de verificar o pH das misturas, visto que este parâmetro é extremamente importante em relação a proteção química da armadura proveniente do concreto, no caso de corrosão por carbonatação. Os valores obtidos neste ensaio estão apresentados na figura 57.

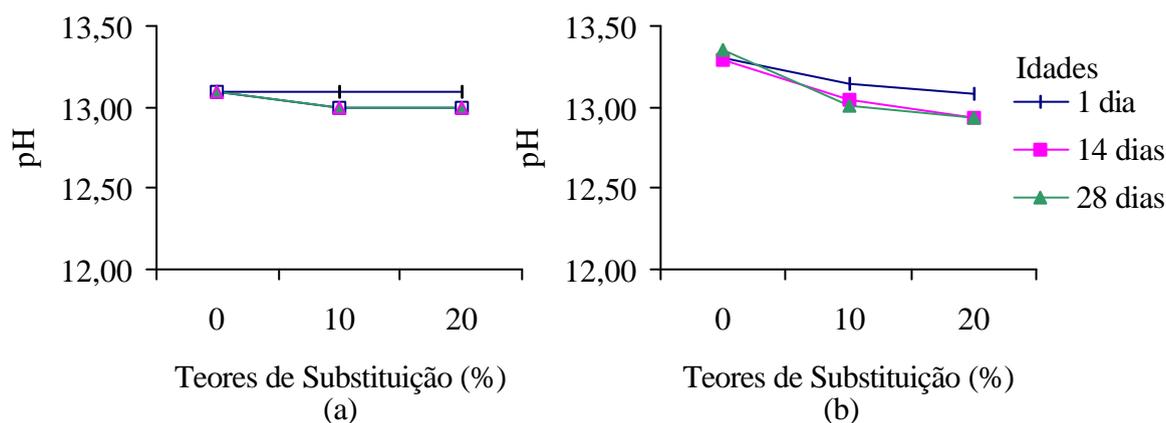


Figura 57 Valores de pH, medidos por titulometria, nas misturas com: (a) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25 (b) relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60.

De acordo com os valores apresentados na figura 57, constata-se que a redução do pH ocorreu, independente da relação $a/(c+MCAR)$ utilizada, sendo contudo mais intensa nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ e nos primeiros quatorze dias. Esta redução do pH nas misturas, pelo consumo do Ca(OH)_2 na reação pozolânica do MCAR, resultou em pouca diminuição de alcalinidade, não influenciando significativamente na proteção química das armaduras. Kostuch et al. (2000) também obteve valores semelhantes de pH com o uso de teores de 10% e 20% de MCAR. Este comportamento também foi semelhante ao obtido por Seidler (1999), com o uso da sílica ativa e da cinza de casca de arroz, contudo, os valores obtidos neste trabalho foram ligeiramente superiores aos relatados pelo autor. Esta situação apresenta novamente como causa os fatores descritos quando da análise do consumo de Ca(OH)_2 .

5.3.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A busca desta análise deveu-se principalmente à necessidade de ratificar o efeito filler do uso do MCAR, evidenciado nas micrografias eletrônicas por varredura (MEV). Na execução dos ensaios adotou-se o PORE MASTER 33 da QUINTACHROME, com um ângulo de contato de 140° e uma faixa de pressão variando de 0 à 33.000 Psi, utilizando-se amostras de concretos extraídas dos corpos-de-prova ensaiados.

A execução deste ensaio se desenvolveu em duas etapas. Desta forma, a intrusão de mercúrio na amostra ocorreu sob baixa pressão (de 0 a 50 Psi) até o momento em que esta pressão tornou-se ineficaz para o andamento do ensaio, sendo conseqüentemente transportada para a segunda célula de pressão, onde a intrusão de mercúrio ocorreu sob alta pressão (de 50 a 33.000 Psi).

Como resultado deste processo, teve-se a distribuição do tamanho dos poros e a porosidade total das amostras analisadas. Para a porosidade total das amostras analisadas, fez-se a somatória do volume de mercúrio introduzido, tanto a baixa pressão quanto a alta pressão. Os valores referente à porosidade total das amostras estão colocados na tabela 35.

Tabela 35 Valores de porosidade total das amostras.

Relação $a/(c+MCAR)$	Misturas	Porosidade total (%)		
		1 dia	14 dias	28 dias
0,25	Referência	4,40	3,22	3,23
	10% de MCAR	4,81	3,33	3,32
	20% de MCAR	4,91	3,04	2,93
0,60	Referência	8,55	7,33	6,71
	10% de MCAR	9,42	6,07	5,6
	20% de MCAR	7,25	7,48	6,02

Com relação ao comportamento da porosidade total, como era esperado, verificou-se que normalmente ocorreu a sua redução com a diminuição da relação $a/(c+MCAR)$, com o aumento do teor de substituição e com o grau de hidratação, indo ao encontro da maioria dos valores obtidos nos ensaios mecânicos. Contudo, este comportamento não foi válido para todos os valores de porosidade total apresentados. Esta situação pode ser resultado da variabilidade inerente ao ensaio, decorrente de vários fatores, como por exemplo, o efeito parede, oriundo do contato da pasta com o agregado ou com a superfície da forma de moldagem, que pode provocar um aumento dos poros nesta região ou falha localizada.

A maior porosidade constatadas na relação $a/(c+MCAR)$ de 0,60, em relação as misturas com relação $a/(c+MCAR)$ de 0,25, é a principal causa da diminuição dos resultados obtidos nessas misturas. A diminuição da porosidade total com o uso do MCAR também foi

relatada por Kostuch et al.(2000) e por Frias e Cabrera (2000), quando do uso de teores de substituição de 20% e de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de MCAR, respectivamente.

Mesmo com o comportamento da porosidade total dentro do esperado, partiu-se para o uso da distribuição do tamanho dos poros como forma de melhor analisar a influência das variáveis estudadas. Esta opção teve como base alguns resultados relatados por Mehta e Monteiro (1994), que afirmam não ser a porosidade total, mas a distribuição do tamanho do poros que controla efetivamente a resistência e a durabilidade Segundo os autores, esta distribuição pode ser dividida em macroporos ($>0,05 \mu\text{m}$) e microporos ($<0,05 \mu\text{m}$), que exercem grande influência na resistência e durabilidade e na retração por secagem e fluência, respectivamente. Os gráficos com a distribuição dos poros das amostras de concreto estudadas estão colocados na figura 58.

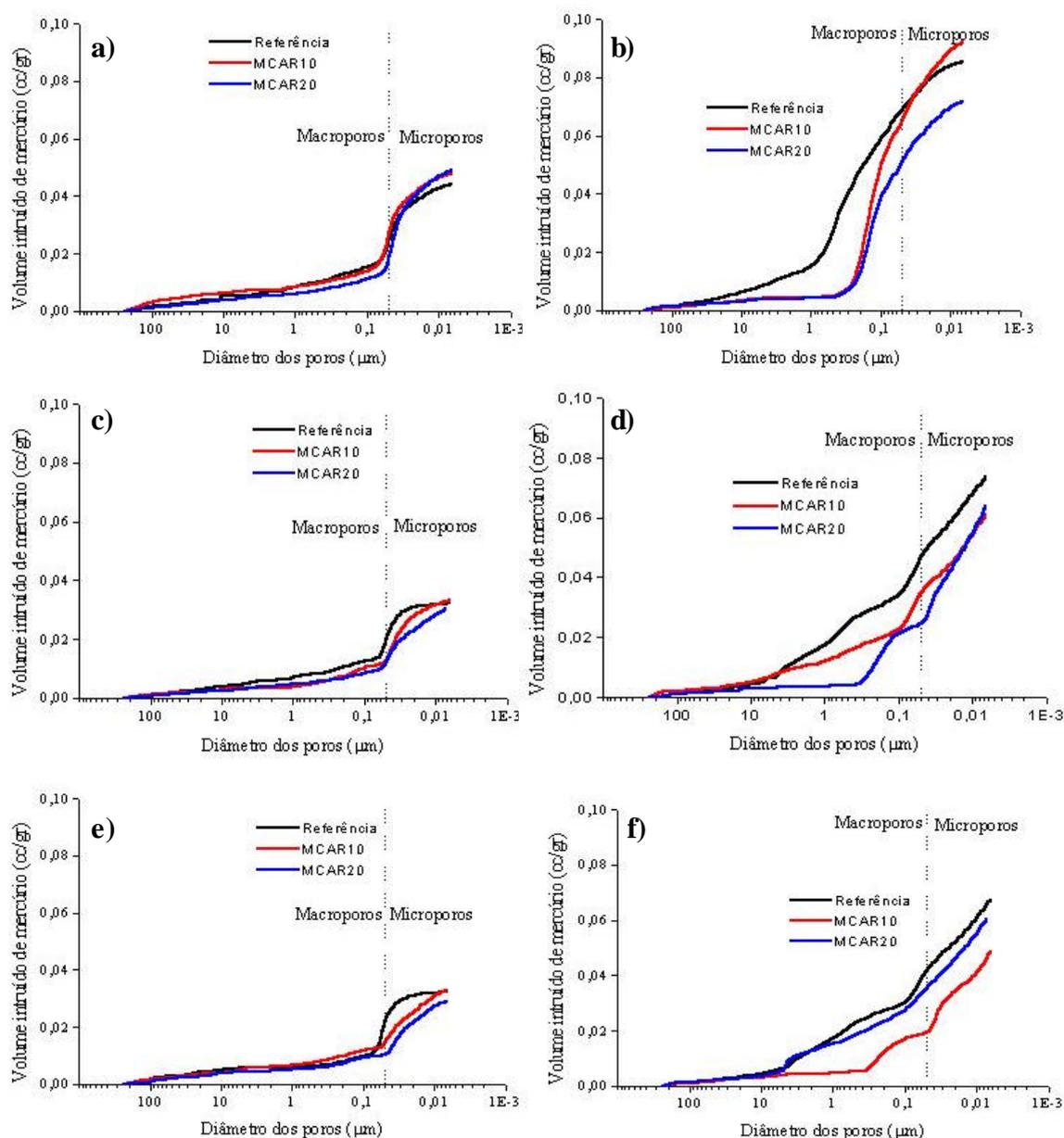


Figura 58 Valores do diâmetro médio dos poros: (a) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 1º dia; (b) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 1º dia; (c) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 14º dia; (d) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 14º dia; (e) $a/(c+MCAR)$ de 0,25 ao 28º dia; (f) $a/(c+MCAR)$ de 0,60 ao 28º dia.

