

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE ADIÇÕES MINERAIS PARA A
PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

*Aluna: Karoline Alves de Melo Moraes
Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Co-Orientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima*

Recife, 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

OTIMIZAÇÃO DO USO DE ADIÇÕES MINERAIS PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Karoline Alves de Melo Moraes

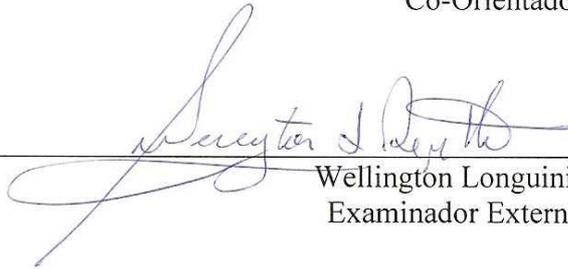
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO
PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU
DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL



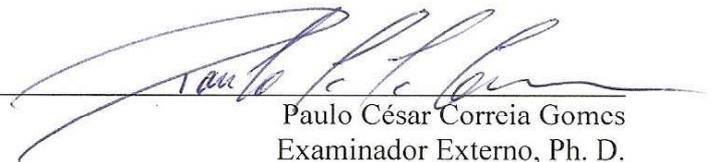
Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Orientador, D. Sc.



Flávio Barboza de Lima
Co-Orientador, D. Sc.



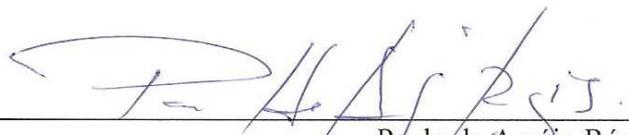
Wellington Longuini Repette
Examinador Externo, D. Sc.



Paulo César Correia Gomes
Examinador Externo, Ph. D.



Antônio Acácio de Melo Neto
Examinador Externo, D. Sc.



Paulo de Araújo Régis
Examinador Interno, D. Sc.

Recife, julho de 2010

M827o Moraes, Karoline Alves de Melo.
Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável / Karoline Alves de Melo Moraes. - Recife: O Autor, 2010.
210 folhas, il : figs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Inclui Bibliografia e Apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Adições Minerais. 3. Dosagem. 4. Concreto Auto-Adensável. I. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2010-172

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha filha, Maria, ao meu esposo, Joaquim, e aos meus pais, Renilda e José Alves.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em engenharia Civil da UFPE, área de Estruturas, pela aceitação para participar do curso de Doutorado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas – FAPEAL, pela bolsa de estudos concedida durante parte deste Doutorado.

Ao Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, orientador deste trabalho, pela paciência que teve nas diversas fases vividas ao longo deste Doutorado, pela confiança e estímulo, pelos ensinamentos sobre os diversos aspectos da carreira acadêmica, por me permitir desenvolver esta pesquisa dando-me o apoio logístico e intelectual necessário.

Ao Prof. Flávio Barboza de Lima, co-orientador, pelo incentivo e apoio não só durante o Doutorado, mas ao longo de toda a minha formação acadêmica e, mais recentemente, profissional.

A Polimix, na pessoa do Eng. Oscar Buarque, pela doação do cimento CP V ARI RS.

A Cimento Poty, na pessoa do Eng. Eduardo Godoy, pela doação do cimento CP II Z.

A Grace do Brasil, nas pessoas dos Engs. Patrick Dal Molin e Otto Mascarenhas, pela doação dos aditivos.

A Caulim do Nordeste, na pessoa do Eng. Amadeo Romaguera, pela doação e moagem do metacaulim e do filer calcário.

A Pedreira Guarani, na pessoa do Eng. Virgílio Carlos Marinho, pela doação dos agregados.

Ao Prof. Carlos Baltar do Laboratório de Química de Interfaces/Grupo de Tecnologia Mineral/Departamento de Engenharia de Minas/UFPE pela disponibilização de pessoal e equipamentos para a realização de ensaios. Ao técnico Marcelo Khan, pela realização dos ensaios de granulometria a laser e à Eng.^a Leila Baltar, pela realização dos ensaios de potencial zeta.

Ao Prof. Pedro Guzzo do Laboratório de Metalurgia Extrativa/Grupo de Tecnologia Mineral/Departamento de Engenharia de Minas/UFPE e ao técnico Renato, pela realização dos ensaios de ATD e ATG.

À Prof.^a Valderez do Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE)/Departamento de Geologia/UFPE, pela realização de ensaios de Fluorescência de raios-X.

Ao Prof. Gorki Mariano, pela realização das imagens obtidas na lupa, e à Prof.^a Alcina Barreto, pela disponibilização do Laboratório de Paleontologia/Departamento de Geologia/UFPE para estas análises.

Ao técnico João Carlos do Laboratório de Raio-X/Departamento de Física/UFPE, pela realização dos ensaios de DRX.

Ao Prof. Rômulo Simões Angélica do Instituto de Geociências/UFPA, pela realização de ensaios de ATD, ATG, DRX e MEV.

Ao Eng. Ednaldo José do Amaral do Laboratório de Construção Civil/ITEP, pelo intermédio na realização dos ensaios de Blaine e BET. Ao técnico Sebastião pela realização dos ensaios de Blaine, e ao Eng. Osmar Baraúna, pelos ensaios de BET.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais da UFPE, Ezequiel Muniz de Siqueira e João Maria Cazuza da Rocha, pelo apoio na realização dos ensaios no laboratório, ajudando-me a resolver os problemas do dia-a-dia e participando nos momentos de maior dificuldade.

À secretária do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE, Andréa Negromonte, pela eficiência e tranquilidade na condução das questões administrativas.

Aos professores Wellington Longuini Repette, Paulo César Correia Gomes, Antônio Acácio de Melo Neto e Paulo de Araújo Régis, por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação, Francisco Daniel, Naasson Azevedo, José Roberto, Marcos Lacerda, Lúcio Max, Ângela Hadade, Adelson Prado, Simone, Elaine Rocha e Marília, com quem pude conviver e partilhar disciplinas, ensaios no laboratório e conversas. Em especial à amiga Leila Magalhães Baltar, pela ajuda em muitos momentos, pelo exemplo de dedicação, compromisso e zelo no desenvolvimento das atividades, pelo companheirismo.

Aos bolsistas Anderson Andrade, Eguinaldo Marques e Mailson Queiroz, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho experimental em parte da pesquisa. À amiga e bolsista Marylinda Santos de França, pelo auxílio na realização dos ensaios de reologia e pela disponibilidade em me socorrer em tantas outras atividades, pelos momentos de partilha que tivemos.

Aos meus pais, José Alves e Renilda, que sempre participaram em todos os momentos da minha vida, me incentivando e dando-me o apoio necessário e o repouso seguro na hora da agonia. Por me ensinarem valores pessoais e profissionais, como ética, honestidade, respeito e dedicação. Pelo imenso apoio nos momentos de ausência, ajudando-me no cuidado com a minha filha, sem o qual eu não poderia chegar até aqui.

Ao meu esposo Joaquim, pelo incentivo incondicional, pelo apoio em todas as horas, pela paciência nos momentos de ausência, pelo braço forte nas dificuldades, por ser um grande companheiro, amigo, esposo e pai. Sem a tua presença tranquila, esta conquista teria sido muito mais difícil.

Ao meu irmão Kléber, meus avós José Soares e Olívia, aos tios, sogros, cunhadas e sobrinhos, pela compreensão nos momentos de ausência, pela torcida e colaboração nos momentos de dificuldade.

Às amigas Patrícia Breda, Janaína Braz, Jaqueline Lopes, Janeilda Costa, Cássia, Roana Beltrão, Christiane Fernandes, Laura Maravilha, Fernanda Simião, pela convivência, companheirismo e partilha ao longo dos três primeiros anos de Doutorado.

À amiga Noraneje Acioli pela acolhida e hospedagem na fase final de desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos do Ministério Universidades Renovadas – MUR, com os quais, através dos Grupos de Oração Universitários, pude alimentar a minha fé e levar a presença e o amor de Jesus para o ambiente acadêmico.

Aos amigos do Grupo Água Viva, pelos momentos de partilha e vivência da fé, não me deixando distanciar da presença de Deus, pelos grupos de oração e missas. Em especial ao grande amigo Guilherme Peplau, com quem pude dividir diversos momentos não só na vivência acadêmica, mas também na vida pessoal, estendo-se às nossas famílias.

Ao Prof. Jaime Cabral, pelos ensinamentos passados, especialmente na vida espiritual e acadêmica, pelo exemplo de profissional e evangelizador.

A Deus, autor de todas as coisas, princípio e fim de tudo, mestre da vida e meu Senhor. Pelos dons que derramastes sobre mim durante todo este tempo de Doutorado, permitindo-me desenvolver este trabalho, superando minhas limitações e dores encontradas ao longo desta caminhada. A ti, honra e glória, para sempre!

“Se o grão de trigo, caído na terra, não morrer, fica só; se morrer, produz muito fruto.”
(Jo, 12, 24)

RESUMO

O concreto auto-adensável é um material capaz de se espalhar pelas formas sob ação do seu peso próprio, dispensando, assim, a necessidade de adensamento. Para que a sua obtenção seja possível, este concreto requer um procedimento de produção diferenciado quando comparado ao concreto convencional. Neste sentido, destaca-se o emprego de grande quantidade de materiais finos, que são constituídos pelo cimento e adições minerais, além de menor consumo de agregados, e uso de aditivo superplastificante. Os finos garantem a estabilidade da mistura, mantendo sua viscosidade num nível adequado para evitar-se a segregação, além de atuarem no preenchimento dos vazios entre as partículas maiores dos agregados, promovendo maior compacidade. A capacidade de atuação das adições minerais está relacionada às suas propriedades físicas, como forma e superfície específica, e químicas – reatividade, carga de superfície. Observa-se, no entanto, que a escolha do tipo e teor de adições na produção do concreto auto-adensável se dá a partir da experiência e disponibilidade do material, não sendo feita uma análise de suas características. Assim, o presente trabalho propõe a otimização da dosagem do concreto auto-adensável a partir da análise das propriedades de dois tipos de adição – metacaulim e fíler calcário, cada um em duas classes de finura, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% de substituição à massa de cimento. Foram empregados cimento do tipo CP V ARI RS e aditivo superplastificante de base policarboxilatos. O cimento, as adições e as composições entre estes materiais foram caracterizados por meio de granulometria a laser, DRX, ATD, ATG, massa unitária, imagens em lupa e MEV, demanda de água e potencial zeta. Os agregados foram utilizados formando uma composição granulométrica entre areia e pedras britadas de dimensão máxima de 9,5 mm e 19 mm. Para a produção das misturas – pastas e concretos, variou-se a relação água/aglomerante em 0,4, 0,5 e 0,6. Nas pastas foram realizados os ensaios de Cone de Marsh e mini-slump para determinação do teor de saturação do aditivo, selecionando-se as misturas para a produção dos concretos, além da determinação das propriedades reológicas – viscosidade e tensão de escoamento. Os concretos foram ensaiados quanto ao espalhamento e Funil-V, ajustando-se o teor de aditivo, e resistência à compressão aos 28 e 90 dias. Foram obtidas relações entre as fases de pasta e concreto, procurando-se relacionar o comportamento das misturas com as propriedades dos finos. Verificou-se intensa relação entre o grau de aglomeração ou de dispersão das partículas das adições e as propriedades das misturas, especialmente no que diz respeito à coesão. As misturas com metacaulim apresentaram excelente coesão, observando um efeito significativo da superfície específica. No caso do fíler calcário, menor desempenho quanto à coesão foi observado, com pequenas variações em termos de superfície específica. Variações com relação ao tipo, superfície específica e teor das adições resultaram em misturas com diferentes características em função da relação água/finos. Ao final, foram propostos parâmetros de dosagem para pastas e concretos, além de um procedimento para otimização do uso das adições minerais, tendo em vista a obtenção de concretos com melhor desempenho quanto às características de auto-adensabilidade.

Palavras chave: adições minerais, dosagem, concreto auto-adensável

ABSTRACT

Self-compacting concrete is a material that spreads on the formworks under own weight, without the need of vibration. For enable its production this concrete needs a mix design method different from that applied for conventional concrete. This concrete is characterized by the employment of great amount of fine materials, that are constituted by the cement and mineral admixtures, besides smaller consumption of gravel and the use of superplasticizer. The fine materials guarantee the stability of the mixture, maintaining its viscosity at an appropriate level to avoid segregation, besides to fill the voids among the larger particles of the aggregates, enhancing the compactness. The performance of the mineral admixtures is related to your physical properties, as form and fineness, and chemical properties - activity, surface charges. Its noticed, however, that the choice of type and content of mineral admixtures for the self-compacting concrete production is given from the experience and availability of the material, and it isn't made through the analysis of its characteristics. So, present work proposes the optimization of self-compacting concrete mix design, from the analysis of the properties of two mineral admixtures - metakaolin and limestone filler, each one in two classes of fineness, at replacement ratios to cement mass of 5%, 10%, 15% and 20%. Portland cement type CP V ARI RS, and a polycarboxylate based superplasticizer were used. The cement, the mineral admixtures and the compositions among these materials were analyzed through laser technique for grain size distribution, XRD, TDA, TGA, unit weight at the loosely filled state, images (SEM), water demand and zeta potential. The aggregates were used forming a grade composition among the sand and gravel with maximum dimension of 9.5 mm and 19 mm. For the mixtures production - pastes and concretes, the water/binder ratio was of 0.4, 0.5 and 0.6. In the pastes, the Marsh Cone and mini-slump tests were developed for the determination of saturation point of the superplasticizer, selecting the mixtures for production of the concretes, besides the determination of the rheological properties - viscosity and yield stress. The concretes were evaluated through Slump flow and V-Funnel tests, with the superplasticizer content adjustment, besides this, it was verified the compressive strength at 28 and 90 days. Relationships between the paste and concrete phases were obtained, trying to link the behavior of the mixtures with the properties of the fine materials. Intense relationship was verified among the agglomeration or dispersion states of the particles of the fines and the properties of the mixtures, especially in terms of cohesion. The mixtures with metakaolin presented excellent cohesion, observing a significant effect of the fineness. In the case of the limestone filler, it was observed smaller acting in cohesion, with small variations in terms of fineness. Variations on type, fineness and content of the mineral admixtures resulted in different characteristics of the mixtures in function of the water/binder value. At the end, mixture design parameters were proposed for pastes and concretes, and a procedure for optimization of the use of mineral admixtures, to obtaining concretes with better performance of self-compactability properties.

Keywords: mineral admixtures, mix design, self-compacting concrete

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Teoria do excesso de pasta (BUI et al., 2002) – Dss: distância interpartícula; Dav: diâmetro do agregado.....	46
Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada no trabalho	55
Figura 3 – Modelo da Dupla Camada Elétrica (Adaptado de HASPARYK, 2005)	63
Figura 4 – Evolução do potencial zeta do C-S-H e pH em função da concentração de cálcio (VIALIS-TERRISSE et al., 2001)	65
Figura 5 – Diferentes condições de compacidade no ensaio de Demanda de água (FORMAGINI, 2005).....	66
Figura 6 – Produção das pastas em argamassadeira.....	69
Figura 7 – Equipamentos empregados nos ensaios em pasta	70
Figura 8 – Exemplo de curvas para definição do ponto de saturação (PS) do aditivo.....	72
Figura 9 – Ensaio de reologia das pastas	73
Figura 10 – Produção do CAA.....	74
Figura 11 – Ensaio no CAA: (a) Funil-V; (b) Espalhamento	75
Figura 12 – Distribuição granulométrica do cimento.....	79
Figura 13 – Imagem do cimento obtida através de lupa (35x).....	79
Figura 14 – Distribuição granulométrica dos finos	81
Figura 15 – Distribuição granulométrica das adições grossas na faixa acima de 0,075 mm.....	81
Figura 16 – Imagens das adições obtidas na lupa binocular.....	84
Figura 17 – Análise Termodiferencial do metacaulim fino.....	86
Figura 18 – Análise Termodiferencial do metacaulim grosso	87
Figura 19 – Análise Termodiferencial do calcário fino	87
Figura 20 – Análise Termodiferencial do calcário grosso.....	88
Figura 21 – Análise Termogravimétrica do metacaulim fino.....	88
Figura 22 – Análise Termogravimétrica do metacaulim grosso.....	89
Figura 23 – Análise Termogravimétrica do calcário fino	89
Figura 24 – Análise Termogravimétrica do calcário grosso	90
Figura 25 – Difratoograma do metacaulim fino	91
Figura 26 – Difratoograma do metacaulim grosso	91
Figura 27 – Difratoograma do calcário fino.....	92
Figura 28 – Difratoograma do calcário grosso.....	92
Figura 29 – Imagens das composições cimento x adição	94
Figura 30 – Massas unitárias das composições de cimento com adições	95
Figura 31 – Potencial zeta das misturas de cimento + adição.....	98
Figura 32 – Exemplo de aglomeração de partículas de sílica ativa devido ao efeito dos íons de cálcio (Adaptado de FORMAGINI, 2005).....	99
Figura 33 – Compacidade das composições sem aditivo	101
Figura 34 – Distribuição granulométrica dos agregados	103
Figura 35 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MF-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%	104
Figura 36 – Aspecto das pastas: (a) ocorrência de segregação e exsudação com concentração dos grãos maiores (MG) no centro; (b) pasta com boa coesão no espalhamento; (c) escoamento contínuo no Cone de Marsh.....	107
Figura 37 – Ponto de saturação das pastas com metacaulim.....	107
Figura 38 – Ponto de saturação das pastas com calcário	108

Figura 39 – Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento da pasta 5%-MF-0,4	112
Figura 40 – Tensão de escoamento <i>versus</i> teor de adição das pastas	114
Figura 41 – Tensão de escoamento <i>versus</i> relação água/finos das pastas com metacaulim MF	114
Figura 42 – Tensão de escoamento <i>versus</i> relação água/finos das pastas com filer calcário CF.....	115
Figura 43 – Viscosidade <i>versus</i> teor de adição das pastas.....	115
Figura 44 – Tempo de escoamento no cone <i>versus</i> tensão de escoamento das pastas.....	117
Figura 45 – Tensão de escoamento <i>versus</i> teor de saturação do aditivo	118
Figura 46 – Espalhamento e tempo de escoamento dos concretos	122
Figura 47 – Distribuição dos agregados no ensaio de espalhamento – ausência de segregação	123
Figura 48 – Teor de adição <i>versus</i> tempo de escoamento nos concretos com metacaulim	124
Figura 49 – Teor de adição <i>versus</i> tempo de escoamento nos concretos com filer calcário	124
Figura 50 – Relação água/finos <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V	126
Figura 51 – Relação água/finos <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V para concretos com metacaulim	126
Figura 52 – Relação água/finos <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V para concretos com filer calcário.....	127
Figura 53 – Teor de aditivo <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V	128
Figura 54 – Teor de aditivo <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V para concretos com metacaulim	128
Figura 55 – Teor de aditivo <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V para concretos com filer calcário.....	129
Figura 56 – Tipo e teor de adição <i>versus</i> tempo de escoamento no Funil-V.....	130
Figura 57 – Teor de aditivo nos concretos com relação água/finos 0,5.....	131
Figura 58 – Teor de aditivo nos concretos com metacaulim MF.....	133
Figura 59 – Teor de aditivo nos concretos e nas pastas.....	134
Figura 60 – Tempo de escoamento nos concretos e nas pastas.....	135
Figura 61 – Espalhamento nos concretos e nas pastas	137
Figura 62 – Tempo de escoamento dos concretos <i>versus</i> tensão de escoamento das pastas para cada adição	139
Figura 63 – Tensão de escoamento das pastas <i>versus</i> teor de aditivo dos concretos para cada adição	139
Figura 64 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com MF.....	142
Figura 65 – Resistência à compressão aos 90 dias para concretos com MF.....	142
Figura 66 – Resistência à compressão aos 28 dias <i>versus</i> teor de adição para água/finos 0,5	143
Figura 67 – Resistência à compressão aos 90 dias <i>versus</i> teor de adição para água/finos 0,5	143
Figura 68 – Curvas de tendência para as relações das pastas	151
Figura 69 – Curvas de tendência para as relações dos concretos.....	152
Figura 70 – Fluxograma do procedimento para otimização do uso das adições minerais	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variabilidade do ensaio do Cone de Marsh.....	71
Tabela 2 – Características do cimento CP V ARI RS.....	78
Tabela 3 – Massas específicas das adições minerais	80
Tabela 4 – Diâmetros das partículas dos finos.....	82
Tabela 5 – Superfície específica dos finos.....	83
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de ATD e ATG	90
Tabela 7 – Massas unitárias dos finos.....	95
Tabela 8 – Massas unitárias das composições cimento x adição	95
Tabela 9 – Influência das adições na massa unitária das composições - ANOVA.....	97
Tabela 10 – Influência das adições no potencial zeta das composições - ANOVA.....	100
Tabela 11 – Compacidades das adições	100
Tabela 12 – Influência das adições na compactidade das composições - ANOVA.....	102
Tabela 13 – Caracterização dos agregados.....	103
Tabela 14 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios nas pastas com metacaulim MF	105
Tabela 15 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios nas pastas com metacaulim MG.....	105
Tabela 16 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios para as pastas com fíler calcário CF	105
Tabela 17 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios para as pastas com fíler calcário CG.....	105
Tabela 18 – Influência das adições no teor de aditivo das pastas - ANOVA.....	109
Tabela 19 – Influência das adições no tempo de escoamento das pastas - ANOVA	110
Tabela 20 – Influência das adições no espalhamento das pastas - ANOVA.....	111
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de reologia nas pastas com metacaulim MF	112
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de reologia nas pastas com fíler calcário CF.....	112
Tabela 23 – Influência das adições na tensão de escoamento das pastas - ANOVA.....	116
Tabela 24 – Influência das adições na viscosidade das pastas - ANOVA	116
Tabela 25 – Ensaio do concreto no estado fresco para o MF	120
Tabela 26 – Ensaio do concreto no estado fresco para o MG	120
Tabela 27 – Ensaio do concreto no estado fresco para o CF	121
Tabela 28 – Ensaio do concreto no estado fresco para o CG	121
Tabela 29 – Zonas de coesão dos concretos	123
Tabela 30 – Influência das adições no tempo de escoamento dos concretos - ANOVA ..	125
Tabela 31 – Influência das adições no teor de aditivo dos concretos - ANOVA	130
Tabela 32 – Influência das adições no tempo de escoamento dos concretos com água/finos = 0,5 - ANOVA.....	131
Tabela 33 - Influência das adições no teor de aditivo dos concretos com água/finos = 0,5 - ANOVA.....	132
Tabela 34 – Características das misturas em função do tempo de escoamento	136
Tabela 35 – Características das misturas em função do espalhamento.....	137
Tabela 36 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o MF	140
Tabela 37 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o MG.....	140
Tabela 38 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o CF	141
Tabela 39 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o CG	141
Tabela 40 - Influência das adições na resistência à compressão aos 28 dias - ANOVA ..	144
Tabela 41 – Influência das adições na resistência à compressão aos 90 dias - ANOVA ..	145

Tabela 42 – Consumos dos materiais nas misturas com metacaulim	146
Tabela 43 – Consumos dos materiais nas misturas com filer calcário.....	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre os métodos de dosagem do CAA	29
Quadro 2 – Exemplos de aplicação das adições minerais na produção do CAA	43
Quadro 3 – Matriz de concretos	119
Quadro 4 – Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura (Adaptado de MELO, 2005).....	147

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Hipóteses	19
1.4 Metas	20
2 O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL	21
2.1 Características gerais do CAA	22
2.2 Dosagem do CAA	25
2.2.1 Método de Okamura.....	26
2.2.2 Método de Gomes.....	26
2.2.3 Método Repette-Melo	27
2.2.4 Modelo de Empacotamento Compressível – LCPC.....	27
2.2.5 Critério de Bloqueio e Critério da Fase Líquida	28
2.3 Materiais para a produção do CAA	29
2.3.1 Adições	31
2.3.1.1 Metacaulim	34
2.3.1.2 Filer calcário	36
2.3.1.3 Outras adições.....	37
2.3.1.4 Efeito das adições no CAA.....	39
2.3.1.5 Utilização das adições no CAA	41
2.3.2 Agregados	45
2.3.3 Composição granulométrica	47
3 ESTUDO EXPERIMENTAL	51
3.1 Etapa 1 – Estudo Piloto	51
3.2 Etapa 2 – Desenvolvimento experimental da tese	53
3.2.1 Seleção e caracterização dos materiais	56
3.2.1.1 Cimento.....	56
3.2.1.2 Adições minerais.....	57
3.2.1.2.1 <i>Granulometria</i>	57
3.2.1.2.2 <i>Superfície específica</i>	58
3.2.1.2.3 <i>Avaliação visual de imagens</i>	58
3.2.1.2.4 <i>Análises térmicas</i>	59
3.2.1.2.5 <i>Difração de raios-X</i>	60
3.2.1.3 Composições entre os finos	61
3.2.1.3.1 <i>Avaliação visual de imagens</i>	61
3.2.1.3.2 <i>Massa unitária</i>	61
3.2.1.3.3 <i>Potencial zeta</i>	62
3.2.1.3.4 <i>Demanda de água</i>	66
3.2.1.4 Agregados	67
3.2.1.5 Aditivo	68
3.2.2 Estudo das pastas para a produção do CAA	68
3.2.2.1 Teor de saturação do aditivo	70
3.2.2.2 Reologia.....	72
3.2.3 Produção do CAA	73
3.2.4 Análise estatística	76

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	78
4.1 Caracterização dos finos	78
4.1.1 Cimento.....	78
4.1.2 Adições minerais	80
4.1.2.1 Granulometria	80
4.1.2.2 Superfície específica	83
4.1.2.3 Avaliação visual de imagens.....	84
4.1.2.4 Análises térmicas	86
4.1.2.5 Difração de raios-X.....	91
4.1.3 Composições entre os finos.....	93
4.1.3.1 Avaliação visual de imagens.....	93
4.1.3.2 Massa unitária	95
4.1.3.3 Potencial zeta	97
4.1.3.4 Demanda de água.....	100
4.1.4 Agregados	102
4.2 Estudo das pastas para a produção do CAA.....	104
4.2.1 Teor de saturação do aditivo.....	104
4.2.2 Reologia.....	111
4.3 Produção do CAA	119
4.3.1 Propriedades do estado fresco	120
4.3.2 Relação pasta x concreto	133
4.3.3 Propriedades do estado endurecido	140
4.3.4 Consumos dos materiais	145
4.4 Conclusões	148
4.5 Curvas de tendência.....	150
4.6 Proposições para a dosagem do CAA	152
4.6.1 Características das pastas	153
4.6.2 Características dos concretos.....	153
4.6.3 Características das adições	153
4.7 Procedimento para a otimização do uso das adições	154
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
5.1 Conclusões	156
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
APÊNDICE A – MÉTODOS DE ENSAIO PARA O CAA	171
APÊNDICE B – ESTUDO PILOTO	176
APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO.....	196
APÊNDICE D – CURVAS DE TEOR DE SATURAÇÃO DO ADITIVO NAS PASTAS	204
.....	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O concreto auto-adensável teve origem no Japão, diante da ocorrência de defeitos nas estruturas, ocasionados, principalmente, pela má homogeneização, de modo que falhas de concretagem eram observadas em decorrência da deficiência do processo de adensamento, comprometendo a qualidade das edificações (NUNES, 2001). Um dos fatores responsáveis pelo surgimento destes problemas é a grande quantidade de armaduras utilizadas para suportar os abalos sísmicos freqüentes na região. Isto comprometia o adensamento do concreto, tendo em vista os obstáculos provocados pela malha de barras de aço.

Diante deste quadro, percebeu-se a necessidade de se eliminar o adensamento, a partir do desenvolvimento de um concreto capaz de se espalhar por todos os espaços da forma sem a ajuda de uma força externa (OKAMURA, 1997). Nisto consiste o concreto auto-adensável. Para que o concreto apresente tal capacidade de espalhamento, é necessário que possua elevada fluidez ou deformabilidade. Além disso, a mistura deve apresentar adequada resistência à segregação e resistência ao bloqueio (GOMES, 2002).

A produção do concreto auto-adensável só é possível graças aos importantes avanços ocorridos na indústria dos materiais de construção, com o surgimento de componentes como os aditivos químicos (AÏTCIN, 2000). Os aditivos redutores de água, os chamados plastificantes e superplastificantes, são indispensáveis para a produção do concreto auto-adensável, pois garantem o aumento da fluidez do material.

Alguns requisitos de dosagem e escolha dos materiais são importantes para se alcançar todas as propriedades requeridas para este concreto. Há necessidade de maior quantidade de material de granulometria fina, que pode ser composto por cimento e adições minerais, cuja ação está no aumento da viscosidade e, conseqüentemente, da estabilidade da mistura, além de promover melhor preenchimento dos vazios entre os grãos maiores. Outro fator importante é a redução da fração referente aos agregados, especialmente em relação ao agregado graúdo, de forma que seja reduzido o risco de ocorrer segregação e/ou bloqueio (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Com a finalidade de se conseguir as propriedades citadas, os primeiros métodos de dosagem desenvolvidos tinham como premissa a utilização de um elevado volume de pasta como forma de garantir o sucesso da mistura. No entanto, esta medida levava ao consumo de grande quantidade de cimento e adições, tendo, por conseguinte, alto custo e comprometimento de outras propriedades como retração, fissuração, entre outras. A resistência à compressão também não era levada em consideração, e atingia sempre um valor alto devido às baixas relações água/cimento empregadas (MELO, 2005).

Diante desta deficiência, com o avanço nos estudos relacionados ao concreto auto-adensável, outros métodos de dosagem têm surgido tendo como filosofia a utilização do volume mínimo de pasta, necessário para preencher os vazios entre os agregados e envolver suas partículas, sem comprometimento da fluidez. Estes métodos se baseiam na otimização da fase de agregado, através do uso de composições granulométricas ajustadas com o intuito de se atingir o menor teor de vazios possível.

Diversos estudos estão sendo desenvolvidos no sentido de se propor modelos capazes de determinar composições granulométricas ideais dos sólidos existentes no concreto auto-adensável. Dentre eles pode-se citar a determinação do Fator de empacotamento citado por Brouwers e Radix (2005); o cálculo do teor de vazios a partir da densidade de empacotamento das partículas defendido por Kwan e Mora (2001). Além disso, Yahia et al. (2005) propõem a determinação do espaço livre existente entre as partículas dos agregados, o qual irá determinar o volume adequado de finos que deve ser incorporado, garantindo a obtenção de misturas com granulometria otimizada.

Segundo Domone (2006), em uma análise dos diversos estudos realizados em concreto auto-adensável desde o seu surgimento, um dos fatores que precisa ser melhorado é a redução do teor de finos. Nos trabalhos investigados pelo autor, os teores empregados variaram de 410 a 607 kg/m³. Estes teores elevados podem ocasionar problemas como fissuração e retração, devido ao maior consumo de água por parte dos materiais finos (NASVIK, 2003). Por outro lado, quando o teor de finos na mistura é reduzido, pode haver tendência à segregação e exsudação. Para que o concreto continue mantendo sua estabilidade e homogeneidade, uma importante ferramenta é a utilização de aditivo promotor de viscosidade. O uso deste aditivo, por sua vez, deve ser analisado em função da sua viabilidade técnica e financeira.

Outro ponto importante está relacionado à forma de utilização dos finos nas misturas. A maior parte dos estudos aponta para o emprego das adições minerais em substituição parcial ao cimento, constituindo a parcela dos finos, podendo-se citar Patel et al. (2004), Zhu e Gibbs

(2005). Outros autores, como Hwang e Hung (2005) e Moosberg-Bustnes et al. (2004) têm levantado a investigação do uso das adições no ajuste da composição granulométrica dos agregados.

A busca de misturas com menor consumo de pasta e, por conseguinte, menor custo e menor utilização de finos, é um dos fatores que merecem destaque nas investigações acerca do CAA. Este consumo mínimo de pasta pode ser obtido a partir do estudo de uma composição compacta entre os agregados, de modo a reduzir os espaços que precisam ser preenchidos pela pasta, sem comprometer o desempenho do concreto, tanto no estado fresco como em relação às propriedades mecânicas e de durabilidade.

Após a definição de um esqueleto granular é importante avaliar-se, então, a adequada composição da pasta, tendo em vista que é esta fase que irá governar as propriedades reológicas do concreto, as quais possuem grande importância em misturas com características fluidas. Na pasta, por sua vez, observa-se grande influência da fração de finos, os quais irão participar intensamente na manutenção da estabilidade do CAA, frente à tendência de segregação sofrida por este material. Neste sentido, aponta-se a importância de se investigar a atuação das adições minerais na composição do concreto, considerando-se a variabilidade de tipos e propriedades, sejam elas físicas ou químicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho segue uma linha de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC/UFPE) – Área de concentração Estruturas, com estudos em concreto auto-adensável. Pode-se destacar o trabalho desenvolvido por Araújo (2003) em parceria com a Universidade Federal da Paraíba – UFPE, em que se apresentou um apanhado geral com relação às características e aos métodos de obtenção do CAA, procedendo-se à produção de misturas com pó calcário e com resíduo de tijolos moídos, com a realização de ensaios em pasta, argamassa e concreto. Outro trabalho desenvolvido teve como pressuposto o uso de metacaulim e pó de pedra como adições

minerais, mostrando-se a viabilidade da utilização destes materiais para a produção de concreto auto-adensável (MENEZES, 2006). Assim, busca-se dar continuidade à esta linha de pesquisa, apresentando-se o trabalho aqui desenvolvido, que tem como objetivo principal: Propor procedimentos para a otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável, a partir da variação do tipo, do teor e da superfície específica destes materiais, tendo em vista a garantia de adequado desempenho do concreto no estado fresco.

1.2.2 Objetivos específicos

O objetivo geral será alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

- Análise das propriedades das pastas e concretos auto-adensáveis, verificando as relações existentes entre estas duas fases da mistura;
- Investigação das propriedades físicas e químicas das adições minerais, identificando a interferência destas características nas propriedades das misturas;
- Identificação de semelhanças e diferenças entre as misturas em função da variação dos parâmetros de dosagem e caracterização dos materiais.

1.3 Hipóteses

A partir da definição dos objetivos formulam-se as seguintes hipóteses:

- As características das adições minerais – tais como superfície específica, forma, reatividade, massa unitária interferem diretamente nas propriedades das misturas auto-adensáveis;
- As interações entre os diversos componentes do concreto podem governar as suas propriedades, em função das interferências físicas (preenchimento de vazios) e químicas (formação de compostos, alteração de carga) que podem surgir entre eles;
- É possível otimizar a produção do concreto auto-adensável a partir da definição de parâmetros de dosagem que levem em consideração o teor e a superfície específica das adições minerais.

1.4 Metas

As seguintes metas são pretendidas com o desenvolvimento do presente trabalho:

- Indicar a viabilidade de se controlar as características das adições a fim de se obter melhor desempenho do concreto auto-adensável no estado fresco;
- Propor misturas com teores otimizados de finos e composições granulométricas que levem à produção eficiente do concreto auto-adensável e com maior economia;
- Propor parâmetros de dosagem em conformidade com as propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco, incluindo-se a verificação da sua resistência à compressão (estado endurecido).

2 O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O concreto auto-adensável surgiu na década de 80, no Japão, diante de um cenário caracterizado pela falta de mão-de-obra qualificada na indústria da Construção Civil, o que estava levando a ocorrência de defeitos nas estruturas de concreto. Nunes (2001) cita que os principais problemas enfrentados estavam relacionados à homogeneização das estruturas, de modo que falhas de concretagem eram observadas em decorrência da deficiência do processo de adensamento, comprometendo assim a qualidade das edificações.

Outro problema identificado nas construções japonesas da época era a necessidade de grande quantidade de armaduras nas estruturas de concreto armado, as quais seriam responsáveis por suportar os abalos sísmicos frequentes na região. Com uma alta densidade de armadura o processo de adensamento do concreto fica comprometido, tendo em vista que é realizado principalmente por meio de agulha de imersão, e esta é impedida de atingir todas as regiões da forma devido aos obstáculos provocados pela malha de barras de aço.

Diante deste quadro, os pesquisadores e construtores do setor perceberam que uma melhora na qualidade das estruturas seria possível se o processo de adensamento pudesse ser dispensado. Para atender a esta necessidade, surge o concreto auto-adensável, o qual consiste em um concreto capaz de preencher adequadamente todos os espaços da forma sem a necessidade de se aplicar uma força externa para o seu adensamento (OKAMURA, 1997). O desenvolvimento deste concreto é atribuído ao Prof. Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, e a primeira aplicação se deu em um protótipo, no ano de 1988 (GOMES, 2002).

O CAA apresenta diversas vantagens em relação ao concreto convencional, especialmente quando utilizado em grandes concretagens, devido à redução de tempo decorrente da facilidade de aplicação, ou em regiões da estrutura em que há alta concentração de armadura, situação que dificulta o adequado adensamento da mistura. Com relação aos custos, os requisitos específicos de dosagem do CAA fazem com que o preço por m³ deste material seja maior do que para o concreto convencional. Porém, são observados ganhos econômicos no que diz respeito ao menor consumo de energia, menor utilização de mão-de-obra e maior velocidade de execução.

Ferreira et al. (2006) compararam o custo do CAA em relação ao concreto convencional, levando-se em consideração não apenas os consumos dos componentes para produzir os dois concretos, mas analisando também os valores de resistência à compressão obtidos. O estudo

mostrou que, para concretos com nível de resistência de 50 MPa, o CAA apresentou-se economicamente mais viável.

2.1 Características gerais do CAA

Para que o concreto apresente a capacidade de espalhamento que possibilita um adequado preenchimento de espaços, é necessário que possua elevada fluidez ou deformabilidade, que constitui a primeira propriedade requerida para o concreto auto-adensável. Além disso, é necessário que a mistura apresente adequada resistência à segregação, de modo que haja estabilidade na distribuição dos componentes na mistura, e resistência ao bloqueio, que pode ocorrer nas regiões estreitas das formas, entre as armaduras.

A capacidade de preenchimento do CAA é conseguida pela sua alta deformabilidade que, por sua vez, é governada pela fluidez e coesão da mistura (GOMES, 2002). A coesão representa a estabilidade das misturas no que diz respeito à distribuição homogênea de seus componentes; misturas com coesão insuficiente estão suscetíveis à ocorrência de separação entre a pasta de cimento e os agregados durante as etapas de transporte e espalhamento do concreto, que é chamada por Schwartzenruber et al. (2006) de segregação dinâmica. Petit e Wirquin (2010) citam que a segregação dinâmica ocorre quando um sistema de partículas de diferentes dimensões e densidades é disperso em um líquido, de modo que elas tendem a segregar ao longo da direção do fluxo. Este fenômeno é comum, segundo os autores, durante o bombeamento do CAA, devido à reduzida tensão de escoamento do material.

Além disso, Schwartzenruber et al. (2006) caracterizam como segregação estática a sedimentação do agregado devido a forças gravitacionais. Portanto, uma adequada resistência à segregação é necessária para garantir uniformidade na distribuição dos diversos componentes da mistura desde a produção até sua aplicação.

Deve-se atentar também para a capacidade do concreto em passar por restrições, que consistem nas áreas congestionadas ao redor das armaduras. Nestas regiões pode haver um bloqueio ao fluxo provocado pela acumulação de partículas sólidas, o qual é decorrente do contato entre as partículas do agregado graúdo, as quais, ao se movimentarem nas regiões próximas aos obstáculos, tendem a diminuir sua distância relativa promovendo o surgimento de tensões de cisalhamento na argamassa (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Para a caracterização da trabalhabilidade do CAA pode-se citar ainda a medida da reologia, a qual já é apontada por Powers (1968) como o fator mais importante na caracterização dos concretos, e talvez o único que pode ser quantificado. Park et al. (2005) confirmam esta idéia quando citam a reologia como um dos fatores mais importantes para a produção de concretos de alto desempenho, nos quais se inclui o CAA.

O comportamento reológico do concreto tem sido adequadamente descrito pelo modelo de Bingham, definido pela Equação 1 (BANFILL, 1994; POWERS, 1968).

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma \quad (1)$$

Onde:

- τ = tensão de cisalhamento
- τ_0 = tensão de escoamento
- η = viscosidade plástica
- γ = taxa de cisalhamento.

Sendo τ_0 e η as propriedades reológicas de um material.

Para o CAA, deve-se ter uma baixa tensão de escoamento, o que garante sua elevada fluidez, e uma viscosidade moderada, para promover a estabilidade necessária. Estes parâmetros são diferentes daqueles definidos para os concretos convencionais, os quais exigem tensões de escoamento muito mais altas e viscosidades muito mais baixas (GOMES, 2002).

Zerbino et al. (2009), no entanto, afirmam que deve haver um equilíbrio entre os parâmetros reológicos para que se possa reduzir o risco de segregação. Segundo os autores, concretos com viscosidade elevada precisam de baixos valores de tensão de escoamento, a qual precisa ser maior quando o concreto apresenta reduzida viscosidade. Desta forma, observa-se uma estreita relação entre os parâmetros reológicos, especialmente a viscosidade, com a coesão da mistura. Quanto maior a viscosidade, maior a coesão, ou seja, maior a estabilidade e menor a tendência de segregação e exsudação.

Segundo Schwartzentruber et al. (2006) a reologia do concreto pode ser investigada a partir de medidas em pastas, cujas propriedades são fundamentais para entender aspectos relacionados, especialmente, à origem da estabilidade ou resistência à segregação de um CAA.

Banfill et al. (2009) indicam que a reologia das pastas de cimento com inclusão de adições minerais é muito complexa devido às interações entre os diversos componentes. Além disso, Papo e Piani (2004) citam outros fatores que influenciam na reologia da pasta:

- Fatores físicos → relação água/cimento, forma e tamanho do grão do cimento;

- Fatores químico e mineralógico → composição do cimento e modificações estruturais devidas ao processo de hidratação;
- Condições de mistura → taxa, tipo e tempo de mistura;
- Condições de medição → instrumentos, procedimentos experimentais;
- Presença de aditivos químicos.

Segundo Zerbino et al. (2009), com relação à mistura, em CAA's que são periodicamente misturados, menores valores de viscosidade e maiores valores de tensão de escoamento são encontrados do que em concretos que permanecem em condição estática.

A reologia é medida através de equipamentos sofisticados e, muitas vezes, de alto custo, denominados viscosímetros ou reômetros. No CAA, a reologia pode ser determinada indiretamente através da medição das demais propriedades deste concreto no estado fresco, para as quais são empregados ensaios mais simples, que utilizam equipamentos de menor custo e de fácil utilização.

Os métodos aplicados na caracterização dos concretos convencionais não são adequados para o CAA, de modo que são necessários métodos de ensaio próprios como o espalhamento, Funil-V, Caixa-L e Caixa-U, cujos procedimentos estão descritos no Apêndice A.

Estudos têm sido realizados em busca da normalização deste concreto e de métodos de ensaio normatizados para sua caracterização. Neste contexto, cita-se como um dos primeiros documentos com este fim, as especificações da EFNARC – *European Federation of National trade associations representing producers and applicators of specialist building products* (EFNARC, 2002) cujo texto foi publicado em 2002, esta federação faz parte do *European Project Group* (EPG) o qual lançou em 2005 novo documento com especificações para o CAA (EPG, 2005). Desde 2005 a *American Standardization for Testing and Materials* (ASTM) tem apresentado normas de ensaio em CAA: espalhamento – ASTM C1611/2005 e ASTM C1611/2009, avaliação da segregação estática – ASTM C1610/2006 e ASTM C1712/2009, e capacidade passante – ASTM C1621/2009. Neste ano de 2010, a ABNT lançou uma série de normas sobre aceitação e métodos de ensaio para o CAA – NBR 15823 - Partes 1 a 6 (ABNT, 2010).

Desta forma, percebe-se que as propriedades do CAA estão voltadas para o seu desempenho no estado fresco. Em termos de estado endurecido não são esperados comportamentos diferenciados do que já é conhecido para o concreto convencional. Domone (2007) cita alguns parâmetros que podem influenciar na resistência à compressão do CAA, que são o tipo e a proporção da adição mineral e a relação água/finos, uma vez que se utiliza uma grande

parcela de finos. Os valores obtidos para a resistência muitas vezes são elevados devido ao uso de aditivo superplastificante, permitindo menor consumo de água, e das próprias adições minerais, que afetam diferentemente o processo de hidratação do cimento.

Quanto ao módulo de elasticidade, alguns autores citam que os valores obtidos são menores no CAA em comparação ao concreto convencional. Isto ocorre devido à utilização de agregados de menor diâmetro e do maior volume de pasta empregado no CAA (FELEKOĞLU et al., 2007; LEEMANN; HOFFMANN, 2005). Segundo Domone (2007), a redução do módulo de elasticidade é mais evidente quando a resistência do concreto é baixa, chegando a ser 40% menor quando esta corresponde a 20 MPa.