Na figura 58, verifica-se a influência das variáveis estudadas na distribuição do tamanho dos poros, onde constata-se a menor presença de macroporos nas amostras com o aumento da idade, o aumento do teor de substituição e diminuição da relação $a/(c+MCAR)$. Com relação ao MCAR, verifica-se que o seu uso, independente da relação $a/(c+MCAR)$ empregada, resultou normalmente na diminuição da porosidade total da mistura. Contudo, esta diminuição via de regra estabilizada-se após o décimo quarto dia, evidenciando novamente a finalização do efeito pozolânico e do efeito filer decorrente do uso do MCAR. Este refinamento dos poros também foi relatado por Khatib e Wild (1996) entre o décimo quarto e vigésimo oitavo dia, em pastas de cimento com 5%, 10% e 15% de MCAR e por

Delvasto e Morales (2000), quando do uso de diversos teores de substituição em argamassas.

A menor presença de macroporos e consequente densificação da matriz vai ao encontro das observações realizadas no MEV, tanto por elétrons secundários quanto por retro-espalhados, e com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. O comportamento da distribuição do tamanho dos poros só não se confirmou no primeiro dia, visto que constatou-se que o aumento do teor de substituição não resultou em diminuição na presença de macroporos. Apesar de apresentar um comportamento diferente, esta situação também justifica a diminuição dos valores, no primeiro dia, constatada em alguns ensaios mecânicos, ratificando a ineficiência do efeito filler do MCAR em substituir o cimento. Além da pouca eficiência do efeito filler, tem também como causa, a menor velocidade da reação pozolânica neste dia, constatada na difração de raios-x e na análise termodiferencial. Estas duas situações são decorrentes principalmente do maior diâmetro médio das partículas do MCAR em relação à sílica ativa. A situação diferenciada no primeiro dia também foi relatada por Frias e Cabrera (2000).

6 Considerações finais

Este trabalho teve o objetivo principal de verificar as variações existentes nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência, decorrentes do uso do MCAR como adição mineral. Mais especificamente, procurou-se analisar as mudanças nas principais propriedades mecânicas do concreto com o emprego do MCAR: resistência à compressão, resistência à tração (tração na flexão e tração por compressão diametral), módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, avaliando a influência da relação $a/(c+MCAR)$, da idade e do teor de adição mineral, utilizando para isto as curvas de comportamento das variáveis consideradas no estudo.

Desta forma, as conclusões apresentadas a seguir, mesmo estando em consonância com a maior parte da bibliografia referente ao assunto, não devem ser tomadas de forma absoluta, visto que estão relacionadas somente aos tipos, quantidades e qualidades específicas dos materiais e técnicas de execução utilizados no trabalho. Sua representatividade deve ser ratificada com a realização de novos trabalhos que apresentem resultados que possam consolidar e complementar os dados obtidos neste estudo.

6.1 Conclusões

Em função dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, pode-se enumerar as seguintes conclusões, todas comprovadas estatisticamente:

6.1.1 Em relação à resistência à compressão

a) Com base nos resultados experimentais, obteve-se um modelo matemático, colocado a seguir, que possibilitou a realização das curvas de comportamento da resistência à compressão em função das variáveis controladas utilizadas na pesquisa. É interessante ressaltar que os parâmetros do modelo representam os efeitos e interações significativas nesta propriedade. O modelo para a resistência à compressão, válido para a idade de até 91 dias, resultou em:

$$F_c = 22,374 - 0,189107 * Teor / Idade^6 - 0,0018724 / (Idade * AC)^6 + 51,9528 * Teor^{0,17} + 3,86101 / AC^{2,34} - 25,7981 * Teor^{0,01} * AC - 0,0119877 / Idade^{10}$$

Onde: f_c : resistência à compressão, em MPa;

AC : valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$;

$Teor$: valor codificado do teor de substituição de MCAR; e

$Idade$: valor codificado da idade de rompimento.

O coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 94,33%.

- b) Os efeitos da relação $a/(c+MCAR)$ e da idade (grau de hidratação) encontraram-se dentro do esperado, ou seja, tiveram uma grande significância. Estes efeitos colocaram-se entre os parâmetros que mais contribuíram nesta variável de resposta.
- c) Na interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade (grau de hidratação) teve-se um comportamento diferenciado do crescimento da resistência à compressão, para as diversas relações $a/(c+MCAR)$ estudadas. Nas menores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi maior nas primeiras idades, enquanto que nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi mais lento. Nas duas situações, teve-se pouco crescimento entre o vigésimo oitavo e o nonagésimo primeiro dia. Esta interação apresentou-se como a de menor significância na variável de resposta, dentre os parâmetros do modelo matemático.
- d) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição de cimento por MCAR, teve-se uma melhoria diretamente proporcional ao teor de substituição adotado, chegando-se a obter uma melhoria média de 16%, dentre as várias relações $a/(c+MCAR)$ utilizadas, no vigésimo oitavo dia de idade com um teor de substituição de 20%. Este efeito apresentou-se muito significativo na resistência à compressão.
- e) A interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e o teor de substituição também mostrou-se significativo. Nesta interação, verificou-se que nas menores relações $a/(c+MCAR)$ a melhoria na resistência à compressão decorrente do aumento do teor de substituição foi inferior à obtida nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Esta interação apresentou-se como a mais significativa dentre os parâmetros existentes no modelo matemático.
- f) Na interação da idade com o teor de substituição, teve-se um crescimento diferenciado dos valores de resistência, em relação às idades estudadas. No primeiro dia, verificou-se uma diminuição dos valores de resistência à compressão, com o aumento do teor de substituição. Nas demais idades, verifica-se um aumento dos valores de resistência à compressão, conforme aumenta-se o teor de substituição de MCAR. Esta interação apresentou-se como um dos parâmetros de maior significância na variável de resposta.

6.1.2 Em relação à resistência à tração

- a) Com base nos resultados experimentais, obteve-se os modelos matemáticos, colocados a seguir, que possibilitaram a realização das curvas de comportamento da resistência à tração, tanto para o ensaio de compressão diametral quanto para o ensaio de flexão, em função das variáveis controladas utilizadas na pesquisa. É interessante ressaltar que os parâmetros dos modelos representam os efeitos e interações significativas nesta propriedade. Os modelos para a resistência à tração são válidos para a idade de até 91 dias, e apresentaram-se da seguinte forma:

$$f_{iF} = 1,56432 - 0,000339423 * Teor^4 / Idade^9 + 0,00111823 * AC / Idade^{10} + 1,9438 * Teor^{0,3} \\ + 2,79714 / AC^{1,8} - 0,00746805 * Teor^{0,1} / AC^9 - 0,0162438 / Idade^8$$

$$f_{iD} = 6,94984 - 0,0000001,58967 * Teor^{13} / Idade^{14} - 1,25903 / (Idade * AC)^{0,3} \\ + 1,36972 * Teor^{0,5} + 0,00771719 / AC^6 - 2,81763 * Teor^{0,1} * AC^{0,8} - 0,0235609 / Idade^{6,01}$$

Onde: *FtF*: resistência à tração por flexão, em MPa;

FtD: resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

AC: valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$;

Teor: valor codificado do teor de substituição de MCAR; e

Idade: valor codificado da idade de rompimento.

O coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 86,49% para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e de 93,20% para o ensaio de tração na flexão.

- b) O efeito da relação $a/(c+MCAR)$ e da idade (grau de hidratação) encontraram-se dentro do esperado, ou seja, tiveram uma grande significância. O efeito da relação $a/(c+MCAR)$ foi mais significativo no ensaio de flexão. Com relação ao efeito da idade, teve-se nos dois tipos de ensaio, grande crescimento até o décimo quarto dia e pouco crescimento após o vigésimo oitavo dia, dos valores de resistência à tração.
- c) Na interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade (grau de hidratação) teve-se também um comportamento diferenciado do crescimento da resistência à tração, para as diversas relações $a/(c+MCAR)$ estudadas, tanto no ensaio de resistência à tração na flexão quanto no de compressão diametral. Nas menores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi maior nas primeiras idades, enquanto que nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi mais lento. Nas duas situações, tem-se um crescimento lento entre o vigésimo oitavo e o nonagésimo primeiro dia. No ensaio de tração na flexão, teve-se uma maior significância desta interação, em relação ao constatado no ensaio de tração por compressão diametral.
- d) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição, tem-se também uma melhoria diretamente proporcional ao teor de substituição adotado, contudo, inferior à constatada na resistência à compressão. No ensaio de tração por compressão diametral constatou-se maiores contribuições decorrentes do uso do MCAR que as constatadas no ensaio de flexão. Nesses ensaios, chegou-se a obter uma melhoria média de 7% e 10%, dentre as várias relações $a/(c+MCAR)$ utilizadas, no vigésimo oitavo dia de idade com um teor de substituição de 20% para o ensaio de flexão e compressão diametral, respectivamente.

Tanto no ensaio de tração por compressão diametral quanto no ensaio de flexão, constatou-se uma grande significância deste efeito.