2.2 Dosagem do CAA

A partir do surgimento do CAA, diversos métodos de dosagem foram desenvolvidos com o intuito de se definir as proporções ideais dos materiais utilizados, de modo a se garantir a obtenção dos requisitos de auto-adensabilidade. Inicialmente, os métodos de dosagem eram baseados na obtenção de alta deformabilidade (fluidez), contemplando assim apenas as propriedades do estado fresco (MELO, 2005). Partindo-se deste princípio, os concretos produzidos apresentavam elevado volume de pasta, levando a misturas anti-econômicas. Dentre as metodologias de dosagem que se baseiam neste critério, destaca-se o Método de Okamura, que foi o primeiro método de dosagem de CAA apresentado na literatura (GOMES, 2002).

Diante da necessidade de se otimizar as misturas do CAA, outras metodologias surgiram com o intuito de se obter concretos com os materiais dosados em proporções ideais, de modo a se aliar as propriedades exigidas nos estados fresco e endurecido. Alguns destes métodos são baseados na determinação do volume mínimo de pasta, como é o caso do método de Gomes (2002) e do LCPC (SEDRAN; DE LARRARD, 2001). Outras propostas foram desenvolvidas com a finalidade de se contemplar a resistência à compressão como um parâmetro de dosagem e escolha dos materiais, como é o caso do Método Repette-Melo (MELO, 2005). Gesoglu et al. (2009) destacam que raramente se encontra um método de dosagem de CAA baseado nas propriedades dos estados fresco e endurecido e ainda na durabilidade.

A seguir, serão apresentados com mais detalhes alguns dos métodos de dosagem de CAA encontrados na literatura.

2.2.1 Método de Okamura

O método de dosagem proposto pelo Prof. Okamura é, segundo Gomes (2002), o primeiro método de dosagem racional desenvolvido para o CAA, tendo em vista que foi este mesmo pesquisador que concebeu a idéia do concreto auto-adensável.

O método se baseia no proporcionamento adequado dos materiais para a obtenção da auto-compactabilidade do concreto, ou seja, para garantir que as suas propriedades do estado fresco sejam conseguidas. Com esta finalidade, tem-se como resultado, muitas vezes, misturas com elevado volume de pasta (SEDRAN; DE LARRARD, 2001; MELO, 2005).

Conforme descrevem Okamura e Ouchi (2003), fixado o teor de ar em 4% a 7%, o volume de agregado graúdo que deve ser empregado corresponde a 50% do volume de sólidos, e o volume de agregado miúdo é fixado em 40% do volume de argamassa, descontada a parcela dos finos (dimensão menor que 0,09 mm).

A razão água/finos e o teor de aditivo superplastificante são ajustados nas fases de pasta e argamassa, sendo realizados os ensaios de espalhamento e Funil-V (Apêndice A). O concreto é então ensaiado através da Caixa-U, de forma a verificar sua auto-compactabilidade.

2.2.2 Método de Gomes

Este método foi desenvolvido por Gomes (2002) para a dosagem de CAA com altas resistências. Parte do pressuposto de que o concreto é dividido em duas fases: a pasta e os agregados. Desta forma, o procedimento apresentado se baseia no ajuste da composição da pasta, determinação do esqueleto granular e definição do volume de pasta no concreto.

A composição da pasta é definida a partir de ensaios no Cone de Marsh e *mini-slump* (detalhados no item 3.2.2.1), obtendo-se os teores de adição e aditivo superplastificante que devem ser empregados. O esqueleto granular é definido em função da combinação entre

agregado miúdo e graúdo que proporcione menor volume de vazios. Partindo-se para a produção dos concretos, o volume de pasta é ajustado através dos ensaios de espalhamento, Funil-V, Caixa-L e Tubo em U (descrito no Apêndice A). As relações água/cimento empregadas são bastante reduzidas, conferindo assim a alta resistência dos concretos.

2.2.3 Método Repette-Melo

O método Repette-Melo (GOMES; BARROS, 2009; MELO, 2005), vem de encontro à maioria dos métodos de dosagem propostos na literatura, tendo como princípio a determinação de composições de CAA para que sejam alcançadas resistências à compressão pré-estabelecidas. Isto é possível devido à utilização de materiais inertes como adição mineral.

A relação água/cimento deve ser fixada em função da resistência à compressão, utilizando-se para isto curvas de dosagem referente ao tipo de cimento empregado. Na fase de pasta determina-se o teor de adição a partir de critérios de controle de segregação. O volume de agregado miúdo é estabelecido em relação ao volume de argamassa, através da realização dos ensaios de espalhamento e Funil-V. Ainda na fase de argamassa, há uma confirmação do teor de adição que pode ser incorporado em substituição ao cimento.

No concreto, determina-se o volume de agregado graúdo e o teor de superplastificante, de forma que sejam atendidos os requisitos de auto-compactabilidade medidos pelos ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L.

2.2.4 Modelo de Empacotamento Compressível – LCPC

Este método, desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC (França), define o concreto como uma suspensão do esqueleto sólido, o qual inclui desde os finos até o agregado graúdo, em água. A definição da proporção adequada dos materiais se dá a partir dos critérios de bloqueio, ou seja, propõe-se a determinação de um traço eficiente (preciso e

rápido) que tenha como principal objetivo evitar a ocorrência de bloqueio nas regiões estreitas (SEDRAN; DE LARRARD, 2001).

Formagini (2005) apresenta sucintamente o método, sendo descritos a seguir os principais pontos do modelo para a dosagem de CAA (GOMES; BARROS, 2009):

- Elaboração de banco de dados com as propriedades dos materiais → distribuição granulométrica, massa específica e absorção de água, compacidade real – \emptyset , índice de compactação – K (depende das condições de lançamento e adensamento), módulo de elasticidade dos agregados, resistência à compressão do cimento e dos agregados, índices de atividade pozolânica dos aglomerantes, dosagem de saturação dos aglomerantes, teor de sólidos do aditivo, parâmetros p e q dos agregados (constantes próprias do agregado definidas por formulação matemática em função das resistências à compressão do concreto, dos agregados e da matriz cimentícia);
- Formulação da mistura granular → melhor empacotamento da mistura seca dos agregados, mantendo-se certa facilidade de lançamento e adensamento;
- Ajuste da pasta em função das propriedades do concreto → as propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade), a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto são determinados por meio de equações e devem obedecer a valores pré-estabelecidos; caso isto não ocorra, a mistura granular deve ser reformulada.

2.2.5 Critério de Bloqueio e Critério da Fase Líquida

Bui (apud BUI; MONTGOMERY, 2001) propôs um método de dosagem para CAA de alto desempenho no qual o concreto é dividido nas fases sólida e líquida. A fase sólida representa os agregados e a fase líquida, a pasta. Este método foi designado como Critério de bloqueio – *Blocking criteria*, e está focado na fase sólida da mistura. O procedimento de dosagem se baseia na determinação do volume mínimo de pasta definido em função da resistência ao bloqueio.

Para complementar este procedimento, Bui e Montgomery (2001) propuseram o Critério baseado na fase líquida – *Liquid-phase criteria*, no qual o volume mínimo de pasta é calculado a partir do volume de vazios no concreto, distância média mínima entre as partículas dos agregados e diâmetro médio das partículas.

RESUMO

No Quadro 1 apresenta-se um comparativo entre os diferentes métodos de dosagem citados.

Quadro 1 – Comparativo entre os métodos de dosagem do CAA

Método de dosagem	Semelhanças	Particularidades
Okamura	Estudos em pasta, argamassa e concreto	Elevados volumes de pasta para garantia da auto-compactabilidade
Repetto - Melo		Dosagem do CAA para atingir-se um valor requerido de resistência
Gomes	Ajuste do volume de pasta em função da composição dos agregados	Dosagem de CAA de altas resistências
Modelo de Empacotamento Compressível		Procura o melhor empacotamento dos sólidos para evitar-se o bloqueio
Critério de bloqueio e Critério da fase líquida		Determinação do volume mínimo de pasta para evitar-se o bloqueio

Nota-se, dos métodos citados, que na maioria das vezes não há uma definição clara do teor ou tipo de adição mineral a ser empregada para a obtenção do CAA, de modo que estas variáveis não são consideradas no processo de dosagem.

Destaca-se que a maior ênfase na dosagem está nas propriedades do CAA no estado fresco, e é nesta fase que as adições minerais, objeto de estudo do presente trabalho, irão exercer importante influência para o desempenho final da mistura.

2.3 Materiais para a produção do CAA

A produção do CAA requer a escolha rigorosa dos materiais que deverão ser empregados, com um controle dos fatores responsáveis pela garantia da fluidez desejada (SAAK et al., 2001). Variações nas características de materiais como o cimento e as adições minerais, devido a mudanças no processo de produção, ou no tipo, tamanho e forma dos agregados, podem causar grandes alterações nas propriedades do CAA, especialmente no estado fresco, conforme cita Nunes et al. (2006). A distribuição granulométrica dos materiais deve ser contínua, de forma que as partículas menores preencham os vazios entre as maiores, a fim de evitar-se a obstrução do CAA diante de regiões estreitas.

Um ponto importante a ser observado é a necessidade de uma maior quantidade de finos, cuja principal contribuição se deve à adsorção de água promovida por sua elevada superfície específica, que contribui para garantir a viscosidade adequada. A especificação da EFNARC (2002) classifica como finos as partículas sólidas com dimensões menores que 0,125 mm, os quais podem ser constituídos por combinação entre cimento e adições.

O maior consumo de finos no CAA é acompanhado pela redução na quantidade de agregados empregados, especialmente do agregado graúdo. Esta medida é tomada tendo em vista a redução da tendência à segregação e bloqueio, mais agravados em misturas fluidas.

Além disso, na confecção do CAA, é indispensável o uso de aditivos, a fim de se obter as características reológicas desejadas. Deve-se empregar aditivo superplastificante para garantir maior fluidez pela redução da tensão de escoamento, cujos efeitos na microestrutura do cimento, citados por De Larrard (2000), são:

- Efeito geométrico → consiste na defloculação das partículas finas, o que aumenta a compacidade do sistema;
- Efeito mecânico → lubrificação das superfícies sólidas, diminuindo o atrito entre as partículas.

Em alguns casos, é possível também utilizar-se um aditivo promotor de viscosidade, a fim de que a mistura obtenha a estabilidade adequada, evitando a ocorrência de segregação. Este aditivo substitui o emprego de uma grande quantidade de finos, quando esta for limitada, pois atua formando uma rede de sustentação para os agregados (KHAYAT et al., 1999).

Saak et al. (2001) concluem, com relação à influência dos materiais no comportamento do CAA, que este é governado pelo volume de pasta, pela composição desta pasta, e pela granulometria dos agregados. Na composição da pasta, verifica-se forte influência dos finos nas propriedades finais da mistura. Tendo em vista que estes materiais são utilizados em grande quantidade no CAA, faz-se necessária uma investigação mais detalhada de sua atuação nas pastas, bem como de sua interação com os agregados.

RESUMO

Neste sentido, serão discutidas a seguir questões referentes às adições minerais no que diz respeito a propriedades e efeitos nos concretos, de acordo com resultados observados na literatura; além das particularidades referentes às composições granulométricas dos

agregados. Com isto, pretende-se evidenciar as lacunas observadas nos estudos envolvendo estes insumos, que nortearam o desenvolvimento do presente trabalho.

2.3.1 Adições

O CAA requer uma grande quantidade de materiais finos os quais, em sua maioria, contribuem principalmente para o aumento da viscosidade e, em segundo plano, para o aumento da fluidez. Este requisito é atendido pelo uso de cimento em conjunto com adições minerais, as quais podem ser de maior superfície específica e, por isso, irão melhorar a distribuição granulométrica dos sólidos da mistura. Assim, entende-se como finos a parcela referente ao cimento e às adições minerais, sendo esta nomenclatura adotada no presente trabalho.

Para Gomes et al. (2003), a utilização de finos no CAA faz com que este contribua significativamente para a sustentabilidade da tecnologia do concreto, tendo em vista que a maior parte das adições minerais consistem em resíduos de diversos setores industriais, que prejudicariam o meio ambiente se lançados de forma inadequada. Os autores enfatizam também a necessidade de elaboração de normas que restrinjam o uso desta grande quantidade de resíduos, bem como de aditivos superplastificantes, no CAA. Assim, é possível contribuir para um planejamento global do processo de produção deste tipo de concreto, contemplando não só a questão da sustentabilidade, mas ainda a relação custo/benefício e os aspectos críticos da fabricação e utilização do material.

As adições têm a característica de adsorver grande quantidade de água, quando comparadas com o cimento, o que irá reduzir a água livre da mistura, promovendo desta forma o aumento da viscosidade e da estabilidade (KHAYAT et al., 2004). De acordo com Yahia et al. (2005), o aumento da viscosidade é decorrente do maior contato entre as partículas, que gera maior efeito de fricção.

Quanto ao aumento da fluidez, Kwan e Mora (2001) citam que o uso de materiais muito finos pode melhorar o empacotamento das partículas resultando em maior trabalhabilidade do concreto. As pequenas partículas atuam preenchendo os vazios entre as maiores (cimento e agregados) promovendo, assim, melhor arranjo dos grãos e melhor aproveitamento da água de amassamento (YAHIA et al., 2005).

Segundo Moosberg-Bustnes et al. (2004), além do preenchimento dos vazios, o uso de materiais finos ajuda a uniformizar a distribuição dos produtos da hidratação do cimento, promovendo a formação de uma matriz mais densa. Gallias et al. (2000) afirmam, por sua vez, que para que se obtenha uma matriz mais densa é importante que se utilizem materiais com ampla distribuição dos tamanhos dos grãos. Além disso, indicam que a presença do aditivo superplastificante é fundamental para que as adições finas contribuam para o melhor empacotamento da mistura granular.

Outro fator relacionado à maior fluidez do concreto é a redução da fricção interna entre as partículas dos sólidos, que acontece em consequência do aumento da porção de finos até um determinado valor. Após este limite de incorporação, ocorre o efeito inverso passando-se a observar o aumento da fricção interpartícula, o que vai afetar negativamente a deformabilidade da mistura (NEHDI et al., 2004).

Sonebi et al. (2000 apud KRAUS et al., 2009) indicam que, incorporando-se uma ou mais adições minerais com diferentes formas e granulometria obtém-se uma melhor densidade de empacotamento das partículas reduzindo-se, assim, a fricção interpartícula e a viscosidade da mistura. Segundo os autores, desta forma é possível produzir CAA's com maior deformabilidade e estabilidade.

De acordo com Yahia et al. (2005), o volume de finos que deve ser incorporado ao concreto é controlado pela granulometria do agregado. Deste modo, a quantidade a ser utilizada deve ser suficiente para promover o adequado preenchimento dos vazios, permitindo assim a redução da fricção interpartícula. Este limite é determinado em relação ao espaço livre existente, no qual as partículas podem ser empacotadas, ou seja, em função do teor de vazios entre os grãos dos agregados. Para o cálculo do espaço livre os autores sugerem as Equações 2 e 3 a seguir:

$$\text{Espaço livre} = 1 - \alpha \cdot P_v - \beta \cdot S_v \quad (2)$$

$$\beta = 1 - 0,45 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{0,19} \quad (3)$$

Sendo:

- P_v = volume de finos;
- S_v = volume de agregado miúdo na argamassa;
- α = densidade de massa compactada dos finos;
- β = densidade de massa compactada do agregado miúdo;
- d = diâmetro para o qual 10% das partículas são menores;
- D = diâmetro para o qual 90% das partículas são menores.

Segundo Gallias et al. (2000), ao preencher os vazios do esqueleto granular do concreto, as adições participam da função aglomerante do cimento. Bigas e Gallias (2003) apontam que, além desta função de preenchimento, as adições podem ser utilizadas para complementar a fração fina na distribuição granulométrica das partículas dos agregados.

Nasvik (2003) indica que o uso de grande quantidade de finos leva a um maior consumo de água, que pode ocasionar fissuração e retração. Moosberg-Bustnes et al. (2004) defendem que a necessidade de maior quantidade de água se dá porque o efeito das forças de atração é mais expressivo nas partículas menores do que nas maiores. Em contrapartida, Yahia et al. (2005) afirmam que esta maior demanda de água é decorrente da elevada superfície específica das partículas finas. Segundo Gallias et al. (2000), este comportamento é afetado também por parâmetros morfológicos como forma e textura superficial das partículas.

Resultados de microscopia eletrônica de varredura de adições minerais, apresentados na literatura mostram uma grande variabilidade em suas formas e aspecto da superfície. De acordo com os parâmetros de forma, as adições podem se classificar em arredondadas, cujas partículas são esféricas ou poligonais com a superfície ligeiramente áspera (sílica ativa); angulares, de partículas poligonais com superfícies apresentando bordas afiadas (pó de quartzo); ou irregulares, partículas com formas complexas e superfície bastante áspera (metacaulim) (BIGAS; GALLIAS, 2003).

Conforme citado por Gallias et al. (2000), partículas arredondadas apresentam menor demanda de água, devido à reduzida fricção entre os grãos, em função da pequena rugosidade superficial. Nestes casos, é possível obter-se um empacotamento mais denso dos grãos.

Diante do exposto, nota-se que há necessidade de se empregar uma parcela significativa de finos para a produção do CAA, devendo-se considerar, além dos benefícios promovidos por estes materiais, os cuidados na dosagem, especialmente no que diz respeito à quantidade de água. Domone (2006), em um levantamento desenvolvido acerca dos 11 anos de estudos sobre o CAA, aponta que um dos fatores que pode ser melhorado na produção deste concreto é a redução do alto teor de finos comumente empregado tendo em vista à otimização da produção.

RESUMO

A partir das afirmações acima, percebe-se que a quantidade de finos que deve ser empregada no CAA, e o estudo dos aspectos morfológicos das partículas das adições, consistem em pontos de fundamental importância e que ainda não estão totalmente definidos na literatura. Procura-se, assim, determinar-se aspectos de dosagem do CAA que contemplem a definição da escolha das adições minerais em função do tipo, superfície específica e teor.

A seguir, são apresentadas as principais adições utilizadas na produção do CAA, destacando-se o metacaulim e o filler calcário, que foram empregados no estudo experimental aqui desenvolvido.

2.3.1.1 Metacaulim

Dentre as adições minerais utilizadas para melhorar as propriedades de concretos e argamassas encontra-se o metacaulim, que consiste em um material de elevada superfície específica proveniente da calcinação da argila caulínica a temperaturas de 650°C a 800°C (PERA, 2001). Gleize et al. (2006) apontam que este processo de produção controlado faz com que o metacaulim apresente boa estabilidade nas suas propriedades, ao contrário do que acontece com outras adições minerais, resultando em um material de alta pureza e reatividade. As temperaturas de calcinação às quais a caulinita é submetida causam desorganização estrutural e conferem ao material propriedades pozolânicas, devido à estrutura amorfa resultante (MEHTA; MONTEIRO, 2008; ROJAS; CABRERA, 2002).

O metacaulim pode ainda ser obtido a partir da calcinação de argilas especiais, como o caulim de alta pureza. Segundo Souza e Dal Molin (2002), além da calcinação, é necessário que o material passe por um processo de moagem para adquirir as propriedades pozolânicas. Os autores citam que quando o tamanho resultante das partículas é inferior a 5 µm, o metacaulim é considerado como sendo de alta reatividade.

A atividade pozolânica do metacaulim se dá através do rápido consumo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) proveniente da hidratação do cimento, produzindo C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) que é o hidrato responsável por garantir as propriedades mecânicas dos concretos e argamassas. Outros compostos também são formados, sendo que a natureza das reações

químicas depende da cura a qual o elemento estará submetido (ROJAS; CABRERA, 2002). Segundo Li e Ding (2003), o metacaulim contém principalmente dióxido de silício amorfo e óxido de alumínio, e são estes compostos que reagem com os hidratos do cimento para formar C-S-H e etringita. O autor cita ainda que este processo promove redução do tempo de pega e aumento da demanda de água da mistura.

Além da atividade pozolânica, o elevado consumo de água provocado pelo uso de metacaulim pode também estar associado à forma irregular de suas partículas que confere ao material uma estrutura leve, de acordo com Bigas e Gallias (2003). Segundo Mehta (1989 apud Carmo et al., 2007), o tamanho, a forma e a textura das partículas do metacaulim de alta reatividade influenciam nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Li e Ding (2003) citam que a reação do metacaulim com os hidratos do cimento é mais rápida do que quando utilizada a escória porque a micro-estrutura do metacaulim é mais aberta, o que facilita a entrada da água de amassamento e, por sua vez, favorece o desenvolvimento das reações.

Dentre as vantagens do uso do metacaulim como adição em concretos e argamassas, pode-se citar: melhoria na trabalhabilidade, microestrutura e resistência mecânica; redução do tempo de pega; menor permeabilidade e retração autógena; maior durabilidade; controle da reação álcali-agregado (ROJAS; CABRERA, 2002). Quanto à resistência à compressão, estudos apresentados por Li e Ding (2003) apontam que o melhor resultado no concreto é obtido quando o cimento é substituído por 10% desta adição.

Quanto ao emprego do metacaulim para a produção de CAA, Güneyisi e Gesoglu (2008) apontam que ainda não há um bom entendimento de como esta adição afeta as características de auto-compactabilidade exigidas, podendo haver melhoras de algumas propriedades e piores resultados para outras. Num estudo desenvolvido por estes autores na produção de argamassas auto-adensáveis observou-se que, à medida que o teor de metacaulim passava de 0 a 15% (em substituição à massa de cimento), ocorreu um grande incremento na coesão das misturas, evidenciado por uma redução nos diâmetros de espalhamento (*Slump flow*) e aumento nos tempos de escoamento (Funil-V). Além disso, observou-se também maior consumo de água e melhores resultados quanto à resistência à compressão.

RESUMO

O metacaulim é uma adição muito fina, de alta reatividade pozolânica, cujas características como forma e superfície específica são capazes de interferir nas propriedades de misturas tanto no estado fresco como no estado endurecido. Destaca-se a necessidade de se conhecer melhor a ação deste material na produção do CAA, sabendo-se, contudo, que há um aumento expressivo da coesão e do tempo de escoamento, redução no espalhamento e maior consumo de água.

2.3.1.2 Filer calcário

O filer calcário caracteriza-se como um pó fino, proveniente da rocha calcário. Pode ser classificado como calcítico ou dolomítico, dependendo de sua composição química. Em geral, sua estrutura é porosa e apresenta superfície rugosa (FELEKOĞLU, 2009).

O filer calcário foi, por muito tempo, considerado como um material inerte. Segundo Modler et al. (2007), as adições do tipo inerte são incorporadas ao concreto para conferir melhores resultados de coesão e viscosidade, no estado fresco, refinamento dos poros da pasta de cimento hidratada e da zona de transição, e melhorar o desempenho no que diz respeito ao ataque por agentes agressivos.

Porém, sabe-se que o filer calcário participa também do processo de hidratação do cimento. Sua atuação não se dá por meio da produção de C-S-H, como no caso dos materiais pozolânicos, mas sim devido à precipitação dos hidratos de aluminato de cálcio (C_3A) e à interação entre o silicato tricálcico (C_3S) e o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), conforme citam Pera et al. (1999).

Este efeito é chamado de nucleação heterogênea, pois o filer calcário atua como agente de nucleação, acelerando a hidratação do cimento, o que leva à cristalização desorientada do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), conforme cita Irassar (2009). Segundo este autor, o uso de filer calcário promove ainda mudanças na porosidade capilar de misturas cimentícias devido ao efeito filer, ou seja, preenchimento de vazios, o qual pode levar a uma redução no consumo de água, para uma mesma trabalhabilidade.

A finura do filer calcário influencia nas propriedades reológicas do CAA. Yahia et al. (1999 apud PETIT; WIRQUIN, 2010) observaram que, aumentando-se a superfície específica de 500 m²/kg para 1000 m²/kg, melhor desempenho quanto à fluidez é obtido em decorrência da redução da tensão de escoamento.

Em estudos realizados por Esping (2008), aumentando-se a superfície específica do filer calcário de 2000 m²/kg para 6000 m²/kg a tensão de escoamento dobrou e a viscosidade aumentou de 35 Pa.s para 50 Pa.s. Este incremento na superfície específica pode levar ainda a um aumento significativo no consumo de água (YAHIA et al., 2005).

Petit e Wirquin (2010) produziram argamassas auto-adensáveis empregando filer calcário como adição em teores de 24% a 55% de substituição à massa de cimento e observaram que, para um mesmo diâmetro de espalhamento, quanto maior o teor de filer da mistura houve um aumento no consumo de aditivo superplastificante e redução na tensão de escoamento.

RESUMO

O filer calcário consiste em uma adição cujo papel é preencher os vazios, em decorrência da sua elevada superfície específica, e intensificar a hidratação do cimento auxiliando no mecanismo de nucleação e formação dos hidratos. As propriedades das misturas contendo filer calcário podem ser bastante afetadas por sua superfície específica, especialmente no que diz respeito à reologia.

2.3.1.3 Outras adições

Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício ou outras ligas de ferro. Este material possui uma estrutura amorfa e elevada superfície específica, sendo encontrado na faixa de diâmetros de 0,1 a 2 µm, o que indica que suas partículas são bem menores que as do cimento, e a superfície específica é da ordem de 15000 a 25000 m²/kg (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Devido às suas características físicas, a sílica ativa representa um tipo de pozolana de alta reatividade, e sua ação se dá pela formação de C-S-H, quando em combinação com o cimento. Sua elevada superfície específica auxilia ainda no preenchimento de vazios entre partículas maiores, como as de cimento ou outras adições (AÏTCIN, 2000). Devido ao seu elevado efeito pozolânico, esta adição costuma ser utilizada em teores baixos, quando comparado com outros materiais.

A sílica ativa pode ser adequadamente utilizada em composições ternárias em conjunto com outro tipo de material fino e cimento. Num estudo desenvolvido por Park et al. (2005), no qual foram medidos os parâmetros reológicos de pastas com cimento e sílica ativa, observou-se que quanto maior o teor desta adição, tanto a viscosidade quanto a tensão de escoamento aumentavam. Já no caso de misturas ternárias empregando escória ou cinza volante as pastas apresentaram melhor desempenho com maior controle dos parâmetros reológicos, de modo que a sílica atuou como um agente responsável por reduzir a segregação. Os autores citam ainda que a alta reatividade da sílica faz com que ela facilmente absorva aditivo superplasticante da mistura, de modo que quanto maior sua quantidade, maior a demanda de aditivo.

Algumas das propriedades conseguidas para o concreto no estado fresco, em função do uso da sílica ativa são: maior coesão, redução da exsudação, aumento da demanda de água, redução da retração, aumento da fluidez.

Cinza volante

A cinza volante é um material resultante da combustão do carvão mineral, cujas partículas são finamente divididas. Segundo Agarwal (2006) esta adição se caracteriza por ser um tipo de pozolana cuja atividade pozolânica é bastante influenciada pela superfície específica.

Segundo Park et al. (2005), em se tratando de propriedades reológicas, a cinza volante promove aumento tanto da tensão de escoamento quanto da viscosidade plástica. Além disso, suas partículas esféricas auxiliam na fluidez da mistura devido à redução da força de fricção entre as partículas do cimento.

Esta adição influencia também no aumento da resistência de aderência na zona de transição (LEEMANN; HOFFMANN, 2005). Devido à característica pozolânica, a resistência de concretos com cinza volante é reduzida nas primeiras idades.

Escória de alto-forno

A escória de alto-forno consiste em um resíduo proveniente da manufatura do ferro-gusa em alto-forno. Suas partículas são bastante finas, com diâmetro médio de 8 μm , e aproximadamente arredondadas. Estas características propiciam o preenchimento de vazios entre partículas maiores, como as do cimento, e melhoram a distribuição granulométrica dos sólidos na mistura (LI; DING, 2003).

Todas estas características contribuem para melhorar a fluidez de matrizes cimentícias, pois há uma redução da fricção com as partículas de cimento, conforme citam Park et al. (2005). No estudo desenvolvido por estes autores melhoras na fluidez foram obtidas quando a escória foi utilizada até 30% em substituição à massa de cimento.

A escória promove ainda aumento da viscosidade, maiores tempos de pega e redução da exsudação. A incorporação de escória em misturas com pequenas quantidades de cimento reduz o processo de hidratação, o que pode ocasionar uma redução na resistência à compressão (PARK et al., 2005).

2.3.1.4 Efeito das adições no CAA

Diversos estudos têm apontado o efeito do uso de adições minerais no CAA, com relação às alterações nas propriedades, melhorando o desempenho do concreto.

Domone (2006) demonstrou que a resistência à compressão das misturas é controlada principalmente pela composição dos finos, ou seja, o tipo de cimento e adição mineral empregados, e não pela relação água/finos, e que o efeito mais significativo da composição dos finos se dá no processo de hidratação.

Com relação aos aspectos reológicos, Heirman et al. (2009) apontam que um aumento de viscosidade do CAA é conseguido quanto maior o volume de finos e menor a quantidade de água livre na mistura. Segundo os autores, a tendência de comportamento dilatante (aumento da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento) observada no CAA pode ser modificada pelo tipo e finura da adição mineral utilizada. Como exemplo, tem-se que o filer calcário aumenta a tendência à dilatação, enquanto que a cinza volante a reduz e o pó de quartzo não exerce influência.

Zhu e Gibbs (2005) indicam que o tipo de adição é mais relevante na determinação da fluidez de pastas de CAA do que a sua finura. Os autores observaram que misturas com diferentes finuras de filer calcário tiveram consumo de superplastificante semelhante entre si, sendo o mesmo comportamento observado quando empregado pó de giz em diferentes finuras. No entanto, menor consumo de aditivo foi necessário quando empregado o filer calcário. Alguns fatores são citados como as possíveis causas deste comportamento, que são: a presença de impurezas nos materiais, as propriedades da superfície, o empacotamento das partículas e a absorção.

Estudos apontados por Cyr et al. (2006) em uma sequência de trabalhos desenvolvidos (CYR et al., 2005; LAWRENCE et al., 2003; LAWRENCE et al., 2005) tiveram o intuito de mostrar a influência das adições minerais, com relação ao tipo, teor e finura, no desenvolvimento da hidratação e na resistência à compressão de argamassas convencionais, sendo utilizados pó de quartzo, filer calcário e cinza volante. O objetivo geral das investigações foi definir um método de dosagem de concretos contendo adições minerais, tendo em vista que em misturas convencionais a resistência à compressão é o principal parâmetro para definição da dosagem. Os autores indicam, quanto ao comportamento das argamassas no estado endurecido, as seguintes diretrizes:

- No início da hidratação o tipo de adição não é um parâmetro significativo;
- A resistência aumenta com a finura da adição;
- Quando a adição é inerte seu efeito de aumento de resistência é chamado de nucleação heterogênea;
- Com adições pozolânicas a resistência aumenta devido a efeitos físicos e químicos.

RESUMO

Diante do exposto por Cyr et al. (2006) pretende-se estender esta otimização da dosagem a partir do entendimento dos efeitos das adições minerais para misturas de CAA, focando-se em sua contribuição ao estado fresco. Para que isto seja possível, destaca-se a necessidade de se analisar melhor as propriedades físicas e químicas das adições minerais, especialmente no que diz respeito à finura, e como elas irão influenciar no desempenho do CAA, sendo este o objetivo central do presente trabalho.

2.3.1.5 Utilização das adições no CAA

A seguir, estão exemplificados alguns estudos desenvolvidos com o intuito de verificar a forma e o teor de utilização das adições no CAA, bem como os efeitos que estes materiais podem provocar nas propriedades tanto do estado fresco quanto do estado endurecido.

Moosberg-Bustnes et al. (2004) estudaram o emprego de *pó de quartzo* substituindo parcialmente o cimento e os agregados. Substituindo-se cimento pela adição mineral houve um aumento da relação água/cimento e redução da resistência à compressão; por outro lado, quando o pó de quartzo foi utilizado em substituição à parte do agregado, as resistências obtidas foram maiores. Observou-se também que, quanto maior a superfície específica do material, foram obtidas misturas mais densas e com maior resistência à compressão. Além disso, o consumo de superplastificante foi aumentado nas misturas com maior teor de pó de quartzo.

Patel et al. (2004), utilizando *cinza volante* como adição mineral para o desenvolvimento do CAA, demonstraram que o emprego deste material promoveu redução no consumo de aditivo superplastificante para se atingir a deformabilidade necessária. Em relação às propriedades mecânicas, quando a porcentagem em massa de cinza em relação ao total de finos foi alta, em torno de 55% a 60%, houve redução na resistência à compressão na idade de 1 dia, principalmente quando a relação água/finos foi maior. Quanto aos requisitos de durabilidade, observou-se redução da retração por secagem e da permeabilidade.

Nehdi et al. (2004) verificaram que o uso de *cinza volante* resultou em baixos valores de resistência à compressão, especialmente quando se utilizou aditivo promotor de viscosidade. Foram estudadas misturas ternárias e quaternárias de cimento e adições, sendo que quanto maior a diversidade de materiais observou-se redução da resistência à compressão, e melhora das propriedades de durabilidade. Os autores sugerem a ocorrência de sinergia relacionada às propriedades de reologia, mecânicas e de durabilidade entre os materiais, nas matrizes cimentícias de muitos componentes, a qual precisa ser melhor entendida e, posteriormente, otimizada.

Alguns autores apontam ainda o uso das adições minerais formando misturas ternárias (cimento + dois tipos de adição) e quaternárias (cimento + três tipos de adição) de finos. Gesoglu et al. (2009) indicam que é possível obter-se um melhor desempenho do CAA, especialmente no que diz respeito à capacidade de preenchimento e viscosidade, quando

utilizadas misturas ternárias e quaternárias de *cinza volante*, *silica ativa* e *escória de alto forno*, do que nas misturas binárias destas adições.

Güneyisi e Gesoglu (2008) utilizaram misturas ternárias de cimento, *metacaulim* e *cinza volante* a fim de obter misturas melhores em relação às propriedades reológicas (menor tensão de escoamento e viscosidade moderada). Nos concretos produzidos apenas com metacaulim, o aumento de viscosidade foi excessivo, prejudicando o desempenho quanto à fluidez.

Destaca-se o trabalho desenvolvido por Zhu e Gibbs (2005), os quais analisaram os efeitos decorrentes da variação do tipo e da finura da adição mineral. Os autores observaram que a substituição parcial do cimento por *filer calcário* e *pó de giz* aumentou o espalhamento de pastas destinadas à produção de CAA, medido através do *mini-slump*. Em geral, quanto menor o teor de adição empregado, maior foi o consumo de aditivo dos concretos, o que, segundo os autores, pode estar relacionado à maior necessidade de aditivo para envolver as partículas do cimento, em comparação aos demais finos. Foram obtidos melhores resultados de resistência à compressão nas misturas com filer calcário, principalmente quando este material apresentava elevada finura, devido ao maior empacotamento e reatividade adquiridos com a redução da dimensão das partículas.

Alguns estudos apontam ainda para o uso de novos tipos de resíduos, que passam a incorporar a gama de materiais empregados como adições minerais. Dentre eles pode-se destacar o *resíduo de corte de rochas ornamentais*, como mármore e granito, apresentado em estudos realizados em diversos estados do Brasil como Alagoas (CAVALCANTI, 2006; LISBÔA, 2004) e Espírito Santo (CALMON et al., 2006), além do *resíduo do corte de blocos cerâmicos*, apresentado por Diniz (2005), e da *escória de aciaria* da produção do aço em conversores LD (CALMON et al., 2007).

No Quadro 2 tem-se um resumo de alguns dos trabalhos citados, enfatizando-se a participação das adições minerais no desempenho das misturas.

Quadro 2 – Exemplos de aplicação das adições minerais na produção do CAA

Referência	Teor de finos empregado		Efeitos do uso das adições no CAA
	Massa de finos	Percentual em relação ao cimento	
Emprego do <i>pó de quartzo</i> em diferentes finuras como adição em substituição ao cimento e aos agregados (MOOSBERG-BUSTNESS et al., 2004)	433 a 560 kg/m ³	10% a 50% de substituição do volume de cimento pela adição	Maior resistência à compressão quanto maior o teor e a finura do filer.
Desenvolvimento de CAA com altos teores de <i>cinza volante</i> (PATEL et al., 2004)	370 a 450 kg/m ³	30% a 60% de substituição da massa de cimento pela adição	Influência do teor de cinza, da relação água/finos e do teor de superplastificante na resistência à compressão e espalhamento.
Substituição parcial do cimento por <i>filer calcário</i> e <i>pó de giz</i> (ZHU; GIBBS, 2005)	540 kg/m ³	25% a 55% de adição (% da massa de finos)	Aumento da resistência à compressão; Consumo de aditivo variou em função do tipo de adição.
Misturas ternárias e quaternárias de misturas cimentícias tendo como adições <i>cinza volante, escória, sílica ativa e cinza da casca de arroz</i> (NEHDI et al., 2004)	425 kg/m ³	50% de substituição da massa de cimento pelas adições	Foram obtidos bons resultados em termos de durabilidade, especialmente nas misturas ternárias e quaternárias de finos.
Misturas cimentícias binárias, ternárias e quaternárias de <i>cinza volante, escória e sílica ativa</i> (GESOGLU et al., 2009)	450 kg/m ³	5% a 60% de substituição da massa de cimento pelas adições	Melhor desempenho com misturas quaternárias e ternárias quanto à: espalhamento, Funil-V, Caixa-L, permeabilidade a íons Cl ⁻ e à água, resistência à compressão, resistividade elétrica, retração.
Misturas cimentícias binárias e ternárias de <i>cinza volante e metacaulim</i> (GÜNEYISI; GESOGLU, 2008)	550 kg/m ³	5% a 60% de substituição da massa de cimento pelas adições	Observou-se uma compensação de efeitos ao utilizar-se a cinza volante e o metacaulim juntos, havendo um efeito mais expressivo da cinza no aumento da fluidez, e do metacaulim no aumento da coesão.
Utilização de <i>resíduo de serragem de mármore e granito</i> passante na peneira de 300 µm (CAVALCANTI, 2006)	560 a 618 kg/m ³	50% de resíduo em relação à massa de cimento	Bom desempenho do concreto nos estados fresco e endurecido, destacando-se a elevada finura da adição.
Utilização de <i>resíduo de serragem de mármore e granito</i> passante na peneira de 600 µm (LISBÔA, 2004)	575 a 635 kg/m ³	50% de resíduo em relação à massa de cimento	Melhor desempenho do concreto quando acrescentado uma pequena quantidade de sílica ativa.

A seguir são destacados alguns pontos observados:

- Não houve uma investigação mais detalhada de como as características das adições, tais como o tipo e a finura, atuam para interferir no resultado final das misturas, ou seja, que mecanismos estão envolvidos para que haja alteração no desenvolvimento do CAA;

- Alguns pontos apresentaram-se contraditórios no que diz respeito, por exemplo, ao consumo de aditivo. Observa-se que, apesar de haver um entendimento de que o consumo de superplastificante aumenta quanto mais adição mineral presente, em dois dos trabalhos citados (PATEL et al. 2004; ZHU; GIBBS, 2005) verificou-se efeito contrário;
- Apenas três trabalhos (PATEL et al. 2004; LISBÔA, 2004; CAVALCANTI, 2006) utilizam métodos de dosagem para a determinação dos teores de adição, nos demais esta proporção foi aleatória observando-se os resultados obtidos;
- As porcentagens de adição mineral nas misturas, em relação à massa de cimento, foram maiores quando empregadas adições reativas (pozolanas ou cimentantes) chegando-se a 60%;
- Quando empregadas adições reativas, a grande maioria dos trabalhos propõe composições ternárias e quaternárias de aglomerantes, observando-se um efeito de sinergia entre as diferentes adições;
- Quando empregadas adições inertes, os teores de utilização atingiram 50% em relação à massa de cimento, observando-se em dois trabalhos (LISBÔA, 2004; CAVALCANTI, 2006) a mistura do filer com uma adição reativa – sílica, em pequena quantidade;
- Foram obtidos elevados consumos de finos, não sendo observada relação com o fato de ter-se empregado um método racional de dosagem;
- Em apenas um dos trabalhos citados (PATEL et al., 2004) houve uma análise estatística para verificação da interferência da quantidade de adição nas propriedades do CAA.

RESUMO

Domone (2006), após um levantamento dos diversos trabalhos publicados sobre CAA entre os anos de 1993 e 2003, aponta os elevados teores de finos empregados, bem como a ausência de abordagem acerca da escolha do tipo de adição.

Assim, nos trabalhos citados, os quais datam de 2004 em diante, percebe-se ainda a deficiência em se definir racionalmente a quantidade de adição mineral que deve ser empregada para a produção do CAA, bem como a ausência de investigações que contemplem aspectos químicos (reatividade, carga de superfície) e aspectos físicos referentes a forma, finura e distribuição granulométrica. Deste modo, destaca-se a necessidade de se entender melhor o efeito dos finos no CAA, voltando-se para as suas propriedades micro e

macroscópicas, como forma de se definirem parâmetros para o emprego destes materiais, a partir de um procedimento padrão.

2.3.2 Agregados

No CAA os agregados são utilizados em teores inferiores aos usualmente encontrados nos concretos convencionais. Há necessidade de se limitar a quantidade e a dimensão máxima, especialmente com relação ao agregado graúdo, para que se tenha melhor controle dos critérios de segregação e bloqueio. Bouzoubaâ e Lachemi (2001) citam que para se evitar a segregação do CAA, um importante artifício é aumentar o teor de agregado miúdo em 4% ou 5%, com redução do agregado graúdo. Para Domone (2006) as proporções mais críticas para a produção do CAA são: agregado graúdo/pasta no concreto, e agregado miúdo na argamassa.

Khayat et al. (2004) atestam que a redução do volume de agregado graúdo do concreto é mais efetiva para que se tenha uma boa resistência ao bloqueio e fácil espalhamento, do que a redução da relação agregado miúdo/pasta. Quanto menor a quantidade de partículas, maior a distância entre elas, reduzindo-se a fricção interpartícula e facilitando-se a fluidez. Esta maior distância entre os grãos também poderia ser conseguida através da incorporação de água, porém, efeitos negativos seriam observados no concreto, como a ocorrência de segregação.

Cannon (2005) verificou que, independente da dimensão máxima do agregado graúdo, a área superficial das partículas de areia a ser envolvida pela pasta de cimento é maior do que a área total dos grãos do agregado graúdo, de forma que a fluidez da mistura é governada pela porção de argamassa. Segundo o autor, a dimensão máxima do agregado deve ser determinada em função do espaçamento entre as armaduras e da distância de espalhamento do concreto.

A distribuição granulométrica dos agregados pode ser mais importante do que a dimensão máxima ou o tipo, conforme cita Domone (2006).

Kwan e Mora (2001) apresentam que quanto mais vazios existirem entre os grãos do agregado haverá redução da trabalhabilidade das misturas e maior consumo de água. Esta redução da trabalhabilidade pode ser afetada por parâmetros de forma, como a angulosidade das partículas, ou devido ao consumo de pasta necessário para preencher os espaços vazios. Para que o movimento entre as partículas do agregado seja facilitado, é necessário que haja um filme de pasta de cimento envolvendo os grãos, que irá funcionar como um lubrificante. Esta

camada de pasta é chamada por alguns autores de excesso de pasta, e depende da granulometria, forma e textura superficial dos agregados (BUI et al., 2002; SHI; WU, 2005). Na Figura 1 tem-se a representação da distribuição da pasta em torno do agregado, indicando-se também o diâmetro máximo e a distância interpartícula, a partir dos quais é medido o excesso de pasta. Powers (1968) aponta que dividindo-se o volume de pasta em excesso pela área total da superfície do agregado com a qual ela faz contato, obtém-se a espessura desta camada de pasta, e esta corresponde a aproximadamente metade da distância de separação das partículas, como pode ser visto na figura.

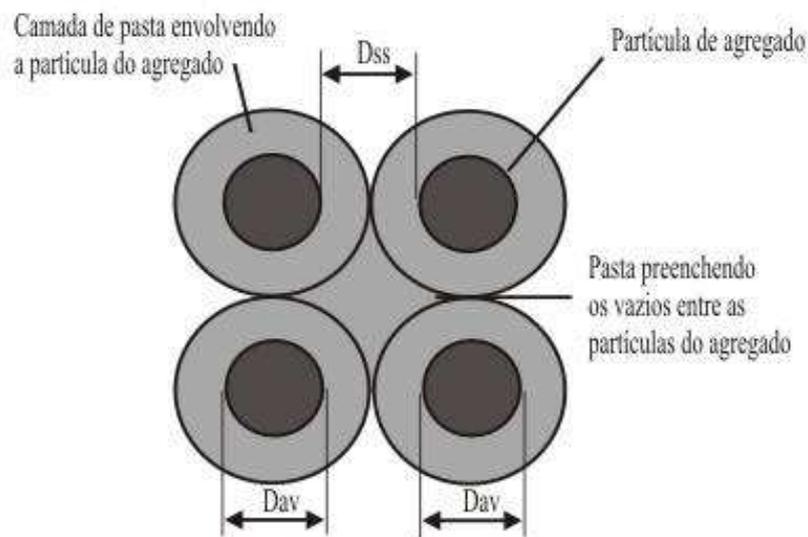


Figura 1 – Teoria do excesso de pasta (BUI et al., 2002) – Dss: distância interpartícula; Dav: diâmetro do agregado

Diversas propriedades dos agregados exercem influência nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido, podendo-se citar dimensão, granulometria, forma e textura superficial. Para exemplificar, agregados mais angulosos e com superfície rugosa contêm mais vazios do que agregados arredondados de superfície lisa, e irão demandar mais água para garantir a trabalhabilidade do concreto, afetando também a resistência à compressão (JAMKAR; RAO, 2004).