- e) A interação da relação $a/(c+MCAR)$ com o teor de substituição teve um comportamento diferenciado entre os ensaios realizados. No ensaio de compressão diametral, constatou-se nas menores relações $a/(c+MCAR)$ uma contribuição ligeiramente superior à observada nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. No ensaio de flexão, as maiores contribuições ocorrem nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Nos dois tipos de ensaio verificou-se, em todas as relações $a/(c+MCAR)$ estudadas, um melhor desempenho nas misturas com MCAR. Esta interação apresentou-se com o mesmo nível de significância para os dois tipos de ensaios realizados nesta propriedade.
- f) Na interação da idade com o teor de substituição, teve-se tanto no ensaio de tração por compressão diametral quanto no ensaio de tração na flexão, um comportamento semelhante. Neste contexto, teve-se no primeiro dia uma pequena melhoria, sendo que com o aumento do teor de substituição tem-se, nos dois ensaios realizados, uma diminuição dos valores de resistência à tração. Nas demais idades, constatou-se um aumento da contribuição com o aumento do teor de substituição. Esta interação apresentou-se como o parâmetro de menor significância, dentre os contidos nos modelos matemáticos obtidos, para os dois tipos de ensaios realizados.
- g) Na relação entre os valores de resistência à tração e resistência à compressão, teve-se um aumento desta relação com a diminuição da relação $a/(c+MCAR)$, nos dois tipos de ensaios realizados na resistência à tração. O modelo para a resistência à tração a partir dos valores de resistência à compressão, para o intervalo de $10 < f_c < 85$ MPa, foi de:
 $f_{tF} = 0,1733 \times f_c^{0,9191}$, $r^2: 95,26\%$, para o ensaio de tração na flexão (MPa); e
 $f_{tD} = 0,2122 \times f_c^{0,7405}$, $r^2: 95,97\%$, para o ensaio de tração na compressão diametral (MPa).

6.1.3 Em relação ao módulo de elasticidade

- a) Com base nos resultados experimentais, chegou-se a um modelo matemático, colocado a seguir, que possibilitou a obtenção das curvas de comportamento do módulo de elasticidade, em função das variáveis controladas utilizadas na pesquisa. É interessante ressaltar que os parâmetros do modelo representam os efeitos e interações significativas nesta propriedade. O modelo para o módulo de elasticidade, válido para a idade de até 91 dias, resultou em:

$$Ec = 14,1332 + 0,00163592/(Teor^4 * Idade^8) - 0,00496357 * AC^3 / Idade^9 \\ + 17,3975 * Teor^{0,2} + 9,76265 / AC^{0,5} - 1,83621 * Teor^{0,01} * AC^3 - 0,0496533 / Idade^8$$

Onde: *Ec*: módulo de elasticidade, em GPa;

AC: valor codificado da relação $a/(c+MCAR)$;

Teor: valor codificado do teor de substituição de MCAR; e

Idade: valor codificado da idade de rompimento.

O coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 88,70%.

- b) Os efeitos da relação $a/(c+MCAR)$ e da idade (grau de hidratação) estiveram-se dentro do esperado, e apresentaram grande significância na variável de resposta. O efeito da idade foi mais significativo que o efeito da relação $a/(c+MCAR)$, onde se observou nesta propriedade um crescimento médio de 68% no primeiro dia de idade.
- c) Na interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e a idade (grau de hidratação) teve-se novamente um comportamento diferenciado do crescimento do módulo de elasticidade, para as diversas relações $a/(c+MCAR)$ estudadas. Nas menores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi maior nas primeiras idades, enquanto que nas maiores relações $a/(c+MCAR)$ o crescimento foi mais lento. Nas duas situações, tem-se um crescimento lento entre o vigésimo oitavo e o nonagésimo primeiro dia. Esta interação apresentou-se como uma das mais significativas na variável de resposta, dentre os parâmetros que constam no modelo matemático.
- d) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição, teve-se novamente uma melhoria diretamente proporcional ao teor de substituição adotado, chegando-se a obter uma melhoria média de 9%, dentre as várias relações $a/(c+MCAR)$ utilizadas, no vigésimo oitavo dia de idade com um teor de substituição de 20%. Este efeito apresentou-se muito significativo na variável de resposta.
- e) A interação entre a relação $a/(c+MCAR)$ e o teor de substituição também mostrou-se significativo. Nesta interação, verificou-se que nas menores relações $a/(c+MCAR)$ a melhoria no módulo de elasticidade foi inferior à constatada nas maiores relações $a/(c+MCAR)$. Esta interação apresentou-se como uma das mais significativa, dentre os parâmetros existentes no modelo matemático.
- f) Na interação da idade com o teor de substituição, teve-se novamente um crescimento diferenciado dos valores do módulo de elasticidade, em relação às idades estudadas. No primeiro dia, verificou-se uma diminuição dos valores de módulo de elasticidade, com o aumento do teor de substituição. Esta situação se modificou após o décimo quarto dia,

onde observou-se um aumento dos valores de módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição. Esta interação também apresentou-se como um dos parâmetros de maior significância na variável de resposta.

- g) Na relação entre os valores de módulo de elasticidade e de resistência à compressão, verificou-se tanto nos dados experimentais quanto nos dados oriundos dos modelos de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, a obtenção de valores inferiores aos previstos pela NBR 6118 (ABNT, 2001). O modelo obtido para o módulo de elasticidade a partir dos valores de resistência à compressão, referente ao intervalo de $10 < f_c < 85$ MPa, foi de: $E_c = 3776,1 \times f_c^{0,5781}$, $r^2 = 92,74\%$,

6.1.4 Em relação ao coeficiente de Poisson

- a) O coeficiente de Poisson não apresentou uma tendência clara de comportamento em relação às variáveis controladas da pesquisa, contudo houve ligeira evidência de redução do coeficiente de Poisson com o aumento da resistência.
- b) O valor médio do coeficiente de Poisson para resistências inferiores a 40 MPa foi de 0,18, enquanto que para resistências superiores a 40 MPa, teve-se um valor médio para o coeficiente de Poisson de 0,17.

Nos ensaios de microestrutura do concreto e da pasta obteve-se informações que auxiliaram a explicação dos mecanismos responsáveis pelo comportamento das variáveis de resposta do programa experimental. Na microscopia eletrônica de varredura observou-se, através da técnica de elétrons secundários e retroespalhados, os efeitos físico-químicos decorrentes do uso do MCAR no concreto, verificando nas misturas com este material uma maior densificação e menor quantidade do Ca(OH)_2 , em relação às misturas de referência.

Nos ensaios de difração de raios-x e de análise termodiferencial e termogravimétrica teve-se evidenciado a diminuição do teor de hidróxido de cálcio com o aumento do teor de substituição de MCAR. Foi também evidenciado que esta reação pozolânica é mais intensa nos primeiros quatorze dias, sendo mais significativa nas maiores relações $a/(c+\text{MCAR})$. Nestas técnicas também constatou-se a presença da gellenita (C_2ASH_8) e do C_4AH_x como produtos resultantes da reação pozolânica.

O efeito químico foi ratificado no ensaio de titulometria, onde foi verificada a continuidade da reação pozolânica até o vigésimo oitavo dia de hidratação, sendo contudo, mais significativa até o décimo quarto dia de idade. Neste ensaio também constatou-se o que o pH das misturas com MCAR se mantiveram sempre em patamares superiores a 12, mesmo com o uso de teores de substituição de 20%, não prejudicando deste modo a proteção química

das armaduras. Com relação ao efeito físico, este foi ratificado no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, onde se constatou na maioria das amostras, uma diminuição do diâmetro médio dos poros e da porosidade total com o aumento do teor de MCAR, aumento do grau de hidratação e diminuição da relação $a/(c+MCAR)$.

Com relação as hipóteses definidas para a realização do trabalho, constatou-se que a hipótese principal foi confirmada, ou seja, o uso do MCAR no concreto proporcionou a produção do CAR com um comportamento similar, ou em alguns casos, superior aos produzidos com outras pozolanas altamente reativas, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz. A hipótese secundária também foi confirmada, pois teve-se no concreto com a inclusão do MCAR uma correlação entre a resistência à compressão e as demais propriedades, similar ao comportamento observado no concreto com outras pozolanas de alta reatividade.

De um modo geral, pode-se verificar que o uso do metacaulim de alta reatividade (MCAR) realmente proporciona uma melhoria nas propriedades mecânicas do concreto semelhante ao encontrado para as outras pozolanas de alta reatividade. O uso desta adição mineral no concreto, além de proporcionar a possibilidade de emprego de um resíduo industrial para a sua produção, ainda apresenta como vantagem em relação às outras pozolanas de alta reatividade, o fato que a sua produção pode ser inteiramente controlada, facilitando a obtenção de uma maior qualidade.

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

Em virtude do diminuto número de trabalhos enfocando o uso do MCAR, principalmente no Brasil, tem-se um grande número de sugestões que poderiam ser colocadas com o intuito de consolidar e melhorar o desempenho do MCAR no concreto. Assim sendo, são feitas a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

1. O estudo do processo de moagem, através do uso de diversos tipos de moinho, com o objetivo de obtenção de um menor diâmetro médio das partículas do MCAR.
2. Correlação dos valores obtidos neste trabalho com os obtidos com o MCAR de maior finura, com o objetivo de verificar se há melhoria da relação custo-benefício, quando adota-se um MCAR com menor finura.
3. Avaliação das propriedades mecânicas com teores de substituição superiores a 20%.
4. Avaliação, de um modo sistemático, da durabilidade do concreto com o uso do MCAR, através do uso de diversos teores de substituição.
5. Avaliação, de um modo sistemático, do calor de hidratação e da retração do concreto com o uso do MCAR, através do uso de diversos teores de substituição.
6. Avaliação do uso do MCAR em argamassas de reparo.