Segundo Bouquety et al. (2007), a forma do agregado é um dos principais parâmetros que caracteriza sua qualidade. Jamkar e Rao (2004) citam que a forma e a textura superficial do agregado pode variar de angular e rugoso até arredondado e liso. Conforme os mesmos autores, esta variação depende de alguns fatores como o tipo da rocha mãe e grau de estratificação, as forças às quais é submetida durante a formação e o tipo de britagem. Todas

estas variações serão refletidas posteriormente nas propriedades das misturas de concretos e argamassas.

Normalmente, a forma do agregado é determinada pelas relações entre as dimensões das partículas (comprimento, largura e espessura), conforme apresenta Bouquety et al. (2007), através de métodos normatizados. Indiretamente, a forma pode ser determinada através de outras características dos agregados como densidade, velocidade de sedimentação, comportamento das partículas em um plano inclinado e teor de vazios (JAMKAR; RAO, 2004).

Donza et al. (2002) desenvolveram um estudo avaliando a influência do agregado miúdo no concreto. Comparando o agregado natural com o artificial, os autores mostram que o último leva a maiores dosagens de aditivo para compensar o efeito da forma e textura de suas partículas. Estas propriedades também influenciam na interação pasta-agregado, o que, por sua vez, vai afetar a resistência à compressão.

RESUMO

Os agregados constituem, assim, elementos de grande importância na produção do CAA, principalmente no que diz respeito às suas propriedades físicas, influenciando decisivamente nos critérios de auto-compactabilidade. Isto demonstra a importância de se estudar melhor estes materiais, tendo como um ponto fundamental a busca de composições granulométricas otimizadas.

2.3.3 Composição granulométrica

Um importante aspecto a ser definido em relação aos agregados empregados no CAA diz respeito à granulometria. Quando a distribuição granulométrica dos agregados não é contínua, podem ocorrer alguns problemas no concreto, como: maior consumo de cimento, levando a um aumento no custo; redução da fluidez; e existência de mais vazios entre os agregados.

Conforme descreve Neville (1997), os principais fatores afetados pela granulometria são a área superficial dos agregados, o volume relativo ocupado pelas partículas, a trabalhabilidade

da mistura e a tendência à segregação. Agregados com composição granulométrica contínua produzem misturas com menor consumo de materiais cimentícios e água, reduzindo, conseqüentemente, problemas relacionados à durabilidade como retração, fissuração e eflorescência. Quando se utiliza agregados com distribuição granulométrica descontínua problemas de segregação e exsudação ocorrem com freqüência, estes tipos são recomendados para misturas de baixa fluidez, adensadas por vibração, sendo, portanto, desaconselhadas para o uso em CAA.

Para que os efeitos negativos decorrentes da má distribuição das partículas dos sólidos sejam minimizados, uma medida importante é utilizar maior quantidade de materiais cimentícios, os quais podem corrigir a granulometria. Outra ferramenta disponível é o uso de aditivos promotores de viscosidade, os quais tendem a aumentar a estabilidade do concreto (NASVIK, 2003).

Desta forma, a utilização de agregados com curva granulométrica otimizada é um fator muito importante para se conseguir as propriedades desejadas no CAA, e isto pode ser conseguido através da elaboração de curvas de composição granulométrica de diferentes tipos de agregados.

Os primeiros estudos referentes à composição granulométrica dos agregados foram realizados por William Fuller (CARNEIRO et al., 2002). Em seguida, surgiram diversos trabalhos que visavam encontrar métodos de se definir composições ideais, ou seja, que levem a granulometrias contínuas, e maior compacidade da mistura de concreto ou argamassa.

Dentre os trabalhos apresentados no Brasil para a obtenção de composições de agregados, pode-se destacar o estudo realizado por Carneiro (1999). O método propõe que a distribuição do tamanho das partículas se dá segundo uma progressão geométrica, a partir da expressão apresentada na Equação 4.

$$A = 100 \cdot \left(\frac{1 - P_r^n}{1 - P_r} \right) \quad (4)$$

Onde:

- A = primeiro termo do somatório, correspondente à quantidade de material retido na peneira de abertura máxima;
- P_r = razão entre as quantidades em massa retidas em cada peneira;
- n = número de termos da PG.

Um sistema de partículas com ampla faixa de distribuição das dimensões permite a obtenção de misturas mais densas, e com menor espaço para a água, ou seja, com menor teor de vazios.

Segundo Moosberg-Bustnes et al. (2004) o empacotamento ideal das partículas, e que vai permitir bons resultados em termos de trabalhabilidade, ocorre quando o volume relativo de cada fração é maior nas frações de menor dimensão. Isto significa que há necessidade de maior quantidade de partículas menores para preencher os vazios entre as maiores.

Os parâmetros que influenciam no grau de empacotamento das partículas são: granulometria, forma, esfericidade e textura, conforme indicam Kwan e Mora (2001). Estes parâmetros podem afetar também a fricção entre as partículas e, conseqüentemente, a fluidez das misturas. Os autores citam que o efeito da forma é difícil de ser entendido, até porque não há uma definição clara de como estes parâmetros são medidos.

Na Equação 5 apresenta-se a formulação para o cálculo da densidade de empacotamento das partículas - Φ , podendo-se, a partir daí, determinar-se o volume de vazios entre elas (Equação 6). Com a redução da densidade de empacotamento das partículas, têm-se concretos menos fluidos e com maior demanda de água.

$$\Phi = \frac{\text{volume das partículas}}{\text{volume total do agregado}} \quad (5)$$

$$\text{Teor de vazios} = 1 - \Phi \quad (6)$$

Brouwers e Radix (2005) definem outro parâmetro chamado de Fator de empacotamento ou *Packing Factor* (PF), cuja expressão encontra-se na Equação 7. Segundo os autores, quanto melhor o empacotamento das partículas, mais água ficará disponível para lubrificar os sólidos, fazendo com que a fluidez do concreto seja melhorada.

$$PF = \frac{\text{densidade aparente do agregado na mistura}}{\text{densidade aparente do agregado no estado solto}} \quad (7)$$

Nesta expressão, o numerador representa a condição de empacotamento das partículas do agregado na mistura de concreto, e o denominador, a densidade aparente dos grãos do agregado solto ao ar.

O Fator de empacotamento indica ainda a relação entre a quantidade de agregados e a quantidade de pasta na mistura. De acordo com Su e Miao (2003), quanto maior o valor do PF, mais agregado está sendo utilizado, portanto, menor será a fluidez da mistura.

Fu e Dekelbab (2003) apontam que há uma relação entre a densidade de empacotamento (semelhante ao fator de empacotamento) dos agregados e as propriedades do concreto no estado fresco, de modo que melhores resultados são obtidos nas misturas com empacotamento próximo do máximo. Segundo os autores, devido ao seu efeito na trabalhabilidade, outras

propriedades são afetadas como porosidade, permeabilidade e, indiretamente, a resistência à compressão.

Alguns métodos para a determinação da proporção ideal de agregados no CAA utilizam como estratégia a análise do teor mínimo de vazios de diversas combinações de agregado miúdo e graúdo, como é o caso de Gomes (2002). Variando-se a proporção entre os agregados miúdo e graúdo, há uma redução do teor de vazios à medida que se incorpora agregado miúdo até certo valor, acima deste ponto os vazios da mistura voltam a aumentar (BROUWERS; RADIX, 2005; SHI; WU, 2005). Para Jamkar e Rao (2004), existe uma única combinação entre os agregados miúdo e graúdo que leva à máxima fluidez, de modo que o volume de agregado miúdo depende da granulometria, forma e textura superficial do graúdo.

A distribuição granulométrica contínua de todos os sólidos da mistura resulta em maior trabalhabilidade e estabilidade, e menor consumo de aditivo. Uma estratégia interessante para melhorar a granulometria, de acordo com Brouwers e Radix (2005), é utilizar como agregado miúdo uma combinação entre areia grossa com uma areia média ou fina, tendo-se ganhos em termos de fluidez, manutenção da fluidez, resistência ao bloqueio, resistência à segregação, consumo de aditivo e resistência à compressão. Além disso, o uso de areia de granulometria fina aumenta a quantidade de finos da mistura podendo reduzir o consumo de materiais cimentícios.

Ball (1998) cita ainda que o controle da distribuição granulométrica das partículas pode levar a muitos benefícios como: redução da eflorescência, melhor acabamento da superfície, maior desempenho do processo de hidratação e maior resistência à compressão.

RESUMO

Todos os métodos apresentados procuram um modelo capaz de fornecer maior compacidade, fluidez e estabilidade das misturas, a partir de composições granulométricas com distribuição contínua dos grãos. Nota-se a evidente contribuição que pode ser dada em termos de melhorias do CAA quando considerada uma composição adequada entre as partículas dos agregados e, até mesmo, incluindo-se os materiais finos em uma interação de todos os sólidos da mistura.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste trabalho propõe-se a produção do CAA, verificando-se a adequação do uso de adições minerais com diferentes valores de superfície específica, com o intuito de se obter misturas otimizadas em relação ao teor de finos.

A seguir tem-se uma descrição do procedimento experimental adotado, o qual foi dividido em duas etapas:

- 1ª Etapa: o procedimento detalhado desta etapa, chamada de Estudo Piloto, encontra-se no Apêndice B. A principal finalidade deste estudo foi fazer uma investigação preliminar acerca do comportamento dos materiais em relação às variáveis estudadas, ajustando-se a metodologia para o desenvolvimento experimental definitivo da tese. Assim, neste capítulo estão apresentadas apenas as informações necessárias para o entendimento dos parâmetros de dosagem definidos para a etapa seguinte.
- 2ª Etapa: utilizando-se os resultados da etapa anterior, esta teve como objetivo propor a otimização da dosagem do CAA, verificando-se as diversas características das adições e sua interferência nas propriedades das misturas.

A seguir, tem-se uma descrição geral do trabalho desenvolvido na Etapa 1.

3.1 Etapa 1 – Estudo Piloto

No Estudo Piloto foram empregados o cimento CP II Z 32 e, como adição mineral, o metacaulim em três classes distintas de finura, sendo denominado por MF (Metacaulim Fino), MN (Metacaulim Normal) e MG (Metacaulim Grosso). Os dois primeiros tipos, MF e MN apresentam valores bastante aproximados de superfície específica – 24000 m²/g e 22000 m²/g, respectivamente, enquanto que para o MG tem-se 7000 m²/g. Os agregados foram empregados formando-se uma mistura ternária entre areia e dois agregados graúdos com dimensão máxima característica de 9,5 mm e 19 mm, de modo a obter-se uma composição granulométrica que proporcionasse um melhor empacotamento dos grãos. Utilizou-se também um aditivo superplastificante de base policarboxilatos.

Foram realizados ensaios em pasta e concreto, a fim de ajustar-se o teor de finos, a relação água/finos, o volume de pasta (em relação ao volume de concreto) e o teor de superplastificante para a obtenção de misturas com as propriedades requeridas para um CAA. Inicialmente, foram produzidas pastas utilizando-se o metacaulim MF seguindo-se os parâmetros adotados por Cyr et al. (2006) que foram: teores de substituição da adição à massa de cimento de 5%, 10%, 17,5%, 35%, 50% e 75%, e relação água/finos de 0,5. Neste momento, houve um primeiro ajuste do teor de aditivo e da relação água/finos. Em seguida, partiu-se para o ajuste em misturas de concretos, incluindo-se nesta fase a variação do volume de pasta em relação ao concreto nos valores de 0,4, 0,45 e 0,5.

Com estas duas primeiras fases do estudo desenvolvidas, foram selecionadas as misturas que apresentaram propriedades adequadas no estado fresco, em termos de espalhamento, fluidez e segregação, bem como no estado endurecido a partir da avaliação da resistência à compressão. Com isto, foram produzidas novas pastas empregando-se o metacaulim nas variações MN e MG para verificar a interferência da superfície específica no comportamento das misturas.

Para finalizar, foram produzidas argamassas utilizando-se metacaulim MF com uma nova proposta para os teores de substituição – 5%, 10%, 15% e 20%, a fim de estimar-se o comportamento nos estados fresco e endurecido do CAA, promovendo-se, assim, a definição final dos parâmetros de dosagem que foram utilizados para a execução da Etapa 2.

Parte deste estudo foi publicada no Periódico *Construction and Building Materials* (MELO; CARNEIRO, 2010), o qual se encontra no Apêndice C.

A partir dos resultados obtidos no Estudo Piloto pode-se concluir que:

- O tipo de cimento utilizado (CP II Z) pode ter mascarado algum resultado tendo em vista a parcela de pozolana em sua composição, combinada com o uso do metacaulim, que é uma adição pozolânica;
- Houve grande semelhança entre os dois primeiros tipos de metacaulim – MF e MN nos resultados das misturas;
- Utilizou-se uma composição granulométrica dos agregados com Pr de 0,7 (Equação 4, item 2.3.3), a qual apresentou-se satisfatória nos ensaios, e que tem a seguinte proporção entre os componentes: brita 19 mm = 31,84%, brita 9,5 mm = 22,28% e areia = 45,88%;
- As misturas com teores de substituição de 50% e 75% da massa de cimento por metacaulim necessitaram de grande quantidade de água, (relações água/finos de 0,8 e 1,1, respectivamente), para que fosse possível realizar ensaios nas pastas. Ainda assim, os concretos com estas características não apresentaram bom desempenho no estado fresco;

- Independente do tipo de metacaulim, quanto maior seu teor maior foi o consumo de aditivo, comportamento observado nas pastas e nos concretos;
- Com a redução da superfície específica do metacaulim houve menor consumo de aditivo para se atingir as propriedades de auto-compactabilidade, com os três teores de substituição;
- A influência da superfície específica, destacada no tópico anterior, foi tanto mais evidente quanto maior a porcentagem de metacaulim empregada;
- O volume de pasta do concreto foi aumentado em algumas misturas, para as quais se observou aumento da fluidez e redução do consumo de aditivo;
- Não se observou grandes variações da resistência à compressão em função do volume de pasta empregado, por outro lado, houve uma redução com o aumento da quantidade de metacaulim e com a redução da sua superfície específica;
- Ensaio de resistência à compressão realizados em argamassas indicaram um limite de 15% de utilização do metacaulim para que o desempenho da mistura não fosse comprometido.

De posse destas conclusões, as seguintes diretrizes foram assumidas para a realização da Etapa 2 – Desenvolvimento Experimental da Tese:

- Utilização de um cimento com uma pequena quantidade de pozolana;
- Utilização do metacaulim em duas classes de finura – MF e MG;
- Utilização das adições nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%;
- Variação da relação água/finos nos mesmos valores para todos os teores de adição – 0,4, 0,5 e 0,6;
- Realização de ensaios em pasta e concreto;
- Utilização de um único volume de pasta em relação ao volume de concreto – 0,4.

3.2 Etapa 2 – Desenvolvimento experimental da tese

A partir do Estudo Piloto apresentado, foi definido o procedimento experimental seguido nesta etapa. Estão incluídos neste procedimento os materiais a serem utilizados de modo a obter-se o melhor desempenho das misturas para a produção do CAA.

As adições minerais empregadas consistem em materiais comumente encontrados na região de estudo, os quais apresentam características físicas e químicas que satisfazem as propriedades requeridas para o concreto. O cimento foi escolhido em função do teor de material pozolânico em sua composição. Os agregados são oriundos de uma jazida fornecedora de boa parte dos agregados utilizados na região. Estes materiais foram caracterizados conforme os procedimentos descritos em norma, além da observação de alguns outros aspectos relevantes para o entendimento dos diversos fatores intervenientes nas propriedades das misturas.

Quanto às composições, foram realizados ensaios em pastas antes da produção do concreto, avaliando-se o atendimento aos requisitos de auto-compactabilidade. A realização de ensaios em pasta é importante, uma vez que é nesta fase que atuam os finos, sendo ela a principal responsável pelas propriedades reológicas do concreto. A partir da observação das características das pastas foi possível antever as propriedades dos concretos, julgando-se, então, que não seria necessário realizar ensaios em argamassas, o que resultou em um menor tempo de investigação experimental.

As misturas foram produzidas variando-se o tipo dos materiais e alguns parâmetros de dosagem, como o teor de água, adições minerais e aditivo. A seguir, tem-se uma descrição resumida das etapas apresentadas no fluxograma.

- Seleção e caracterização dos materiais → foram investigados os materiais utilizados na região procedendo-se à sua caracterização e estudo dos principais aspectos que possam influenciar nas propriedades do concreto;
- Estudo em pasta → estes estudos foram realizados com o intuito de verificar-se mais detalhadamente a influência dos materiais constituintes na obtenção dos parâmetros de dosagem do concreto. A partir dos primeiros resultados de ensaios pode-se verificar a adequação das definições iniciais, fazendo-se os ajustes necessários na metodologia de produção do concreto com os materiais empregados;
- Estudo em concreto → os concretos foram produzidos a partir da seleção das misturas produzidas na forma de pastas, verificando-se suas propriedades no estado fresco e endurecido, e relacionando-as com os parâmetros de dosagem e as características dos materiais.

Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma de todas as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho.

A maior parte do estudo experimental foi desenvolvida no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Outros laboratórios foram utilizados conforme a necessidade de aplicação de equipamentos e/ou procedimentos específicos: Laboratório de Química de Interfaces e Laboratório de Metalurgia Extrativa, ambos pertencentes ao Grupo de Tecnologia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE; e Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) e Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da UFPE, Laboratório de Raio-X do Departamento de Física da UFPE, Laboratório de Construção Civil (LCC) e Laboratório de Materiais (LMat) do Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP) e Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA.

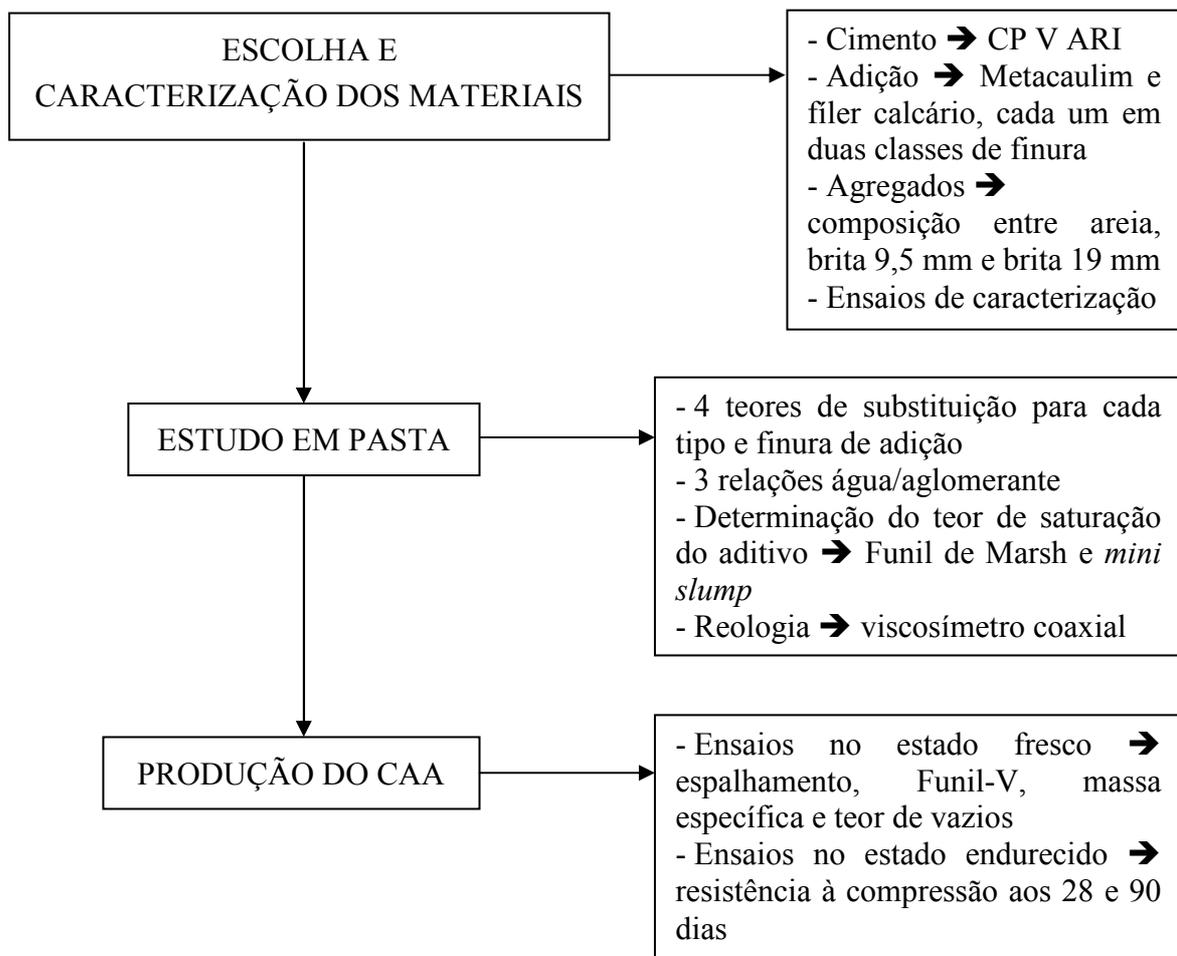


Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada no trabalho

3.2.1 Seleção e caracterização dos materiais

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados materiais produzidos e distribuídos no Estado de Pernambuco, procedendo-se à sua caracterização através das normas vigentes na ABNT.

3.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP V ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos. Este cimento apresenta algumas vantagens para a produção do CAA, que são: (a) elevada superfície específica, o que auxilia no aumento da fluidez do concreto devido à redução da tensão de escoamento da mistura (NUNES, 2001); (b) baixo teor de pozolana, o que possibilita melhor entendimento da influência das adições minerais no processo de hidratação do cimento, especialmente no que diz respeito às adições pozolânicas. Além desses efeitos no estado fresco, este cimento classifica-se como de Alta Resistência Inicial, exercendo então grande influência nas propriedades do concreto no estado endurecido. Para a análise de distribuição granulométrica do cimento realizou-se o ensaio de granulometria a laser, no equipamento medidor de tamanho de partículas Mastersizer 2000 da MALVERN Instruments disponibilizado pelo Laboratório de Química de Interfaces do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE.

A análise por granulometria a laser utiliza a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo e consiste na medição dos ângulos de difração dos raios de luz que são relacionados ao diâmetro de partícula. Quanto maiores os tamanhos das partículas, menores são os ângulos de espalhamento. Antes do início das análises uma etapa importante é a escolha do dispersante, o qual vai evitar a aglomeração de partículas que, por sua vez, pode gerar erros de medida (SAMPAIO et al., 2007). No presente trabalho os ensaios foram realizados por via úmida, de modo que a água atuou como dispersante das partículas.

Obteve-se ainda imagens da amostra de cimento por meio de uma lupa do tipo binocular da marca LEICA ZOOM 2000, com aumentos de 10,5 a 45 vezes, pertencente ao Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da UFPE. As imagens foram registradas por uma

câmera fotográfica Canon PowerShot A40, com 2.0 Mega Pixels, e 7,5 vezes de zoom óptico e digital combinados, acoplada a uma das lentes da lupa.

3.2.1.2 Adições minerais

Como adição mineral empregou-se metacaulim e filer calcário. Tendo em vista o objetivo de investigar em mais detalhes o efeito da fração fina (especialmente no que diz respeito à superfície específica) nas misturas, o uso de uma adição pozolânica – o metacaulim, e outra considerada inerte – o filer calcário, permite a análise dos resultados a partir de materiais de diferentes características químicas, sendo um ponto importante para a otimização da dosagem. As adições minerais foram empregadas em duas classes de finura, sendo identificados como metacaulim grosso – MG, metacaulim fino – MF, calcário grosso – CG, calcário fino – CF. A seguir estão listados os ensaios realizados para caracterização e investigação das propriedades das adições.

3.2.1.2.1 Granulometria

A distribuição granulométrica das adições foi avaliada empregando-se a técnica de granulometria a laser, conforme realizado no cimento.

No caso das adições de menor superfície específica (metacaulim grosso e calcário grosso) eliminou-se a fração acima de 0,075 mm através de peneiramento (peneira nº 200) para que não houvesse danos ao equipamento e os resultados pudessem ser padronizados. As frações maiores foram ensaiadas por peneiramento complementando a curva de distribuição granulométrica.

3.2.1.2.2 Superfície específica

A superfície específica foi determinada, inicialmente, através do ensaio de Permeabilímetro de Blaine – NBR NM 76 (ABNT, 1998), que é amplamente utilizado, de aparelhagem simples e fácil execução. Neste método força-se a passagem de um volume de ar através de uma camada compactada de pó, cujo tempo de escoamento medido é relacionado à superfície específica das partículas que o compõem (NEVILLE, 1997). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil (LCC) do ITEP.

Uma técnica mais refinada, que leva a resultados de maior precisão para materiais muito finos, é o método do BET, cuja sigla faz referência aos pesquisadores que desenvolveram a Teoria de Brunauer, Emmet e Teller, conforme citam Sampaio et al. (2007). Segundo os autores, este método consiste na medição da área superficial dos sólidos por meio da determinação do volume de gás necessário para formar uma monocamada, adsorvida sobre a sua superfície. Este ensaio foi realizado para os dois tipos de metacaulim e de pó calcário, tendo sido desenvolvido no Laboratório de Materiais (LMat) do ITEP.

3.2.1.2.3 Avaliação visual de imagens

Foi feita uma análise visual de imagens com o objetivo de identificar características referentes à superfície das partículas – forma e tamanho, e verificar sua relação com as propriedades das misturas. Apesar de não ser uma avaliação muito precisa, uma vez que possui um caráter subjetivo, pois é fruto de uma interpretação a partir daquilo que se vê, a visualização das imagens pode auxiliar na caracterização das adições minerais.

Diversos modelos têm sido propostos na literatura para a verificação da forma dos grãos. Mora e Kwan (2000) propuseram o método chamado de *Digital Image Processing* – DIP, que pressupõe a aquisição de imagens das partículas através de uma câmera de vídeo, as quais são posteriormente analisadas buscando-se identificar o contorno de cada grão. A partir daí são determinados parâmetros como o alongamento, esfericidade, forma e convexidade (consiste na área de um traçado convexo circunscrito à área superficial efetiva do agregado, projetada num plano).

Araújo et al. (2003) realizam a análise de imagens a partir da obtenção fotográfica dos grãos, os quais são divididos em frações conforme a distribuição das dimensões. Utiliza-se o *software* AUTOCAD para a determinação da área projetada e do diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula, os quais são necessários para o cálculo do grau de esfericidade. Barata (2007), por sua vez, utilizou o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para determinação da micromorfologia e do tamanho das partículas de amostras de metacaulim. No presente trabalho, foi feita uma visualização por meio de lupa, cujas especificações encontram-se no item 3.2.1.1.

3.2.1.2.4 Análises térmicas

Foram realizadas análises térmicas – Análise Termogravimétrica (ATG) e Análise Termodiferencial (DTA) nas amostras de metacaulim e calcário. As amostras foram ensaiadas no Laboratório de Tecnologia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, utilizando-se o Sistema de Análises Térmicas, modelo RB-3000-20 da Bp Engenharia. A taxa de aquecimento aplicada foi de 10°C/minuto, chegando-se a uma temperatura máxima de 1000°C, que determinou um tempo de duração de cerca de 100 minutos para cada ensaio.

Estas análises podem ser utilizadas tanto na identificação quanto na quantificação das fases de uma amostra, e as medidas são feitas em função da variação da temperatura (LUZ et al., 2004).

Através da Termogravimetria são determinadas mudanças na massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, quando submetida a aquecimento lento. Estas variações de massa podem ser causadas por alterações físicas ou químicas do material. Segundo Dal Molin (2007), com esta técnica é possível acompanhar a estabilidade térmica dos materiais e a intensidade das reações.

Na Análise Térmica Diferencial há um acompanhamento da temperatura da amostra ensaiada em comparação com um material de referência, podendo-se obter informações a respeito da temperatura de fusão e cristalização, reações de decomposição, mudança de fase, oxidação etc (HASPARYK, 2005).

Como resultados da análise são gerados picos, sendo os picos endotérmicos associados a reações de fusão, reações de decomposição ou dissociação, e os picos exotérmicos associados a mudanças de fase cristalina (ARAÚJO, 1998).

3.2.1.2.5 *Difração de raios-X*

A Difração de raios X (DRX) consiste numa técnica simples e amplamente empregada para a determinação das fases cristalinas presentes nos materiais, identificando a estrutura, composição e estado destes (DAL MOLIN, 2007).

Para caracterização através da realização do ensaio de Difração de Raios-X, as amostras de metacaulim foram enviadas ao Laboratório de Difração de Raios-X da UFPA onde se utilizou o difratômetro da marca Philips, modelo PW 1050. Quanto às amostras de pó calcário, estas foram enviadas ao Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFPE– DRX, para as quais se utilizou o difratômetro Siemens, modelo D5000.

Segundo Luz et al. (2004), a DRX é uma técnica quantitativa que está baseada na interação de ondas na frequência de raios-X com os planos de repetição do retículo cristalino dos materiais. A base teórica do método é conhecida como Lei de Bragg, expressa pela Equação 8.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (8)$$

Sendo: λ = comprimento de onda da fonte de raios X; d = distâncias interplanares; θ = ângulo de reflexão. Cada mineral possui um conjunto típico de distâncias interplanares, as quais se encontram tabuladas na literatura.

Com os dados do ensaio são elaborados os espectros de difração de raios-X, ou difratogramas. Através dos difratogramas são identificados os picos das fases cristalinas característicos para cada composto (DAL MOLIN, 2007).

3.2.1.3 Composições entre os finos

Foram realizados ensaios para verificar o comportamento das composições entre os finos, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% de substituição da massa de cimento pelas adições. Estes teores foram adotados também na produção das pastas e concretos, conforme descrição apresentada posteriormente nos itens 3.2 e 3.3.

Foram realizados ensaios no estado anidro – análise de imagens, e massa unitária, e no estado fresco (mistura dos finos com água, sem o uso de aditivos) – potencial zeta e demanda de água.

3.2.1.3.1 Avaliação visual de imagens

A fim de verificar a interação que ocorre entre os grãos do cimento e das adições, foram obtidas imagens por meio de lupa, conforme descrito no item 3.2.1.1. As imagens foram realizadas nos teores de 5% e 20%, pois se pretendia evidenciar a finura destes materiais e o grau de aglomeração alcançado pela composição, de modo que não seriam observadas grandes diferenças nos teores intermediários, optando-se, assim, por verificar as composições com teores extremos de adição mineral. Como descrito no item 3.2.1.2.3, deve-se evidenciar a pequena precisão atribuída a este tipo de análise, mas, ao mesmo tempo, a possibilidade de se visualizar o material e perceber seu comportamento no que diz respeito às características morfológicas.

3.2.1.3.2 Massa unitária

Foram realizadas misturas secas entre o cimento e as adições minerais a fim de acompanhar o desenvolvimento dos vazios nestas composições e, assim, obter parâmetros que auxiliem no procedimento de dosagem tendo em vista o grau de empacotamento dos grãos destes materiais. Mediram-se ainda as massas unitárias de cada material para comparação.

Neste ensaio, utilizou-se um recipiente de volume igual a 395 cm³ e massa de 267,2 g.

3.2.1.3.3 Potencial zeta

Com o intuito de verificar a interferência das adições minerais no desenvolvimento da hidratação das misturas, foram realizados ensaios de determinação do potencial zeta. Estes ensaios foram realizados sem a incorporação de aditivos químicos, no intuito de ser um elemento de caracterização das adições e das combinações entre os finos. Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia de Minas da UFPE e o equipamento utilizado consiste em um Medidor de potencial eletroacústico modelo ESA 9800, o qual emprega a técnica de eletrocinética.

Para a realização do ensaio a amostra foi constituída por uma pequena quantidade de material sólido, de modo a garantir que os eletrodos não fossem obstruídos e, conseqüentemente, danificados. Para isto, utilizou-se uma concentração de 1% de sólidos (cimento + adições) em massa, em relação ao volume total da solução, que foi de 220 ml. As leituras foram realizadas após 5 minutos de contato dos sólidos com a água, de modo que já tivesse sido iniciada a hidratação do cimento e, portanto, a dissolução dos íons. De acordo com Zampiere (1989 apud KIHARA; CENTURIONE, 2005), a dissolução e precipitação dos hidratos iniciais (etringita e hidróxido de cálcio) se dá nos 10 minutos iniciais da hidratação do cimento, chamado de Estágio inicial, sendo que nos primeiros minutos deste estágio há um aumento significativo da disponibilidade de íons de cálcio na solução.

A seguir, tem-se uma descrição da técnica, bem como são apresentados alguns resultados obtidos na literatura para compostos cimentícios.

Quando se tem uma solução de partículas sólidas em meio aquoso, estas adquirem uma carga elétrica na superfície e seus efeitos eletrocinéticos dão um indicativo dos fenômenos que acontecem na interface sólido-líquido. A partícula carregada está sujeita a uma força direcionada para o lado do campo eletrostático cuja carga é oposta à da partícula. Esta força é diretamente proporcional ao potencial zeta e o sinal assumido por ele indica a direção do movimento da partícula (POWERS, 1968; LUZ et al., 2004).

Um dos modelos que descrevem a estrutura do campo eletrostático ao redor de uma partícula carregada em suspensão é o modelo da Dupla Camada Elétrica, ilustrado na Figura 3.

Conforme a descrição deste modelo, a camada de fluido adjacente à superfície da partícula é chamada de Camada de Stern. Nesta camada há um número de íons de carga contrária (contra-íons) atraídos ao redor da partícula. Em seguida tem-se a Camada Difusa, na qual há uma concentração de íons repelidos da Camada de Stern e cujas cargas têm o mesmo sinal da superfície das partículas. A interface entre estas duas camadas é conhecida como plano de cisalhamento e o potencial medido neste plano é chamado de potencial zeta (ζ), o qual é determinado a partir da mobilidade das partículas (YANG et al., 1997).

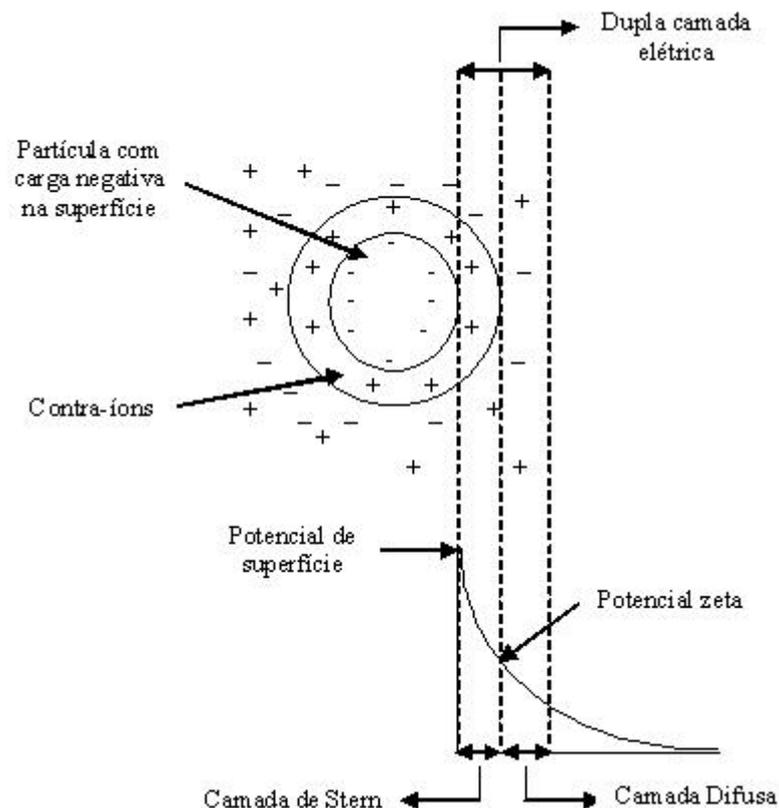


Figura 3 – Modelo da Dupla Camada Elétrica (Adaptado de HASPARYK, 2005)

Estudos citados por Powers (1968) apontam alguns indicativos com relação aos resultados obtidos a partir da medida do potencial zeta:

- Na dissolução de um composto, o potencial zeta é menor (considerando o sinal) quanto maior a valência do contra-íon;
- Partículas de cimento normalmente assumem uma carga positiva, que pode ser alterada em função da sua combinação com outro material, como um aditivo químico;
- Em pastas de cimento, o principal íon atuante na determinação da carga é o íon de cálcio (Ca^{2+});

- Nas pastas de cimento, os íons negativos (ânions) são principalmente a hidroxila (OH^-) e os íons de sulfato (SO_4^{2-});
- Os ânions são responsáveis pela neutralização da carga positiva e promoção da floculação;
- Alterações no potencial zeta são acompanhadas por mudanças nas forças inter-partícula, que propiciam variações que vão desde um estado de floculação até um estado de dispersão.

Algumas destas observações foram aprimoradas em estudos recentes, citados abaixo.

Yang et al. (1997) indicam que o potencial zeta do cimento apresenta alterações em função do tempo de hidratação. Segundo Mehta e Monteiro (2008), nos estágios iniciais da hidratação do cimento o mecanismo predominante é o de dissolução-precipitação, no qual há dissolução dos compostos em seus constituintes iônicos, seguida da formação e precipitação de hidratos. Yang et al. (1997) observaram ainda que com o tempo as suspensões de cimento estão sempre coaguladas ou floculadas, de modo que o grau de floculação não varia para a faixa de valores de potencial medido para este tipo de mistura (< 20 mV – valor absoluto).

Conforme observado por Uchikawa et al. (1997), o potencial zeta não está diretamente relacionado com a fluidez de pastas de cimento.

Segundo Luz et al. (2004), o sinal e o valor assumidos pelo potencial zeta influenciam significativamente no processo de adsorção de surfactantes, como os aditivos químicos, pelas partículas. Por outro lado, a adsorção de moléculas ionizadas, presentes nos aditivos que atuam por meio de efeito eletroestérico, altera o potencial zeta (OLIVEIRA et al., 2000). No caso dos aditivos cujo mecanismo de ação se dá por repulsão estérica, as cadeias poliméricas se estendem na vizinhança da superfície do grão impedindo a aproximação dentro da faixa de atuação da força de atração de van der Waals (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Medidas de potencial zeta realizadas por Hodne e Saasen (2000) em pastas de cimento apontaram valores negativos que tendem a aumentar com a absorção de íons Ca^{2+} presentes na água da mistura.

Viallis-Terrisse et al. (2001) verificaram o comportamento de compostos de C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) na presença de cátions alcalinos e identificaram que são os íons de cálcio que determinam o potencial zeta. Quando a concentração de cálcio é elevada (< 2 mmol/l) sua adsorção compensa a carga negativa do C-S-H levando a um aumento (considerando-se o sinal negativo) do potencial zeta e do pH do meio. A Figura 4 ilustra a curva de variação do potencial zeta e do pH em função da concentração de Ca^{2+} , encontrada pelos autores.

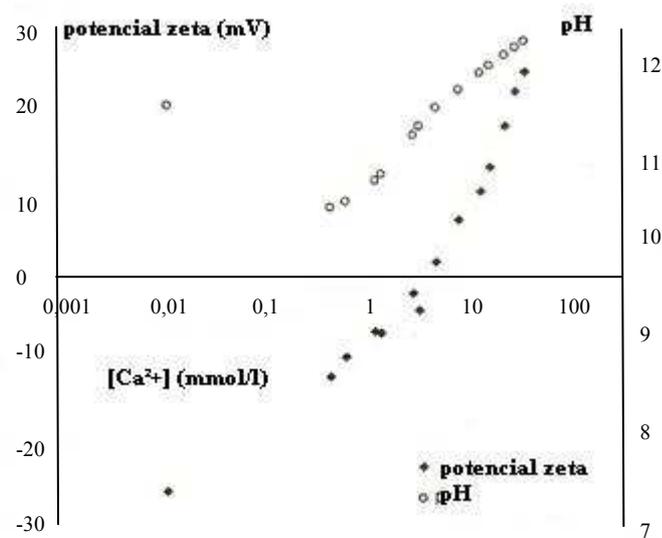


Figura 4 – Evolução do potencial zeta do C-S-H e pH em função da concentração de cálcio (VIALIS-TERRISSE et al., 2001)

Segundo Oliveira et al. (2000) na superfície das partículas sólidas há ligações atômicas incompletas que levam a reações de hidroxilação ou hidratação superficial em óxidos colocados em contato com a água. Os autores afirmam que quando o pH do meio aquoso é básico ($\text{pH} > 7$) as reações predominantes são entre os grupos $-\text{OH}$ da superfície dos óxidos e os íons hidroxila (OH^-), levando a partícula a assumir uma carga total negativa. Por outro lado, em meio ácido, as reações ocorrem com os íons hidroxônio (H_3O^+), o que gera uma carga positiva na partícula.

Partículas carregadas eletricamente em um meio líquido estão submetidas a uma força de repulsão que impede a aglomeração das partículas. A extensão de atuação desta força de repulsão é definida pela espessura da Camada Difusa, na qual há um decaimento gradativo do potencial elétrico com conseqüente redução da força de repulsão e da distância de separação entre as partículas. Caso estas partículas se aproximem de tal modo que passem a sofrer a atuação das forças atrativas de van der Waals, ocorre sua aglomeração (YANG et al., 1997; OLIVEIRA et al., 2000). Isto demonstra que o potencial zeta interfere também no grau de aglomeração ou dispersão das partículas, que, por sua vez, influencia diretamente nas propriedades de misturas frescas.

3.2.1.3.4 Demanda de água

Este ensaio, proposto por De Larrard (2000) como parte integrante do MEC (citado no item 2.2.4), representa a determinação da quantidade de água, em massa, necessária para preencher todos os vazios de uma mistura granular, a partir da qual ocorre um afastamento entre os grãos.

O ensaio consiste em determinar o consumo de água necessário para a mistura atingir a condição de pasta saturada. Este consumo é definido a partir de uma análise visual da mistura, conforme vai se acrescentando água, identificando-se o ponto de passagem do estado úmido para o estado capilar, ilustrados na Figura 5 (FORMAGINI, 2005). Este ponto representa o estado de pasta saturada, em que todos os vazios entre os grãos estão preenchidos por água.



Figura 5 – Diferentes condições de compactidade no ensaio de Demanda de água (FORMAGINI, 2005)

O ensaio seguiu o procedimento descrito por Formagini (2005). Pesou-se 350 g do material seco (cimento + adições minerais) e, na argamassadeira, acrescentou-se parte da água misturando-se em velocidade baixa. A cada intervalo de 1 minuto foi acrescentada uma pequena quantidade de água até a formação de aglomerados. Neste momento, paralisou-se a mistura por 30 segundos, procedendo-se à limpeza da pá. Em seguida a argamassadeira foi ligada em velocidade alta acrescentando-se novamente água em intervalos de 1 minuto, até que se observasse a formação de uma pasta homogênea e adensada no fundo do recipiente (estado capilar – ponto de demanda de água).

Assim, foi determinado o consumo de água para um ponto específico de consistência das misturas. Após a determinação desta demanda de água, foram calculadas as compacidades das misturas a partir da Equação 9, e a compactidade do cimento, por meio da Equação 10.

$$C = \frac{1}{1 + M_{H_2O} \left(\frac{m_{e1} \cdot m_{e2}}{m_{e2} \cdot M_1 + m_{e1} \cdot M_2} \right)} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{1 + m_{e1} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_1}} \quad (10)$$

Onde:

- C = compacidade do material
- M_{H_2O} = massa de água acrescentada até o ponto de demanda de água
- m_{e1} = massa específica do cimento
- m_{e2} = massa específica da adição mineral
- M_1 = massa de cimento na mistura
- M_2 = massa de adição mineral na mistura

3.2.1.4 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia quartzosa, considerada de granulometria média. Como agregado graúdo foram utilizados 2 tipos de brita, as quais eram anteriormente denominadas de brita 0 e brita 1 conforme a NBR 7211 (ABNT, 1995). Esta norma foi revisada em 2002, momento em que houve uma modificação nesta denominação, assim, o agregado graúdo empregado é caracterizado em função de sua dimensão máxima característica que é de 9,5 mm e 19 mm, respectivamente. Estes agregados foram escolhidos devido à limitação da dimensão máxima do agregado no CAA, para se evitar a segregação e o bloqueio.

Estes materiais foram caracterizados em relação à determinação da distribuição granulométrica – NBR NM 248 (ABNT, 2001), massa específica – NBR NM 52 (ABNT, 2002b) e NBR NM 53 (ABNT, 2002c) e massa unitária no estado solto – NBR NM 45 (ABNT, 2006).

As quantidades de agregados utilizadas foram definidas a partir de uma composição granulométrica dos mesmos, de modo a se obter os teores usuais empregados no CAA, obedecendo-se ao mesmo tempo a uma distribuição otimizada das partículas. A partir da distribuição granulométrica da areia e das britas, determinou-se a curva granulométrica ideal

destes agregados de acordo com o método apresentado por Carneiro (1999) (Equação 4, item 2.3.3). Esta metodologia foi adotada em trabalhos anteriores (MELO et al., 2007; PRADO et al., 2007) para a produção de concretos convencionais, nos quais se observou significativa melhora nas propriedades do estado fresco, especialmente em relação à coesão. O procedimento detalhado de determinação das composições foi realizado na fase de Estudo Piloto e encontra-se descrito no item A2 do Apêndice B.