Referências

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

ALMEIDA, I.R. **Betões de alta resistência e durabilidade – Composição e características**. Lisboa, 1990. 740 p. Tese de doutorado. Universidade Técnica de Lisboa.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência**. Porto Alegre, 2000. 137 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

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

AMBROISE, J.; MAXIMILIEN, S.; PERA, J. Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**, v. 1, n. 4, p 161-168, 1994.

AMBROISE, J.; MURAT, M.; PERA, J. Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV – Experimental conditions for strength improvment on metakaolinite minicylinders. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p 83-88, 1985a.

AMBROISE, J.; MURAT, M.; PERA, J. Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. V- Extension of the research and general conclusions. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p 261-268, 1985b.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 234. Guide for the use of silica fume in concrete. **ACI Material Journal**, Detroit, v. 92, n. 4, p 437-440, july-aug, 1995.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R. State-of-the-art report on high-strength concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, 1991, part 1. 48p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standart Methods for Examination of Water and Waste Water**, New York, 1985, p. 287 – 288.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: ASTM C 618, 3p. In: **Anual book of ASTM standards**, Philadelphia, 1991.

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

ASBRIDGE, A.H.; PAGE, C.L.; PAGE, M.M. Effects of metakaolin, water/brinder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars. **Cement and Concrete Research**. v. 32, p 1365-1369, 2002.

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 – 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 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. **Cimento Portland de alta resistência inicial:** NBR 5733, Rio de Janeiro, 1991.

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 - Determinação da consistência pelo espalhamento da mesa de Graff:** NBR NM68. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos:** NBR 12142. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – Tensão-Deformação:** NBR 8522. Rio de Janeiro, 1984.

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. **Concreto para fins estruturais - classificação por grupos de resistência:** NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.

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. **Projeto de estruturas de concreto: NBR 6118.** Rio de Janeiro, 2001.
- 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.
- BAI, J.; WILD, S. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n 2, p 201-209, 2002.
- BALOGH, A. High-reactivity metakaolin. **Concrete construction**, July, 1995.
- BANTHIA, N.; YAN, C. Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p 657-662, 1996.
- 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. 153 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- BASHEER, P.A.M.; McCABE, C.C.; LONG, A.E. The influence of metakaolin on properties of fresh and hardened concrete. In: **INFRASTRUCTURE REGENERATION AND REHABILITATION IMPROVING THE QUALITY OF LIFE THROUGH BETTER CONSTRUCTION: Vision for the next millenium. Proceedings...** Sheffield: R.N. Swany, 1999.
- BATTAGIN, A. F. Características das escórias e pozolanas aos cimentos Portland brasileiro. In: **CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE TECNOLOGIA DO CONCRETO**, 4, ABCP, 1987, São Paulo, p 1-55.
- BENTZ, D.P.; GARBOCZI, E.J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, p 518-529, Sep-Oct, 1991.
- BRIDSON, D.; DAVIES, T.W.; HARRISON, P. Properties of flash-calcined kaolinite. **Clays and Clay Minerals**, v. 33, n. 3, p 258-260, 1985.

- BRISTOW, C.M. World kaolin: genesis, exploitation and application. **Industrial Minerals**, jul., p45-59, 1987.
- BROOKS, J.J.; JOHARI, M.A.M. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p 495-502, 2001.
- 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.; GRUDER, 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, p. 37-40, Nov.1994.
- 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 sub-produto 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.
- CHATVEERA, B.; NIMITYONGSKUL, P. High performance concrete containing modified rice husk ash. **Appropriate concrete technology**. London: E & FN Spon, Edited by R.K. Dhir and M.J. Mc Carthy, 1996, p. 298-308.
- CHRISTODOULOU, G. A comparative study of the effects of silica fume, metakaolin and pfa on the air content of fresh concrete. In: **YOUNG RESEARCHERS FORUM. SCI CONSTRUCTION MATERIALS GROUP**. Londres: Society of Chemical Industries, 2000.
- COHEN, M.D.; OLEK, J.; DOLCH, W.L. Effects of the form of silica fume on plastic shrinkage cracking of Portland cement paste. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, Supplementary papers, 1989. **Proceedings....**Trondheim, Norway: 3° CANMET/ American concrete institute, 431-443.
- COLEMAN, N.J.; PAGE, C.L. Aspects of the solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin. **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).
- COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento da mesa de graff**. Norma Mercosur NM 68/98, 1998.
- COOK, D.J. Calcined clay, shale and other soils. In: SWAMY, R.N. (ed). **Cement Replacement Materials**. (Concrete technology and design; v.3, London, Surrey University Press, 1986.

CORDEIRO, G.C.; DÉ SIR, J.M. Estudo da potencialidade de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho, agosto, 2001. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 43, 2001. **Anais...**, Foz do iguaçu, Brasil: IBRACON. CD-Room

CORDEIRO, G.C.; DÉ SIR, J.M.; VAILLANT, J.M.M.; FILHO, R.D.T.. Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas, agosto, 2002. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 44, 2002. **Anais...**, Belo Horizonte, Brasil: IBRACON. CD-Room

CURCIO, F.; DeANGELIS, B.A.; PAGLIOLICO, S. Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 6, p 803-809, 1998.

DAFICO, D. de A. **Contribuição ao estudo da dosagem de concreto de alto desempenho**. Florianópolis, 2001. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC.

DAHL, P.A.; MELAND, I. Influence of different pozzolan types upon the effect of plastifying admixture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, v. 1, 1989. **Proceedings...**Trondheim, Norway: 3º CANMET/ American concrete institute, 689-711.

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

DAL MOLIN, D.C.C.; MONTEIRO, P. Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1, 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, junho, 1996, p 213-224.

DAL MOLIN, D.C.C.; WOLF, J. Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alta resistência em edifícios altos. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10, Gramado, 1990. **Anais...**Porto Alegre: SERGS. p 853-863.

DASS, A. Pozzolanicity of rice husk ash. In: CIB CONGRESS TO BUILD AND TAKE CARE OF WHAT WE HAVE BUILT WITH LIMITED RESOURCES – BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 9, Stockolm, **CIB 83**, v. 4, 1983, p85-96.

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.

DAVIES, T.W. Density reduction of kaolinite by flas heating. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 63, n. 2, p 82-88, 1985.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário mineral**, 2001.

DIAMOND, S. Sobre as bases científicas do uso da microssílica no concreto. In: SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA ELKEM MICROSSÍLICA, 1, 1984, São Paulo. **Anais....** São Paulo: ELKEM, 1984, 10p.

FLORES, S.M.P. **Aproveitamento do rejeito de caulim na produção de alumina para cerâmica e sílica ativa de baixa granulometria.** Belém, 1998. Tese de Doutorado. Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará.

FORREST, J.A. Burnt clay pozzolanas. In: MEETING ON SMALL-SCALE MANUFACTURE OF CEMENT MATERIALS, 1974. **Proceedings....** London: Intermed Technol. Publ., 1975, p 53-59.

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.; CABRERA, J. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p 519-527, 2001.

FRÍAS, M.; CABRERA, J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p 561-569, 2000.

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, p 209-216, 2000.

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.

GUPTA, S.; RAO, A.V.P. Production of clay pozzolana by fluidized bed technique. **Trans. Indian Ceramic Society**, n. 37, p 165-171, 1978.

HAMILTON, I. W.; SAMMES, N. M. Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar. **Cement and Concrete Research**, n. 29, 1999.

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° CANMET/ American Concrete Institute, v. 1, 1989, p 499-516.

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

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, p 267-271, 2000.

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.

HOUSTON, D.F. Rice Hulls. In: RICE: Chemistry and technology. **American Association of Cereal Chemists (AACC)**, 1972, p 301-352.

HWANG, C.L.; WU, D.S. Properties of cement paste containing rice husk ash. 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, 733-762.

ISAIA, 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.

ISAIA, G.C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozzolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo com vistas a corrosão das armaduras.** São Paulo, 1995. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION (IS). **Specification for burnt clay pozzolan.** IS 1344, New Delhi, 1968.

JOHN, V.M. Panorama da reciclagem na construção civil. **Qualidade na Construção.** São Paulo, v. 3, n. 20, p 26-33, 1999.

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

KULAKOWSKI, M.P. **Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos.** Porto Alegre, 1994. 129 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassa compostas com a adição de sílica ativa.** Porto Alegre, 2002. 178 p. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, UFRGS.

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

KHAN, M.H.; MOHAN, K.; TAYLOR, H.F.W. Pastes of tricalcium silicate with rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v.15, p 89-92, 1985.

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, 1993. v.2, p.835-872 (ACI Special publication, 132).

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

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.

LACERDA, C.S.; HELENE, P.. Metacaulim: A nova opção para concretos de alto desempenho, agosto, 2002. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 44, 2002. **Anais...**, Belo Horizonte, Brasil: IBRACON. CD-Room.

LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. 3ª ed. London: Chemical Publishing Company, Inc. 1971. p 1-10.

LOPES, A.N. de M.. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Brasília, 1999. 169 p. Dissertação de mestrado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

LOLAND, K.E.; HUSTAD, T. **Silica in concrete: fresh concrete and methods of analysing results**. Trondheim: cement and concrete research institute, Norwegian Institute of Technology, 1981. 23p. (Report, STF 065A81031).

LOUGHBROUGH, R. Kaolin producer more upmarket. **Industrial Minerals**, p. 51-69, oct, 1993.

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 , p 23-28, Apr., 1993.

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

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.

MASSAZZA, F.; COSTA, U. Aspetti dell'attività pozzolanica e proprietà dei cement pozzolanici. **Il Cemento**, Roma, n. 3, 1979.

MEINHOLD, R.H.; SALVADOR, S.; DAVIES, T.W.; SLADE, R.C. A comparison of the kinetics of flash calcination of kaolinite in different calciners. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 72, part A, p 105-113, 1994.

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

MEHTA, P.K. Pozolanic and cementitious by-products in concrete – Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 1989. **Proceedings....**Trondheim, Norway: 3º CANMET/ American concrete institute, v. 1, 1989, p 1-43.

MEHTA, P.K. Mineral admixture for concrete – An overview of recent developments. In: ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE, Durham, NH, 1994. **Proceedings...** De Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar, 1994, p. 243-255.

MEHTA, P.K. Concrete technology for sustainable development. **Concrete international**, v. 21, n 11, p 47-53, Nov. ,1999.

MEHTA, P.K. Rice Hush Ash – A unique supplementary cementing material. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 2, Ottawa: Energy Mines and Resources, 1994, p 419-445.

MEHTA, P.K.; AİTCIN, P.C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v.12, n. 2, p. 70-78, Winter 1990.

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

MEHTA, P.K.; PIRTZ, D. Use of rice hull ash to reduce temperature in high-strength mass concrete. **ACI Journal**. v. 75, n. 2, Feb, 1978.

MIELENS, R.C.; WITTE, L.P.; GLANTZ, O.J. Effect of calcination on natural pozzolans. In: SYMPOSIUM ON USE OF POZZOLANIC MATERIALS IN MORTARS AND CONCRETE. **Papers...**Philadelphia: ASTM, p 43-92, 1950. (STP 99).

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley, 1986.

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

MÜLLER, A.. **Efeito da sílica e de látex polímero EVLC sobre as características de argamassas de assentamento e o comportamento de prismas de bloco de concreto**. Florianópolis, 1999. 175p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I – Preliminary investigation on metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p 259-266, 1983.

MURAT, M.; COMEL, C. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. III – Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. **Cement and Concrete Research**. v. 13, p 631-637, 1983.

NANNI, L.F.; RIBEIRO, J.L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. 2 ed. CPGECC-UFRGS, Porto Alegre, 1992. 213 p. (Caderno Técnico 30).

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

NIELSEN, U.; SANDBERG, P. FOLLIARD, K. Influence of mineral admixtures on the transition zone in concrete. In: RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERFACES IN CEMENTITIOUS COMPOSITES, 1992, Toulouse. **Proceedings...** London: E&FN SPON, 1993, p 65-70. (Rilem Proceedings 18).

NOLASCO, A. M.; AGNESINI, M. V. C. Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. In: AVANÇOS EM TECNOLOGIA E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE EDIFICAÇÕES. Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 1993, v. 1, p. 55-64.

OLIVEIRA, D.F.; SWARNAKAR, R.; MORAIS, C.R. da S.; FERREIRA, H.C. Cinética da reação metacaulinita e hidróxido de cálcio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 35, 1995. **Anais...**São Paulo, 1995. p 190-195.

ORIOLO, M., PERA J. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p 265-270, 1995.

PAPADIKIS, M.; VENUAT, M. Empleo en los cementos y hormogones. In: **Fabrication, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento**. Barcelona, Técnicos asociados, 1968. pp 170-171.

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, 1995, v.2, p 493-506.

PERA, J.; AMROUZ, A. Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. **Advanced Cement Based Materials**, n. 7, p 49-56, 1998.

PERSSON, B.. Poisson's ratio of high-performance concrete. **Cement Concrete Research**, v. 29, n.10, p 1647-1653, 1999.

PETERMAN M.B.; CARRASQUILLO, R.L. **Production of High Strength Concrete**. Austin: University of Texas, Center for Transportation Research Austin, 1983.

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, p 1301-1306, 2001.

PRUDÊNCIO, J.R.; SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozzolanicidade da cinza de casca de arroz. In: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. Workshop. USP- São Paulo, Nov. 1996, p 53-62.

QIAN, X.; LI, Z. The relationships between stress and strain for high-performance with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 11, p 1607-1611, 2001.

RAMIRES, M.V.V. **Estudo da influência da cura na resistência à compressão em concretos de alta resistência**. Porto Alegre, 1993. 92 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

RILEM TECHNICAL REPORTS. Final Report: Siliceous by-products for use in concrete. **Materials and Structures**, v. 21, n. 121, p. 69-80, 1988.

ROCHA, S. O desempenho medido na prática. **Téchne**. São Paulo, 29, p14-21, Jul/Ago, 1997.

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, p 133-138, 2002.

ROJAS, M.I.S. de; FRÍAS, M.; RIVERA, J. Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros com materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. **Materiales de Construcción**, v. 50, n. 260, p 39-48, oct-dic, 2000.

ROLS, S.; MBESSA, M.; AMBROISE, J.; PERA, J. Influence of ultra-fine particle type on properties of very-high-strength concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1999. **Proceedings....** Gramado, Brasil: CANMET/ American Concrete Institute, p 671-685.

SAAD, M.; ANDRADE, W.P.;PAULON, V.A. Properties of mass concrete containing na 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. Temperature effects on the strength development in concrete containing fly ash-metakaolin blended cements. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000. **Proceedings....** João Pessoa, Brasil: Universidade Federal da Paraíba/ University of Sheffield, 2000, p 165-175.

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, p 441-454, 2001.

SABIR, B.B; WILD, S.; KHATIB, J.M. Strength development and workability of concrete blended with metakaolin and fly ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1999. **Anais...** Gramado, Brasil: CANMET/ American concrete institute, 1999. CD-Room

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

SAMPAIO, J; COUTINHO, J.S; SAMPAIO, M.N.. Melhoría do desempenho de betões pelo metacaulino. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 43, 2001. **Anais...**, Foz do iguaçu, Brasil: IBRACON, agosto, 2001. CD-Room.

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

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Florianópolis, 1997, 133p. Dissertação de mestrado- Escola de engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: PINI, 1986.

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

SELLEVOLD, E.J. The function of condensed silica fume in high-strength concrete. In: SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, Stavanger, Norway. **Proceedings....** Trondheim: Tapir, 1987. p 39-49.

SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. Condensed silica fume in concrete. In: MALHOTRA, V.M. **Supplementary cementing materials for concrete**, Ottawa, Canadá: 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, 2000. 181p. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SENSALE, G.R.; DAL MOLIN, D.C.C. Study of influence of rice-husk fly ash on compressive strength of concrete at different ages. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE: PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 199. **Proceedings....** Gramado, Brazil, 1999, p 213-230.

SILVA, P.S. de; GLASSER, F.P. Hydration of cements based on metakaolin chemistry. **Advanced in Cement Research**, v. 3, n. 12, p 166-177, 1990.

SILVA, P.S. de; GLASSER, F.P. Phase relations in the system $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin- calcium hydroxide hydration. **Cement Concrete Research**. v. 23, p 627-639, 1993.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996, 139p. Dissertação de mestrado – Escola de engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SILVEIRA, A. A. **Reação álcali-agregado em concretos com adição de cinza de casca de arroz**. Porto Alegre, 2001. Exame de qualificação do doutorado – Escola de engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, A. A.; DAL MOLIN, C.C.. A cinza de casca de arroz como adição mineral. In: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. Workshop. USP- São Paulo, Nov, 1996, p 39-44.

SILVEIRA, R.L.; CALIXTO, J.M.; FONTOURA, J.T. Mechanical properties and durability on high-performance concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1999. **Proceedings....** Gramado, Brasil: CANMET/ American Concrete Institute, 1999, p 655-670.

SOBRINHO, J.F.C. **Pozolanas como material de construção: sua fabricação artificial em Urubupungá**. São Paulo: Centrais elétricas, 1970.

SOUZA, M.F. de; BATISTA, P.S.; REGIANI, I.; LIBÓRIO, J.B.L.; SOUZA, D.P.F. de. Rice hull-derived silica: Applications in Portland cement and Mullite Whiskers. **Materials Research**, v. 3, n. 2, p 25-30, 2000.

TALERO, R.; BOLLATI, M.R.; HERNÁNDEZ, F. Preparación de morteros y hormigones no tradicionales a base de cemento Portland, metacaolín y yeso (15,05%). **Materiales de Construcción**. v. 49, n. 256, oct-dic, 1999, p 29-42.

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

TAYLOR, P.C.; BURG, R.G. Low-cost, durable concrete. **Concrete Construction**. Apr, 1999.

VIEIRA, F.M.P. **Estudo do Comportamento da aderência de barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microsilica**. Porto Alegre, 1994. 107p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VU, D.D.; STROEVEN, P.; BUI, V.B. Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p 471-478, dec-2001.

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, 2, 1991. **Proceedings...**Montreal, Canadá: V.M. Malhotra/ American Concrete Institute, (ACI SP- 126), v. 2, 1991, p 941-953.

WEBER, S.L. **Metodologia para a obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento da cinza de casca de arroz**. Florianópolis, 2001. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC.

WILD, S.; KHATIB, J.M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p 137-146, 1997.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; CRAYTHORNE, M.J. Strength development of mortar containing metakaolin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN BUILDING MATERIALS, STRUCTURES AND TECHNIQUES, 5, may-1997. **Proceedings...**Lituânia: Vilnius Gediminas Technical University, 1997, p 58-63.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p 1537-1544, 1996.

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

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

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, p. 1713-1725, Jul 1995.

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, p 963-977, 1996.

ANEXOS

ANEXO A - Estudo piloto com o uso da argila caulínica calcinada.

Neste estudo, empregou-se o material utilizado como pozolana na fabricação do cimento, por uma fábrica localizada no estado do Pará. As características químicas e físicas desta pozolana foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na tabela A.1, onde também é colocada a relação Al_2O_3/SiO_2 , no valor de 0,87, semelhante ao valor teórico (0,85), descrito por Grim (1962), para a cela unitária da caulinita, evidenciando a predominância deste argilomineral.

Tabela A.1 Características químicas e físicas da pozolana.