3.2.1.5 Aditivo

Como aditivo químico foi utilizado um superplastificante com massa específica de $1,1 \text{ g/cm}^3$, teor de sólidos de 30% e cuja base química é de policarboxilatos. Esta formulação a base de polímeros garante maior eficiência no aumento da fluidez, sendo assim recomendada para o uso em CAA. Este aditivo é diferente do que foi utilizado no Estudo Piloto, pois aquele deixou de ser comercializado. Porém, a formulação é semelhante, de modo que é possível fazer um comparativo entre os resultados obtidos com os dois materiais.

Os aditivos foram dosados em porcentagem em relação à massa de cimento, considerando-se seu teor de sólidos.

3.2.2 Estudo das pastas para a produção do CAA

As pastas foram produzidas variando-se a porcentagem de substituição da massa de cimento por adição mineral, o teor de água e o tipo de adição, com o intuito de investigar quais as misturas que apresentavam características de auto-compactabilidade.

As seguintes variáveis foram consideradas na produção das pastas:

- Tipo de adição mineral: metacaulim e filer calcário;
- Finura das adições: duas classes de finura para cada adição – MF e MG (metacaulim), CF e CG (fíler calcário);
- Relação água/finos: 0,4, 0,5 e 0,6;
- Teor de substituição do cimento por adição mineral em massa: 5%, 10%, 15% e 20%;

- Teor de aditivo superplastificante: incrementos de 0,05% a 0,1%, até se atingir o ponto de saturação.

As misturas foram realizadas em uma argamassadeira da marca Pavitest com capacidade de 5 l (Figura 6), com um tempo de preparação de 4 minutos, conforme a seguinte sequência:

- Cimento + 80% da água → 30 segundos, em velocidade baixa
- Incorporação da adição mineral → durante 30 segundos, em velocidade baixa
- Mistura → 1 min, em velocidade alta
- Descanso e limpeza das pás → 2 minutos, argamassadeira parada
- Incorporação do aditivo + 20% da água → 1 minuto, em velocidade alta



Figura 6 – Produção das pastas em argamassadeira

Os primeiros ensaios realizados nas pastas tiveram como objetivo a determinação do teor de saturação do aditivo, através do Cone de Marsh e do *mini-slump* (espalhamento). Em função dos resultados dos ensaios realizados nesta fase, as misturas foram selecionadas ou eliminadas para o prosseguimento do trabalho experimental. Para isto, definiu-se uma matriz de pastas, a partir da qual foi possível avaliar misturas adequadas para o CAA, nas quais seriam incorporados os agregados.

Esta metodologia está de acordo com o que citam Barrak et al. (2009) e López et al. (2009) que demonstraram existir uma boa relação entre o desempenho das misturas nas fases de pasta e concreto, quanto ao teor de aditivos e propriedades reológicas, podendo-se entender a influência de cada componente na fluidez da pasta e, assim, selecionar de modo mais eficiente estes componentes e levar à otimização da produção do CAA. Segundo os mesmos autores, através da pasta é possível ainda verificar-se a compatibilidade entre o cimento, as adições minerais e os aditivos, antes de se partir para maiores volume de mistura.

3.2.2.1 Teor de saturação do aditivo

Imediatamente após a preparação das pastas foram realizados os ensaios do Cone de Marsh e mini-abatimento. Para cada teor de metacaulim, variou-se a porcentagem de aditivo em relação à massa de cimento. Em cada ponto de incorporação de aditivo uma nova pasta foi produzida, pois, segundo Schwartzentruber et al. (2006), a pasta não recupera seu estado reológico inicial quando é submetida a um tempo de mistura adicional. Os equipamentos utilizados podem ser visualizados na Figura 7.



(a) Cone de Marsh



(b) Mini-cone

Figura 7 – Equipamentos empregados nos ensaios em pasta

Os ensaios com o Cone de Marsh seguiram a metodologia citada por Roncero (2000) que consiste no preenchimento do cone com 800 ml da mistura, marcando-se o tempo para o escoamento de 200 ml. Após o preenchimento do cone esperou-se um minuto para a liberação do escoamento para permitir o assentamento das partículas, caso esteja havendo segregação, o que irá facilitar a observação deste fenômeno ao se iniciar o escoamento, devido ao entupimento do orifício de saída.

Com as mesmas misturas ensaiadas no cone mediu-se o espalhamento após preenchimento e retirada do mini-slump. A partir dos resultados destes ensaios foram elaboradas curvas

relacionando o teor de aditivo (%) com o tempo de escoamento (s) e com o espalhamento (mm).

Para garantir a correta definição do teor de saturação do aditivo, fez-se um estudo de repetitividade a partir de 5 misturas com os mesmos parâmetros e produzidas sob as mesmas condições do ambiente de laboratório ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 50\%$) uma após a outra. O resultado obtido encontra-se na Tabela 1, a partir da qual se observa que diferenças de leitura de até 0,6 segundos no tempo de escoamento representam a variação do ensaio. Assim, o teor de saturação foi considerado em função desta leitura e da observação visual das curvas.

Tabela 1 – Variabilidade do ensaio do Cone de Marsh

Repetição	Tempo de escoamento (s)	Espalhamento (mm)
1	3,53	151,0
2	3,40	130,0
3	3,94	142,0
4	3,75	149,5
5	3,34	128,0

Conforme preconiza a literatura, nas curvas referentes ao ensaio do Cone de Marsh é possível determinar o ponto de saturação do aditivo. Segundo Schwartzentruber et al. (2006) tanto o diâmetro de espalhamento quanto o tempo de escoamento no Cone de Marsh não sofrem alteração a partir do ponto de saturação. No presente trabalho, observa-se que as curvas do espalhamento seguem uma tendência inversa em relação ao tempo, mas com menor precisão na definição do teor ideal de aditivo, como exemplificado na Figura 8. Assim, adotou-se a curva de Tempo *versus* %aditivo para a determinação do ponto de saturação.

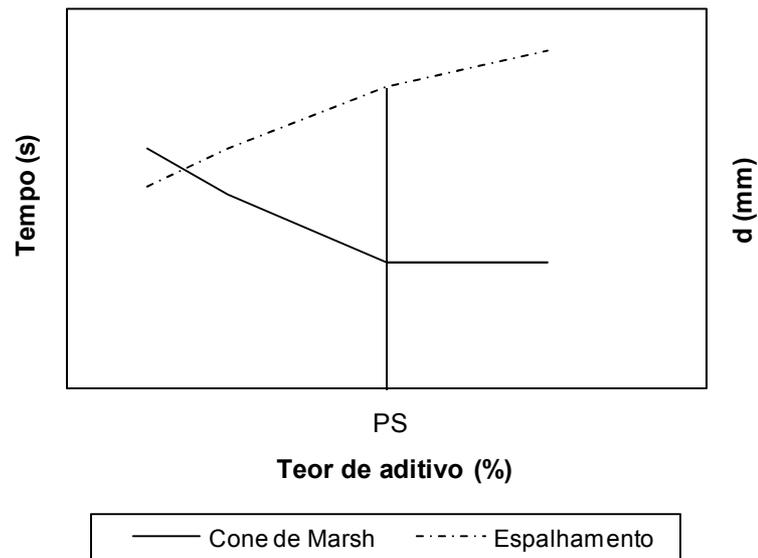


Figura 8 – Exemplo de curvas para definição do ponto de saturação (PS) do aditivo

3.2.2.2 Reologia

Foram medidas as propriedades reológicas de viscosidade e tensão de escoamento das pastas, empregando-se a quantidade de aditivo definida no Cone de Marsh para os teores de saturação. Segundo Santos et al. (2008), as propriedades reológicas são indispensáveis para a caracterização de concretos de elevada trabalhabilidade como o CAA.

Estes ensaios foram realizados apenas para as amostras de granulometria fina – MF e CF, pois o equipamento não suporta grãos do tamanho das amostras chamadas de grossas – MG e CG. O equipamento utilizado foi o viscosímetro da marca Brookfield, modelo LVDV, disponível no Laboratório de Química de Interfaces do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, empregando-se a geometria de cilindros concêntricos (Figura 9).



Figura 9 – Ensaio de reologia das pastas

O princípio do ensaio é medir os valores de tensão de cisalhamento que surgem no fluido durante a aplicação de diferentes taxas de cisalhamento, em decorrência da rotação do cilindro interno. O ensaio iniciou com uma velocidade (taxa de cisalhamento) igual a zero atingindo-se o valor máximo de 9 rpm, quando então foi reduzida até retornar ao repouso. A cada 10 s foram feitas leituras de viscosidade e tensão de cisalhamento, a partir dos quais foram obtidas curvas ajustadas por meio de regressão linear para o modelo de Bingham (Equação 1, item 2.1), obtendo-se assim a viscosidade e a tensão de escoamento de cada mistura. O ajuste foi feito no ramo da curva obtido a partir dos dados referentes à etapa de redução da taxa de cisalhamento. Isto se deve à necessidade de se promover uma quebra na estrutura das partículas das misturas, impondo assim uma condição semelhante que permita a comparação entre os resultados das diferentes pastas (BANFILL, 2003).

3.2.3 Produção do CAA

Os concretos foram produzidos tendo-se como ponto de partida os resultados obtidos no estudo em pasta. O volume de pasta foi fixado em 0,4 devido aos resultados obtidos no Estudo Piloto, em que não se observou alteração significativa na resistência à compressão quando se variou este parâmetro.

Para o metacaulim MF foi reproduzida toda a família de concretos, com todas as variações de relação água/finos e teor de adição. Também para a relação água/finos intermediária – 0,5 foram produzidos concretos com os quatro tipos de adição mineral em todos os teores de substituição. Para as demais misturas investigaram-se os concretos com teores extremos de incorporação de adição – 5% e 20%.

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de cuba de 140 l, em ambiente de laboratório. Na Figura 10 pode ser visualizada a produção de uma mistura de concreto.



Figura 10 – Produção do CAA

A seqüência de mistura adotada foi:

- 1 - Agregado graúdo + 80% da água → mistura por 1 minuto
- 2 - Cimento + metacaulim + restante da água → mistura por 1,5 minuto
- 3 - Agregado miúdo → mistura por 1,5 minuto
- 4 - Limpeza das pás → betoneira parada por 2 minutos
- 5 - Mistura → 2 minutos
- 6 - Aditivo superplastificante → mistura por 3 minutos

Observa-se que o aditivo foi incorporado 7 minutos após o contato do cimento com a água. Nas pastas, a incorporação de aditivo também aconteceu depois do período inicial de hidratação do cimento. Schwartzentruber et al. (2006) indicam que esta medida aumenta a eficiência do superplastificante. Isto acontece porque, ao se incorporar o aditivo no início da

mistura, este pode ficar aprisionado entre o grão de cimento anidro e os primeiros produtos de hidratação, reduzindo sua disponibilidade para atuar na dispersão e defloculação dos grãos.

Os concretos foram avaliados quanto às suas propriedades nos estados fresco e endurecido. No estado fresco, o teor de aditivo do concreto foi ajustado através dos ensaios de espalhamento e Funil-V (mostrados na Figura 11 e cujo procedimento de ensaio encontra-se no Apêndice A).



(a)

(b)

Figura 11 – Ensaio no CAA: (a) Funil-V; (b) Espalhamento

Para que fosse possível fazer uma comparação mais coerente entre as misturas, procurou-se fixar o espalhamento no intervalo de 600 a 700 mm, o que foi conseguido para a maior parte delas. O espalhamento foi escolhido como referência por ser um ensaio mais restritivo do que o Funil-V, conforme observado por Zerbino et al. (2009), que afirmam que o ensaio de espalhamento representa bem o comportamento reológico do concreto sendo bastante útil na classificação do CAA. O Funil-V, por outro lado, apesar de ser recomendado para a realização do controle tecnológico do CAA, é um ensaio que, segundo os autores, não reproduz classes de concretos com características reológicas semelhantes, ao que eles atribuem a existência de outros fatores intervenientes.

Segundo Schwartzenrube et al. (2006) o ensaio de espalhamento está bastante relacionado à tensão de escoamento, enquanto que a viscosidade tem relação com a viscosidade da mistura. Desta forma, Felekoğlu et al. (2007) indicam que quando o tempo de escoamento no Funil-V é menor do que o limite especificado, pode haver indício de segregação do CAA.

No estado endurecido, investigou-se a resistência à compressão aos 28 e 90 dias de acordo com as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994b), sendo moldados 4 CP's de 10 x 20 cm de

uma mesma mistura para cada idade de ensaio, os quais permaneceram em cura numa câmara úmida, conforme NBR 5738 (ABNT, 1994a). As idades de ensaio foram definidas em função do uso do metacaulim, pois, por se tratar de um material pozolânico, é importante avaliar suas propriedades mecânicas em idades avançadas, permitindo que haja tempo suficiente para que a reação pozolânica ocorra.

As propriedades medidas foram comparadas aos resultados obtidos em função das diferentes combinações de adições e agregados em termos de reologia, propriedades físicas e consumo de aditivo. A fim de se encontrar parâmetros que possam incrementar os critérios de dosagem, foram determinadas as relações volumétricas: (agregado miúdo)/(argamassa), (agregado graúdo)/(concreto), (agregado miúdo)/(concreto), (agregado miúdo)/(agregado graúdo).

3.2.4 Análise estatística

Para melhor verificar as relações obtidas a partir dos resultados, procedeu-se a uma análise estatística das diversas propriedades medidas nas composições entre os finos, nas pastas e nos concretos. O objetivo desta análise foi demonstrar a influência dos parâmetros referentes às adições minerais (tipo, superfície específica e teor) nestas propriedades. Para isto foi utilizado um modelo de experimentos fatoriais para análise de variância (ANOVA) os quais, através dos testes de hipóteses, verificam a influência de uma ou mais variáveis no resultado de um experimento e indicam a existência ou não de inter-relações entre elas.

Para a realização dos testes de variância são elaboradas tabelas (Tabela ANOVA), nas quais constam os seguintes parâmetros:

- SQ = Soma dos quadrados dos resíduos das médias de cada grupo em relação à média total
- GDL = grau de liberdade (Número de variações menos 1)
- MQ = Médias quadradas (SQ/GDL)
- $F = MQ/MQ_{Resíduo}$
- $F\alpha$ = Valor da função de Distribuição F para uma significância α

Quando F assume valor maior que $F\alpha$ diz-se que a variável em questão exerce influência significativa sobre a grandeza analisada, para uma confiabilidade percentual de $100 \times (1-\alpha)$.

Para a realização deste estudo foi adotada uma significância de 0,05, de modo que os

resultados das análises apresentam uma confiabilidade de 95%. Os resultados encontram-se apresentados ao longo da discussão desenvolvida no capítulo 4, à medida que foi analisada cada propriedade.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento experimental da tese, bem como a discussão e análise destes.

4.1 Caracterização dos finos

4.1.1 Cimento

Na Tabela 2 encontram-se as características do cimento, conforme laudo fornecido pelo fabricante.

Tabela 2 – Características do cimento CP V ARI RS

Composição química	Perda ao fogo (%)	3,84
	Resíduo insolúvel (%)	0,85
	SO ₃ (%)	3,74
	CaO livre (%)	1,89
Finura	Massa específica (g/cm ³)	3,11
	Blaine (cm ² /g)	4436
	# 325 (%)	1,57
	# 200 (%)	0,27
Expansibilidade a Quente (mm)		0,73
Pega	Início (min)	149
	Fim (min)	180
Consistência normal (%)		29,10
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	19,74
	3 dias	30,77
	7 dias	36,73
	28 dias	44,42

O baixo valor de resíduo insolúvel indica a pequena quantidade de material pozolânico presente neste cimento, o que motivou sua escolha possibilitando que o efeito das adições minerais seja melhor verificado, sem interferência de adições presentes no cimento. Além disso, destaca-se também sua elevada superfície específica, que provoca melhoras na fluidez, o que favorece a produção do CAA.

Na Figura 12 tem-se a curva granulométrica do cimento, obtida por granulometria a laser.

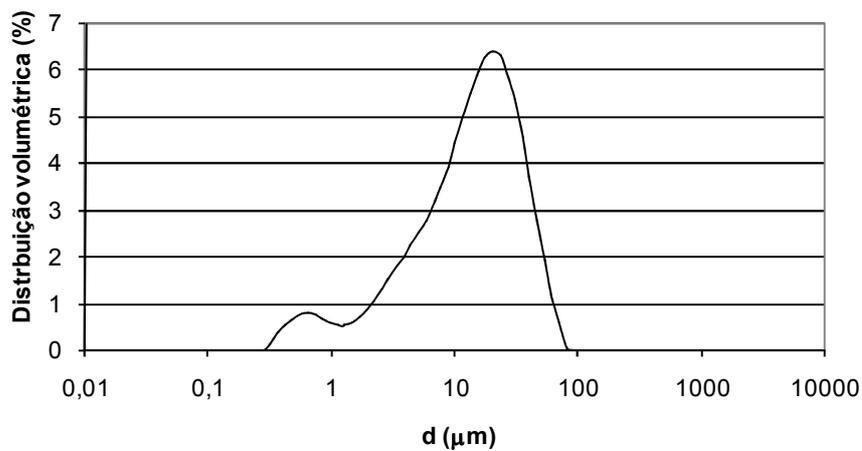


Figura 12 – Distribuição granulométrica do cimento

A partir deste ensaio foram obtidos os valores de superfície específica de $11400 \text{ cm}^2/\text{g}$ e diâmetro médio – $d_{0,5}$ de $15,476 \text{ μm}$ para o cimento.

Na Figura 13 pode-se visualizar uma imagem do cimento obtido por meio de lupa, onde se observa a formação de aglomerados pouco compactos.



Figura 13 – Imagem do cimento obtida através de lupa (35x)

4.1.2 Adições minerais

Na Tabela 3 estão resumidas as massas específicas das adições minerais empregadas.

Tabela 3 – Massas específicas das adições minerais

Material	Massa específica (g/cm ³)
Metacaulim fino	2,56
Metacaulim grosso	2,56
Calcário fino	2,70
Calcário grosso	2,84

4.1.2.1 Granulometria

Na Figura 14 podem ser visualizadas as distribuições granulométricas das adições, bem como a curva obtida para o cimento, de modo a visualizar-se as faixas de distribuição dos tamanhos dos grãos das adições relacionando-as ao cimento. Ressalta-se que para os materiais grossos (MG e CG) foi feito o peneiramento na peneira de nº 200, conforme exigência do ensaio. Assim, na Figura 15 estão mostradas as curvas granulométricas destas adições distribuídas nas peneiras usualmente empregadas para caracterização de agregados, de modo a verificar-se a fração acima de 0,075 mm.

Da Figura 14 foram retirados os diâmetros equivalentes aos pontos de maior concentração e os diâmetros médios ($d_{0,5}$) das partículas dos finos, cujos valores estão na Tabela 4.

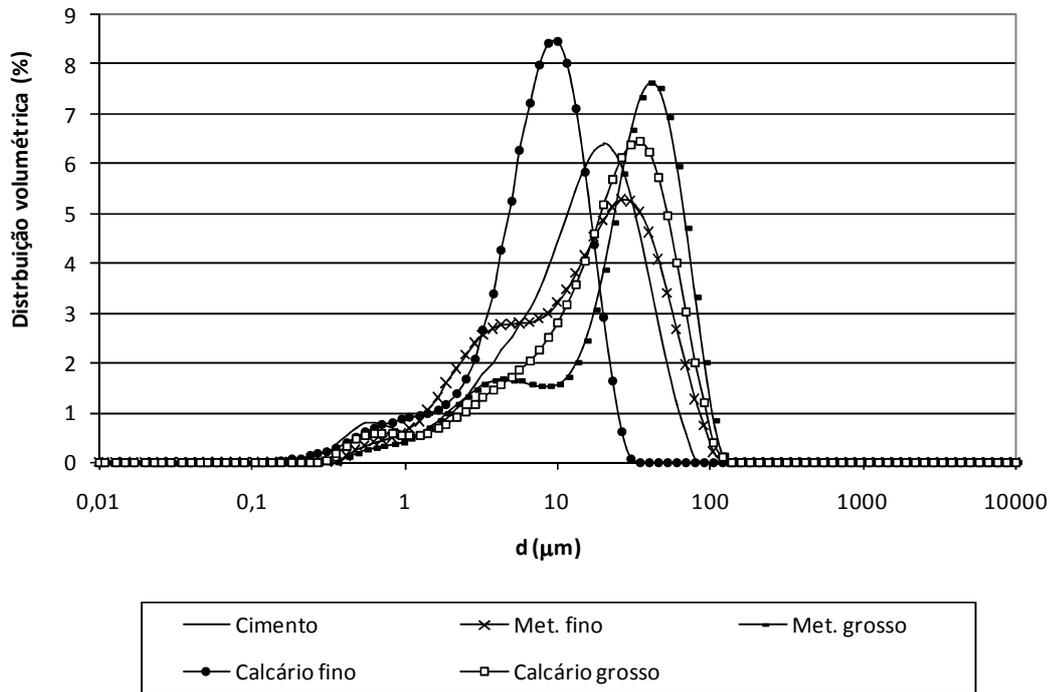


Figura 14 – Distribuição granulométrica dos finos

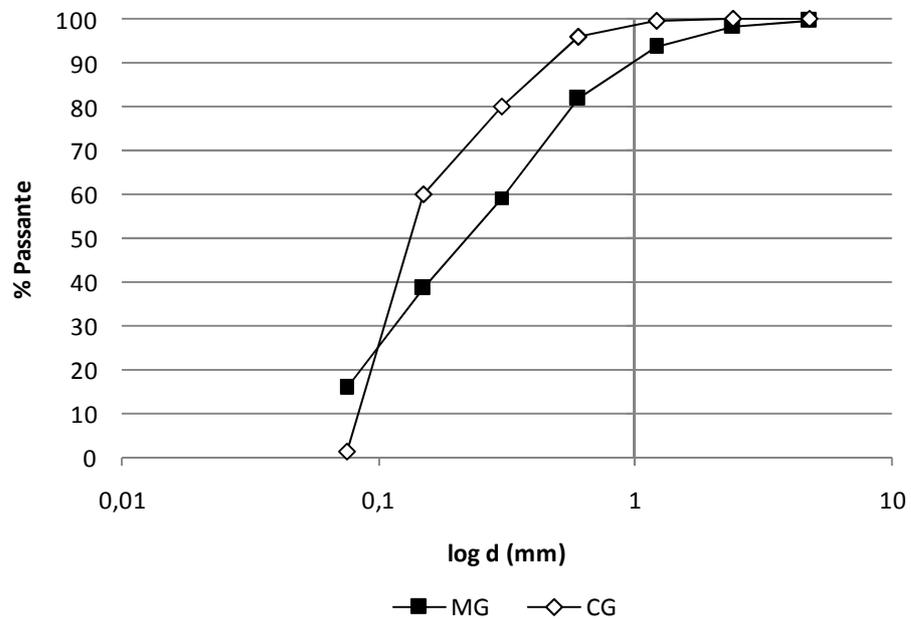


Figura 15 – Distribuição granulométrica das adições grossas na faixa acima de 0,075 mm

Tabela 4 – Diâmetros das partículas dos finos

Material	d (maior concentração) (μm)	$d_{0,5}$ (μm)
Cimento	19,953	15,476
Metacaulim fino	26,303	16,771
Metacaulim grosso	39,811	32,206
Calcário fino	10,000	7,270
Calcário grosso	34,674	24,216

As duas grandezas apresentam a seguinte ordem crescente de valores:

calcário fino - cimento - metacaulim fino - calcário grosso - metacaulim grosso.

Admitindo-se o cimento como ponto de referência, uma vez que ele é o principal componente das pastas, apenas o calcário fino possui partículas de menor dimensão. Destaca-se que o metacaulim fino apresenta partículas maiores, porém não muito distantes, que as do cimento. Considerando-se as partículas de maior afastamento em relação ao cimento, que ocorre com as adições CF e MG, a relação entre as suas dimensões e a do cimento é igual a dois ($d_1/d_2=2$).

Em misturas binárias, a inserção de um grão fino na porosidade de um empacotamento de grãos grossos pode provocar dois efeitos: se a diferença de dimensão for tal que para a partícula fina a superfície de contato com a partícula grossa possa ser considerada plana ($d_1/d_2=10$), ocorre o chamado Efeito parede, com preenchimento dos vazios dos grãos maiores pelos menores (OLIVEIRA et al., 2000); caso o grão menor não seja suficientemente pequeno para se deslocar num vazio, ocorre localmente uma redução do volume dos grãos grossos, chamada de Efeito de relaxamento (DE LARRARD, 2000).

Por sua vez, a inserção de grãos grossos em um empacotamento de grãos finos promove o afastamento destes, reduzindo seu empacotamento.

No caso dos materiais empregados no presente trabalho espera-se, em relação ao cimento, a ocorrência do efeito de relaxamento exercido pelo calcário fino, e o efeito de afastamento dos grãos promovido pelas demais adições.

4.1.2.2 Superfície específica

Na Tabela 5 estão os resultados obtidos nos diferentes ensaios de determinação de superfície específica dos finos.

Tabela 5 – Superfície específica dos finos

Material	Blaine (cm ² /g)	BET (cm ² /g)	Granulometria a laser (cm ² /g)
Metacaulim fino	25266	229984	9460
Metacaulim grosso	9906	215619	6480
Calcário fino	5790	17792	17300
Calcário grosso	800	3372	8420

Segundo Banfill et al. (2009) os resultados de ensaios realizados no BET diferem daqueles medidos por granulometria a laser, uma vez que a primeira técnica mede a porosidade interna das partículas, e a segunda mede o diâmetro externo equivalente.

Pelo ensaio do Blaine observa-se a elevada superfície específica dos dois tipos de metacaulim em relação ao cimento. Este resultado também é observado por meio do BET, porém sendo atingidos valores maiores. Neste ensaio foi possível observar também uma pequena variabilidade dos resultados para os dois tipos de metacaulim, ao contrário do que acontece com o pó calcário, que abrange um intervalo maior de superfície específica.

Os resultados do granulômetro a laser demonstram que este ensaio não é adequado para a avaliação da superfície específica na faixa de valores dos materiais empregados, visto que não condizem com o observado nos demais ensaios e com o conhecimento que se tem dos materiais. Santos (1989), por exemplo, cita que a superfície específica da caulinita é da ordem de 100000 cm²/g, considerando-se que para a produção do metacaulim há, entre outras etapas, um processo de moagem, é notória a aproximação deste valor com aqueles medidos pelo BET para o metacaulim.

4.1.2.3 Avaliação visual de imagens

A seguir estão apresentadas algumas das fotos obtidas pela lupa (Figura 16). Durante a visualização das imagens, verificou-se uma grande aglomeração dos grãos, o que dificulta a identificação da forma e do tamanho deles. Esta aglomeração foi mantida mesmo após a secagem destes materiais em estufa, sendo este mesmo comportamento observado por Barata (2007). Característica diferenciada ocorreu apenas para o calcário grosso, em cuja amostra os grãos estão soltos e em forma de cristais.



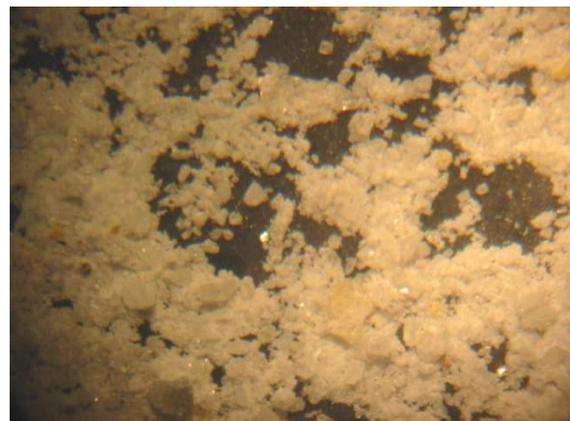
MF (10,5x)



MG (12x)



CF (15x)



CG (10,5x)

Figura 16 – Imagens das adições obtidas na lupa binocular

No metacaulim grosso é perceptível a grande variação de tamanho dos grãos. Já a amostra de calcário grosso apresentou placas de grande dimensão em relação às demais amostras,

formato irregular, concordando com o resultado identificado na lupa e com a ampla faixa granulométrica desta adição.

Para o calcário fino não foi possível realizar este ensaio.

Nas análises das adições em termos de granulometria, superfície específica e forma (itens 4.1.2.1 a 4.1.2.3), observa-se que todas elas apresentam uma pequena quantidade de partículas com dimensão menor $0,001 \mu\text{m}$, as quais, segundo Oliveira et al. (2000), são classificadas como colóides. Os autores citam que em sistemas coloidais secos ou em suspensão, as partículas apresentam uma elevada tendência à aglomeração devido às forças superficiais de atração, o que pode explicar a forte aglomeração observada no metacaulim fino.

Esta aglomeração dificulta o empacotamento dos grãos, apesar do efeito de preenchimento de vazios que as partículas finas promovem. Esta deficiência no empacotamento aumenta a porosidade do sistema e leva à necessidade de maior fase líquida para preenchimento dos vazios, uma vez que há um aprisionamento de água no interior dos aglomerados. Quanto mais irregular for o grão e quanto menor o seu tamanho, maior é o efeito de redução do empacotamento. Por outro lado, partículas grandes promovem um afastamento das partículas menores de suas posições originais, levando ao surgimento de novos vazios, o que também reduz o empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000).

A amostra de metacaulim grosso também apresenta grãos aglomerados, o que pode acontecer em decorrência da sua fração mais fina, que possui características semelhantes ao metacaulim fino, além da tendência dos materiais argilosos de se apresentarem sob a forma de placas aglomeradas (SANTOS, 1989).

No calcário fino observa-se a formação de aglomerados uma vez que é uma tendência das partículas finas, porém com um aspecto menos compacto do que nas amostras de metacaulim. No caso do calcário grosso não se verifica a aglomeração de partículas, os cristais podem ser vistos um a um separadamente. Esta ausência de aglomerados caracteriza o grau de dispersão deste material e favorece o empacotamento dos grãos, especialmente se houver um adequado preenchimento de vazios entre os diversos elementos de uma mistura (preenchimento dos grãos de CG por cimento, por exemplo).

Oliveira et al. (2000) apontam ainda que o teor, a granulometria e a forma dos finos (cimento e adições) interferem nas propriedades reológicas e de fluidez dos concretos. Segundo os autores formas irregulares favorecem o aumento da viscosidade e redução da fluidez.

Assim, percebe-se o efeito da forma, superfície específica e granulometria das adições na aglomeração e no grau de empacotamento de misturas e, tendo em vista a produção de concretos, no volume de pasta necessário para preencher os vazios e nas suas propriedades do estado fresco.

4.1.2.4 Análises térmicas

A seguir estão ilustradas as curvas obtidas nos ensaios de ATD (Figuras 17 a 20) e ATG (Figuras 21 a 24), respectivamente.

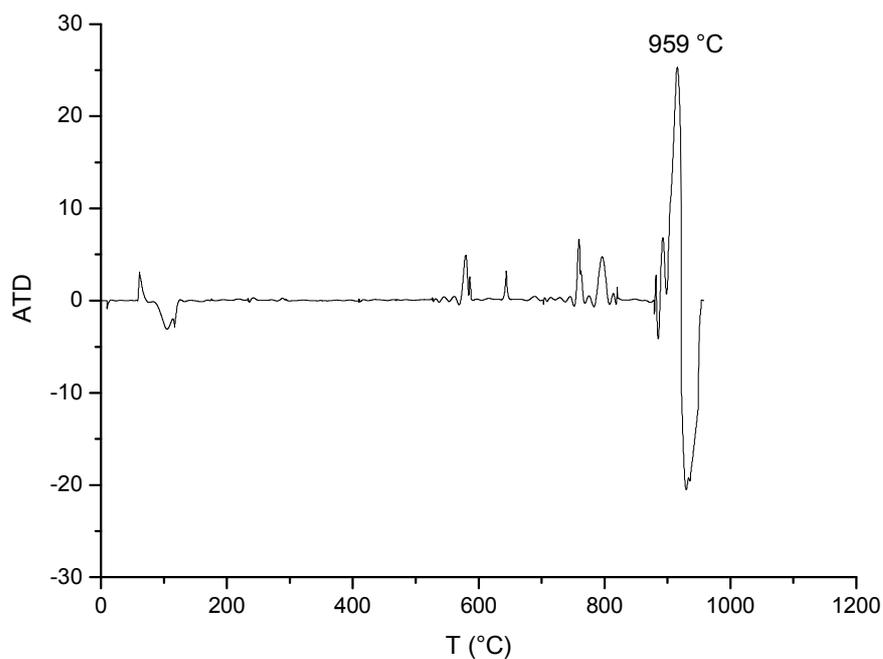


Figura 17 – Análise Termodiferencial do metacaulim fino

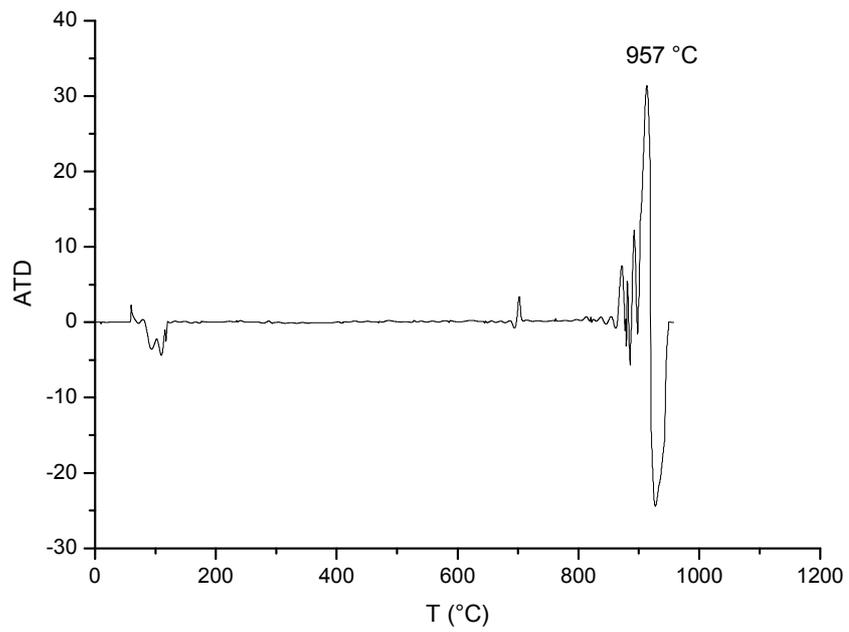


Figura 18 – Análise Termodiferencial do metacaulim grosso

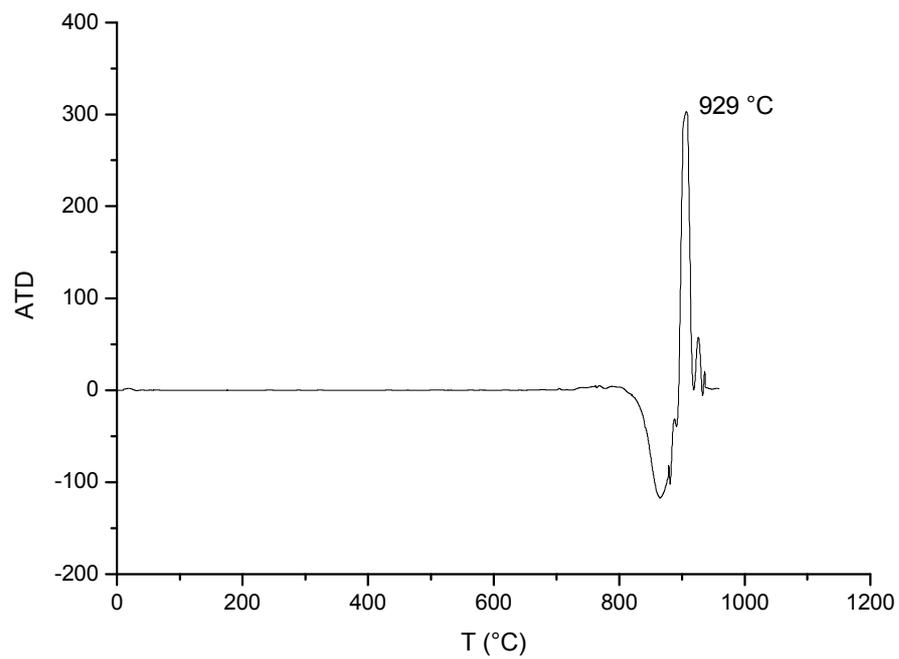


Figura 19 – Análise Termodiferencial do calcário fino

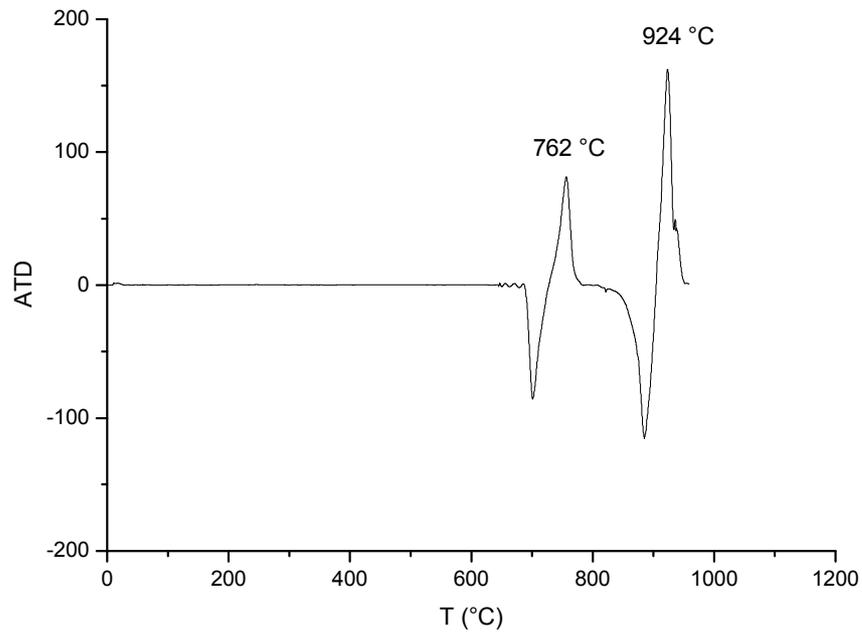


Figura 20 – Análise Termodiferencial do calcário grosso

Os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20 demonstram que as amostras de pó calcário representam dois materiais distintos. O fíler calcário fino é calcítico, enquanto que o fíler calcário grosso é dolomítico.

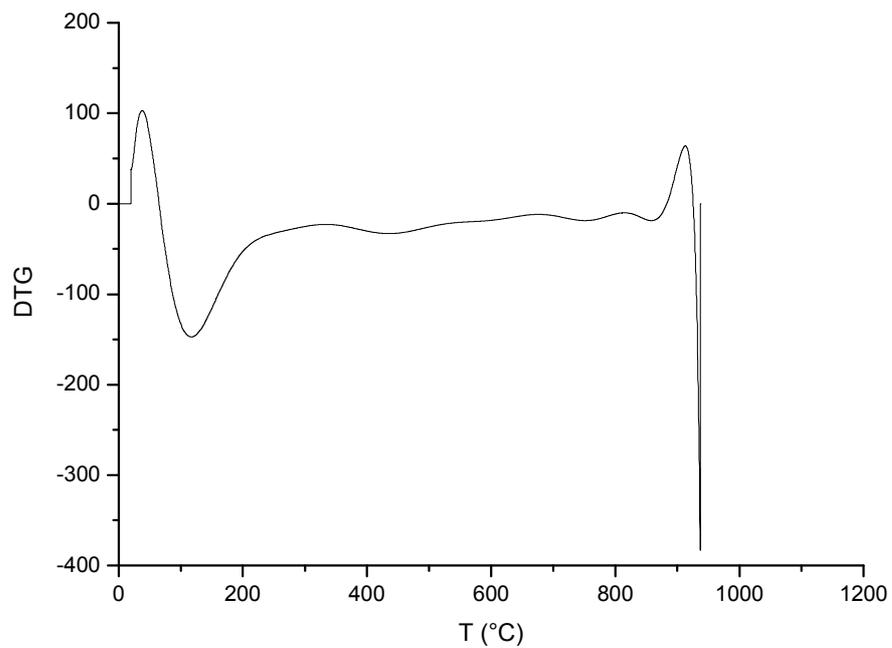


Figura 21 – Análise Termogravimétrica do metacaulim fino

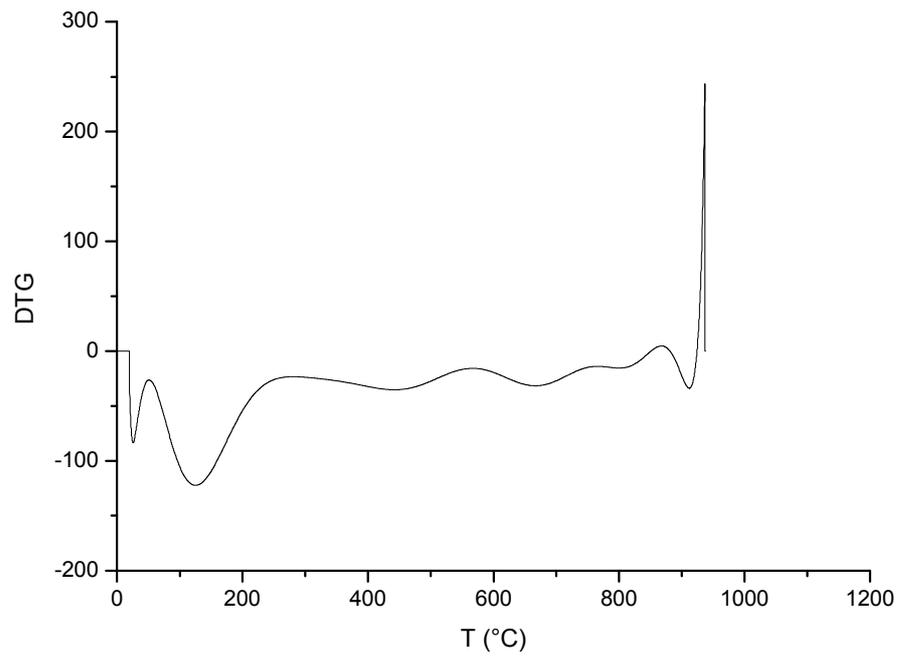


Figura 22 – Análise Termogravimétrica do metacaulim grosso

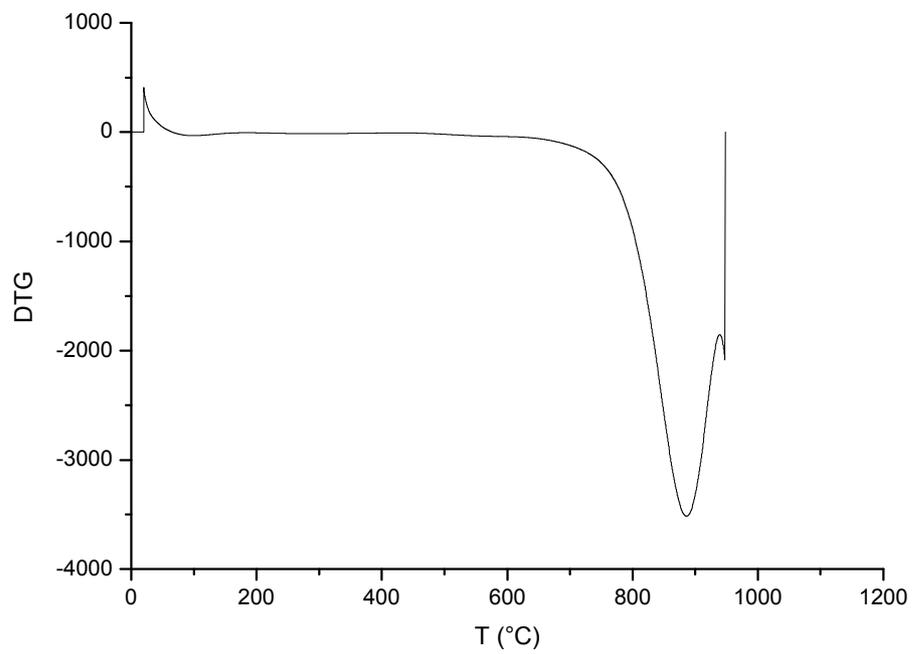


Figura 23 – Análise Termogravimétrica do calcário fino

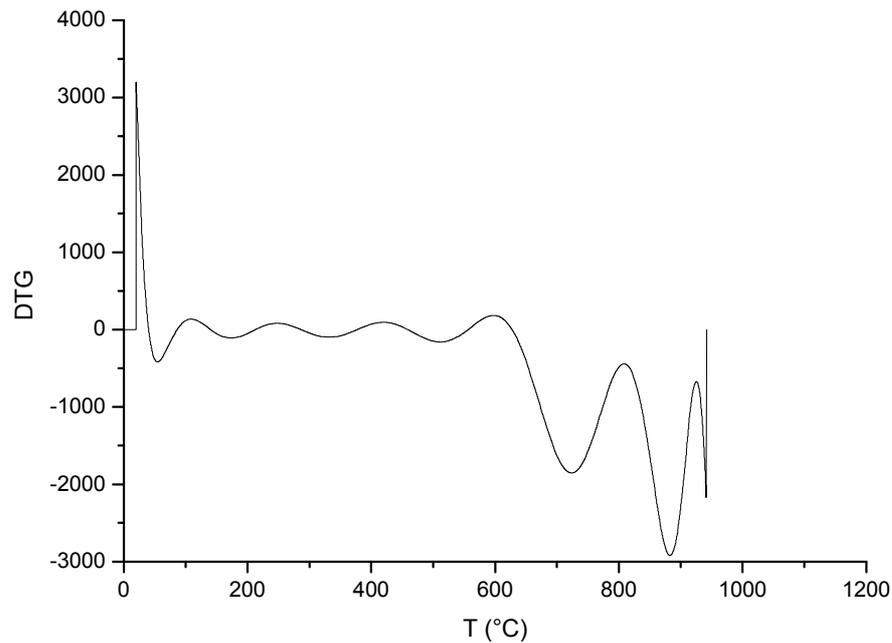


Figura 24 – Análise Termogravimétrica do calcário grosso

Na Tabela 6 estão resumidos os resultados obtidos a partir das curvas apresentadas.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de ATD e ATG

Amostra	Acidentes térmicos significativos – ATD	Perda de massa total (%) – ATG
MF	959°C → acidente exotérmico de média intensidade	2,92
MG	957°C → acidente exotérmico de média intensidade	3,06
CF	929°C → acidente endotérmico de grande intensidade	42,22
CG	762°C → acidente endotérmico de grande intensidade	43,10
	942°C → acidente endotérmico de grande intensidade	

4.1.2.5 Difração de raios-X

Nas Figuras 25 e 26 estão os difratogramas das amostras de metacaulim, nos quais se observa o comportamento esperado para este material, ou seja, amorfo, sem formação de cristalinos. O pico em torno do ângulo de 30° é a indicação da presença de caulinita.

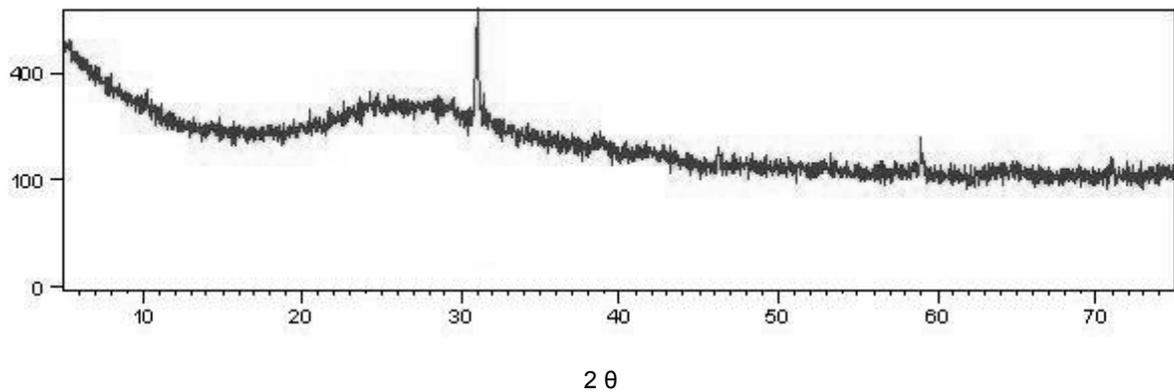


Figura 25 – Difratograma do metacaulim fino

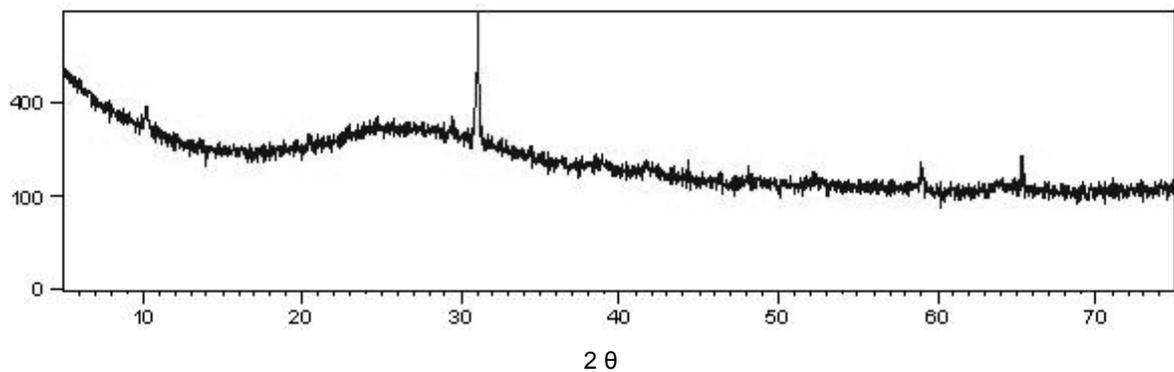


Figura 26 – Difratograma do metacaulim grosso

Nas Figuras 27 e 28 tem-se os difratogramas das amostras de filer calcário, nas quais se observa a característica cristalina deste tipo de material. Nota-se, nas duas amostras, o pico em torno do ângulo de 30° decorrente da presença de calcita.

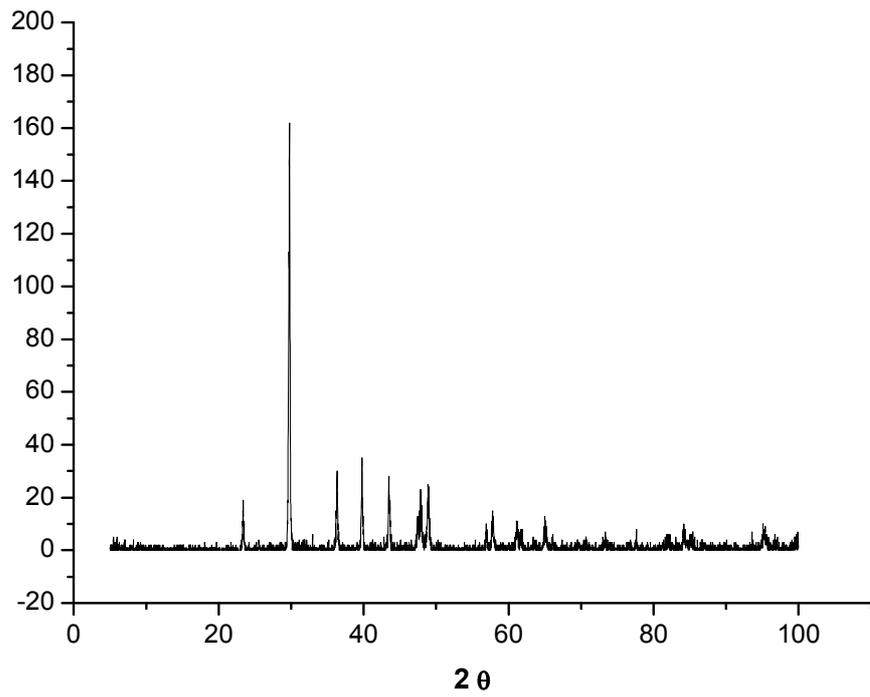


Figura 27 – Difratoograma do calcário fino

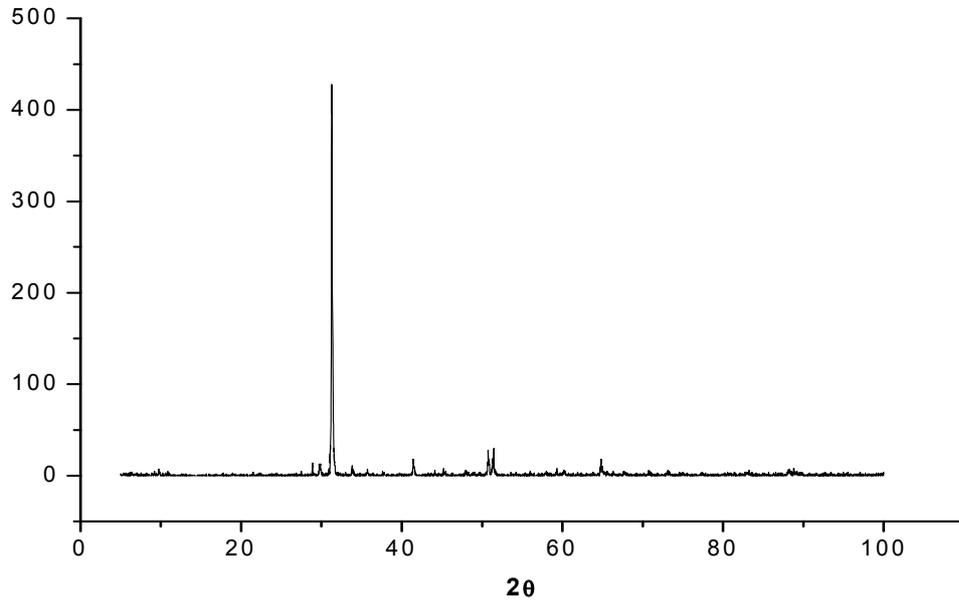


Figura 28 – Difratoograma do calcário grosso

4.1.3 Composições entre os finos

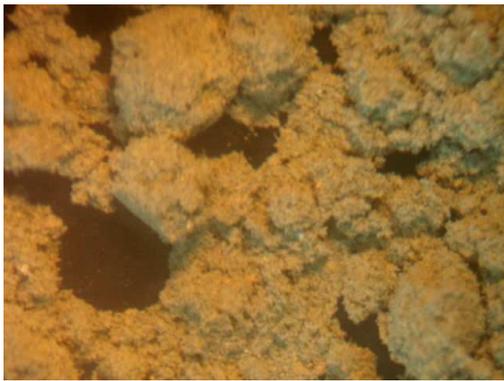
4.1.3.1 Avaliação visual de imagens

Na Figura 29 estão ilustradas as imagens das composições cimento x adição nos teores de 5% e 20%.

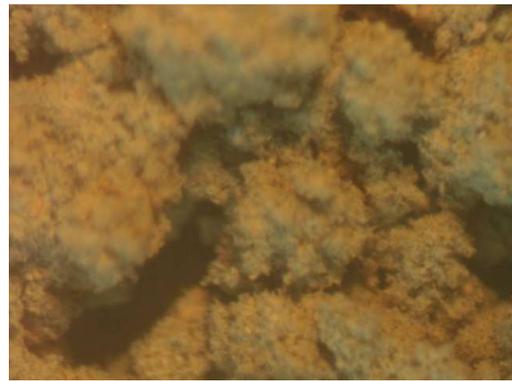
No caso das adições finas – MF e CF, suas partículas não são muito perceptíveis nas imagens, ficando distribuídas nos aglomerados de grãos de cimento, de modo que só se tornam mais visíveis quando também estão aglomeradas, como pode ser visto na figura que representa a composição 20%-CF. As adições grossas – MG e CG, por sua vez, apresentam grãos facilmente identificáveis nas imagens, especialmente quando o teor de substituição é de 20%. Ainda com relação à superfície específica, nota-se que, os grãos das adições finas aparecem aderidos aos grãos de cimento formando aglomerados com a combinação dos dois materiais. Com as adições grossas, identificam-se algumas partículas não aderidas, com uma menor tendência à aglomeração, observando-se um afastamento dos grãos de cimento na região adjacente aos grãos maiores das adições. Destacam-se os cristais de calcita bastante evidentes nas amostras com calcário grosso.

Estas observações corroboram com a tendência à aglomeração sofrida por materiais finos, em decorrência da elevada força superficial de atração, conforme descrito no item 4.1.2.3.

Quanto ao tipo de adição, as composições com metacaulim apresentam aglomerados de aparência compacta. Por outro lado, os aglomerados formados com o calcário demonstram aspecto mais poroso, o que pode indicar uma maior facilidade de desaglomeração, sendo possível obter-se um sistema mais disperso nas misturas que empregam estes materiais. Esta estrutura porosa é característica dos grãos de filer calcário, conforme cita Felekoglu (2009).



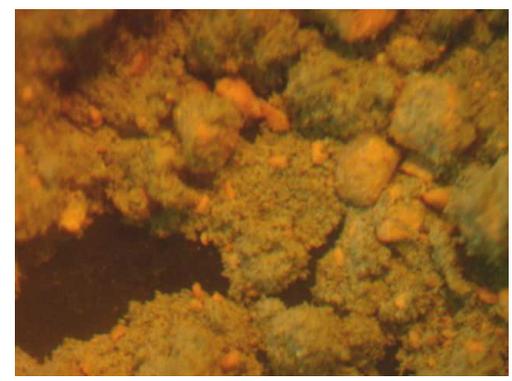
5%-MF (15x)



20%-MF (25x)



5%-MG (25x)



20%-MG (20x)



5%-CF (25x)



20%-CF (20x)



5%-CG (25x)



20%-CG (15x)

Figura 29 – Imagens das composições cimento x adição

4.1.3.2 Massa unitária

As massas unitárias de cada componente e das composições cimento x adição mineral estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente. Os resultados podem ser visualizados na Figura 30.

Tabela 7 – Massas unitárias dos finos

Material	Massa unitária (g/cm ³)
Cimento	0,933
MF	0,343
MG	0,567
CF	0,830
CG	1,545

Tabela 8 – Massas unitárias das composições cimento x adição

Teor de adição (%)	MF	MG	CF	CG
5	0,825	0,863	0,897	0,933
10	0,765	0,847	0,893	0,937
15	0,719	0,833	0,888	0,961
20	0,689	0,820	0,879	0,982

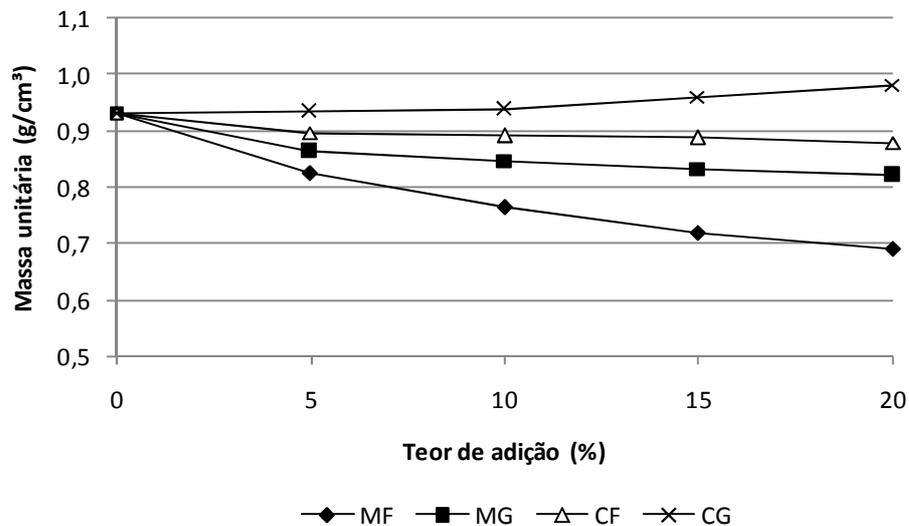


Figura 30 – Massas unitárias das composições de cimento com adições

As seguintes observações podem ser citadas:

- Quando se misturou o cimento com o metacaulim as massas unitárias sofreram uma redução, em relação à do cimento. Para o calcário fino este efeito foi menos expressivo, uma vez que os resultados apresentaram-se próximos entre si. Já para as composições com calcário grosso, até 10% de sua incorporação não se observou alteração no valor da massa unitária que, ao contrário das demais misturas, aumentou a partir deste ponto chegando a um acréscimo de 5,3% em relação ao cimento.
- Maiores valores de massa unitária foram obtidos com o emprego do filer calcário em todos os teores, principalmente o CG, enquanto que os menores valores foram obtidos nas composições com metacaulim, especialmente o MF.
- Para um mesmo tipo de adição, maiores massas unitárias foram atingidas quanto menor a superfície específica.

Estes efeitos se devem a duas questões principais: massa específica dos materiais e estado de aglomeração ou dispersão das partículas.

A massa específica do calcário grosso é maior que as das demais adições e próxima à do cimento, o que pode justificar este leve aumento de massa unitária nos teores de 15% e 20% de substituição, apesar da presença de grãos grandes, que promovem afastamento entre os grãos do cimento. Efeito contrário acontece com o metacaulim, que apresenta menor massa específica do que o cimento. No caso do calcário fino a massa específica é intermediária, de modo que foram observadas pequenas variações nas composições.

Ainda em função da massa específica é que as composições com metacaulim apresentam menor massa unitária. Isto porque, como uma amostra de mesma massa de metacaulim ocupa um volume maior que o do cimento ou o do calcário, e como os seus grãos não são suficientemente pequenos para preencher os vazios entre os grãos de cimento, parte deste volume “sobra” durante a realização do ensaio de massa unitária, levando a uma menor massa e, conseqüentemente, menor preenchimento de vazios.

Além disso, o calcário grosso é o único material que se apresenta em um estado satisfatório de dispersão dos grãos, conforme demonstram as imagens apresentadas no item 4.1.2.3, de modo, que à medida que ele é empregado em maior quantidade, pode haver um preenchimento dos seus vazios pelas partículas de cimento, deixando a mistura mais compacta, e aumentando a massa unitária.

A partir da realização de uma análise de variância (Tabela ANOVA) pode-se verificar a influência das características das adições na massa unitária das composições. Assim, da

Tabela 9 percebe-se que todos os parâmetros das adições, bem como suas inter-relações, exercem influência significativa na massa unitária das composições. Contudo, maiores influências são observadas em decorrência do tipo e da superfície específica da adição.

Tabela 9 – Influência das adições na massa unitária das composições - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	0,063565	1	0,063564622	1100,65	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Superfície específica da adição	0,024094	1	0,02409372	417,1935	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Teor de adição	0,003084	3	0,001027905	17,79863	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica	0,000742	1	0,00074239	12,85481	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Inter-relação teor x superfície específica	0,003694	3	0,001231302	21,32054	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Inter-relação tipo x teor	0,006243	3	0,00208092	36,03206	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Resíduo	0,000231	4	5,77519E-05			
Total	0,101652	16				

4.1.3.3 Potencial zeta

Na Figura 31 estão as curvas resultantes do ensaio de potencial zeta.

Os valores de pH das soluções ensaiadas permaneceram em torno de 12 em todas as medidas, com variação de 11,923 a 12,257, caracterizando um meio básico. Conforme preconiza a literatura, o pH exerce influência nas leituras de potencial zeta de tal modo que, quando o pH é básico a partícula tende a assumir uma carga total negativa (OLIVEIRA et al., 2000), o que está de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho.

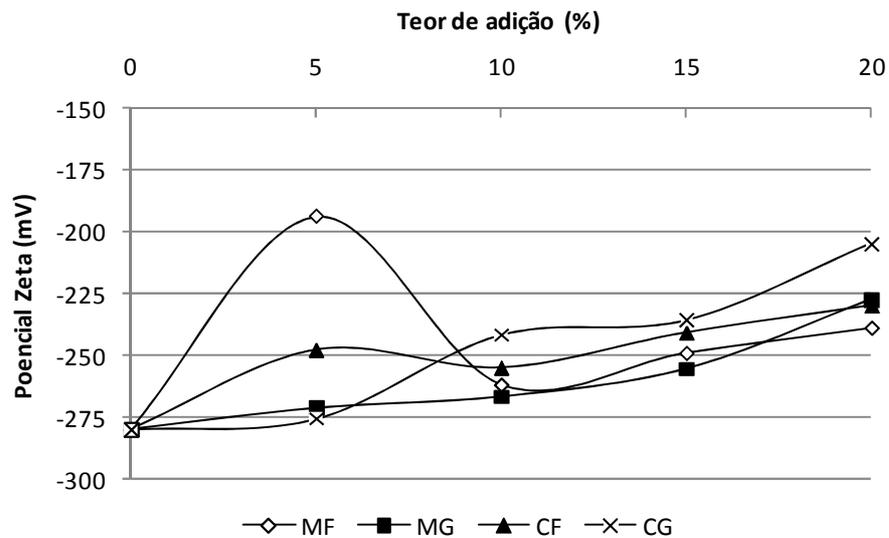


Figura 31 – Potencial zeta das misturas de cimento + adição

Chama-se atenção para o ponto de 5%-MF, que parece ter assumido um valor espúrio, ficando fora da tendência geral da curva, porém não foi possível repetir esta determinação. Isto se deve a uma limitação encontrada para a realização deste ensaio que foi a calibração do equipamento, o qual precisa atingir um valor de potencial zeta pré-definido para uma solução padrão. A definição deste ponto conferiu extrema dificuldade à calibração e uma das preocupações era que as amostras estivessem submetidas à mesma condição de ensaio (calibração do equipamento), de modo a permitir a comparação entre os valores obtidos para as diferentes adições. Em função disto, as medidas de potencial zeta foram realizadas numa sequência única, ficando sem possibilidade de repetição.

Para o teor de adição de 5% observa-se uma perturbação também para os demais tipos de adição, podendo-se citar a amostra de CG que, para este teor, apresentou o menor valor de potencial zeta, assumindo o maior valor nos demais teores. A partir do teor de 10% de adição, em geral, houve uma estabilidade na variação dos resultados, observando-se que os maiores valores foram obtidos quando empregado o calcário (especialmente o CG) e os menores valores com o metacaulim (especialmente o MG). Em geral, o potencial zeta aumentou (considerando-se o sinal negativo) na medida em que se aumentou o teor de adição mineral na amostra para todos os tipos de adição.

O maior valor de potencial zeta assumido pelo filer calcário pode estar relacionado à composição química deste material (grande quantidade de CaO), pois, conforme citado no item 3.2.1.3.3, os íons de cálcio são os que mais interferem na definição da carga das

partículas (POWERS, 1968). Isto explica o comportamento diferenciado das amostras de calcário e pode justificar ainda o aumento no potencial zeta com o teor de adição, devido ao aumento da concentração de íons Ca^{2+} , os quais são capazes de alterar o potencial zeta para valores menos negativos, conforme efeito descrito por Viallis-Terrisse et al. (2001).

No caso do metacaulim, Santos (1989) afirma que uma partícula coloidal de argilomineral em água tem carga negativa, a qual pode ser modificada em função do uso de um dispersante ou aumentando-se a carga positiva do meio, com inserção de íons Ca^{2+} , por exemplo. No presente trabalho, não se utilizou aditivo superplastificante nas medidas de potencial zeta, que seria o dispersante citado, porém, ocorre uma liberação significativa de íons de cálcio da suspensão, decorrentes da hidratação do cimento. Desta forma, há uma alteração do potencial do metacaulim aumentando o potencial da solução como um todo.

Ainda segundo Santos (1989), o cátion de cálcio atua como um floculante em suspensões argilosas, podendo-se atingir floculação completa em meios com pH básico (para pH básico a tendência é de o sistema permanecer defloculado, porém a presença do Ca^{2+} altera este comportamento). Isto indica que a aglomeração das partículas de metacaulim observada no estado anidro, pode acontecer também quando as mesmas estiverem em solução, ou seja, na constituição de pastas e concretos.

Este efeito de aglomeração provocado pelos íons de cálcio é exemplificado por Roncero e Gettu (1998 apud FORMAGINI, 2005) para o caso da sílica ativa, em que os íons Ca^{2+} atuam como pontes de ligação entre as partículas através de sua combinação com os silicatos, conforme ilustrado na Figura 32.

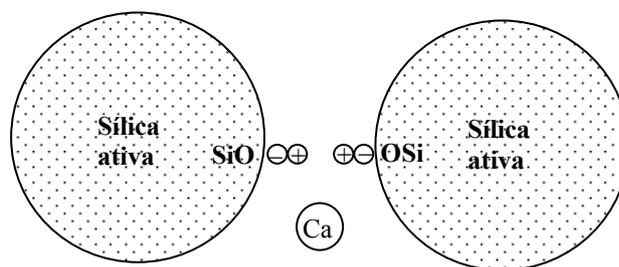


Figura 32 – Exemplo de aglomeração de partículas de sílica ativa devido ao efeito dos íons de cálcio (Adaptado de FORMAGINI, 2005)

A partir da análise de variância (Tabela 10) apenas o teor de adição resultou em influência significativa no potencial zeta, bem como as inter-relações tipo x superfície específica, teor x superfície específica, tipo x teor.

Tabela 10 – Influência das adições no potencial zeta das composições - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	67,32203	1	67,32203	1,131498	F _{0,05} (1,4) = 7,71	NÃO
Superfície específica da adição	240,8704	1	240,8704	4,04837	F _{0,05} (1,4) = 7,71	NÃO
Teor de adição	2052,084	3	684,0279	11,49663	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica	545,2225	1	545,2225	9,163694	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Inter-relação teor x superfície específica	2887,336	3	962,4454	16,17607	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Inter-relação tipo x teor	1480,725	3	493,5751	8,295643	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Resíduo	237,9925	4	59,49811			
Total	7511,553	16				

4.1.3.4 Demanda de água

Com os resultados dos ensaios de demanda de água foram definidas as compacidades – C das adições minerais (item 3.2.1.3.4), as quais estão apresentadas na Tabelas 11 e na Figura 33. Para o cimento, obteve-se a compacidade de 0,437.

Tabela 11 – Compacidades das adições

Teor de adição (%)	MF	MG	CF	CG
5	0,451	0,453	0,434	0,485
10	0,411	0,453	0,425	0,496
15	0,381	0,439	0,446	0,491
20	0,375	0,419	0,422	0,514

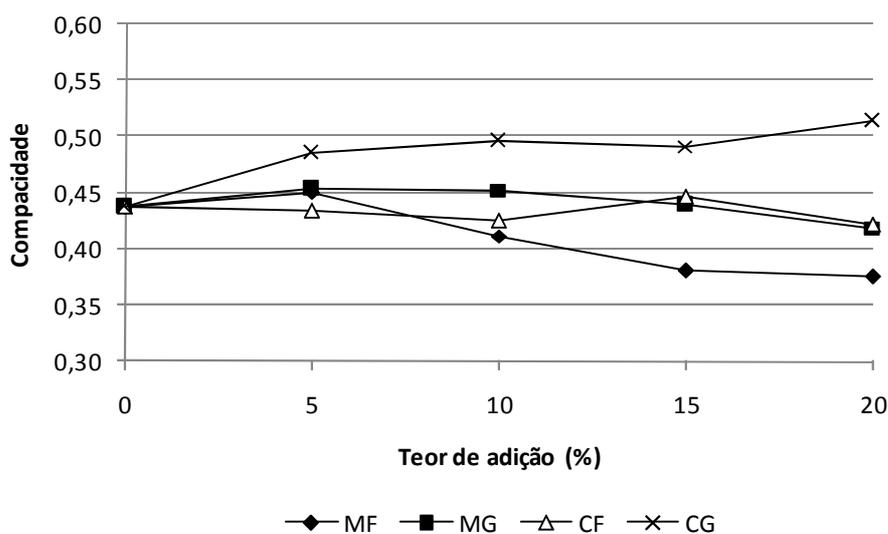


Figura 33 – Compacidade das composições sem aditivo

Quanto ao teor de adição, nas misturas com metacaulim verificou-se uma tendência de redução da compacidade quanto maior a quantidade de material. O contrário acontecendo nas misturas com filer calcário. Isto se justifica pelo efeito de aprisionamento da água nos aglomerados das partículas de metacaulim, fazendo com que mais água seja consumida e, conseqüentemente, a compacidade diminua.

Quanto à superfície específica da adição, observa-se que as maiores compacidades foram obtidas pelas adições grossas, especialmente o CG, demonstrando o efeito do estado de aglomeração ou dispersão das partículas, uma vez que, quanto maior a dispersão, menor o consumo de água para atingir-se determinada consistência, levando à maior compacidade.

Estas observações estão de acordo com o preconizado por Formagini (2005), que confirma a interferência do grau de dispersão das partículas no resultado do ensaio de demanda de água, indicando que quando as partículas estão dispersas a mudança de fase da mistura se dá rapidamente após pequeno acréscimo de água.

Verificando-se a interferência das características das adições por meio de análise de variância (Tabela 12), tem-se que a compacidade é influenciada pelo tipo e pela superfície específica da adição, o que está de acordo com os resultados obtidos. Com relação ao teor, não se observou influência significativa.

Tabela 12 – Influência das adições na compacidade das composições - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	0,00690264	1	0,00690264	43,49278056	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Superfície específica da adição	0,01028778	1	0,01028778	64,82219902	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Teor de adição	0,0011886	3	0,0003962	2,496412879	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	0,00081421	1	0,00081421	5,130255937	F _{0,05} (1,4) = 7,71	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	0,00090423	3	0,00030141	1,89914914	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Inter-relação tipo x teor	0,00251471	3	0,00083824	5,281644459	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Resíduo	0,00063483	4	0,00015871			
Total	0,02324699	16				

4.1.4 Agregados

Na Tabela 13 estão resumidos os parâmetros de caracterização dos agregados, e na Figura 34 suas curvas granulométricas.

Observa-se que os grãos dos agregados possuem faixa de dimensão acima de 0,1 mm, que equivale a 100 μ m, sendo esta, por sua vez, o limite superior de tamanho das partículas dos finos (cimento e adições minerais MF e CF). Deste modo, há uma complementação de tamanho dos grãos dos sólidos constituintes dos concretos. Para as adições grossas (MG e CG) atinge-se a dimensão de 1 mm.

Estes agregados foram utilizados formando uma mistura ternária de proporção: areia = 45,88%, brita 9,5 mm = 22,28%, brita 19 mm = 31,84%, conforme definido no Estudo Piloto, cujo procedimento detalhado encontra-se no Apêndice B.

Tabela 13 – Caracterização dos agregados

Abertura das peneiras (mm)	% Retidas acumuladas		
	Areia	Brita 9,5 mm	Brita 19 mm
19,0	0,00	0,00	3,00
12,5	0,00	0,00	58,18
9,5	0,32	3,82	92,20
6,3	0,72	17,34	98,69
4,8	1,36	66,39	99,18
2,4	3,13	99,03	99,48
1,2	10,59	99,47	99,53
0,6	34,64	99,53	99,57
0,3	76,65	99,56	99,64
0,15	97,21	99,58	99,72
0,075	99,51	99,82	99,99
Fundo	100,00	100,00	100,00
Diâmetro máximo característico (mm)	2,4	9,5	19
Módulo de Finura	2,24	5,67	6,92
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,65	2,65
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,51	1,37	1,40

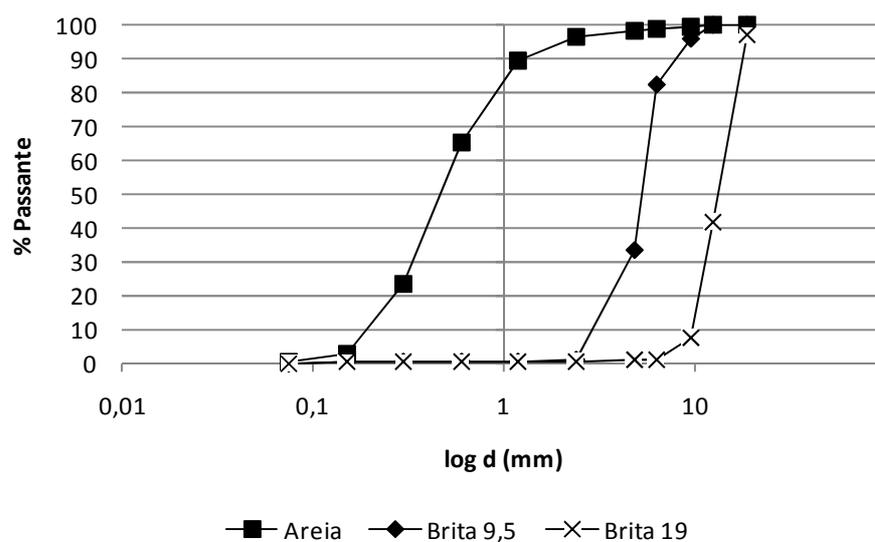


Figura 34 – Distribuição granulométrica dos agregados

4.2 Estudo das pastas para a produção do CAA

4.2.1 Teor de saturação do aditivo

Foram obtidas curvas de variação do teor de aditivo em função do tempo de escoamento no Cone de Marsh, bem como curvas com o teor de aditivo *versus* o diâmetro de espalhamento das pastas no mini-slump. Na Figura 35 ilustram-se as curvas encontradas quando utilizado o metacaulim MF, para a relação água/finos de 0,4. No Apêndice D encontram-se as curvas para as demais pastas.

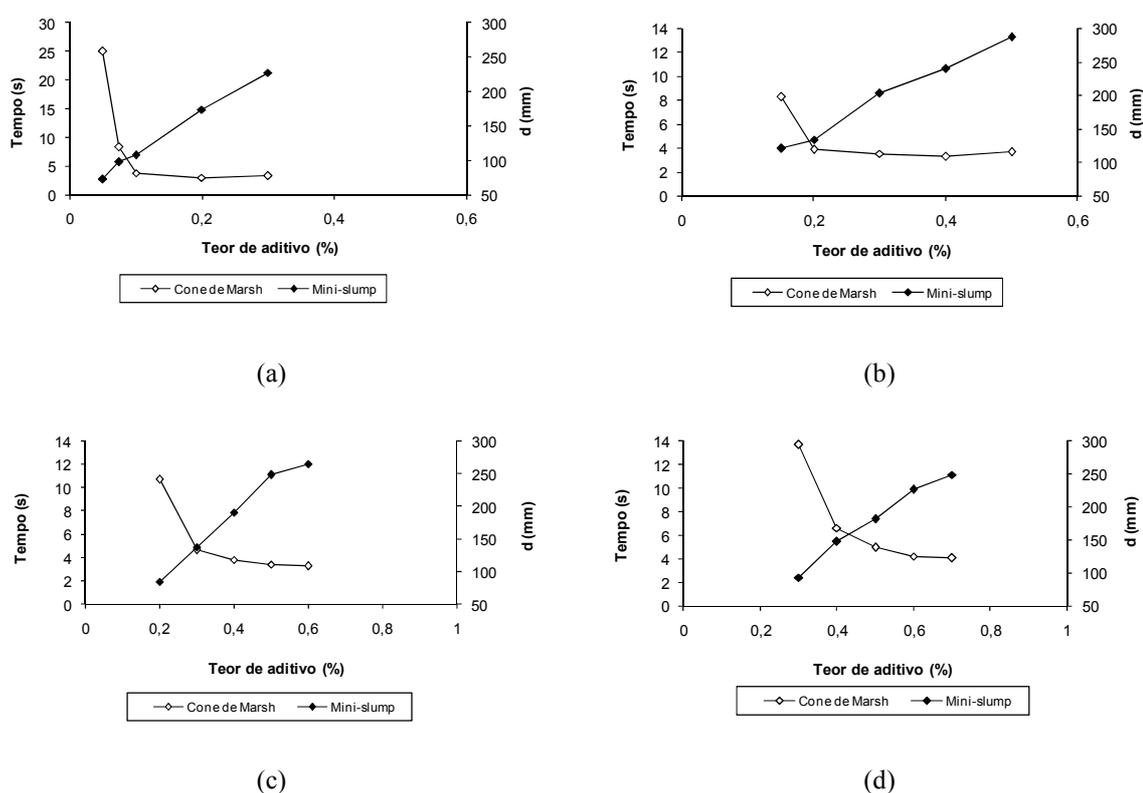


Figura 35 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MF-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

Nas Tabelas 14 a 17 estão resumidos os pontos de saturação determinados através do Cone de Marsh, e os resultados dos ensaios nestes pontos.

Tabela 14 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios nas pastas com metacaulim MF

Teor de adição	a/finos = 0,4			a/finos = 0,5			a/finos = 0,6		
	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)
5%	0,2	3,00	174,0	0,05	2,78	131,5	0,05	2,25	181,5
10%	0,2	3,85	134,0	0,1	2,97	120,0	0,05	2,57	157,0
15%	0,4	3,85	191,0	0,2	3,00	173,0	0,2	2,06	195,5
20%	0,6	4,22	227,0	0,4	3,06	221,5	0,1	2,88	121,8

PS = Ponto ou Teor de saturação do aditivo

Tabela 15 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios nas pastas com metacaulim MG

Teor de adição	a/finos = 0,4			a/finos = 0,5			a/finos = 0,6		
	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)
5%	0,1	2,81	132,9	0,05	2,56	151,0	0	1,75	154,5
10%	0,2	3,12	192,5	0,05	2,91	148,5	0	2,35	141,2
15%	0,15	3,34	149,0	0,1	2,90	154,0	0	2,50	127,1
20%	0,2	4,65	147,5	0,05	3,41	111,0	0	2,47	129,1

Tabela 16 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios para as pastas com filer calcário CF

Teor de adição	a/finos = 0,4			a/finos = 0,5			a/finos = 0,6		
	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)
5%	0,1	2,57	157,0	0,1	1,72	204,9	0	2,00	154,0
10%	0,1	2,81	130,2	0,05	2,15	168,0	0	2,09	157,0
15%	0,1	3,69	124,0	0,05	2,16	159,0	0	2,10	170,0
20%	0,1	2,68	161,5	0,05	2,19	157,0	0	1,97	151,0

Tabela 17 – Teor de saturação do aditivo e resultados dos ensaios para as pastas com filer calcário CG

Teor de adição	a/finos = 0,4			a/finos = 0,5			a/finos = 0,6		
	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)	PS (%)	t (s)	d (mm)
5%	0,1	3,09	247,0	0*	2,50	126,4	0	1,69	182,5
10%	0,075	2,97	157,0	0,05	1,91	182,5	0	1,57	180,0
15%	0,05	3,53	123,2	0,05	1,88	182,5	0	1,53	187,5
20%	0,05	2,88	142,0	0*	1,97	157,5	-	1,63	195,5

Destaca-se dos resultados que algumas pastas apresentaram teor de saturação igual a 0 (zero), ou seja, quando se incorporou aditivo, os tempos foram iguais aos obtidos para as pastas sem aditivo (respeitando-se a variabilidade do ensaio). Com exceção das misturas produzidas com

metacaulim MF, este comportamento aconteceu nas pastas de maior relação água/finos – 0,6, nas quais se observou tendência à segregação (Figura 36-a), antes mesmo da incorporação do aditivo. Nestes casos, os valores dos ensaios mostrados nas tabelas correspondem à pasta sem aditivo. Este efeito foi bastante evidente na mistura 20%-CG-0,6 em que não foi possível realizar o ensaio, pois, no primeiro ponto de incorporação de aditivo já se observou a ocorrência de exsudação excessiva sem possibilidade prática de realização da leitura, ou seja, o escoamento se deu de forma tão rápida que não se conseguiu medir o tempo de fluxo. Para esta pasta, os valores dos ensaios também correspondem ao teor 0 (zero) de aditivo.

Em consequência disto, observa-se a tendência de redução do consumo de aditivo nas misturas em decorrência do aumento da relação água/finos, visto que estes dois insumos atuam no aumento da fluidez, sendo o superplastificante um agente redutor de água.

Estes efeitos podem ser devidos a um aumento da dispersão das partículas nos sistemas de maior relação água/finos e com adições mais grossas. No caso das misturas com relação água/finos de 0,6, por exemplo, observa-se um excesso de água na mistura, que pode ser maior do que a porosidade do sistema.

Algumas destas pastas foram descartadas para a produção dos concretos, pois nesta fase já foi possível verificar sua baixa coesão (Figura 36-a), podendo levar à segregação do CAA. Esta redução da coesão se deve, mais uma vez, à elevada dispersão das partículas, que tende a reduzir a viscosidade da mistura, estando estas duas propriedades diretamente ligadas entre si (OLIVEIRA et al., 2000). Na Figura 36-b tem-se uma pasta com coesão adequada e na Figura 36-c a realização de um ensaio no Cone de Marsh em que se observa o fluxo contínuo da mistura, o que está relacionado à homogeneidade dos componentes em uma pasta sem a ocorrência de segregação.

Para o metacaulim MF, quanto maior o teor de adição houve um aumento no consumo de aditivo, o que já havia sido observado no Estudo Piloto (Apêndice B), de modo que a faixa de variação dos teores de aditivo está entre 0,05% e 0,6%. Para as demais adições minerais o consumo de aditivo foi muito semelhante ao se variar o seu teor, obtendo-se uma faixa de variação de 0 a 0,2% para o MG, e de 0 a 0,1% para os dois tipos de calcário, com uma leve tendência de redução do teor de saturação à medida que se incorpora mais calcário grosso. Os baixos consumos de aditivo das pastas com MG, CF e CG se devem à sua maior dispersão em relação ao MF, de modo que não há necessidade de se promover a defloculação das partículas, que é a principal finalidade do aditivo superplastificante.

Estes resultados podem ser visualizados nas Figuras 37 e 38.

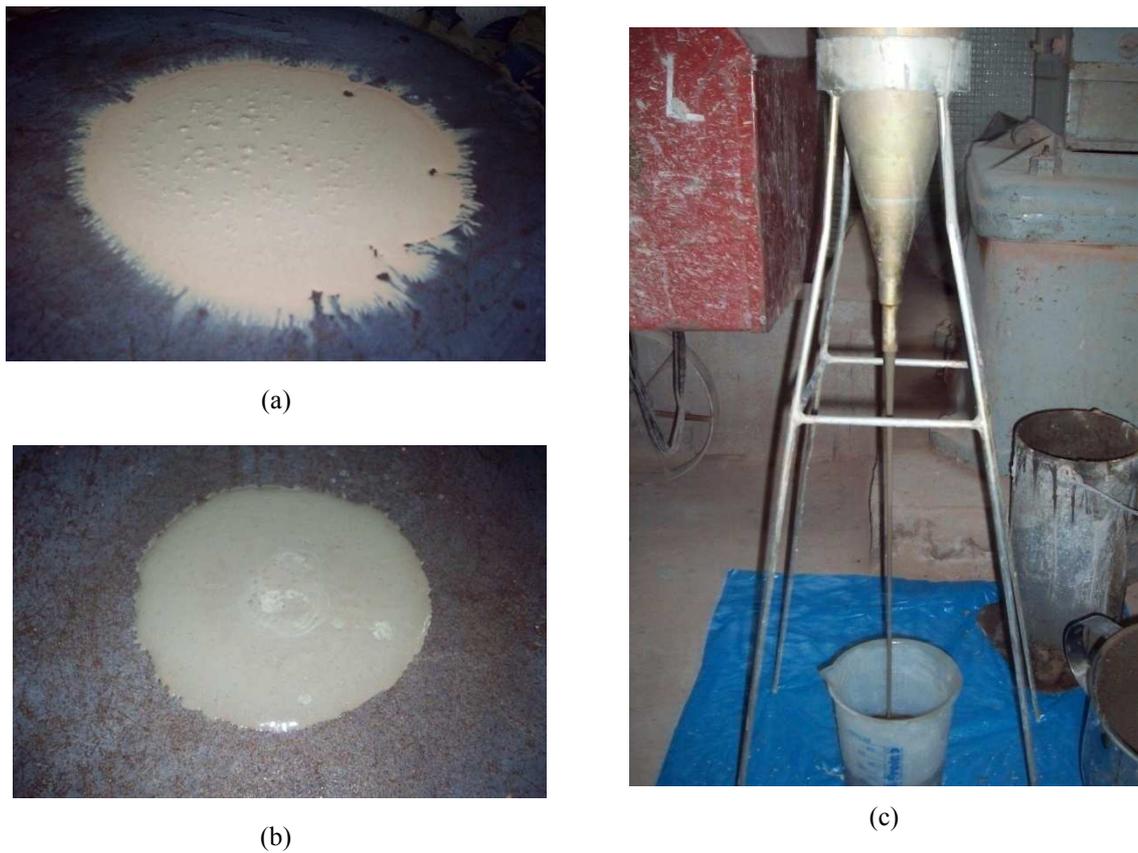


Figura 36 – Aspecto das pastas: (a) ocorrência de segregação e exsudação com concentração dos grãos maiores (MG) no centro; (b) pasta com boa coesão no espalhamento; (c) escoamento contínuo no Cone de Marsh

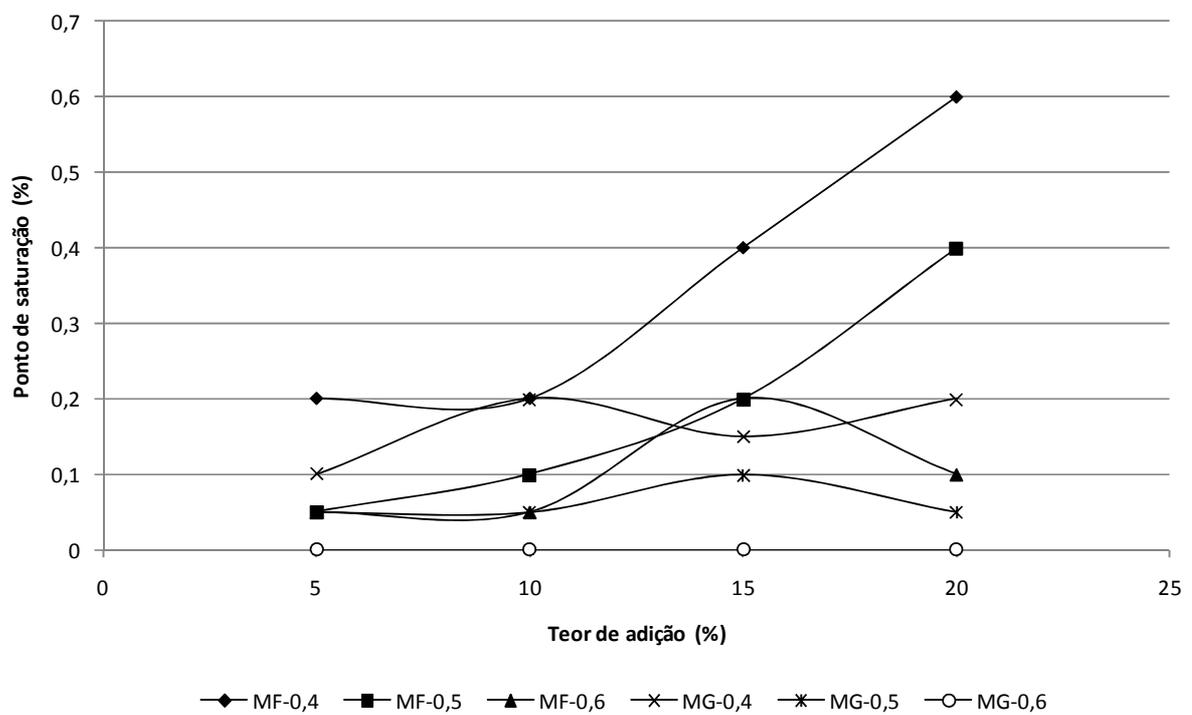


Figura 37 – Ponto de saturação das pastas com metacaulim

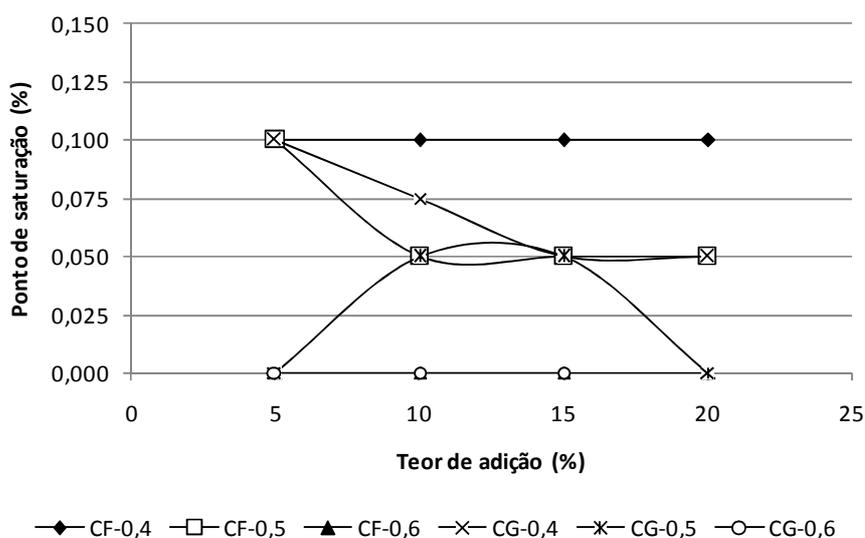


Figura 38 – Ponto de saturação das pastas com calcário

Na Tabela 18 pode-se verificar a influência das características das adições no teor de saturação do aditivo nas pastas por meio de análise de variância.