Características	Determinações	Valores obtidos
Químicas	Óxido de silício (SiO_2)	46,00 %
	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	40,00 %
	Óxido de ferro (Fe_2O_3)	1,30 %
	Óxido de cálcio (CaO)	0,77 %
	Óxido de sódio (Na_2O)	0,13 %
	Óxido de Titânio (TiO_2)	2,51 %
	Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,10 %
	Óxido de enxofre (SO_3)	0,02 %
	Perda ao fogo	9,6 %
		Al_2O_3/SiO_2
Físicas	Massa específica	2,52 g/cm ³
	Superfície específica	-

Este material foi obtido após o processo de calcinação, ou seja, antes da sua moagem. A sua obtenção antes do processo de moagem deveu-se ao fato que a moagem desta pozolana é realizada em conjunto com o clínquer. A falta de moagem, adicionado a característica de aglomeração da argila caulínica durante o processo de calcinação, faz com que o material apresente uma grande variação no que se refere ao tamanho das partículas, chegando-se a obter partículas com 5 cm de diâmetro.

Na figura A.1 tem-se a difração de raio-x deste material, onde observa-se a presença de um único tipo de argilomineral, a caulinita, sendo que pela pequena intensidade do halo de amorficidade, constata-se que a mesma ainda apresenta fases cristalinas. Esta situação pode ser verificada na figura A.2, que mostra uma foto da argila caulínica após o processo de calcinação, onde observa-se no seu interior a presença de argila não calcinada. Este resultado, aliado ao alto valor de perda ao fogo residual observado na tabela A.1, pode ser creditado a uma falta de homogeneidade do processo de calcinação desta argila caulínica, o que evidentemente resulta em prejuízo à sua atividade pozolânica.

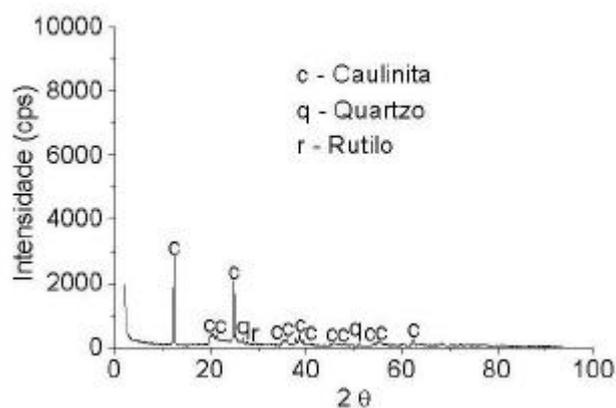


Figura A.1 Difração de raio-x do da argila caulinítica, após o processo de calcinação.



Figura A.2 Foto da partículas de argila calcinada

Mesmo após a constatação de possíveis deficiências no processo de calcinação, partiu-se para a execução da moagem. Nesta etapa, adotou-se, numa primeira tentativa, a moagem em moinhos de bola em diferentes tempos, contudo, em nenhum deles, foi obtida uma granulometria que proporcionasse ao metacaulim uma alta reatividade, visto que há a necessidade, segundo a bibliografia existente (item 3.4), de um diâmetro médio em torno de 3 μm .

Visando uma melhor eficiência da moagem, bem como reduzir a presença de material não calcinado, adotou-se o pré-peneiramento do material na peneira 4,8 mm, contudo, este procedimento não proporcionou o resultado esperado, apesar de provocar ligeira melhora no material resultante do processo de moagem. Deste modo, fez-se a opção de realizar o pré-peneiramento na peneira 2,4 mm, o que novamente não proporcionou a obtenção dos resultados esperados, apesar de proporcionar novamente uma ligeira melhora do material

resultante da moagem, em relação aos resultados obtidos com o pré-peneiramento na peneira 4,8 mm.

Visando solucionar esta ineficiência do processo de moagem, partiu-se para a adoção de outros tipos de moinho, bem como combinações entre eles, não se tendo novamente sucesso na obtenção da granulometria desejada em nenhum dos moinhos adotados. Ressalta-se que em todas as tentativas de moagem, adotou-se como material a ser moído, o resultante do pré-peneiramento na peneira 2,4 mm.

Com a não obtenção de granulometrias dentro da faixa esperada ($\phi_{50\%} \cong 3 \mu\text{m}$), optou-se pelo peneiramento, na peneira $75\mu\text{m}$ (nº 200), do material que apresentou os melhores resultados, após o processo de moagem, para que se pudesse realizar os ensaios de atividade pozolânica com a cal e com o cimento Portland. Na figura A.3 é apresentado um resumo das diversas tentativas visando a obtenção da granulometria desejada, onde é colocado, em cada quadro, o moinho utilizado, a peneira em que foi realizado o pré-peneiramento, o tempo de moagem, a ocasião em que foi feito o peneiramento na peneira nº 200 e o diâmetro médio ($\phi_{50\%}$) obtido.

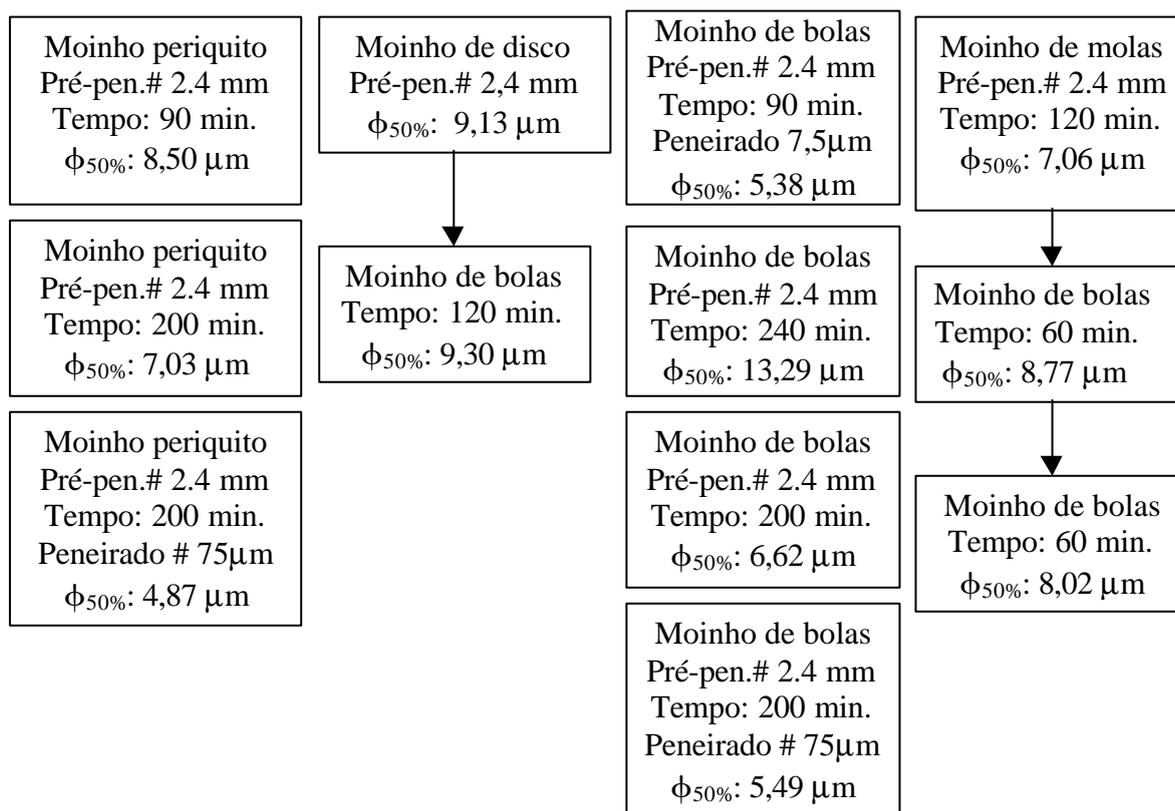


Figura A.3 Apresentação, de forma esquemática, das diversas moagens executadas.

Além das moagens apresentadas na figura A.3, foram realizadas outras tentativas, alterando-se o tempo de moagem, onde também não se obteve o resultado esperado. É interessante ressaltar que, em todos os processos de moagem, se observou no material

resultante uma má distribuição granulométrica, que se refletiu na sua curva granulométrica (colocadas no anexo B), o que levou a acreditar que a não obtenção dos resultados esperados, mesmo o material demonstrando ser aparentemente de fácil moagem, pode ser decorrente da falta de adequação do material aos moinhos utilizados.

Com relação à atividade pozolânica, esta foi realizada no material oriundo do seguinte processo: pré-peneiramento da peneira 2.4 mm, moagem no moinho de bolas por 200 minutos e posterior peneiramento na peneira 75 μ m. A opção por este material não deveu-se exclusivamente ao seu menor diâmetro médio em relação a maioria das tentativas de moagem, mas também a melhor distribuição dos grãos, obtida na curva granulométrica.

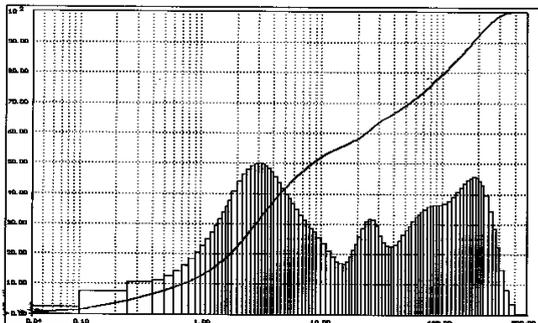
Na execução destes ensaios adotou-se a NBR 5751 (ABNT, 1992) e a NBR 5752 (ABNT, 1992), para a atividade pozolânica com a cal e com o cimento Portland, respectivamente, sendo colocado no anexo C, os quantitativo de materiais e os resultados de consistência e de resistência dos corpos-de-prova. Na tabela A.2 é realizada uma comparação dos resultados obtidos com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 1992), onde constata-se pouca atividade pozolânica por parte deste material, que pode ser creditado à possível falta de homogeneização no processo de calcinação que não promoveu uma amorfização total do material e a pouca eficiência da moagem, conforme visto anteriormente. Face a estes resultados, procurou-se outro material visando a obtenção do MCAR.