Praticamente todas as variáveis exercem influência significativa, especialmente o tipo e a superfície específica da adição. Apenas a inter-relação tipo x superfície específica não apresenta influência, contudo a partir dos resultados dos ensaios observou-se que o efeito da superfície específica foi expressivo para um dos tipos de adição – o metacaulim.

Cabe salientar que os teores de aditivo necessários para conferir a fluidez das pastas foram baixos, podendo-se chamar atenção para a mistura 20%-MF-0,4, que consiste na mistura mais desfavorável no que diz respeito à fluidez, pois apresenta a menor relação água/finos e o maior teor de adição mineral obtendo-se, portanto, maior consumo de aditivo. Estes consumos deverão ser aumentados quando da produção dos concretos, em função do espalhamento requerido, devido ao maior número de partículas interagindo entre si e afetando a fluidez deste sistema.

Os resultados de tempo de escoamento seguiram uma leve tendência de aumento quanto maior o teor de saturação do aditivo para as pastas com metacaulim, sendo assumidos valores da ordem de 1,5 a 4,5 s, enquanto que para as pastas com filer calcário este intervalo foi de 1,5 a 3,5 s.

De um modo geral, espera-se que a incorporação de finos (adições minerais) atue principalmente no aumento da coesão, que é indiretamente medida pelo tempo de escoamento no funil. Este efeito foi observado no presente trabalho para a maioria das misturas, em que se

verificou uma tendência de aumento do tempo de escoamento quanto maior o teor de adição, mesmo com o maior consumo de aditivo. Por outro lado, o tempo de escoamento também sofreu redução em decorrência do aumento da relação água/finos, em função da maior dispersão das partículas, que reduz a viscosidade do sistema.

Tabela 18 – Influência das adições no teor de aditivo das pastas - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	0,09845703	1	0,09845703	13,96398892	F _{0,05} (1,16) = 4,49	SIM
Superfície específica da adição	0,09845703	1	0,09845703	13,96398892	F _{0,05} (1,16) = 4,49	SIM
Teor de adição	0,05552734	3	0,05552734	7,87534626	F _{0,05} (3,16) = 3,24	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica	0,01642578	1	0,01642578	2,329639889	F _{0,05} (1,16) = 4,49	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	0,05224609	3	0,05224609	7,409972299	F _{0,05} (3,16) = 3,24	SIM
Inter-relação tipo x teor	0,05224609	3	0,05224609	7,409972299	F _{0,05} (3,16) = 3,24	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	0,02740234	3	0,02740234	3,886426593	F _{0,05} (3,16) = 3,24	SIM
Resíduo	0,1128125	16	0,00705078			
Total	0,51357422	31				

Com relação ao espalhamento das pastas, estas relações não foram bem estabelecidas, observando-se uma leve tendência de aumento em função do maior teor de aditivo, com valores da ordem de 100 a 250 mm para todos os tipos de adição. Quando empregado o metacaulim, verificou-se um aumento quanto maior a superfície específica, sendo o inverso observado para o calcário.

Pela análise de variância, apenas o tipo de adição exerce efeito no tempo de escoamento das pastas (Tabela 19). Quanto ao espalhamento, nenhuma das características das adições exerce individualmente influência significativa, sendo esta relação observada apenas devido à ação

conjunta do tipo e da superfície específica, conforme Tabela 20. Estes resultados condizem com a análise dos dados para estas propriedades.

Tabela 19 – Influência das adições no tempo de escoamento das pastas - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	5,32000833	1	5,32000833	11,16642033	F _{0,05} (1,32) = 4,15	SIM
Superfície específica da adição	0,151875	1	0,151875	0,318777713	F _{0,05} (1,32) = 4,15	NÃO
Teor de adição	1,25750833	3	0,41916944	0,879814826	F _{0,05} (3,32) = 2,90	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	0,01140833	1	0,01140833	0,023945497	F _{0,05} (1,32) = 4,15	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	0,18070833	3	0,06023611	0,126432459	F _{0,05} (3,32) = 2,90	NÃO
Inter-relação tipo x teor	1,56864167	3	0,52288056	1,097499045	F _{0,05} (3,32) = 2,90	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	0,40664167	3	0,13554722	0,284506558	F _{0,05} (3,32) = 2,90	NÃO
Resíduo	15,2457333	32	0,47642917			
Total	24,142525	47				

Tabela 20 – Influência das adições no espalhamento das pastas - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F $_{\alpha}$	Influência
Tipo de adição	760,816875	1	760,816875	0,879461552	F $_{0,05}(1,32) = 4,15$	NÃO
Superfície específica da adição	297,505208	1	297,505208	0,343899302	F $_{0,05}(1,32) = 4,15$	NÃO
Teor de adição	705,077292	3	235,025764	0,271676575	F $_{0,05}(3,32) = 2,90$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	4398,75521	1	4398,75521	5,084713823	F $_{0,05}(1,32) = 4,15$	SIM
Inter-relação teor x superfície específica	3961,05229	3	1320,35076	1,526251283	F $_{0,05}(3,32) = 2,90$	NÃO
Inter-relação tipo x teor	1739,37729	3	579,792431	0,670207467	F $_{0,05}(3,32) = 2,90$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	2268,65896	3	756,219653	0,874147421	F $_{0,05}(3,32) = 2,90$	NÃO
Resíduo	27683,0067	32	865,093958			
Total	41814,2498	47				

Os resultados obtidos nesta seção para o teor de saturação do aditivo levaram à seleção das misturas para a produção do concreto, conforme descrito posteriormente no item 4.3. Antes, serão apresentados os ensaios de reologia realizados ainda na fase de pasta, nos quais foram empregados o MF e o CF em todos os teores, em função da limitação de tamanho de partícula no equipamento.

4.2.2 Reologia

Segundo Oliveira et al. (2000) muitas das manifestações reológicas medidas em suspensões parcialmente aglomeradas, como é o caso do metacaulim utilizado no presente trabalho, estão relacionadas com as interações existentes entre as partículas a nível microscópico. Assim, os resultados dos ensaios de reologia complementam a caracterização das pastas buscando-se

relação com as propriedades dos materiais (especialmente adições) e obtenção de parâmetros de dosagem.

Nas Tabelas 21 e 22 estão os resultados dos ensaios de reologia das pastas, os quais foram obtidos a partir de ajuste das curvas tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento, como exemplificado na Figura 39. A tensão de escoamento é definida como o ponto de interseção da reta ajustada com o eixo-y e a viscosidade é a inclinação da reta.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de reologia nas pastas com metacaulim MF

Teor de adição	água/finos=0,4		água/finos=0,5		água/finos=0,6	
	τ_0	η	τ_0	η	τ_0	H
5%	26,31	13,29	7,82	17,88	3,99	19,11
10%	25,67	21,33	16,82	7,90	9,42	15,52
15%	40,50	20,01	21,15	14,52	7,42	23,51
20%	41,04	24,01	29,05	12,59	12,01	14,14

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de reologia nas pastas com filer calcário CF

Teor de adição	água/finos=0,4		água/finos=0,5		água/finos=0,6	
	τ_0	η	τ_0	η	τ_0	η
5%	2,71	0,86	1,98	0,72	10,06	10,50
10%	4,04	1,75	4,65	1,67	17,91	3,78
15%	13,51	2,40	10,42	2,11	14,94	5,77
20%	13,72	12,90	6,18	1,78	14,33	9,04

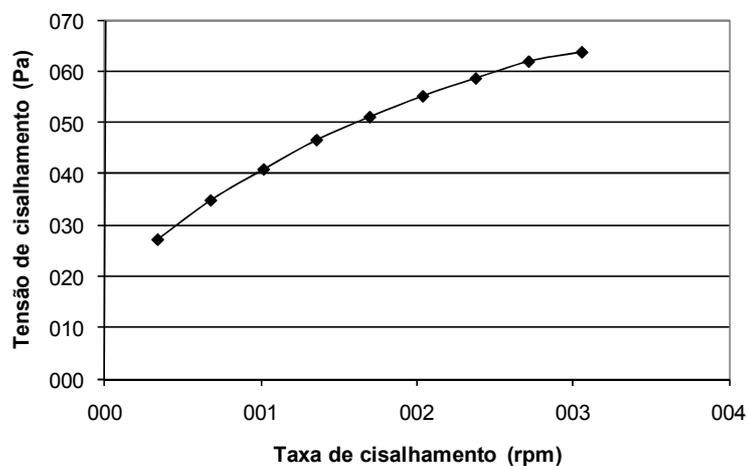


Figura 39 – Curva tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento da pasta 5%-MF-0,4

Para as pastas com metacaulim, os valores apresentados foram medidos empregando-se os teores de saturação do aditivo definidos através do Cone de Marsh. Também em decorrência desta análise de saturação, nas pastas com filer calcário, não foi utilizado aditivo para a avaliação da reologia, uma vez que não foram definidos teores de saturação.

Observa-se que há uma tendência de aumento da tensão de escoamento quanto maior o teor de adição (Figura 40), cuja relação é fortemente estabelecida para as pastas com metacaulim. Estes resultados confirmam o efeito das adições minerais na coesão e fluidez das misturas.

Analisando-se as pastas com metacaulim, os valores de tensão de escoamento ficaram situados em patamares bem definidos de 25 a 40 Pa, 10 a 30 Pa e 5 a 10 Pa, para as relações água/finos de 0,4, 0,5 e 0,6, respectivamente. Na Figura 41 destaca-se este comportamento de redução da tensão de escoamento com o aumento da relação água/finos. Isto evidencia que uma maior quantidade de água aumenta a distância entre as partículas, facilitando o escoamento inicial, o que é uma consequência do aumento da dispersão, pois, conforme afirmam Oliveira et al. (2000) os fatores que favorecem a aglomeração das partículas tendem a elevar a tensão de escoamento.

No caso das pastas com filer calcário, os valores de tensão de escoamento ficaram entre 2 e 18 Pa, sendo que os menores resultados foram obtidos com a relação água/finos de 0,5, como pode ser visto na Figura 42. Este fato chama a atenção para a ausência de aditivo nas pastas CF-0,6, demonstrada na figura pelo aumento da tensão de escoamento, o que indica a forte influência do superplastificante nesta propriedade, apesar de terem sido medidos valores compatíveis com as demais pastas nos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento.

Quanto à viscosidade (Figura 43), verifica-se uma tendência de aumento com o teor de adição quando a relação água/finos foi igual a 0,4, para os dois tipos de adição, o que indica que a proporção de água utilizada nestas pastas é ideal para o adequado preenchimento dos vazios e manutenção da estabilidade das misturas, para as demais pastas não há um comportamento bem definido. No que se refere à viscosidade, as pastas com metacaulim atingiram valores entre 10 e 25 Pa.s, e nas pastas com filer calcário observou-se o intervalo de 0 a 13 Pa.s. Este comportamento diferenciado demonstra mais uma vez o aumento de viscosidade promovido pela aglomeração das partículas.

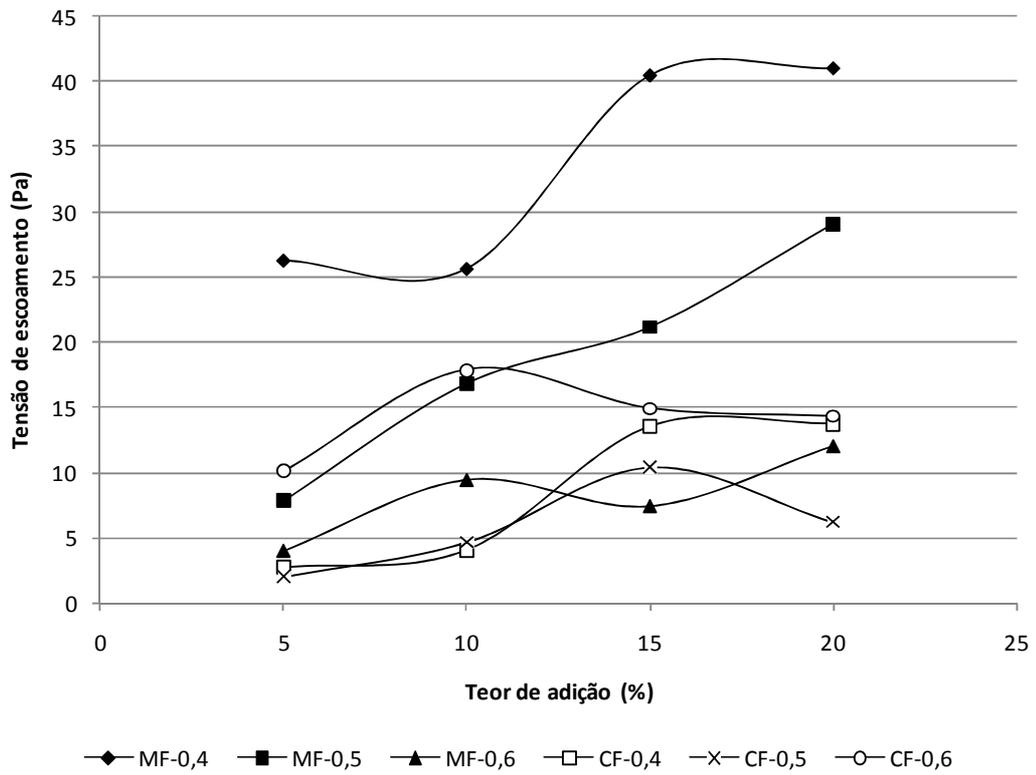


Figura 40 – Tensão de escoamento *versus* teor de adição das pastas

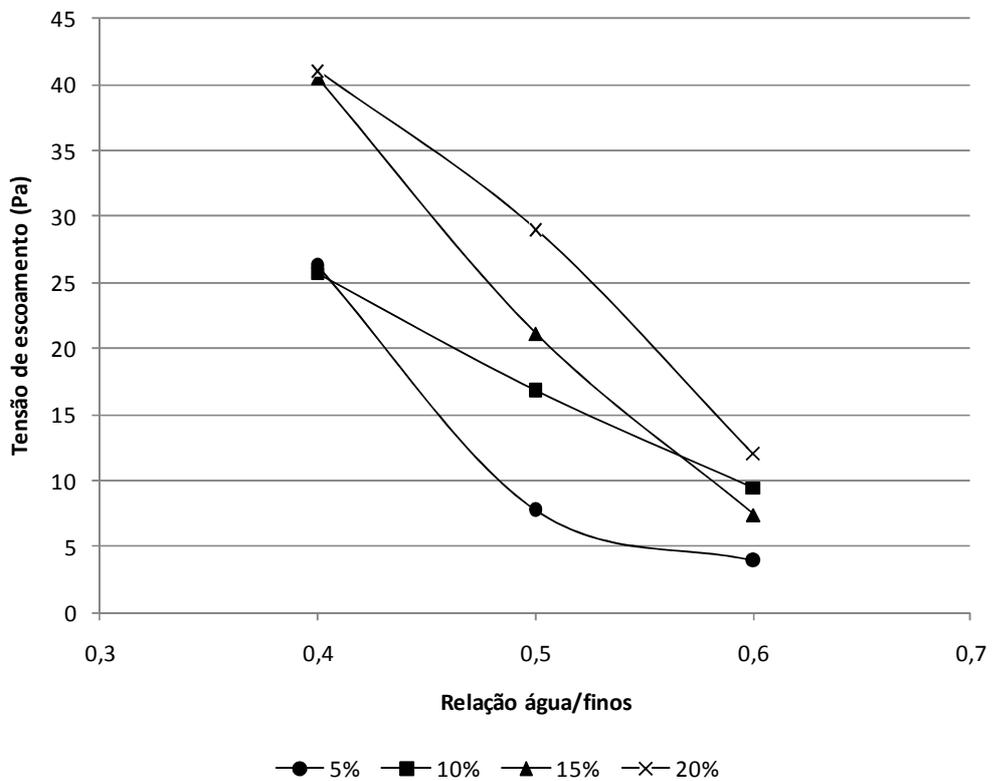


Figura 41 – Tensão de escoamento *versus* relação água/finos das pastas com metacaulim MF

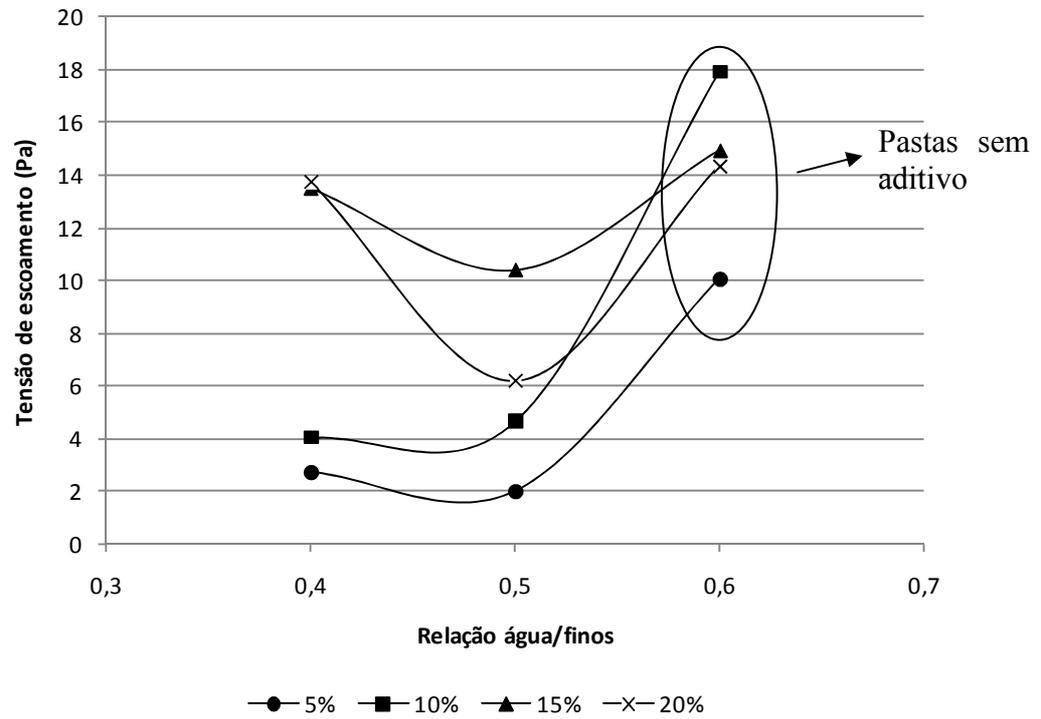


Figura 42 – Tensão de escoamento *versus* relação água/finos das pastas com fíler calcário CF

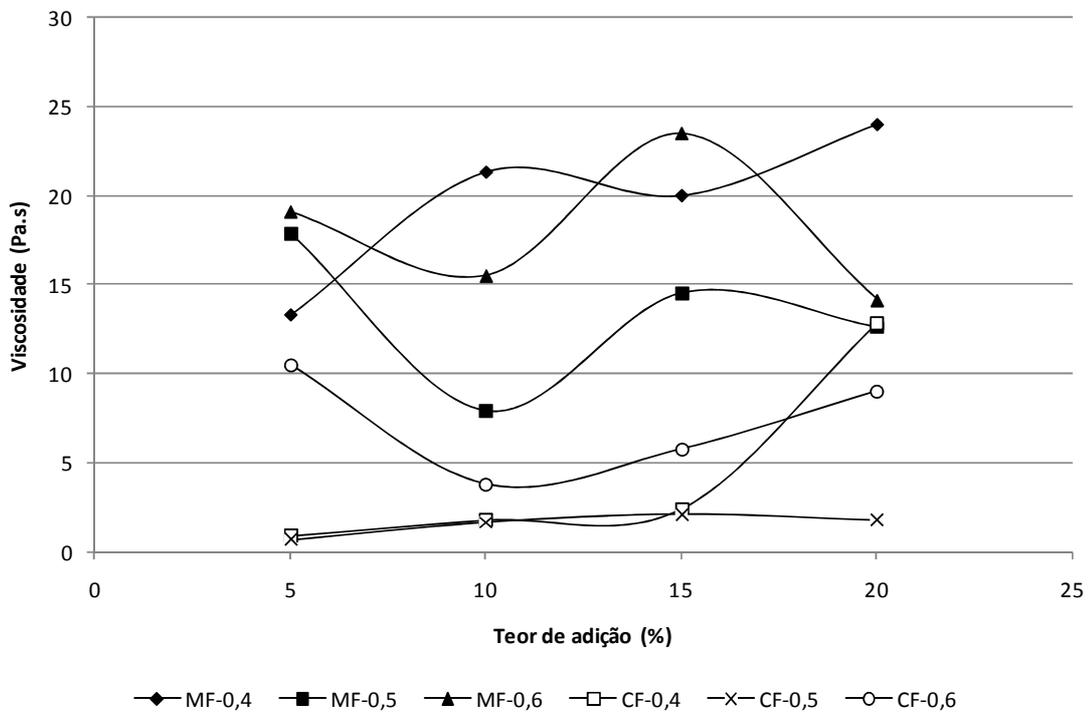


Figura 43 – Viscosidade *versus* teor de adição das pastas

Procedendo-se à análise estatística de variância, apenas o tipo de adição exerce influência significativa tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade, como pode ser visto nas Tabelas 23 e 24, respectivamente, não sendo observadas influências com relação ao teor.

Tabela 23 – Influência das adições na tensão de escoamento das pastas - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	669,398437	1	669,398437	7,068110847	F _{0,05} (1,17) = 4,45	SIM
Teor de adição	420,173146	3	140,057715	1,478855344	F _{0,05} (3,17) = 3,2	NÃO
Inter-relação tipo x teor	62,3232125	3	20,7744042	0,219354846	F _{0,05} (3,17) = 3,2	NÃO
Resíduo	1610,01627	17	94,7068392			
Total	2761,91106	24				

Tabela 24 – Influência das adições na viscosidade das pastas - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	944,136704	1	944,136704	43,95903804	F _{0,05} (1,17) = 4,45	SIM
Teor de adição	45,9448458	3	15,3149486	0,713064544	F _{0,05} (3,17) = 3,2	NÃO
Inter-relação tipo x teor	35,9200458	3	11,9733486	0,557479531	F _{0,05} (3,17) = 3,2	NÃO
Resíduo	365,12	17	21,4776471			
Total	1391,1216	24				

Analisando-se as propriedades reológicas com relação aos ensaios de Cone de Marsh e *mini-slump*, para as pastas produzidas neste estudo, não foi obtida relação entre a tensão de escoamento e o espalhamento, bem como entre a viscosidade e o tempo de escoamento no funil. Estas comparações foram feitas por serem relações muitas vezes encontradas em estudos de pastas fluidas. Por outro lado, encontrou-se uma boa relação entre a tensão de escoamento e o tempo de escoamento no cone (Figura 44).

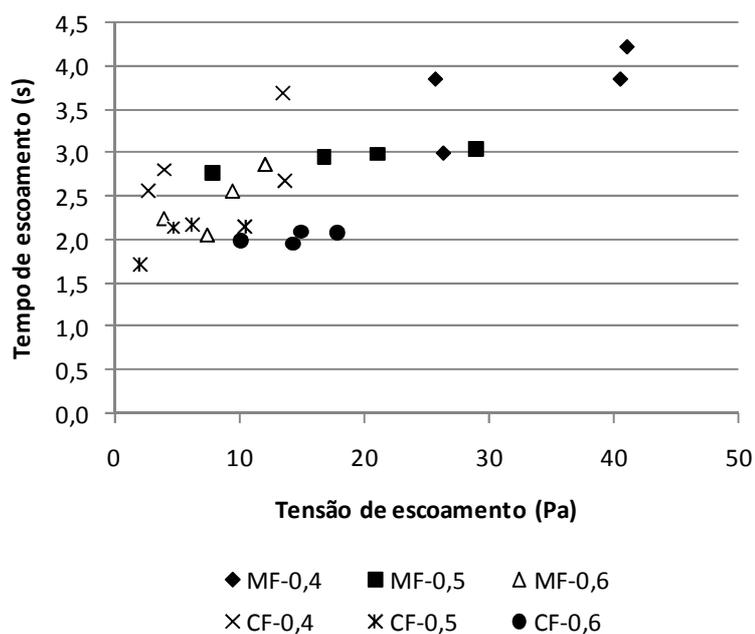


Figura 44 – Tempo de escoamento no cone *versus* tensão de escoamento das pastas

(Obs.: para cada par adição-água/finos existem 4 pontos referentes aos teores de adição – 5%, 10%, 15% e 20%)

Quanto ao ponto de saturação, verificou-se que, nas misturas com metacaulim, quanto maior o teor de aditivo maior foi a tensão de escoamento (Figura 45), apesar de atribuir-se ao aditivo uma atuação direta na redução da tensão de escoamento, devido ao menor contato entre as partículas decorrente da sua adsorção na superfície do grão de cimento, conforme reforçam Petit e Wirquin (2010). Esta relação confirma resultados anteriores indicando a influência do aumento da coesão (maior tensão de escoamento) promovido pela aglomeração das partículas, que leva a um maior consumo de aditivo para promover a defloculação.

Além disso, observa-se que os teores de aditivo, de um modo geral, foram bastante baixos (apenas três pastas apresentaram consumo maior que 0,2%) de modo que, possivelmente, a quantidade utilizada não foi suficiente para promover a defloculação das pastas com metacaulim.

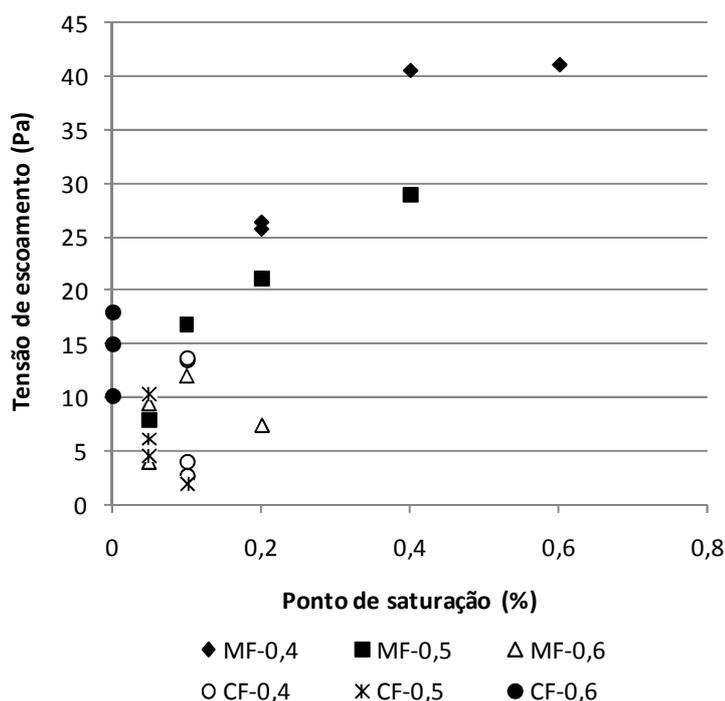


Figura 45 – Tensão de escoamento *versus* teor de saturação do aditivo

(Obs.: para cada par adição-água/finos existem 4 pontos referentes aos teores de adição – 5%, 10%, 15% e 20%)

RESUMO

A partir dos resultados dos ensaios nas pastas, observou-se claramente o forte efeito exercido pelo estado de aglomeração/dispersão das partículas na condição de fluidez e coesão destas misturas, podendo-se concluir que:

- Houve um comportamento diferenciado entre os dois tipos de adição – as pastas com metacaulim apresentaram maiores valores e maiores intervalos de variação para o teor de aditivo, tempo de escoamento, tensão de escoamento e viscosidade;
- O efeito da superfície específica foi observado apenas nas pastas com metacaulim;
- Apesar da elevada superfície específica do filer calcário CF, os resultados em pasta demonstram que não houve um efeito de aglomeração das partículas;
- Houve uma sinergia entre os efeitos promovidos pelos teores de água (relação água/finos) e de adição empregados;
- Não se observou a atuação efetiva do aditivo superplastificante na redução da tensão de escoamento, o que pode ter sido consequência dos baixos consumos, porém, a ausência de

aditivo em algumas misturas de filer calcário refletiu em elevados valores de tensão de escoamento e de viscosidade com relação às demais pastas com este material.

4.3 Produção do CAA

A seleção das misturas de concreto a serem produzidas se deu em função dos resultados das pastas, eliminando-se algumas em que houve falta de coesão, nas quais não foi possível determinar o teor de saturação do aditivo.

Assim, foram produzidas todas as misturas com relação água/finos 0,5, bem como as misturas com relação água/finos de 0,4 nos valores extremos de adição (5% e 20%). Para a relação água/finos de 0,6, foram acrescentadas as misturas com 5% e 20% para o calcário fino, apesar de não atenderem ao critério de seleção das pastas, para que fossem obtidos parâmetros para a análise dos ensaios de reologia realizados com esta adição mineral. No Quadro 3 tem-se o resumo da matriz de concreto, com indicação das misturas produzidas (SIM) e das que foram eliminadas (NÃO).

Quadro 3 – Matriz de concretos

Mistura		Tipo de adição			
a/finos	Teor de adição (%)	MF	MG	CF	CG
0,4	5	SIM	SIM	SIM	SIM
	10	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
	15	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
	20	SIM	SIM	SIM	SIM
0,5	5	SIM	SIM	SIM	SIM
	10	SIM	SIM	SIM	SIM
	15	SIM	SIM	SIM	SIM
	20	SIM	SIM	SIM	SIM
0,6	5	SIM	NÃO	SIM	NÃO
	10	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
	15	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
	20	SIM	NÃO	SIM	NÃO

4.3.1 Propriedades do estado fresco

Nas Tabelas 25 a 28 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no CAA no estado fresco. Destaca-se que os teores de aditivo apresentados foram decorrentes de ajustes no concreto, tendo como ponto de partida os teores de saturação das pastas.

Tabela 25 – Ensaio do concreto no estado fresco para o MF

Mistura		Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	Massa específica (g/cm ³)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	0,33	642,5	6,00	2,41
	10	0,36	627,5	9,82	2,39
	15	0,65	695,0	11,91	2,39
	20	0,96	682,5	57,85	2,42
0,5	5	0,24	670,0	5,32	2,29
	10	0,31	650,0	3,50	2,38
	15	0,36	622,5	6,03	2,37
	20	0,56	760,0	7,72	2,36
0,6	5	0,11	635,0	2,22	2,29
	10	0,15	645,0	2,15	2,36
	15	0,23	640,0	2,53	2,34
	20	0,26	670,0	2,66	2,34

Tabela 26 – Ensaio do concreto no estado fresco para o MG

Mistura		Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	Massa específica (g/cm ³)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	0,25	692,5	6,25	2,29
	20	0,65	632,5	19,06	2,37
0,5	5	0,17	662,5	3,88	2,29
	10	0,26	692,5	2,34	2,37
	15	0,32	703,0	3,09	2,38
	20	0,37	640,0	4,25	2,36

Tabela 27 – Ensaio do concreto no estado fresco para o CF

Mistura		Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	Massa específica (g/cm ³)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	0,21	635,0	5,22	2,29
	20	0,25	640,0	6,19	2,39
0,5	5	0,10	625,0	5,59	2,29
	10	0,13	715,0	2,03	2,38
	15	0,14	625,0	2,38	2,39
	20	0,17	690,0	1,85	2,41
0,6	5	0,05	632,5	2,03	2,29
	20	0,08	680,0	1,72	2,35

Tabela 28 – Ensaio do concreto no estado fresco para o CG

Mistura		Teor de aditivo (%)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	Massa específica (g/cm ³)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	0,31	650,0	4,93	2,29
	20	0,26	642,5	4,41	2,40
0,5	5	0,15	665,0	2,66	2,29
	10	0,16	682,5	2,12	2,37
	15	0,16	627,5	2,25	2,37
	20	0,18	627,5	2,06	2,39

Na Figura 46 tem-se um resumo de todos os resultados de espalhamento e tempo de escoamento no Funil-V, através da qual é possível observar que apenas três misturas apresentaram espalhamento acima da faixa definida para uniformização dos resultados (600 a 700 mm), conforme procedimento descrito no item 3.2.3.

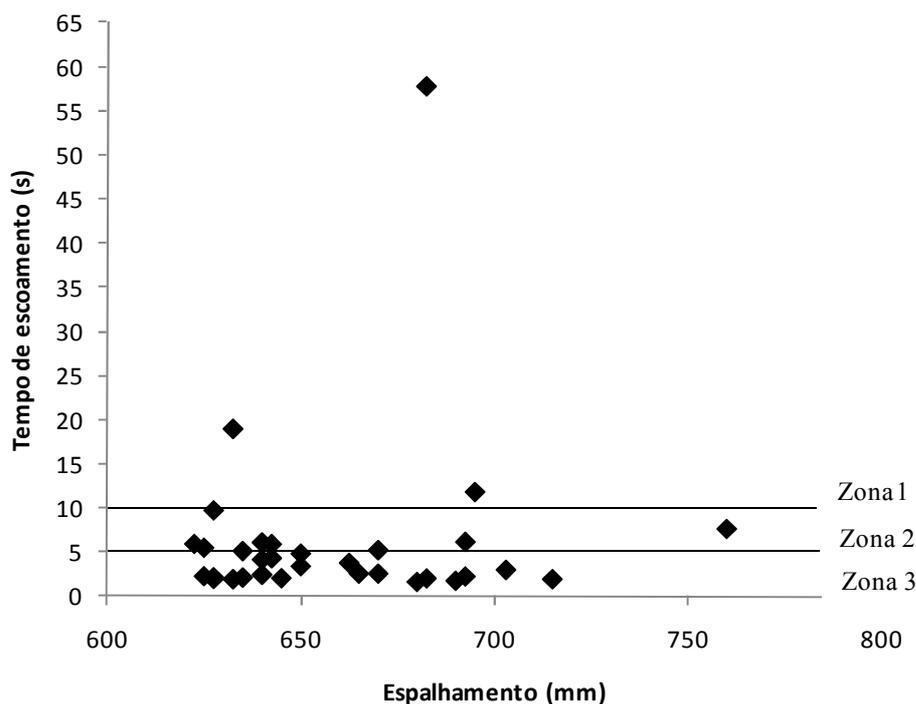


Figura 46 – Espalhamento e tempo de escoamento dos concretos

Com relação ao escoamento no funil, observa-se da figura que a mistura 20%-MF-0,4 apresentou tempo extremamente alto – 57,85 s, o que é um indicativo da sua elevada coesão. A figura apresenta três zonas distintas em função da observação visual do comportamento das misturas com relação à coesão, para o que se levou em conta:

- a homogeneidade dos componentes: especialmente com relação à distribuição dos grãos do agregado graúdo por toda a mistura, inclusive durante a realização dos ensaios; quanto mais espalhados os grãos maior a coesão;
- a facilidade de escoamento: tempo decorrido para que a mistura se espalhe ou preencha certo volume; maiores tempos de escoamento indicam maior coesão;
- a uniformidade do escoamento: verificação da ocorrência de bloqueio durante o escoamento no funil; a interrupção do escoamento indica baixa coesão e, conseqüentemente, segregação;
- a forma de espalhamento: verificação da existência de uma borda arredondada ao longo de todo o ensaio do espalhamento, o que indica maior homogeneidade e coesão.

Na Tabela 29 tem-se uma descrição das zonas identificadas.

Tabela 29 – Zonas de coesão dos concretos

Zonas	Faixa de Tempo de escoamento (s)	Comportamento das misturas
1	> 10	Elevada coesão e fluidez, com aparência extremamente seca antes da incorporação do aditivo
2	5 – 10	Misturas com boa coesão, as quais estavam secas antes da aplicação do aditivo
3	0 – 5	Misturas com menor coesão, porém sem comprometer a homogeneidade, ou seja, sem a ocorrência de segregação ou exsudação

Verificou-se tendência à exsudação nas misturas com tempo de escoamento inferior a 2 s. Em nenhum dos casos houve exsudação ou segregação, como exemplificado na Figura 47.



Figura 47 – Distribuição dos agregados no ensaio de espalhamento – ausência de segregação

Analisando-se os resultados de espalhamento pode-se observar que na região referente a valores de diâmetro menores que 650 mm está concentrada a maior parte das misturas com tempo de escoamento entre 5 e 10 s (Zona 2). Isto reforça o fato de que quanto menor a fluidez do concreto, maior a tendência de se obterem misturas mais coesas.

Nas Figuras 48 e 49, estão ilustradas as curvas tempo de escoamento *versus* teor de adição para os concretos produzidos com metacaulim e com calcário, respectivamente.

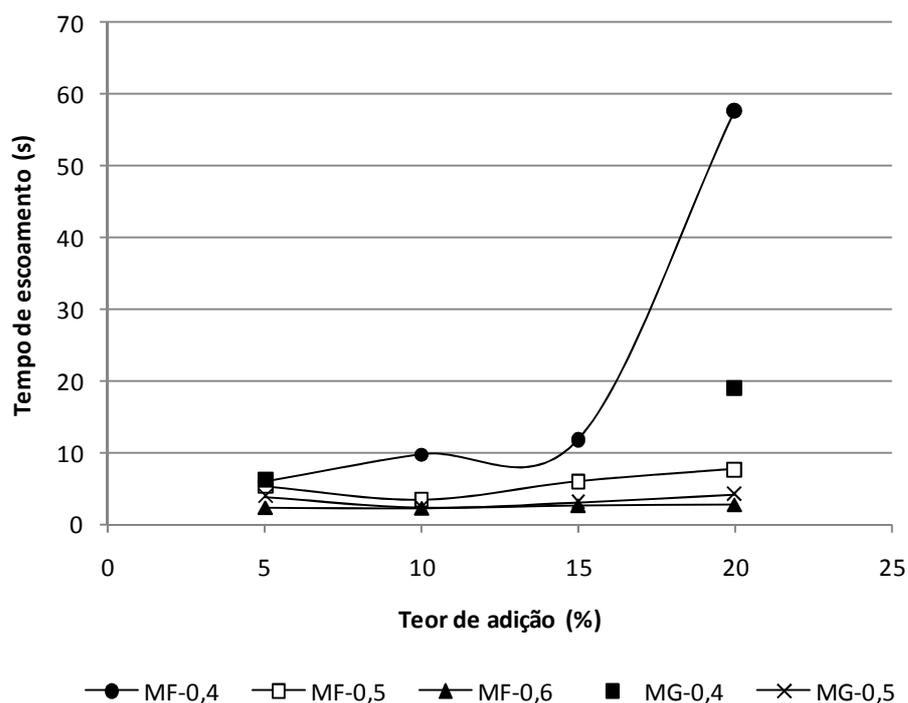


Figura 48 – Teor de adição *versus* tempo de escoamento nos concretos com metacaulim

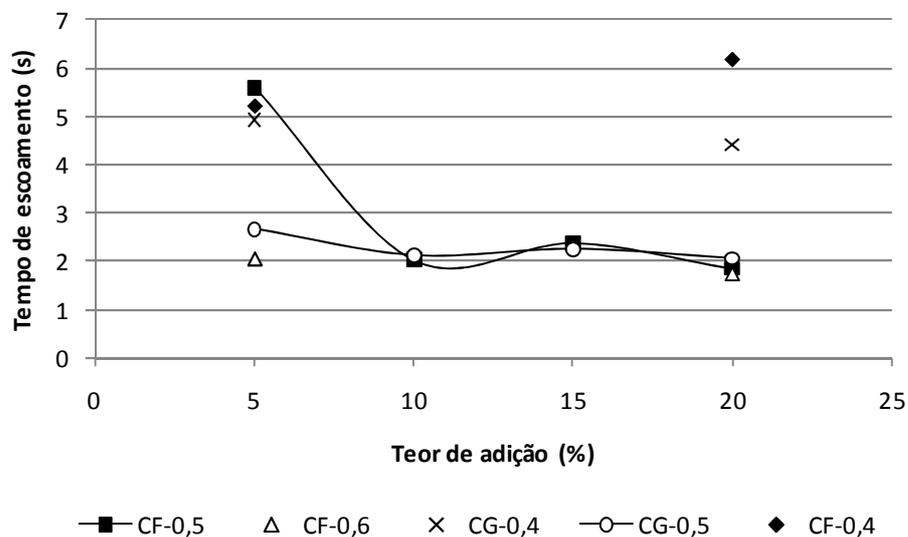


Figura 49 – Teor de adição *versus* tempo de escoamento nos concretos com filer calcário

Nos concretos com metacaulim as misturas que atingiram maior tempo para o escoamento foram aquelas nas quais se utilizou maior quantidade de adição mineral, como observado nas pastas, sendo atingidos valores de 2 a 60 s. Quando empregado o filer calcário, os tempos de escoamento apresentaram-se próximos entre si, variando no intervalo de 2 a 6 s, com uma tendência a decaimento para maiores teores de adição. Isto demonstra o incremento na coesão

promovido pelo metacaulim, o que está de acordo com as observações de Güneyisi e Gesoglu (2008).

Estas interferências do tipo e do teor de adição no tempo de escoamento dos concretos não foram observadas na análise de variância, cujos resultados estão mostrados na Tabela 30.

Tabela 30 – Influência das adições no tempo de escoamento dos concretos - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F $_{\alpha}$	Influência
Tipo de adição	374,616	1	374,616	2,165348	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Superfície específica da adição	145,4436	1	145,4436	0,84069	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Teor de adição	252,3332	1	252,3332	1,458531	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	93,41222	1	93,41222	0,539939	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	97,12102	1	97,12102	0,561377	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação tipo x teor	317,9089	1	317,9089	1,83757	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	114,0624	1	114,0624	0,659301	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Resíduo	1384,04	8	173,005			
Total	2778,938	15				

Analisando-se em função da relação água/finos nota-se da Figura 50 uma boa correlação entre esta e a coesão dos concretos (medida indiretamente pelo tempo de escoamento). Na figura se observa que, de modo geral, os maiores tempos de escoamento foram atingidos pelas misturas com menor quantidade de água. Destaca-se que todas as misturas com relação água/finos de 0,6 ficaram enquadradas na Zona 3 de coesão, enquanto que todas as misturas da Zona 1 apresentam relação água/finos de 0,4. Para melhor visualização dos resultados, nas Figuras 51 e 52 tem-se o detalhamento em função do tipo de adição.

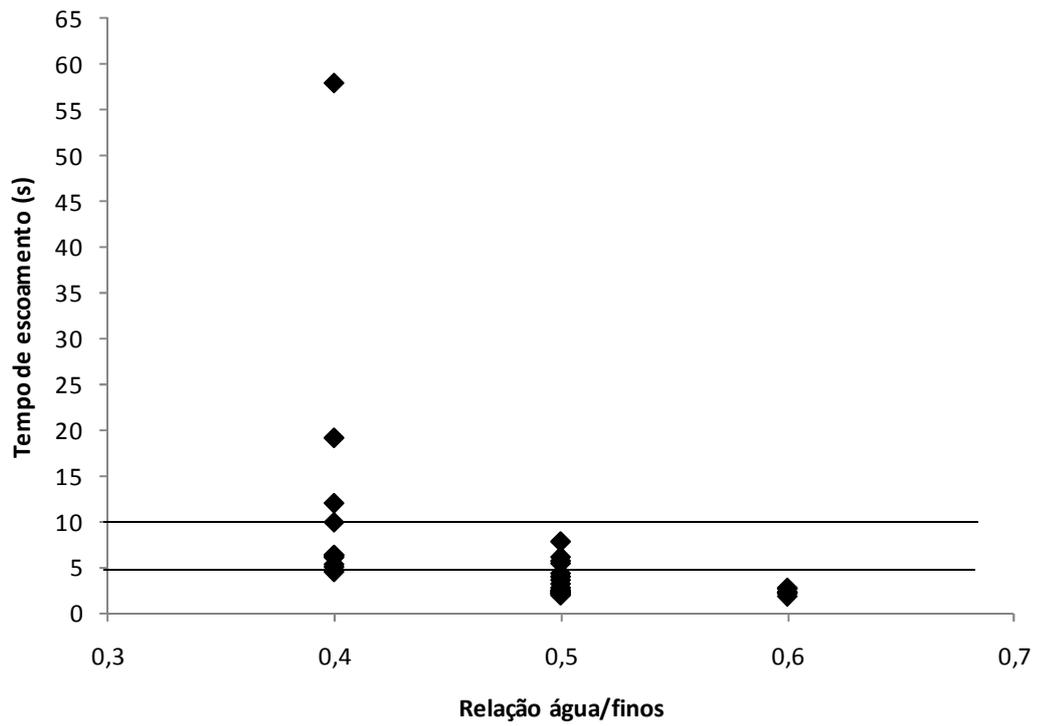


Figura 50 – Relação água/finos *versus* tempo de escoamento no Funil-V

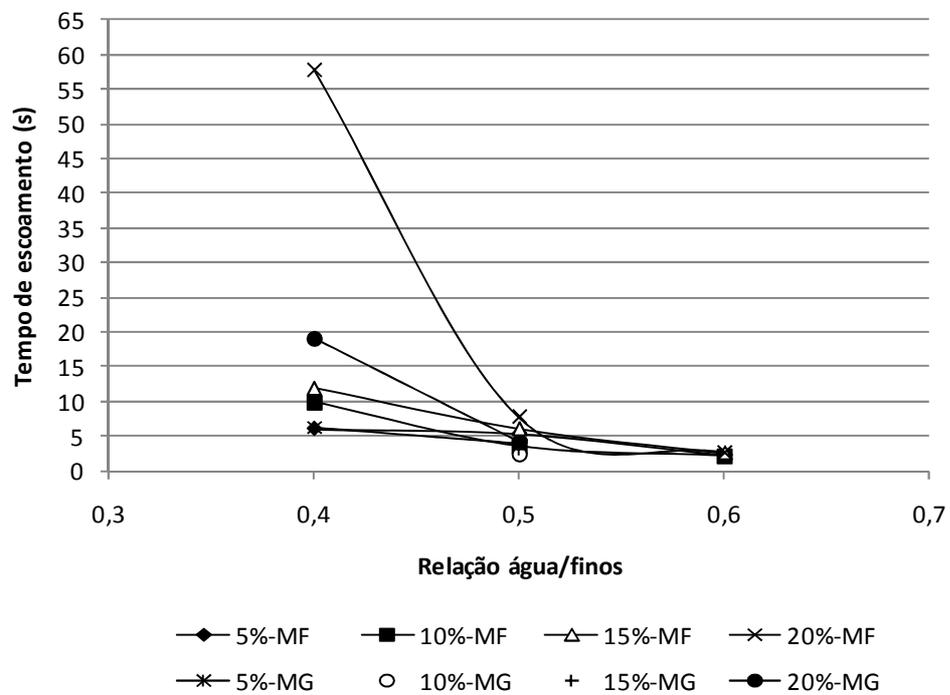


Figura 51 – Relação água/finos *versus* tempo de escoamento no Funil-V para concretos com metacaulim

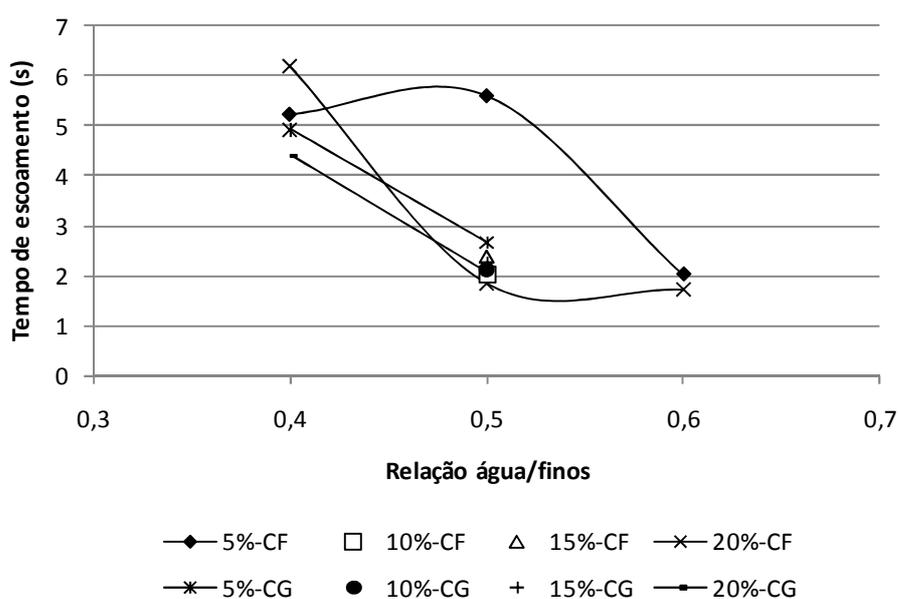


Figura 52 – Relação água/finos *versus* tempo de escoamento no Funil-V para concretos com filer calcário

Relacionando-se o tempo de escoamento com o teor de aditivo empregado nos concretos, conforme Figura 53, destaca-se que os concretos mais coesos (Zonas 1 e 2) necessitaram de uma maior quantidade de aditivo (acima de 0,6% para os concretos situados na Zona 1); além disso, para teores de aditivo menores que 0,2%, com exceção de um concreto, todos se encontram na Zona 3. Isto está relacionado ao fato de que, antes da incorporação do superplastificante, estes concretos estavam bastante secos, sendo um dos fatores que levaram a este efeito as menores relações água/finos empregadas, como destacado anteriormente. Assim, nestas misturas houve necessidade de grande quantidade de aditivo para atingir os padrões de auto-compactabilidade desejados.

Nas Figuras 54 e 55 tem-se uma visão do consumo de aditivo para cada tipo de adição, de onde se verifica que nos concretos com metacaulim há uma tendência de maior consumo de aditivo quando obtidos maiores tempos de escoamento, verificado também nas pastas, sendo observado comportamento inverso nos concretos com filer calcário. Os consumos de aditivos variaram de 0,1% a 1% nas misturas com metacaulim, enquanto que com filer este intervalo foi de 0 a 0,4%.

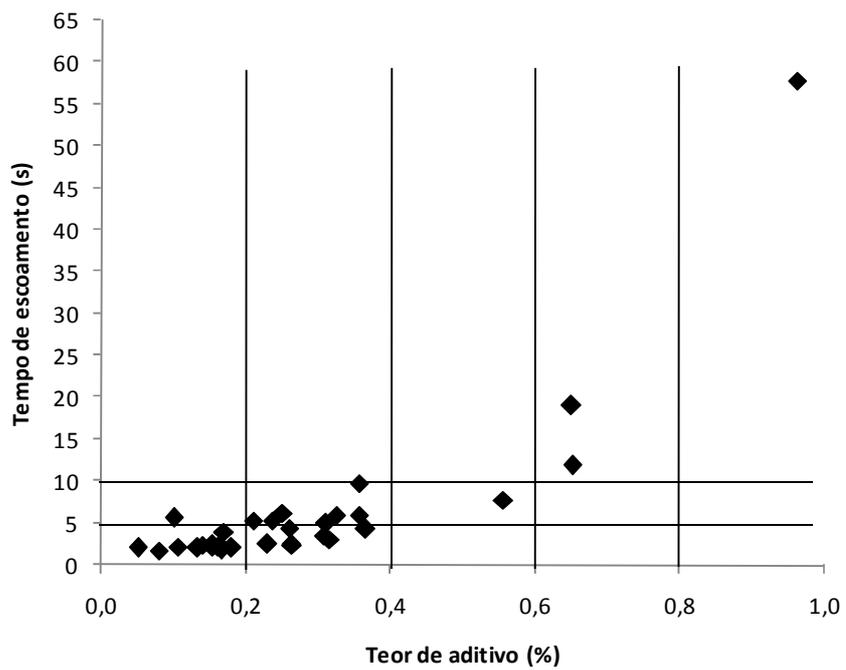


Figura 53 – Teor de aditivo *versus* tempo de escoamento no Funil-V

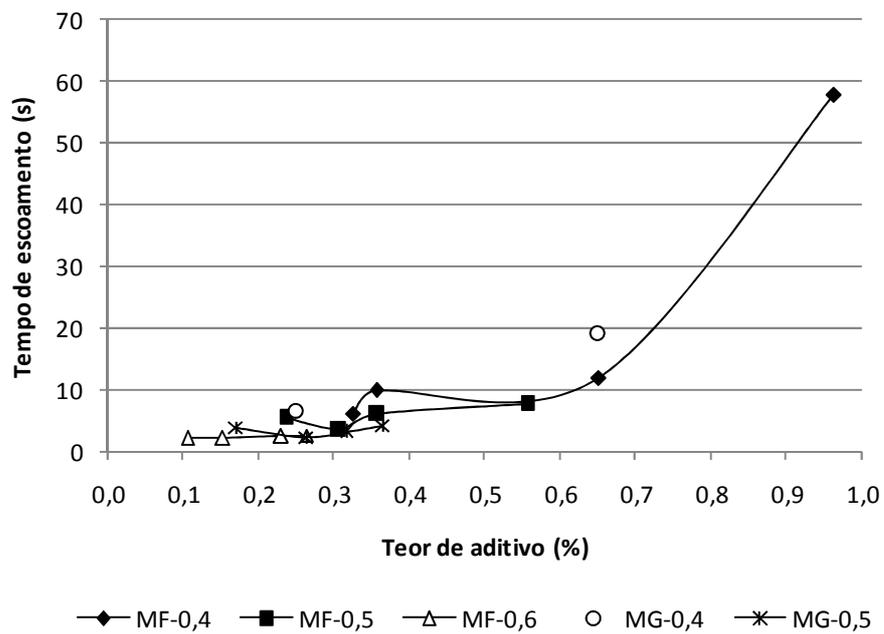


Figura 54 – Teor de aditivo *versus* tempo de escoamento no Funil-V para concretos com metacaulim

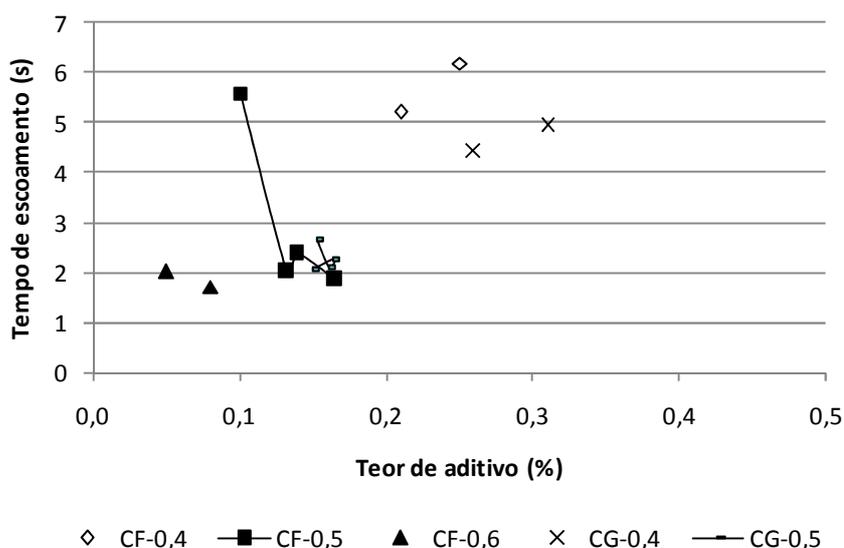


Figura 55 – Teor de aditivo *versus* tempo de escoamento no Funil-V para concretos com filer calcário

Estes resultados foram confirmados a partir da análise de variância, conforme Tabela 31.

Não foi observada relação entre o teor de aditivo e o espalhamento. Sabe-se, contudo, que os valores de espalhamento dos concretos foram limitados em uma faixa pré-definida (600 a 700 mm).

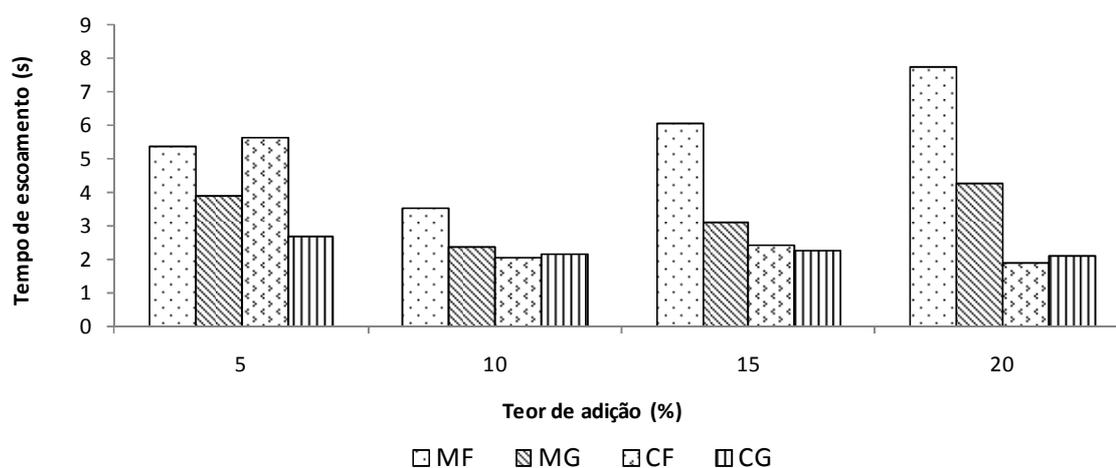
Nas Figuras 56 e 57, são avaliadas as misturas de mesma relação água/finos – 0,5. Na Figura 56 podem ser visualizados os tempos de escoamento variando quanto ao tipo e teor de adição mineral. Para os concretos com metacaulim, no teor de 10% de adição houve uma queda no valor do tempo, passando a aumentar em seguida em função da maior quantidade de adição mineral. Observou-se um forte efeito da superfície específica do metacaulim no aumento do tempo e, conseqüentemente, da coesão, com maior intensidade à medida que se incorporou maior quantidade desta adição.

No caso dos concretos com filer calcário, com exceção do teor de 5%, não foram observadas variações quanto ao teor e superfície específica das adições. Os valores obtidos para o metacaulim foram sempre maiores do que aqueles obtidos com o filer, sendo esta diferença progressiva à medida que se aumentou o teor de adição.

Todos estes efeitos foram observados na fase de pasta.

Tabela 31 – Influência das adições no teor de aditivo dos concretos - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F $_{\alpha}$	Influência
Tipo de adição	0,232806	1	0,232806	12,05079262	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	SIM
Superfície específica da adição	0,016256	1	0,016256	0,841475251	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Teor de adição	0,162006	1	0,162006	8,385959236	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica	0,039006	1	0,039006	2,019087674	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	0,016256	1	0,016256	0,841475251	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Inter-relação tipo x teor	0,138756	1	0,138756	7,182465222	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	0,002256	1	0,002256	0,116790683	F $_{0,05}(1,8) = 5,32$	NÃO
Resíduo	0,15455	8	0,019319			
Total	0,761894	15				

Figura 56 – Tipo e teor de adição *versus* tempo de escoamento no Funil-V

Influências significativas do tipo e do teor de adição no tempo de escoamento dos concretos com relação água/finos de 0,5 foram observadas a partir da análise de variância (Tabela 32).

Tabela 32 – Influência das adições no tempo de escoamento dos concretos com água/finos = 0,5 - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	14,42101	1	14,42101	14,92909	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Superfície específica da adição	8,658306	1	8,658306	8,963354	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Teor de adição	7,823319	3	2,607773	2,69965	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	2,441406	1	2,441406	2,527422	F _{0,05} (1,4) = 7,71	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	1,415269	3	0,471756	0,488377	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Inter-relação tipo x teor	7,799569	3	2,599856	2,691454	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Resíduo	3,863869	4	0,965967			
Total	46,42274	16				

Na Figura 57 estão apresentados os consumos de aditivo.

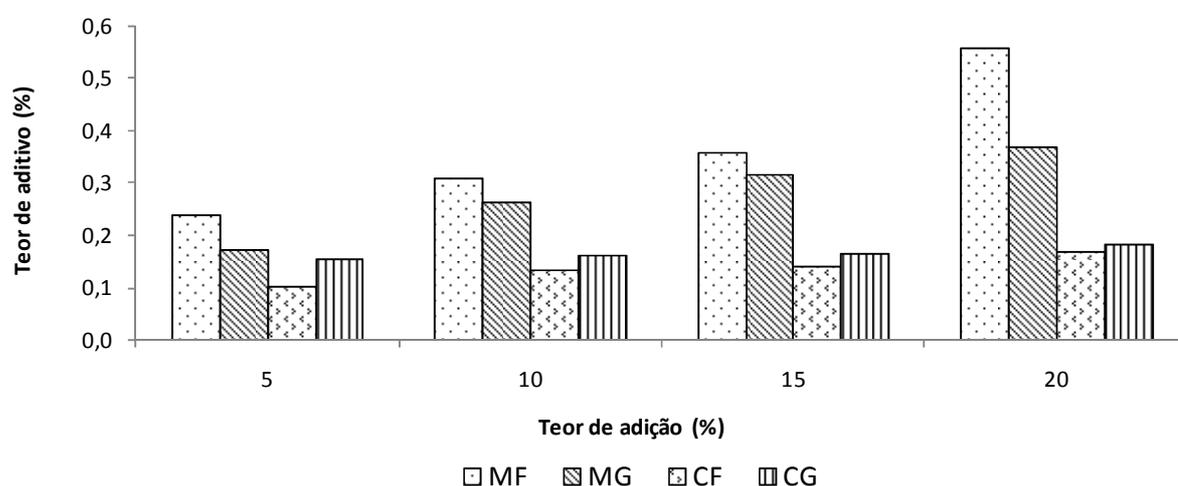


Figura 57 – Teor de aditivo nos concretos com relação água/finos 0,5

Analisando-se estas misturas verificou-se que: no caso do metacaulim, quanto maior o teor e a superfície específica da adição, maior o consumo de aditivo, o mesmo ocorrido nas pastas; quanto ao filer calcário, a variação no consumo de aditivo foi mais expressiva para o teor de 5% de adição, observando-se pequena variação para os demais concretos. Pela análise de

variância (Tabela 33), há influência significativa de quase todos os parâmetros, exceto da inter-relação teor x superfície específica, apesar desta interferência ter sido observada para os dados dos concretos com metacaulim.

Avaliando-se o consumo de aditivo apenas nos concretos produzidos com metacaulim MF, observou-se que este foi menor nas misturas de maior relação água/finos, tendo em vista a maior quantidade de água disponível na mistura para conferir a fluidez necessária. Esta redução foi mais expressiva quanto maiores os teores de MF, como pode ser visto na Figura 58, na qual se destaca a mistura 20%-MF-0,4. Quanto ao teor de adição, observou-se uma relação direta com o teor de aditivo. Estes comportamentos foram também observados nas pastas.

Tabela 33 - Influência das adições no teor de aditivo dos concretos com água/finos = 0,5 - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	0,123017	1	0,123017	259,1313	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Superfície específica da adição	0,003926	1	0,003926	8,269108	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Teor de adição	0,043668	3	0,014556	30,66167	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Inter-relação tipo x superfície específica	0,011653	1	0,011653	24,54671	F _{0,05} (1,4) = 7,71	SIM
Inter-relação teor x superfície específica	0,006865	3	0,002288	4,820378	F _{0,05} (3,4) = 6,59	NÃO
Inter-relação tipo x teor	0,027446	3	0,009149	19,27145	F _{0,05} (3,4) = 6,59	SIM
Resíduo	0,001899	4	0,000475			
Total	0,218474	16				

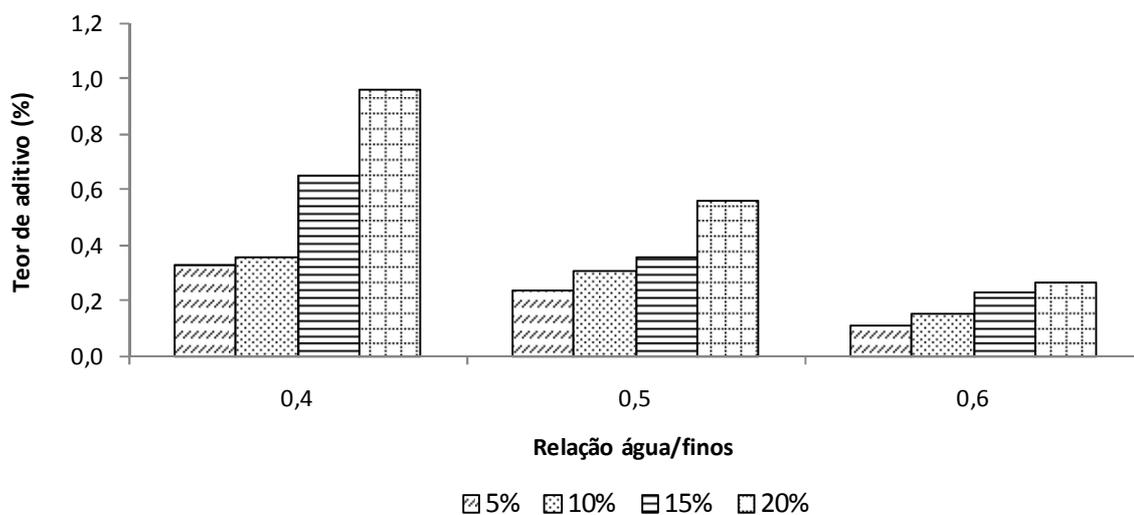


Figura 58 – Teor de aditivo nos concretos com metacaulim MF

RESUMO

Pode-se concluir, dos resultados apresentados para os concretos, que foram reproduzidas as relações obtidas nas pastas, identificando-se zonas de comportamento das misturas no que diz respeito à coesão. No presente trabalho, esta propriedade demonstra ser a mais afetada pelas variações de tipo, superfície específica e teor das adições, e relação água/finos, demonstrando uma ligação com o estado de aglomeração/dispersão das partículas dos finos.

A seguir, estas relações pasta x concreto são investigadas, verificando-se ainda as relações entre as propriedades medidas no concreto e as propriedades reológicas das pastas.

4.3.2 Relação pasta x concreto

As relações entre os teores de aditivo, os tempos de escoamento e os espalhamentos obtidos nas pastas e nos concretos podem ser visualizadas nas Figuras 59 a 61, nas quais se pode observar que apenas os resultados de espalhamento não tiveram boa correlação entre si. Destaca-se que, nas figuras, para cada par adição-água/finos há mais de um ponto, cuja variação ocorre em função dos diferentes teores de adição empregados, sendo que a

quantidade de pontos é decorrente da quantidade de pastas em que se empregou aditivo, e da quantidade de concretos produzidos.

Na Figura 59 estão apresentados os consumos de aditivo, observando-se que os teores necessários para que os concretos atingissem as propriedades auto-adensáveis, ajustados por meio do ensaio de espalhamento, foram muito maiores do que nas pastas. Contudo, alguns concretos, especialmente quando empregaram filer calcário CF nas relações água/finos 0,5 e 0,6, apresentaram valores muito próximos daqueles encontrados nas pastas. Neste sentido, destaca-se a mistura 5%-CF-0,5, que resultou no mesmo teor de aditivo tanto na pasta quanto no concreto. A pasta com estas características apresentou os menores resultados de tempo de escoamento no Cone de Marsh, tensão de escoamento e viscosidade dentre todas as ensaiadas, caracterizando um estado de baixa coesão.

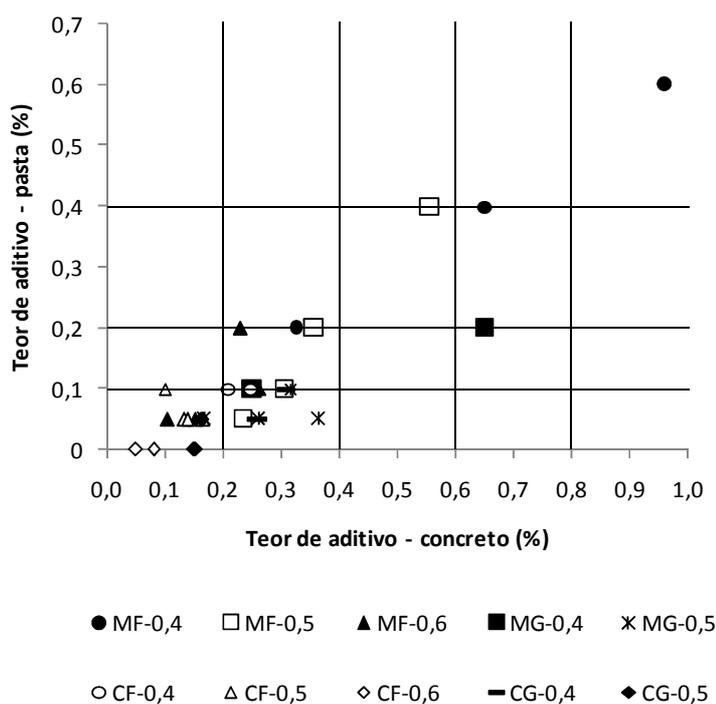


Figura 59 – Teor de aditivo nos concretos e nas pastas

Oliveira et al. (2000) apontam que o escoamento do concreto só é possível quando for aplicada uma tensão de cisalhamento capaz de vencer a aglomeração dos grãos finos e os efeitos de atrito dos grãos grossos (agregados). Os resultados obtidos nas pastas e nos concretos demonstram que o filer calcário não sofre efeito de aglomeração dos seus grãos, permanecendo disperso, o que leva a menores resultados de viscosidade e tensão de

escoamento. Estes efeitos podem, respectivamente, diminuir a coesão, aumentando o risco de segregação, e aumentar a fluidez, favorecendo a capacidade de preenchimento da mistura. Nos concretos com teores de aditivo menores que 0,2% (enquadrados na Zona 3 de coesão), estes teores foram menores do que 0,1% nas pastas; quando obtidos resultados maiores do que 0,6% nos concretos, as pastas correspondentes tiveram teores superiores a 0,2%.

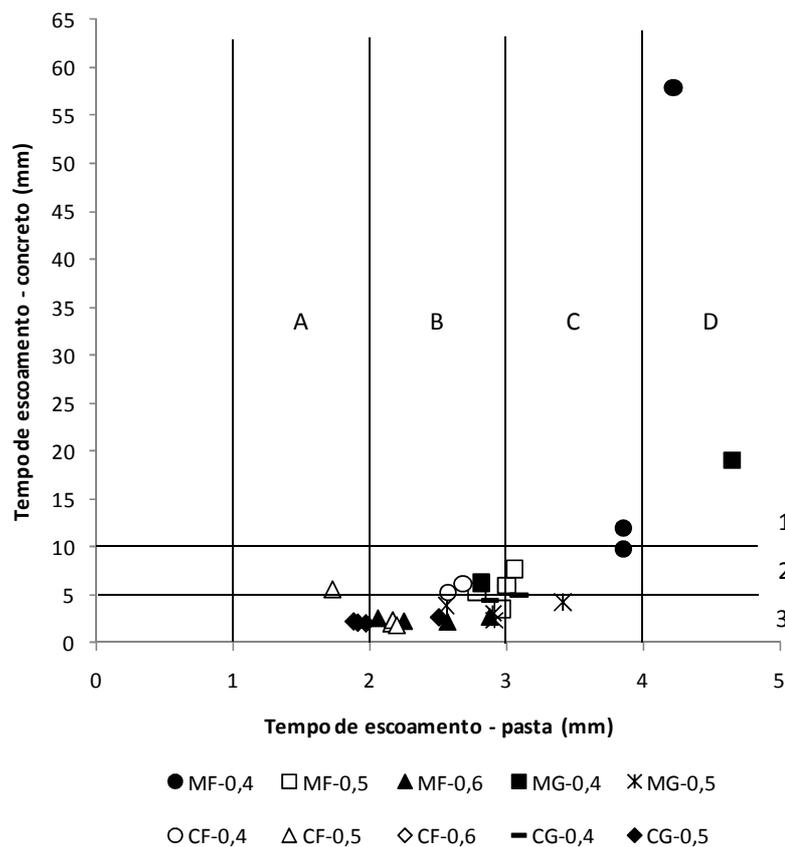


Figura 60 – Tempo de escoamento nos concretos e nas pastas

Para os resultados de tempo de escoamento, dividindo-se os valores obtidos nas pastas de acordo com as delimitações apresentadas na Figura 60, tem-se as seguintes regiões de análise: A – de 1 a 2 s, B – de 2 a 3 s, C – de 3 a 4 s, D – de 4 a 5 s. Estes resultados foram confrontados com as características dos concretos nas zonas de coesão definidas anteriormente (Figura 46), obtendo-se a Tabela 34.

A partir dos dados resumidos na Figura 60 e na Tabela 34, destacam-se os seguintes pontos:

- Apenas duas misturas (20%-MF-0,4 e 20%-MG-0,4) apresentaram tempos de escoamento maiores do que 4 s nas pastas, sendo também as de maiores resultados nos concretos (Zona D – 1);

- A superfície específica das adições interfere diretamente na coesão das misturas, podendo-se observar que materiais mais finos resultaram em pastas e concretos mais coesos (Zona 2). No entanto, esta tendência foi afetada pela relação água/finos, de modo que, empregando-se a adição MG com água/finos de 0,4 (citada no ponto anterior) foi atingido um tempo elevado de escoamento; ao contrário, adições mais finas resultaram em misturas com pequena coesão quando empregadas relações água/finos de 0,5 e 0,6 (Zona B – 3).

Tabela 34 – Características das misturas em função do tempo de escoamento

Região do gráfico	Características das misturas
A – 1	Não houve misturas nesta faixa
B – 1	Não houve misturas nesta faixa
C – 1	Misturas com metacaulim MF
D – 1	Misturas com metacaulim no teor de 20% e água/finos de 0,4
A – 2	Apenas a mistura 5%-CF-0,5
B – 2	Predominância das adições finas (MF e CF)
C – 2	Misturas com metacaulim MF
D – 2	Não houve misturas nesta faixa
A – 3	Predominância do calcário, especialmente na combinação CG-0,5
B – 3	Todas as misturas com: MF-0,6, MG-0,5, CF-0,5
C – 3	Predominância das adições grossas (MG e CG)
D – 3	Não houve misturas nesta faixa

Repetindo-se a análise anterior, a Tabela 35 apresenta um panorama dos resultados de espalhamento nas pastas e nos concretos, em função das zonas distribuídas de acordo com a Figura 61.

Tabela 35 – Características das misturas em função do espalhamento

Região do gráfico	Características das misturas
A – I	Não houve misturas nesta faixa
A – II	Apenas a mistura 15%-MG-0,5
A – III	Predominância de metacaulim
A – IV	Predominância de metacaulim
B – I	Não houve misturas nesta faixa
B – II	Apenas a mistura 10%-CF-0,5
B – III	Não se observou um ponto em comum nas misturas
B – IV	Predominância das adições finas (MF e CF)
C – I	Apenas a mistura 20%-MF-0,5
C – II	Não houve misturas nesta faixa
C – III	Misturas 20%-MF-0,4 e 5%-CG-0,4
C – IV	Misturas com calcário no teor de 5%

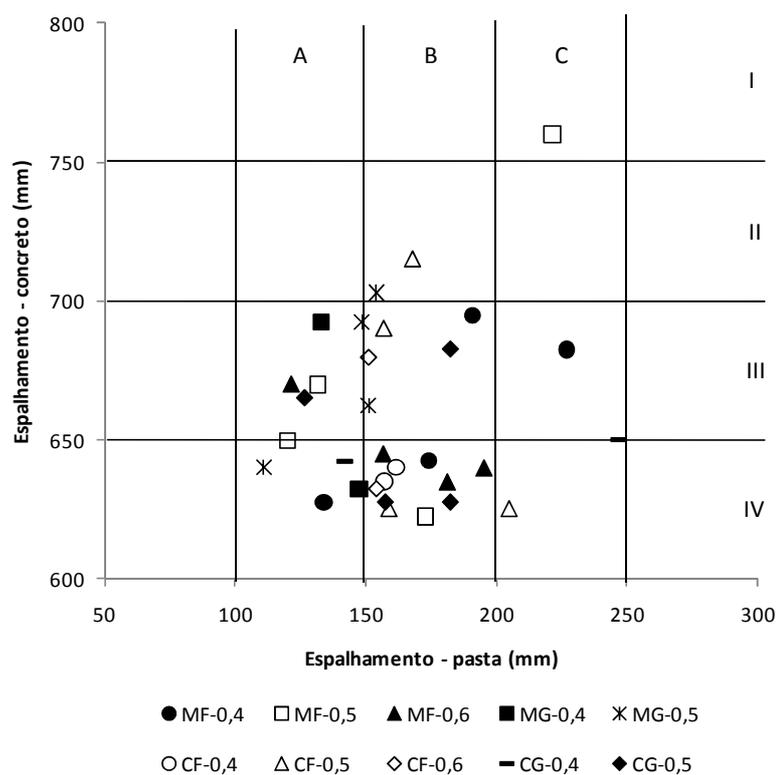


Figura 61 – Espalhamento nos concretos e nas pastas

Sabe-se que nos concretos o espalhamento foi fixado para ajuste do teor de aditivo, de modo que não se esperam correlações em função desta propriedade. Por outro lado, as propriedades das pastas foram medidas no ponto de saturação do aditivo, de modo que pode haver alguma

interferência das adições minerais, como visto para o tempo de escoamento. Esta fraca definição no comportamento de espalhamento das misturas já havia sido observada no item 4.2.1. Alguns pontos podem ser destacados: nas pastas com menores resultados de espalhamento houve predominância do uso do metacaulim, enquanto que na faixa intermediária observaram-se mais misturas com as adições finas (MF e CF).

Analisando-se, agora, a correlação pasta x concreto em função das propriedades reológicas das misturas, as seguintes observações no concreto estão de acordo com os resultados obtidos nas pastas:

- Não houve uma boa relação entre o espalhamento dos concretos e a tensão de escoamento das pastas, nem entre o tempo de escoamento dos concretos e a viscosidade das pastas;
- Os resultados de tempo de escoamento dos concretos apresentaram uma tendência de aumento, com o aumento da tensão de escoamento das pastas, sendo este efeito mais expressivo quando empregado o metacaulim fino nas relações água/finos de 0,4 e 0,5 (Figura 62);
- Os teores de aditivo dos concretos aumentaram quanto maiores os valores de tensão de escoamento das pastas, comportamento observado para todas as misturas (Figura 63).

Verifica-se das Figuras 62 e 63 que, para os concretos com menos de 0,2% de aditivo (Zona 3), os valores de tensão de escoamento medidos nas pastas ficaram abaixo de 15 Pa. Por outro lado, os concretos da Zona 1, ou seja, aqueles com mais de 0,6% de aditivo, apresentaram tensões de escoamento na pasta acima de 40 Pa. Estes valores podem ser utilizados como indicativos para a dosagem do CAA a partir dos parâmetros medidos nas pastas.

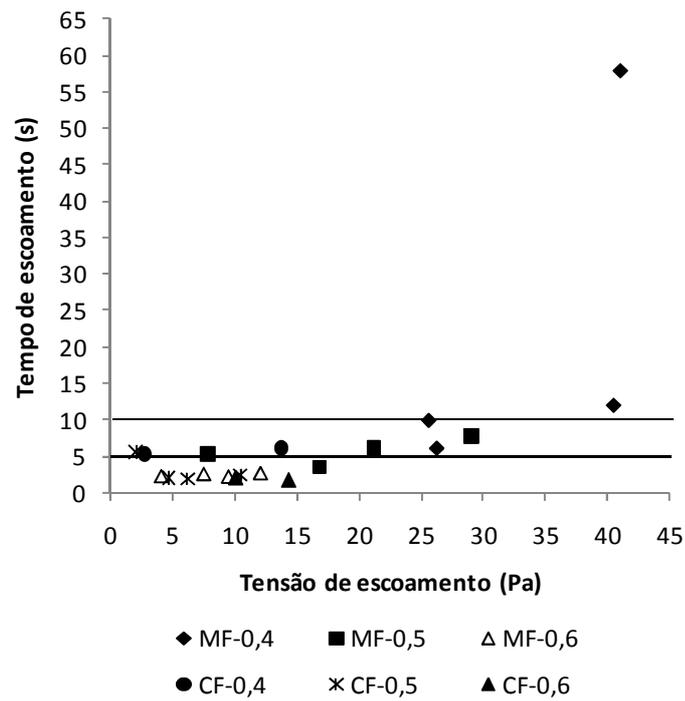


Figura 62 – Tempo de escoamento dos concretos *versus* tensão de escoamento das pastas para cada adição

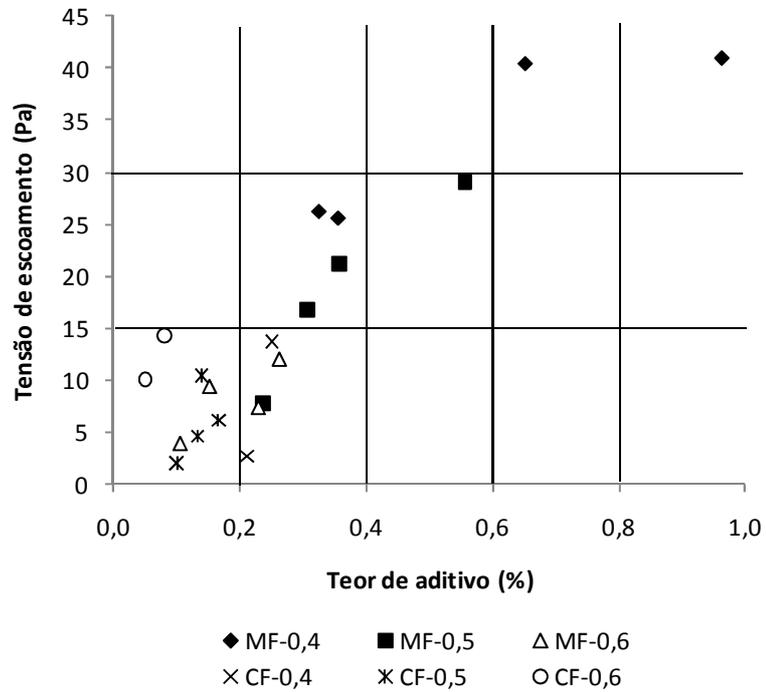


Figura 63 – Tensão de escoamento das pastas *versus* teor de aditivo dos concretos para cada adição

4.3.3 Propriedades do estado endurecido

Quanto ao comportamento do concreto no estado endurecido, nas Tabelas 36 a 39 tem-se os resultados de resistência à compressão obtidos aos 28 e 90 dias, para cada tipo de adição mineral. Os resultados correspondem à média obtida em três corpos-de-prova, sendo ensaiados quatro por idade e excluído o resultado de menor valor.

Tabela 36 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o MF

Mistura		fc 28 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)	fc 90 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	52,82	1,80	53,66	4,65
	10	55,74	6,46	66,13	4,99
	15	60,73	1,19	67,80	7,44
	20	59,27	7,44	59,94	2,72
0,5	5	44,09	2,95	49,91	14,14
	10	49,29	3,35	56,15	9,69
	15	49,29	4,56	51,78	7,33
	20	45,75	11,02	55,11	4,00
0,6	5	32,03	2,98	36,81	1,69
	10	33,07	13,61	43,26	1,67
	15	32,65	2,92	41,59	10,54
	20	34,44	2,38	39,31	6,73

Tabela 37 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o MG

Mistura		fc 28 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)	fc 90 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	52,20	3,84	59,48	4,24
	20	63,22	4,11	63,33	6,27
0,5	5	41,39	4,85	43,67	6,23
	10	37,85	3,81	45,55	1,37
	15	42,84	4,68	49,50	3,85
	20	49,08	5,29	55,94	1,70

Tabela 38 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o CF

Mistura		fc 28 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)	fc 90 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	49,29	10,36	59,06	8,54
	20	48,46	5,20	55,11	5,10
0,5	5	37,02	3,89	39,72	8,65
	10	35,35	2,70	39,93	5,41
	15	32,65	4,41	35,15	5,71
	20	29,74	4,84	34,11	8,64
0,6	5	27,45	3,94	32,65	3,98
	20	24,12	2,99	30,57	2,04

Tabela 39 – Ensaio do concreto no estado endurecido para o CG

Mistura		fc 28 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)	fc 90 dias (MPa)	Coeficiente de variação (%)
a/finos	Teor de adição (%)				
0,4	5	53,45	0,67	50,74	3,95
	20	44,92	2,78	46,17	5,89
0,5	5	27,66	2,60	44,51	0,81
	10	26,83	2,33	40,97	2,33
	15	27,45	3,94	39,72	5,05
	20	32,07	2,37	33,69	3,21

Nas Figuras 64 e 65 é possível visualizar o comportamento dos concretos à compressão com o uso do metacaulim MF aos 28 e 90 dias, respectivamente; bem como os resultados obtidos com a relação água/finos de 0,5, nas Figuras 66 e 67.

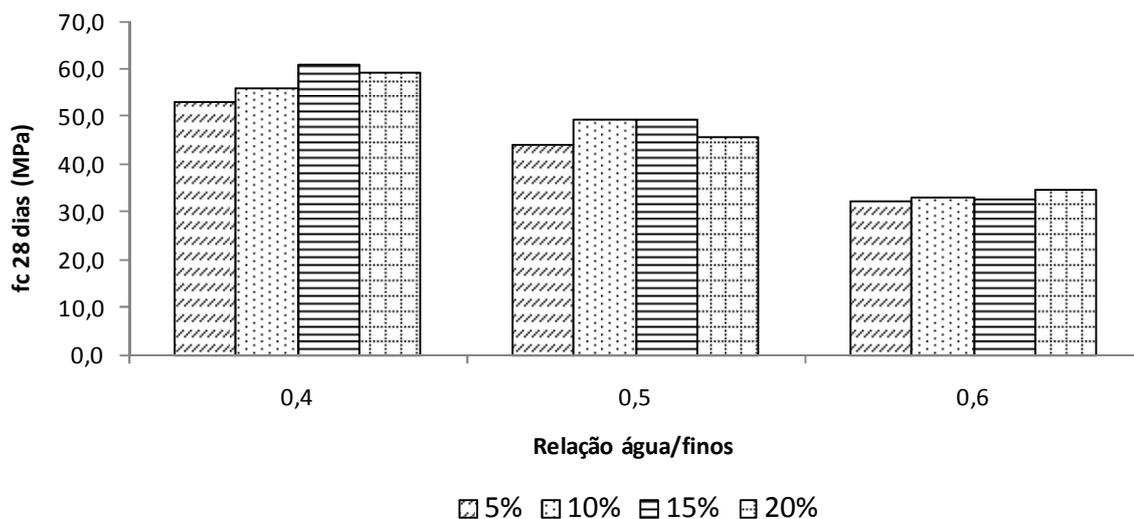


Figura 64 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com MF

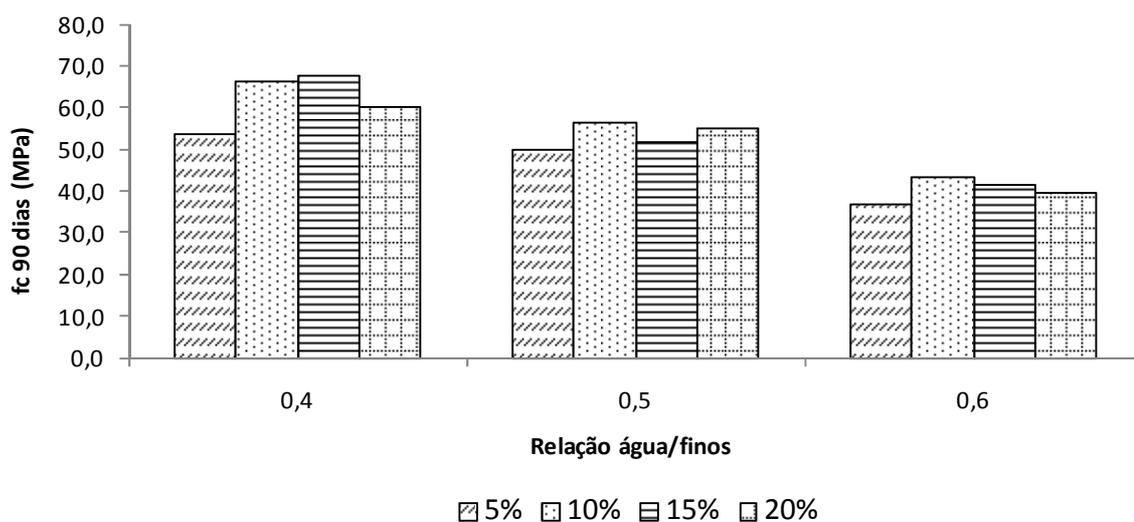


Figura 65 – Resistência à compressão aos 90 dias para concretos com MF

Como esperado, a resistência à compressão diminui com o aumento da relação água/finos. Com relação à quantidade de metacaulim, pode-se destacar que quando a relação água/finos foi de 0,4, os maiores resultados foram obtidos quando empregado 15% de metacaulim; enquanto que com as relações água/finos de 0,5 e 0,6 as maiores resistências foram obtidas com 10% de incorporação. Isto corrobora com o fato de que há um limite de pozolana que pode ser utilizado no concreto a fim de que não ocorram prejuízos quanto à resistência à compressão.