Tabela A.2 Atividade pozolânica do metacaulim proveniente de argila caulinítica.

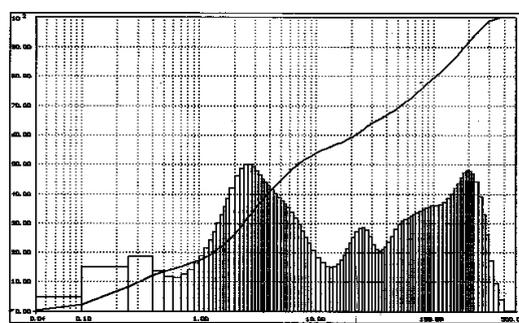
Ensaio	Norma	Idade	Valor obtido	Exigência normativa NBR 12653 (ABNT, 1992)
Atividade pozolânica com a cal	NBR 5751 (ABNT, 1992)	7 dias	8,3MPa	$\geq 6,0$ MPa
Atividade pozolânica com o cimento Portland	NBR 5752 (ABNT, 1992)	28 dias	74 %	≥ 75 %

ANEXO B - Apresentação das curvas granulométricas obtidas através dos diversos processos de moagem da argila calcinada.

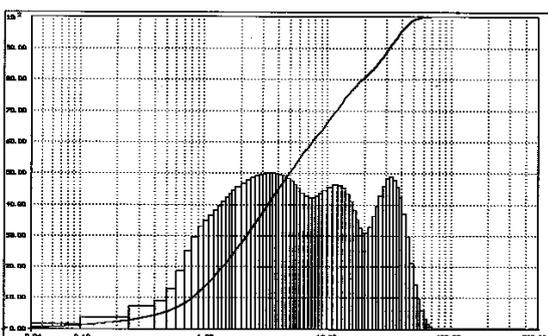
1. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm e moído por 90 minutos no moinho periquito.



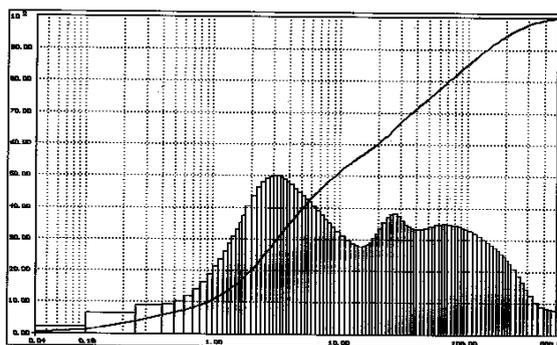
2. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm e moído por 200 minutos no moinho periquito.



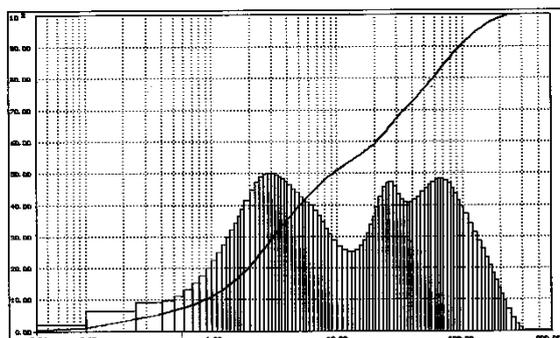
3. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm, moído por 200 minutos no moinho periquito e peneirado na peneira 7,5 µm.



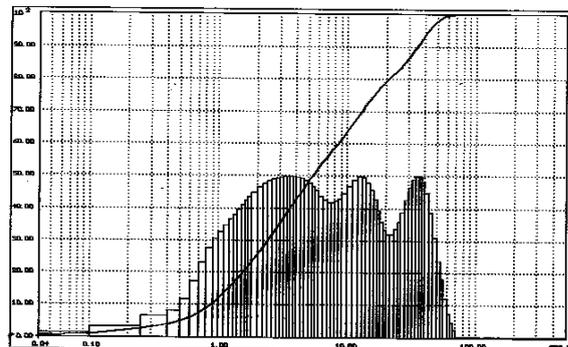
4. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm e moído no moinho de disco.



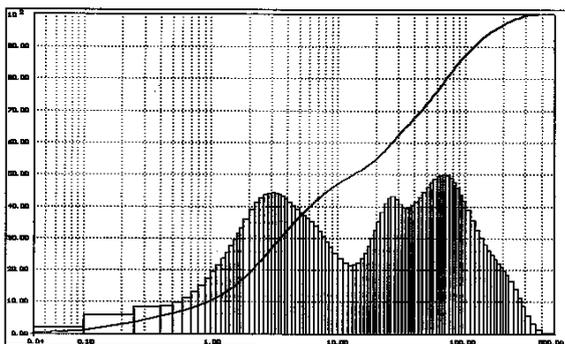
5. Material pré-peneirado 2.4 mm, moído no moinho de disco e por 120 minutos no moinho de bolas.



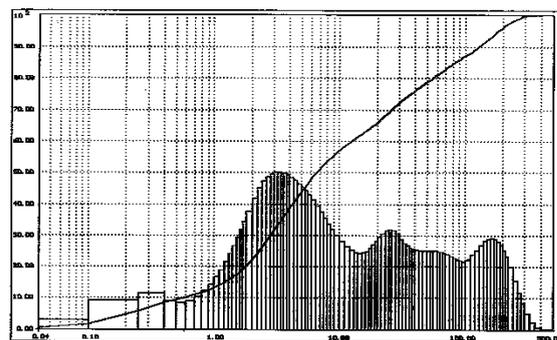
6. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm e moído por 90 minutos no moinho de bolas e peneirado na peneira 7,5 µm.



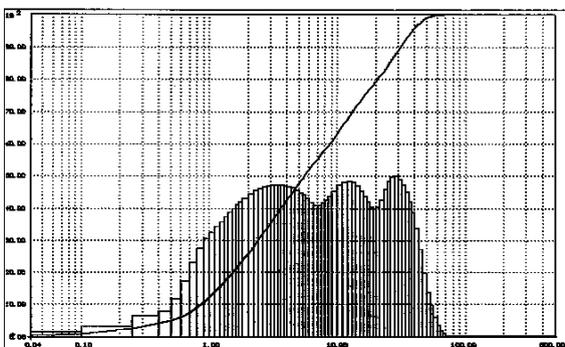
7. Material moído por 240 minutos no moinho de bolas.



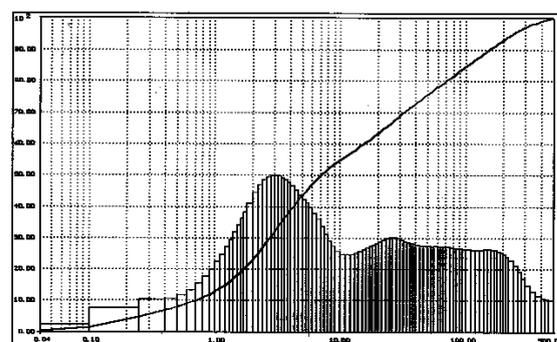
8. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm, moído por 200 minutos no moinho de bolas.



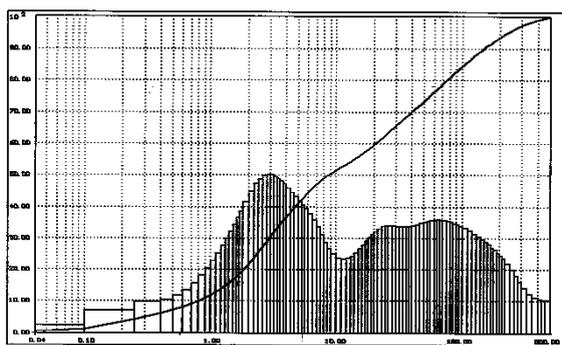
9. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm, moído por 200 minutos no moinho de bolas e peneirado na peneira 7,5 µm.



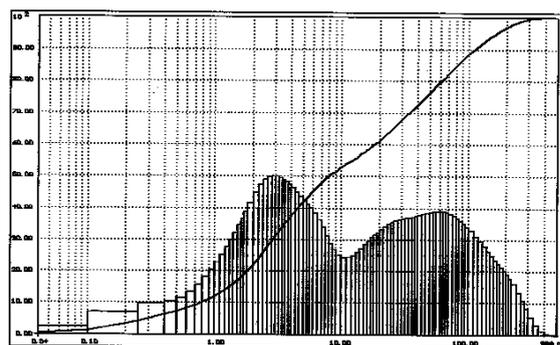
10. Material pré-peneirado na peneira 2.4 mm e moído por 120 minutos no moinho de molas.



11. Material moído por 120 minutos no moinho de molas e por 60 minutos no moinho de bolas.



12. Material moído por 120 minutos no moinho de molas e por 120 minutos no moinho de bolas.



ANEXO C - Apresentação da composição e dos resultados de resistência das argamassas usadas no ensaio de determinação da atividade pozolânica com o cimento portland de alta resistência inicial (ARI) e com a cal, do metacaulim proveniente da calcinação de argilas caulínicas.

Informações preliminares: M_{esp} do Metacaulim: 2,52 g/dm³

M_{esp} do cimento ARI: 3,07 g/dm³

M_{esp} da cal: 2,11 g/dm³

Consistência a ser obtida: 225 ± 5 mm.

Mistura	Quantidade de materiais* e relação água/aglomerante	Consistência (mm)				Resistência (MPa)	
		φ1	φ2	φ1-φ2	(φ1+φ2)/2	Valor obtido	Valor médio
Cal e Metacaulim	Cal: 104 g Metacaulim: 248,42 g Areia: 936 g Água: 253,74 g f a/c: 0,72	225,1	223,8	1,3	224,45	8,2 8,8 8,1 8,5 7,4 7,8	8,3
Cimento ARI e metacaulim	Cimento ARI: 202,8 g Metacaulim: 89,64 g Areia: 936 g Água: 172,54 g f a/c: 0,59	225,9	224,3	1,6	225,1	32,5 32,0 30,2 30,2 30,1 29,2	30,7
Cimento ARI	Cimento ARI: 312 g Areia: 936 g Água: 156 g f a/c: 0,50	229,4	228,6	0,8	229	37,9 45,1 40,8 42,2 41,8 41,9	41,7

* As quantidades dos materiais foram multiplicadas por dois visando a produção de 6 corpos-de-prova.

φ1 - Significa a primeira medida de escoamento da mesa de Graff.

φ2 - Significa a segunda medida de escoamento da mesa de Graff.

Os valores em negrito foram excluídos por resultarem num desvio relativo maior do que 6.

ANEXO D - Apresentação da composição e dos resultados de resistência das argamassas usadas no ensaio de determinação da atividade pozolânica com o cimento portland de alta resistência inicial (ARI) e com a cal, do metacaulim proveniente da calcinação do rejeito da indústria de papel.

Informações preliminares: M_{esp} do Metacaulim: 2,49 g/dm³

M_{esp} do cimento ARI: 3,07 g/dm³

M_{esp} da cal: 2,27 g/dm³

Consistência a ser obtida: 225 ± 5 mm.

Mistura	Quantidade de materiais* e relação água/aglomerante	Consistência (mm)				Resistência (MPa)	
		φ1	φ2	φ1-φ2	(φ1+φ2)/2	Valor obtido	Valor médio
Cal e Metacaulim	Cal: 104 g Metacaulim: 228,2 g Areia: 936 g Água: 279,05 g f a/c: 0,84	228,7	230	1,3	229,35	15,20 16,60 17,00 15,60 14,60 17,00	16,00
Cimento ARI	Cimento ARI: 312 g Areia: 936 g Água: 174,72 g f a/c: 0,56	220	224	4	222	30,60 26,60 26,70 28,10 25,50 30,40	26,7
Cimento ARI e metacaulim	Cimento ARI: 202,8 g Metacaulim: 88,57 g Areia: 936 g Água: 215,61g f a/c: 0,74	224	225	1	224,5	21,30 26,00 25,70 26,50 23,80 23,70	25,60
Cimento ARI e metacaulim, com aditivo superplast.	Cimento ARI: 202,8 g Metacaulim: 88,57 g Areia: 936 g Água: 163,17g f a/c: 0,56 Teor de aditivo:2,02 %	220	221	1	220,5	37,30 37,50 38,60 37,20 38,10 36,80	37,60

* As quantidades dos materiais foram multiplicadas por dois visando a produção de 6 corpos-de-prova.

φ1 - Significa a primeira medida de escoamento da mesa de Graff.

φ2 - Significa a segunda medida de escoamento da mesa de Graff.

Os valores em negrito foram excluídos por resultarem num desvio relativo maior do que 6.

ANEXO E - Valores obtidos para a resistência à compressão com o uso do modelo.

0% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	49,29	45,79	36,40	25,06	13,28
7 dias	65,08	59,14	48,47	36,90	25,09
14 dias	71,35	64,18	52,86	41,17	29,34
28 dias	74,36	66,45	54,74	42,98	31,14
91 dias	75,27	67,09	55,23	43,45	31,61
5% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	49,51	45,99	36,59	25,22	13,39
7 dias	66,87	60,92	50,23	38,63	26,78
14 dias	73,94	66,76	55,41	43,69	31,82
28 dias	77,42	69,51	57,77	45,98	34,10
91 dias	78,51	70,32	58,44	46,63	34,74
10% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	48,93	45,40	35,99	24,59	12,74
7 dias	67,86	61,91	51,20	39,58	27,69
14 dias	75,72	68,54	57,18	45,44	33,53
28 dias	79,69	71,76	60,01	48,20	36,29
91 dias	80,95	72,75	60,86	49,02	37,11
15% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	47,88	44,35	34,93	23,51	11,63
7 dias	68,39	62,43	51,71	40,07	28,16
14 dias	77,05	69,85	58,49	46,72	34,80
28 dias	81,49	73,56	61,80	49,97	38,03
91 dias	82,92	74,72	62,82	50,96	39,03
20% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	46,53	43,00	33,56	22,13	10,23
7 dias	68,61	62,65	51,92	40,26	28,33
14 dias	78,07	70,87	59,49	47,71	35,77
28 dias	82,98	75,05	63,28	51,43	39,48
91 dias	84,60	76,39	64,48	52,60	40,65

**ANEXO F - Valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral
com o uso do modelo.**

0% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	3,48	3,06	2,60	2,06	1,39
7 dias	4,33	3,92	3,45	2,90	2,23
14 dias	4,81	4,38	3,91	3,36	2,68
28 dias	5,15	4,73	4,25	3,69	3,00
91 dias	5,53	5,09	4,58	4,00	3,29
5% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	3,63	3,21	2,73	2,16	1,46
7 dias	4,49	4,06	3,58	3,01	2,30
14 dias	4,96	4,53	4,04	3,46	2,75
28 dias	5,31	4,87	4,38	3,79	3,07
91 dias	5,68	5,23	4,71	4,10	3,36
10% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	3,77	3,34	2,84	2,26	1,53
7 dias	4,63	4,19	3,70	3,10	2,37
14 dias	5,10	4,66	4,16	3,56	2,82
28 dias	5,45	5,01	4,49	3,88	3,14
91 dias	5,82	5,37	4,83	4,20	3,43
15% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	3,85	3,41	2,91	2,30	1,56
7 dias	4,74	4,31	3,80	3,19	2,44
14 dias	5,22	4,78	4,27	3,65	2,90
28 dias	5,57	5,13	4,60	3,98	3,21
91 dias	5,95	5,49	4,94	4,29	3,51
20% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	3,50	3,06	2,55	1,93	1,17
7 dias	4,78	4,33	3,82	3,19	2,43
14 dias	5,33	4,88	4,36	3,73	2,96
28 dias	5,69	5,24	4,70	4,07	3,29
91 dias	6,06	5,60	5,04	4,38	3,58

ANEXO G - Valores obtidos para a resistência à tração por flexão com o uso do modelo.

0% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	5,72	6,12	4,14	2,59	2,04
7 dias	7,92	8,25	6,10	4,30	3,43
14 dias	8,82	9,13	6,93	5,05	4,08
28 dias	9,22	9,53	7,32	5,41	4,41
91 dias	9,32	9,62	7,41	5,50	4,49
5% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	5,73	6,24	4,29	2,75	2,20
7 dias	7,96	8,40	6,29	4,49	3,62
14 dias	8,87	9,29	7,13	5,25	4,28
28 dias	9,28	9,69	7,52	5,61	4,61
91 dias	9,37	9,78	7,61	5,70	4,69
10% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	5,67	6,26	4,33	2,79	2,24
7 dias	7,97	8,50	6,41	4,61	3,74
14 dias	8,91	9,41	7,28	5,40	4,43
28 dias	9,33	9,83	7,68	5,77	4,77
91 dias	9,42	9,92	7,77	5,86	4,86
15% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	5,46	6,12	4,22	2,67	2,13
7 dias	7,94	8,53	6,46	4,66	3,79
14 dias	8,93	9,50	7,39	5,51	4,54
28 dias	9,38	9,94	7,81	5,90	4,90
91 dias	9,47	10,03	7,90	5,99	4,99
20% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	5,05	5,76	3,88	2,33	1,79
7 dias	7,83	8,47	6,42	4,63	3,76
14 dias	8,93	9,55	7,45	5,58	4,61
28 dias	9,41	10,03	7,91	6,01	5,01
91 dias	9,52	10,13	8,01	6,11	5,11

ANEXO H - Valores obtidos para o módulo de elasticidade com o uso do modelo.

0% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	36,5	35,2	32,2	26,8	16,5
7 dias	40,5	39,2	36,7	32,8	26,0
14 dias	42,0	40,8	38,5	35,0	29,4
28 dias	42,7	41,5	39,3	36,0	30,8
91 dias	42,9	41,7	39,4	36,2	31,1
5% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	32,4	31,1	28,1	22,7	12,4
7 dias	39,7	38,5	36,0	32,0	25,2
14 dias	42,6	41,4	39,1	35,6	30,0
28 dias	43,9	42,7	40,4	37,1	32,0
91 dias	44,1	43,0	40,7	37,4	32,3
10% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	32,5	31,1	28,1	22,7	12,4
7 dias	40,4	39,1	36,6	32,6	25,8
14 dias	43,5	42,3	39,9	36,5	30,8
28 dias	44,8	43,6	41,4	38,1	32,9
91 dias	45,1	43,9	41,7	38,4	33,3
15% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	33,0	31,7	28,7	23,3	13,0
7 dias	41,1	39,8	37,3	33,3	26,5
14 dias	44,2	43,0	40,7	37,2	31,6
28 dias	45,6	44,4	42,1	38,8	33,7
91 dias	45,9	44,7	42,5	39,2	34,1
20% de MCAR					
Idade	0,25	0,28	0,35	0,46	0,60
1 dia	33,6	32,3	29,3	23,8	13,5
7 dias	41,7	40,5	38,0	34,0	27,1
14 dias	44,9	43,7	41,4	37,9	32,2
28 dias	46,3	45,1	42,8	39,5	34,3
91 dias	46,6	45,4	43,1	39,9	34,7