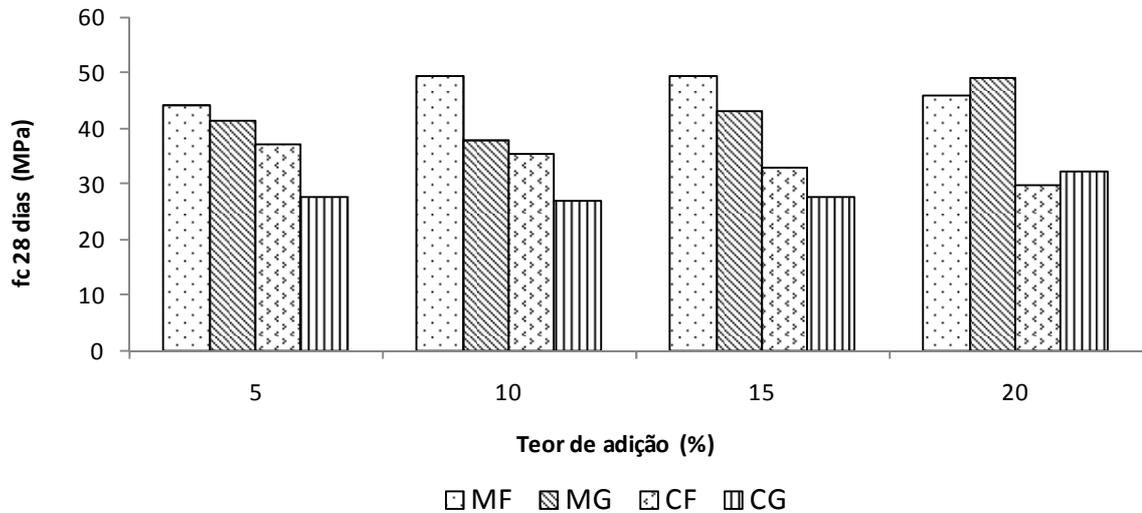


Figura 66 – Resistência à compressão aos 28 dias *versus* teor de adição para água/finos 0,5

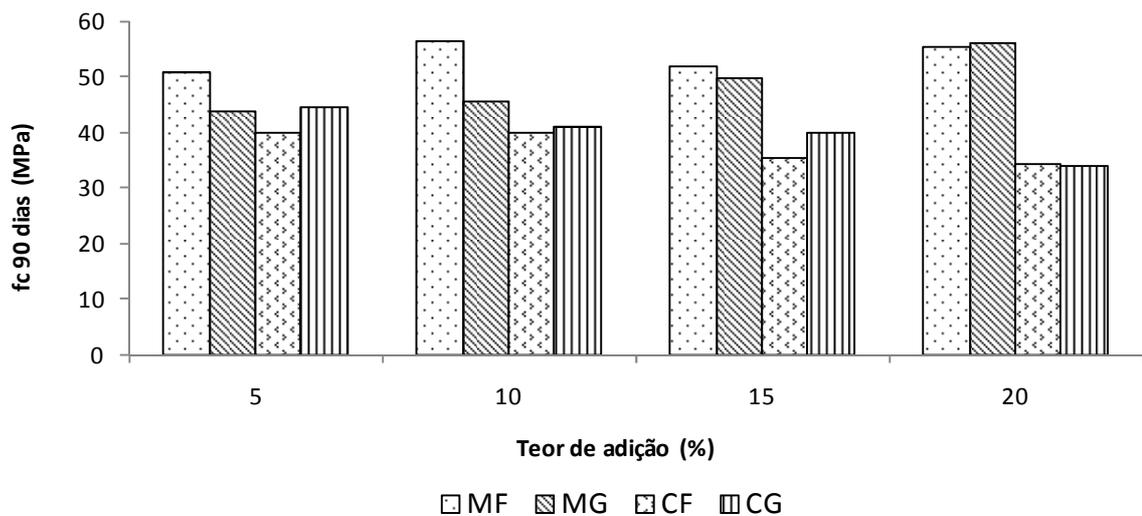


Figura 67 – Resistência à compressão aos 90 dias *versus* teor de adição para água/finos 0,5

Mantendo-se fixa a relação água/finos em 0,5, de modo geral se verifica que:

- Os concretos com metacaulim apresentaram maiores valores de resistência à compressão do que aqueles com filer calcário, sendo esta diferença mais evidente nos teores de 15% e 20%;
- Aos 28 dias os piores resultados foram obtidos com calcário grosso; já aos 90 dias os piores resultados foram com o calcário fino;

- Aos 28 dias a resistência à compressão diminuiu com a redução da superfície específica da adição, nos teores de 5% a 10%;
- Com 20% de adição houve pequena diferença entre os resultados dos dois tipos de metacaulim, bem como dos dois tipos de calcário.

Apesar desta variação em função do tipo de adição, esta influência não é significativa quando avaliada por meio de análise de variância, como demonstrado nas Tabelas 40 e 41.

Tabela 40 - Influência das adições na resistência à compressão aos 28 dias - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F $_{\alpha}$	Influência
Tipo de adição	453,7965	1	453,7965	3,807343	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Superfície específica da adição	0,375156	1	0,375156	0,003148	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Teor de adição	13,30426	1	13,30426	0,111622	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	6,721056	1	6,721056	0,05639	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	13,30426	1	13,30426	0,111622	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Inter-relação tipo x teor	95,30641	1	95,30641	0,799619	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	2,730756	1	2,730756	0,022911	F $_{0,05}(1,8) = 5.32$	NÃO
Resíduo	953,5184	8	119,1898			
Total	1539,057	15				

Tabela 41 – Influência das adições na resistência à compressão aos 90 dias - ANOVA

Variável	SQ	GDL	MQ	F	F α	Influência
Tipo de adição	387,6961	1	387,6961	4,608495074	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Superfície específica da adição	6,1504	1	6,1504	0,073109036	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Teor de adição	0,207025	1	0,207025	0,00246088	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica	15,72122	1	15,72122	0,186876236	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Inter-relação teor x superfície específica	0,0081	1	0,0081	9,62837E-05	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Inter-relação tipo x teor	167,1849	1	167,1849	1,987306006	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Inter-relação tipo x superfície específica x teor	7,980625	1	7,980625	0,094864692	F _{0,05} (1,8) = 5.32	NÃO
Resíduo	673,0112	8	84,1264			
Total	1257,96	15				

4.3.4 Consumos dos materiais

Os consumos de agregados foram os mesmos para todas as misturas, havendo apenas variação nos finos devido às variações de relação água/finos e massa específica das adições.

Os consumos de agregados foram:

- Areia = 721,23 kg/m³
- Brita 9,5 mm = 354,25 kg/m³
- Brita 19 mm = 506,26 kg/m³

Nas Tabelas 42 e 43, tem-se os consumos dos materiais das pastas nas misturas produzidas com metacaulim e filer calcário, respectivamente. A pequena variação decorrente do tipo de adição se deve à diferença na massa específica destes materiais.

Tabela 42 – Consumos dos materiais nas misturas com metacaulim

Mistura		Cimento (kg/m ³)	Adição (kg/m ³)	Água (l/m ³)	a/c (massa)	a/c (volume)
a/finos	Teor de adição (%)					
0,4	5	524,140	27,586	220,690	0,42	1,31
	10	494,199	54,911	219,644	0,44	1,38
	15	464,541	81,978	218,607	0,47	1,46
	20	435,161	108,790	217,581	0,50	1,56
0,5	5	460,607	24,242	242,425	0,53	1,64
	10	434,546	48,283	241,414	0,56	1,73
	15	408,700	72,124	240,412	0,59	1,83
	20	383,069	95,767	239,418	0,63	1,94
0,6	5	410,812	21,622	259,460	0,63	1,96
	10	387,742	43,082	258,495	0,67	2,07
	15	364,844	64,384	257,537	0,71	2,20
	20	342,114	85,529	256,586	0,75	2,33

Tabela 43 – Consumos dos materiais nas misturas com filer calcário

Mistura		Cimento (kg/m ³)	Adição (kg/m ³)	Água (l/m ³)	a/c (massa)	a/c (volume)
a/finos	Teor de adição (%)					
0,4	5	525,625	27,664	221,316	0,42	1,31
	10	496,994	55,222	220,886	0,44	1,38
	15	468,475	82,672	220,459	0,47	1,46
	20	440,065	110,016	220,033	0,50	1,56
0,5	5	461,754	24,303	243,028	0,53	1,64
	10	436,706	48,523	242,614	0,56	1,73
	15	411,742	72,660	242,201	0,59	1,83
	20	386,864	96,716	241,790	0,63	1,94
0,6	5	411,724	21,670	260,036	0,63	1,96
	10	389,461	43,273	259,641	0,67	2,07
	15	367,266	64,812	259,247	0,71	2,20
	20	345,138	86,285	258,854	0,75	2,33

A partir dos consumos apresentados, os seguintes parâmetros de dosagem, em volume, foram obtidos para os concretos produzidos, alguns dos quais já haviam sido previstos no momento da escolha da composição granulométrica ideal dos agregados, conforme mostrado no Estudo Piloto (Tabela A.10, no Apêndice B):

- (agregado miúdo)/(argamassa) = 0,41;

- (agregado graúdo)/(concreto) = 0,32;
- (agregado miúdo)/(concreto) = 0,28;
- (agregado graúdo)/(total de agregados) = 0,54;
- (agregado miúdo)/(agregado graúdo) = 0,85.

Estes valores se enquadram dentro das recomendações previstas na literatura para o CAA, apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura (Adaptado de MELO, 2005)

	Cimento	Finos	água/finos	Água	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Okamura (1997)	-		0,9 – 1,00 (em volume)	-	50% do volume de sólidos	40% do volume de argamassa
Coppola (2001)	-		0,85 – 1,20 (em volume)	-	< 340 (l/m ³)	-
EFNARC (2002)	350 – 450 (kg)		0,80 – 1,10 (em volume)	< 200 (l/m ³)	28 – 35% do volume de concreto	-
Gomes (2002)	200 – 400 (kg)		0,25 – 0,40 (em massa)	150 – 180 (kg/m ³)	30 – 35% do volume de concreto ou 750 – 920 (kg/m ³)	40 – 50% do volume de argamassa ou 710 – 900 (kg/m ³)
EPG (2005)	-	380 – 600 (kg/m ³)	0,85 – 1,10 (em volume)	150 – 210 (l/m ³)	750 – 1000 (kg/m ³) ou 270 – 360 (l/m ³)	48 – 55% da massa total de agregados

Observa-se que os consumos de cimento obtidos foram elevados (acima de 450 kg/m³) para algumas misturas (5%-0,4, 10%-0,4, 15%-0,4 e 5%-0,5, utilizando-se todas as adições), porém o total de finos (cimento + adição) permaneceu dentro dos limites mostrados no quadro. Quanto à dosagem de água, destacam-se valores elevados de consumo (acima de 210 l/m³) e de relação água/cimento obtidos, o que é decorrente da pré-fixação das relações água/finos, chegando-se ao valor de 0,6.

Com os dados dos consumos foi determinado o teor de argamassa (α) dos concretos, que é um parâmetro adotado no método do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992) para a dosagem de concretos convencionais, e indica a relação entre os materiais secos componentes da argamassa e do concreto. Assim, obteve-se um valor de α médio de 58,5% com pequenas variações em função da relação água/finos.

4.4 Conclusões

A partir dos resultados apresentados, apresenta-se abaixo um resumo das conclusões obtidas.

- Apenas o calcário fino possui partículas de dimensão menor que as do cimento;
- Pela análise de imagens verifica-se forte aglomeração dos grãos de metacaulim, especialmente o MF, seguida do calcário fino com uma menor intensidade de aglomeração, até o calcário grosso que apresenta elevada dispersão; este efeito é observado também nas imagens das composições entre as adições;
- As massas unitárias das composições com calcário grosso sofreram aumento em função do teor de adição, efeito contrário ocorrido com o emprego do metacaulim;
- O potencial zeta é influenciado pelo teor de adições minerais, destacando-se maior interferência do calcário CG;
- Nas misturas com metacaulim verificou-se uma tendência de redução da compacidade quanto maior a quantidade de material, efeito contrário ao ocorrido nas misturas com filer calcário;
- Observou-se um comportamento diferenciado em função do tipo de adição para as propriedades relacionadas com a coesão nas pastas e nos concretos (teor de aditivo, tempo de escoamento, tensão de escoamento e viscosidade), demonstrando o efeito do estado de aglomeração ou dispersão das partículas;
- Nas pastas produzidas com relação água/finos 0,6, não foi possível determinar o ponto de saturação do superplastificante, com exceção daquelas em que se empregou o metacaulim de maior superfície específica;
- Aumentando-se o teor e a superfície específica das adições foi necessária maior quantidade de aditivo nas misturas, especialmente quando empregado o metacaulim;
- Os tempos de escoamento no Cone de Marsh (pastas) e no Funil-V (concretos) foram maiores quando observados: maior teor de adição, menor quantidade de água e maior teor de aditivo (nas pastas e nos concretos); este último ponto indica que as adições atuaram efetivamente na manutenção da coesão das misturas, mesmo empregando-se mais aditivo;
- A viscosidade e, principalmente, a tensão de escoamento das pastas aumentaram em função de maiores teores de adição;
- Foram encontradas boas relações entre a tensão de escoamento das pastas e os tempos de escoamento medidos nas pastas e nos concretos;

- Para os resultados de viscosidade das pastas e de espalhamento (das pastas e dos concretos) não foram encontrados boas correlações com as demais grandezas;
- Foram estabelecidas zonas de coesão dos concretos em função dos resultados em pasta, do tempo de escoamento no Funil-V e da análise visual das misturas antes e após a incorporação do superplastificante, das quais se verificou as seguintes características, de acordo com as zonas definidas:

Zona 1:

- relação água/finos = 0,4
- teor de aditivo na pasta > 0,4%
- tempo de escoamento na pasta > 4 s
- tensão de escoamento na pasta > 40 Pa
- teor de aditivo no concreto > 0,6%
- tempo de escoamento no concreto > 10 s
- tipo de adição: metacaulim (mais fina predominante)
- teor de adição = 20%

Zona 2:

- relação água/finos = 0,4 e 0,5
- espalhamento no concreto < 650 mm
- tipo de adição: mais fina predominante

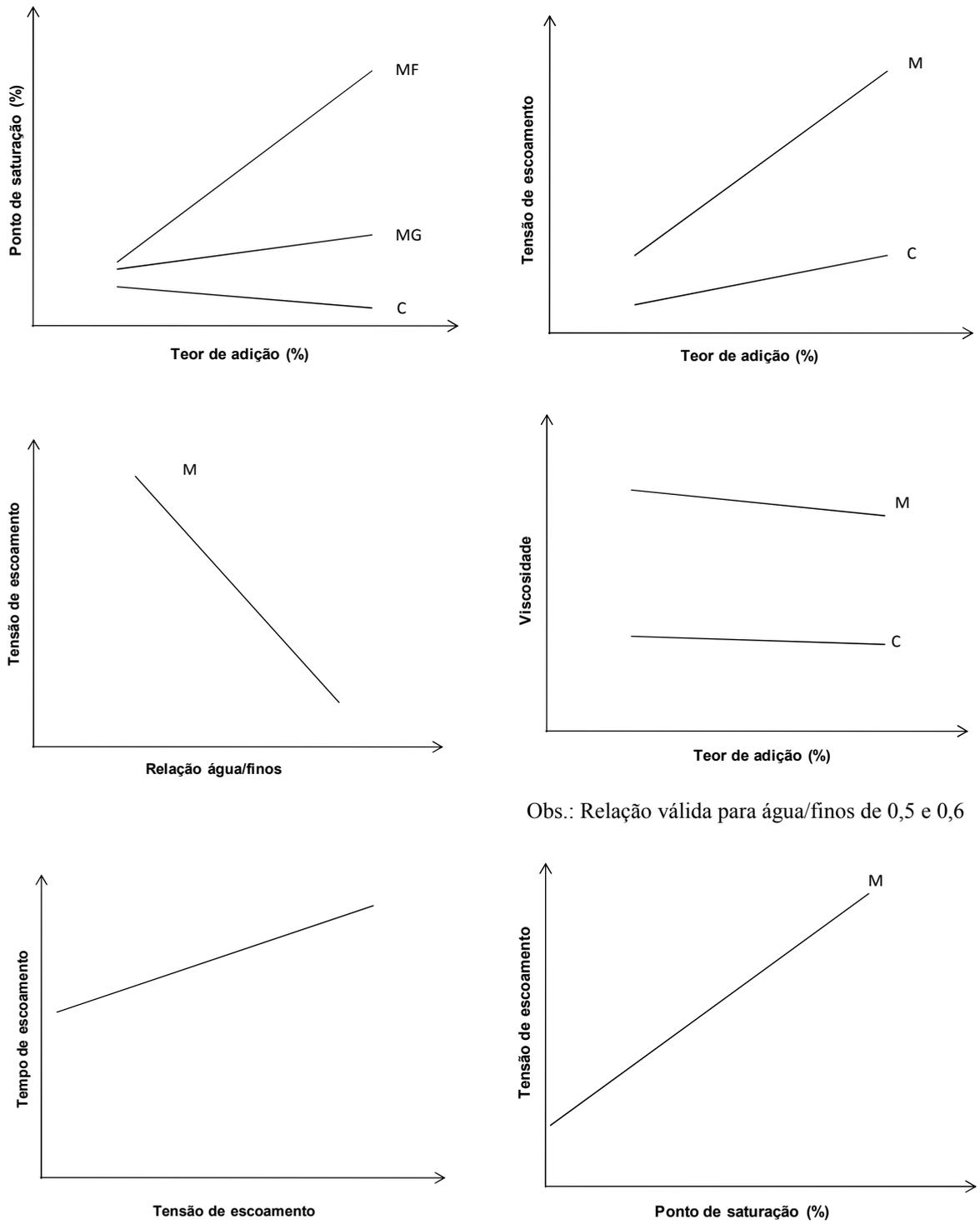
Zona 3:

- relação água/finos = 0,5 e 0,6 (todos os concretos com este valor)
- teor de aditivo na pasta < 0,1%
- tensão de escoamento na pasta < 15 Pa
- teor de aditivo no concreto < 0,2%
- O efeito da superfície específica nas propriedades das misturas foi expressivo apenas para o metacaulim;
- Observou-se uma forte interferência entre a combinação superfície específica da adição e relação água/finos da mistura na coesão dos concretos;
- Foi identificado um limite de incorporação das adições minerais, em função da perda de resistência à compressão, o qual pode ser alterado em decorrência da relação água/finos;
- Ao se utilizar o teor de 20% de adição, não foram observadas variações na resistência à compressão em decorrência da superfície específica da adição mineral;

- Os melhores resultados nos estados fresco e endurecido foram obtidos para os concretos produzidos com metacaulim MF;
- Foram obtidos parâmetros de dosagem que podem ser relacionados com os valores usuais para o CAA;
- A partir da análise de variância verificou-se que: o tipo de adição exerce influência significativa na compactidade e massa unitária das composições entre os finos, na tensão de escoamento e na viscosidade, no tempo de escoamento das pastas e no teor de aditivo de pastas e concretos; a superfície específica da adição influencia a compactidade e massa unitária dos finos, o teor de aditivo das pastas e concretos e o tempo de escoamento dos concretos; e o teor de adição atua na massa unitária dos finos, no tempo de escoamento das pastas e no teor de aditivo das pastas e dos concretos. A maior parte destas relações estão de acordo com as análises qualitativas dos resultados.

4.5 Curvas de tendência

A partir da análise dos resultados foi possível observar tendências de variação dos dados em função de propriedades das adições ou das próprias misturas. Assim, com base nos gráficos apresentados nas seções anteriores, foram obtidas as Figuras 68 e 69, as quais não representam uma correlação estatística, mas a tendência geral dos resultados verificados no presente trabalho.



Obs.: Relação válida para água/finos de 0,5 e 0,6

Figura 68 – Curvas de tendência para as relações das pastas

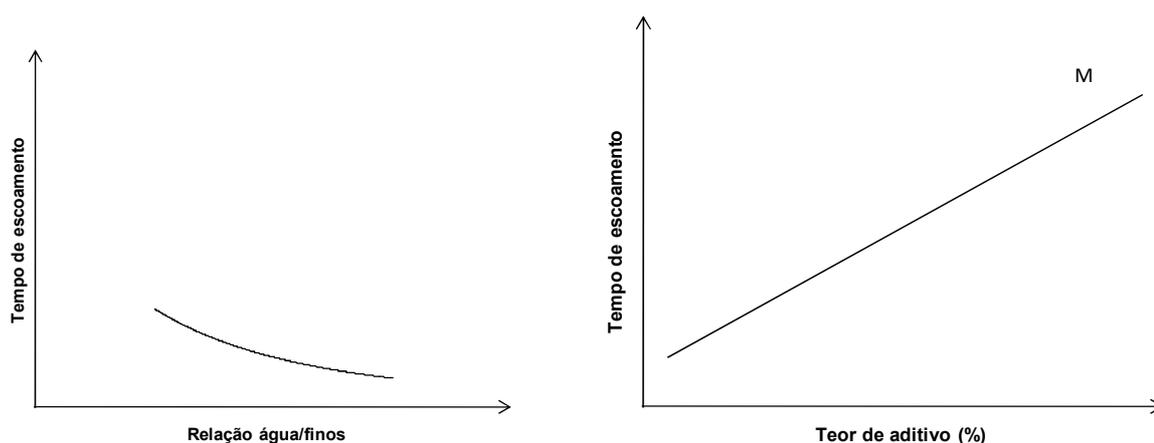


Figura 69 – Curvas de tendência para as relações dos concretos

As curvas visualizadas nas Figuras 68 e 69 evidenciam as tendências obtidas no presente trabalho para as pastas e para os concretos, respectivamente. Estas curvas se apresentam como indicação de comportamento para a dosagem do CAA conforme as propriedades desejadas para as misturas.

4.6 Proposições para a dosagem do CAA

Levando-se em consideração todos os aspectos analisados, as seguintes proposições são feitas com o intuito de possibilitar a otimização da dosagem do CAA, sob o ponto de vista das adições minerais.

Como ponto de partida, destaca-se que as melhores misturas, em termos de comportamento do concreto à coesão, são aquelas classificadas no presente trabalho como pertencentes às Zonas 1 e 2 (cujos valores de tempo de escoamento estiveram acima de 5 s). Estes concretos apresentaram-se bastante coesos, mas foram também capazes de fluir com facilidade, mantendo a auto-compactabilidade e resistência à segregação requeridas.

4.6.1 Características das pastas

Propõe-se que, a partir da fase de pasta, podem ser obtidos os primeiros indicativos para a dosagem do CAA. Assim, para a pasta, indicam-se como parâmetros de dosagem:

- Teor de aditivo superior a 0,1% (considerando-se o teor de sólidos);
- Tempo de escoamento superior a 2 s;
- Espalhamento de 100 a 200 mm;
- Tensão de escoamento acima de 15 Pa.

4.6.2 Características dos concretos

Nos concretos, os seguintes parâmetros são indicados com a finalidade de se obterem misturas com melhor comportamento nos estados fresco e endurecido:

- Teor de aditivo superior a 0,2% (considerando-se o teor de sólidos);
- Tempo de escoamento superior a 5 s;
- Espalhamento entre 600 e 650 mm.

4.6.3 Características das adições

Quanto às adições, verificou-se que o efeito da superfície específica está diretamente ligado ao tipo de adição e à relação água/finos da mistura. Assim, para se definir qual a de adição mais recomendada para a produção de CAA, é preciso avaliar que tipo de material está sendo utilizado, bem como suas características físicas (granulometria, superfície específica, forma) e químicas (reatividade, carga da partícula). Estas características irão interferir diretamente no grau de empacotamento, governando o estado de aglomeração ou de dispersão, os quais possuem estreita relação com as características de fluidez e, principalmente, de coesão do concreto.

Indica-se ainda que um melhor desempenho das adições pode ser conseguido a partir de uma composição granulométrica que proporcione um elevado grau de empacotamento, reduzindo assim a porosidade da mistura e o volume de pasta necessário para preenchimento dos vazios entre os grãos dos agregados.

4.7 Procedimento para a otimização do uso das adições

Na Figura 70 está um fluxograma referente ao procedimento para a otimização do uso das adições minerais para a produção do CAA.

A seguir tem-se a descrição do procedimento:

- 1) Verificação do grau de aglomeração das partículas: esta investigação pode ser feita por meio de uma lupa, simplificando a análise e servindo como um indicativo inicial do comportamento da adição, tendo em vista a definição do grau de aglomeração ou dispersão das partículas, que está diretamente ligada à coesão da mistura;
- 2) Definição da relação água/finos e do teor de adição: estes parâmetros atuam de forma conjunta nas propriedades da mistura e podem ser ajustados através de um método racional, podendo-se adotar, por exemplo, o Método Repette-Melo (MELO, 2005) citado no item 2.2.3;
- 3) Realização de ensaios em pasta: realização de ensaios como o tempo de escoamento para seleção das misturas com melhor comportamento em termos de coesão e fluidez, adotando-se os parâmetros definidos no item 4.6.1;
- 4) Definição de composição granulométrica dos agregados: utilização de um método racional para composição otimizada de agregados, propondo-se o método apresentado no item 3.2.3, tendo em vista a redução do consumo de pasta;
- 5) Produção do CAA: realização dos ensaios para ajuste do teor de aditivo em função da maior quantidade e dimensão das partículas, seguindo-se os parâmetros do item 4.6.2.

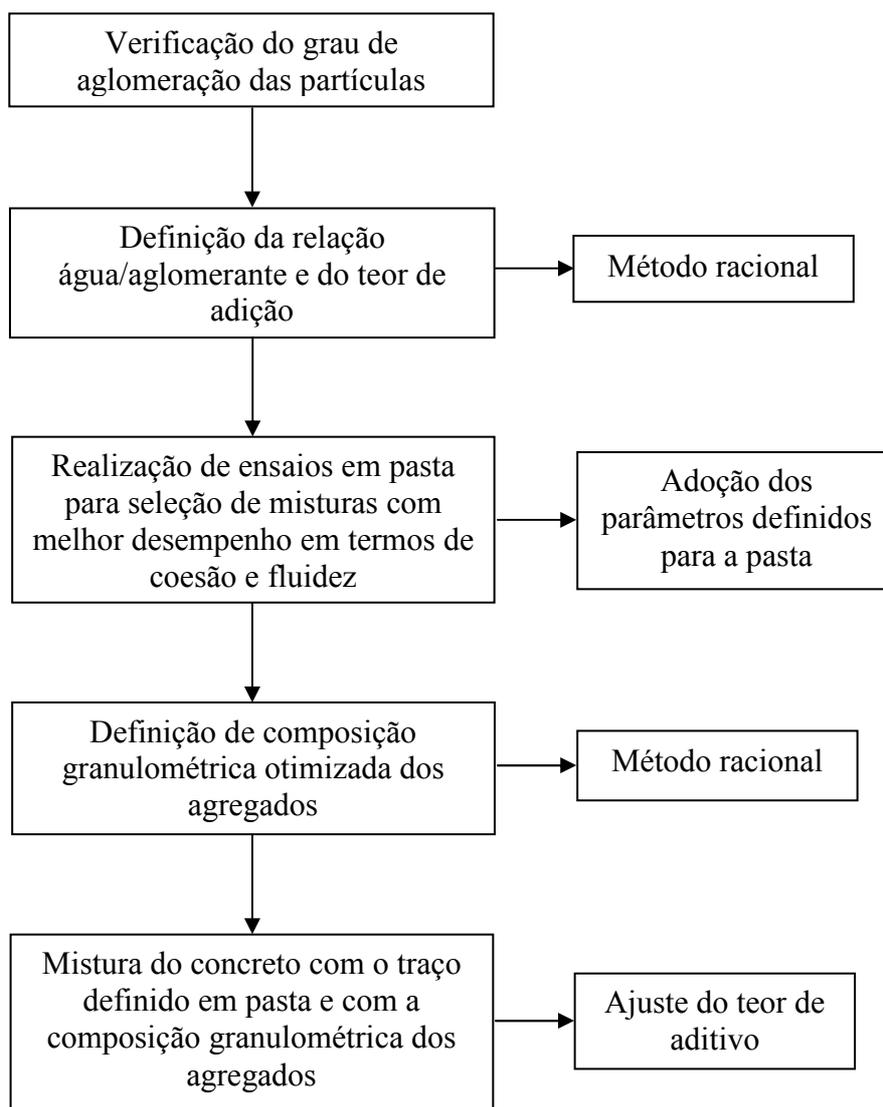


Figura 70 – Fluxograma do procedimento para otimização do uso das adições minerais

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

No presente trabalho foram investigadas as características de duas adições minerais – o filer calcário e o metacaulim, verificando-se a interferência de suas propriedades físicas e químicas na produção do CAA. Para isto, foram realizados ensaios em pasta com análise do teor de aditivo e da reologia das misturas, para então produzir-se concretos que tivessem maior potencial para adequar-se às propriedades requeridas no estado fresco.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a otimização em separado das fases de pasta, argamassa e concreto, para a produção de CAA é de fundamental importância para que os parâmetros possam ser ajustados na fase em que é mais atuante, além de que na pasta e na argamassa já é possível prever alguns comportamentos do concreto. No estudo desenvolvido observou-se que as relações entre as propriedades do concreto no estado fresco foram identificadas já na pasta, no que diz respeito, por exemplo, ao efeito do tipo, teor e superfície específica das adições no tempo de escoamento dos concretos no Funil-V e, conseqüentemente, no consumo de aditivo superplastificante. Além disso, as propriedades reológicas das pastas, especialmente a tensão de escoamento, tiveram boa relação com as demais propriedades do estado fresco, quanto ao tempo de escoamento e o consumo de aditivo. Isto evidencia a confiabilidade de se estudar a fase de pasta para a otimização da dosagem do concreto.

A análise das propriedades físicas das adições, a nível micro e macroscópico (granulometria, análise de imagem – forma, massa unitária), bem como das suas características químicas (potencial zeta, reatividade) levaram à obtenção de indicadores quanto ao grau de aglomeração ou de dispersão das partículas, os quais condizem com o comportamento das misturas empregando estas adições. Os resultados obtidos demonstram que a interferência da aglomeração é predominante em relação a aspectos como a superfície específica das adições, uma vez que o comportamento foi diferenciado em função do tipo de material.

O metacaulim é uma adição mineral pozolânica que interfere diretamente nas propriedades das misturas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Diferenças foram observadas em decorrência da variação da sua superfície específica e da quantidade

empregada. As misturas com filer calcário apresentaram desempenho inferior no que diz respeito à coesão em relação àquelas em que se utilizou o metacaulim, o que foi demonstrado pelos baixos resultados de tempo de escoamento no Funil-V e à pequena alteração desta medida nos diferentes teores de filer. Estas características estão relacionadas à intensa aglomeração das partículas de metacaulim, especialmente no de maior superfície específica, seguida de um estado menos intenso de aglomeração para o caso do calcário fino, e total dispersão no calcário grosso.

A aglomeração aumenta a viscosidade do sistema e, conseqüentemente, a coesão. Seu efeito é decorrente da composição química dos materiais e da superfície específica. Este efeito químico foi verificado por meio das medidas de potencial zeta, que diz respeito à carga assumida pelas partículas em solução, e está diretamente relacionada com a interação entre os materiais presentes em uma mistura. A atuação da superfície específica, que decorre das forças superficiais de atração, foi evidenciada nas medidas de massa unitária e compacidade, bem como na observação do comportamento das pastas e dos concretos.

Quando a relação água/finos atingiu valores da ordem de 0,6, como em algumas das misturas produzidas no presente trabalho, houve dificuldade na determinação do ponto de saturação do aditivo nas pastas, bem como houve uma tendência de redução da viscosidade, o que pode comprometer a coesão das misturas. Além destes fatores, deve-se levar em consideração a redução da resistência à compressão que decorre de elevadas relações água/cimento, além de futuros problemas de durabilidade em um elemento executado com este tipo de material.

Destaca-se a excelente coesão das misturas como um todo, conseguida em função da composição granulométrica dos agregados e do emprego das adições minerais, sendo mais evidente o efeito do metacaulim de maior superfície específica, especialmente com menores valores de relação água/finos.

Os resultados citados acima com relação à coesão evidenciam que, quanto às propriedades do estado fresco, o teor ideal de adição mineral que deve ser empregado está diretamente relacionado com a quantidade de água na mistura. Deste modo, misturas com menor tendência à segregação (mais coesas) podem ser prejudicadas quando há mais água na mistura, acontecendo também o comportamento contrário, aumento da coesão em decorrência de menores relações água/finos.

Assim, foram elaboradas proposições que têm como objetivo servir de indicativo para a produção de misturas de CAA, visando a garantia das propriedades requeridas para este

material, com base na utilização de adições minerais que atuem no aumento da coesão sem comprometer a capacidade de escoamento dos concretos.

Pelo presente trabalho propõe-se que a escolha da adição mineral a ser empregada deve contemplar aspectos diferenciados daqueles que são normalmente adotados, ou seja, devem ser verificados aspectos referentes ao estado de aglomeração ou de dispersão das partículas, que é consequência de sua natureza química e física. Desta forma, definiu-se um procedimento de ensaios para nortear a otimização do uso das adições minerais para a produção do CAA.

Esta otimização é necessária, uma vez que, em geral, as adições são empregadas no CAA para promover o aumento da coesão, que é uma propriedade crítica em concretos fluidos. Porém, este resultado é governado pelo tipo, superfície específica e teor de adição, o que mostra a necessidade de um processo racional de dosagem. Com isto, é possível explorar o potencial das adições minerais, utilizando-as da maneira correta, em função das propriedades que se deseja obter para a confecção de concretos com excelente desempenho no estado fresco.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos no tema em estudo, apresentam-se as proposições abaixo, as quais foram definidas em função das observações do presente trabalho, considerando-se, inclusive, aquilo que não foi possível de ser realizado:

Com o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento, diferentes interações ocorrem em função dos materiais presentes e da proporção entre eles, o que irá refletir no surgimento de cargas superficiais nas partículas destes componentes. Assim, sugere-se investigar o potencial zeta das composições de adição mineral em maiores intervalos de tempo, verificando-se o desenvolvimento da dissolução dos íons e formação de hidratos. Neste sentido, sugere-se ainda a incorporação do aditivo superplastificante, de modo a se verificar a interferência das características da adição na sua adsorção.

Uma vez que há possibilidade de se empregar aditivos promotores de viscosidade para garantia de coesão do CAA, outra sugestão é a verificação do comportamento das misturas quando empregado este aditivo, confrontando-se seu desempenho e viabilidade em substituição às adições minerais.

Na literatura, muitos trabalhos têm empregado as adições minerais em composições ternárias ou quaternárias em conjunto com o cimento, conforme foi discorrido no corpo deste trabalho. Esta combinação promove um efeito de sinergia entre os materiais, de modo que se explora a vantagem de cada um deles, encobrendo-se os efeitos negativos que por ventura possam ser causados. Neste sentido, um melhor desempenho das adições, especialmente com relação ao filer calcário, poderia ser obtido se fossem utilizadas composições ternárias (cimento + metacaulim + filer calcário), podendo-se atingir maiores compacidades em decorrência da melhor distribuição granulométrica dos sólidos. Este estudo exige uma nova metodologia de definição do teor de finos, contemplando os diferentes componentes.

Tendo em vista, ainda, o aumento da compacidade, outra possibilidade de emprego das adições é no preenchimento dos vazios entre os agregados, considerando-os não só como materiais finos, mas como integrantes do chamado esqueleto granular formado pelos agregados. Esta combinação pode ser bastante eficiente, especialmente quando se empregam as adições grossas, seguindo a classificação apresentada neste trabalho.

Outro fator que poderia melhorar o desempenho das misturas promovendo, inclusive, uma economia do CAA, é aliar a otimização do uso das adições a partir da escolha adequada do material, de suas características e dosagem (objeto do presente trabalho), com a determinação racional do volume mínimo de pasta para preenchimento dos vazios, tendo em vista a interação entre os diversos componentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, S. K. Pozzolanic activity of various siliceous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1735-1739, Sep. 2006.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.

ARAÚJO, E. A. Estudando Vidros por Meio de Análise térmica diferencial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, n. 3, p. 359-362, Dez. 1998.

ARAÚJO, J. L. **Considerações sobre concreto auto-adensável e uma aplicação com materiais locais**. 2003. 80 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2003.

ARAÚJO, G. S.; BICALHO, K. V.; TRISTÃO, F. A. Determinação da forma das areias através da análise de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 5., 2003, **Anais...** ANTAC.

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

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994b.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2002a.

_____. **NBR 15823-1**: Concreto auto-adensável – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15823-3**: Concreto auto-adensável – Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15823-4**: Concreto auto-adensável – Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável – Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15823-6:** Concreto auto-adensável – Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBRNM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBRNM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002b.

_____. **NBRNM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002c.

_____. **NBRNM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBRNM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BALL, D. Selecting aggregates for maximum packing density in low permeability concretes. **Concrete**. v. 32, n. 5, p. 9-10, May 1998.

BALTAR, L. M.; HADADE, M. A. S.; QUEIROZ, M. M.; CARNEIRO, A. M. P. Verificação da influência do uso de valores extremos de metacaulim nas propriedades do estado endurecido do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 43-50, Mar. 1994.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: INTERNATIONAL CEMENT CHEMISTRY CONGRESS, 11st., 2003, Durban. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 533-539.

BANFILL, P. F. G.; RODRÍGUEZ, O.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. Effect of activation conditions of a kaolinite based waste on rheology of blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 10, p. 843-848, Oct. 2009.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos caulínicos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. 2007. 396 p. Tese – Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica – Universidade Federal do Pará, Belém. 2007.

BARRAK, M.; MOURET, M. BASCOUL, A. Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 12-21, Jan. 2009.

BIGAS, J. P.; GALLIAS, J. L. Single-drop agglomeration of fine mineral admixtures for concrete and water requirement of pastes. **Powder Technology**, v. 130, n. 1-3, p. 110-115, Feb. 2003.

BOUQUETY, M. N.; DESCANTES, Y.; BARCELO L.; DE LARRARD, F.; CLAVAUD, B. Experimental study of crushed aggregate shape. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 4, p. 865-872, Apr. 2007.

BOUZOUBAÂ, N.; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volume of class F fly ash – Preliminary results. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 3, p. 413-420, Mar. 2001.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116-2136, Nov. 2005.

BUI, V. K.; MONTGOMERY, D. Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. In: RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, 2., 2001. **Proceedings...** RILEM, 2001.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y.; SHAH, S. Rheological model for self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 6, p. 549-559, Nov./Dec. 2002.

CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S.; MORATTI, M. Estudos de finos e pastas para produção de concreto auto-adensável de alta resistência. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 48., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

CALMON, J. L.; MORATTI, Mirko; SOUZA, F. L. S.; MORATTI, Markus. Estudo de finos e pastas para a produção de concreto auto-adensável de alta resistência com filler de escória de aciaria e outras adições. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

CANNON, R. W. Proportioning workable concrete mixtures with specific gravity of cement-water paste. **ACI Materials Journal**, v. 102, n. 5, p. 338-346, Sept./Oct. 2005.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F.; VALDUGA, L. Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 170 p.

Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARNEIRO, A. M. P.; BARATA, M. S.; LIMA, J. M.; QUARESMA, G. L. Otimização de misturas binárias de agregados para produção de concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 44., Belo Horizonte, 2002. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

COPPOLA, I. Rheology and mix proportioning of self-compacting concretes. **Industria Italiana del Cemento**, v. 71, n. 2, p. 152-163, Feb. 2001.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 719-730, Apr. 2005.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects on fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 264-277, Feb. 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas Experimentais para o Estudo da Microestrutura. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil** e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. v. 1, São Paulo: IBRACON, 2007.

DE LARRARD, F. **Structures granulaires et formulation des bétons**. Paris: LCPC, 2000. 414 p.

DINIZ, F. E. G. **Utilização de resíduo cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios auto-adensáveis**. 2005. Tese – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case study. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 197-208, Feb. 2006.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 1, p. 1-12, Jan. 2007.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1755-1761, Nov. 2002.

EFNARC. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Reino Unido, 2002. 32p.

EPG. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: specification, production and use. Reino Unido, 2005. 68p.

ESPING, O. Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 7, p. 938-944, July 2008.

FELEKOĞLU, B.; TÜRKEL, S.; BARADAN, B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and environment**, v. 42, n. 4, p. 1795-1802, Apr. 2007.

FELEKOĞLU, B. A new approach to the characterisation of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1154-1162, Feb. 2009.

FERREIRA, R. B.; LIMA, M. B.; PEREIRA, A. C.; SILVA, M. V. A.; ANDRADE, M. A. S. Comparativo de custo entre o concreto convencional e o concreto auto-adensável na região de Goiânia/GO. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 48., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 285 P. Tese – Programas de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

FU, G.; DEKELBAB, W. 3-D random packing of polydisperse particles and concrete aggregate grading. **Powder Technology**, v. 113, n. 1-3, p. 147-155, Jul. 2003.

GALLIAS, J. L.; KARA-ALI, R.; BIGAS, J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1543-1549, Oct. 2000.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; ÖZBAY, E. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1847-1854, May 2009.

GLEIZE, P. J. P.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G. Efeitos do metacaulim na retração autógena de pastas de cimento. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 48., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 139 p. Tese - Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya. 2002.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J. J. L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 45., Vitória, 2003. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2003.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto auto-adensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009. 165 p.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M. Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, n.9, p. 1519-1531, Nov. 2008.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2006. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HEIRMAN, G.; HENDRICKX, R.; VANDEWALLE, L.; VAN GEMERT, D.; FEYS, D.; DE SCHUTTER, G.; DESMET, B.; VANTOMME, J. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer Part II. Influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behavior. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 3, p. 171-181, Mar. 2009.

HODNE, H.; SAASEN, A. The effect of the zeta potential and slurry conductivity on the consistency of oilwell cement slurries. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 11, p. 1767-1772, Nov. 2000.

HWANG, C.-L.; HUNG, M.-F. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 8, p. 619-626, Oct. 2005.

IRASSAR, E. F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 3, p. 241-254, Mar. 2009.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2021-2027, Nov. 2004.

KHAYAT, K. H.; HU, C.; MONTY, H. Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 143-152.

KHAYAT, K. H.; ASSAAD, J.; DACZKO, J. Comparison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 2, p. 168-176, Mar./April 2004.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v. 1, São Paulo: IBRACON, 2005.

KRAUS, R. N.; NAIK, T. R.; RAMME, B. W.; KUMAR, R. Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3439-3442, Nov. 2009.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 2, p. 91-100, Apr. 2001.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 1939-1947, Dec. 2003.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1092-1105, June 2005.

LEEMANN, A.; HOFFMANN, C. Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities. **Magazine of Concrete Research**, v. 57, n. 3, p. 315-319, Aug. 2005.

LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 4, p. 579-584, Apr. 2003.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 144 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LÓPEZ, A.; TOBES, J. M.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 754-761, Nov. 2009.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. 867 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. (Tradução da 3ª edição em Inglês) São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. 2005. 183 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

MELO, K. A. et al. Análise das propriedades de concretos no estado fresco com o emprego de metacaulim e aditivo superplastificante. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 48., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

MELO, K. A. et al. Comparação das propriedades do concreto no estado fresco produzido com diferentes misturas de agregados e uso de metacaulim. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

MELO, K. A.; CARNEIRO, A. M. P. Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n.8, p. 1529-1535, Aug. 2010.

MENEZES, C. M. T. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais**. 2006. 122 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2006.

MODLER, L. E.; RUPP, R. F.; PREDIGER, P. W.; BOEIRA, F. D. Concreto bombeável com adição de finos basálticos – Análise das características físicas. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**, v. 37, n. 266, p. 74-81, Mar. 2004.

MORA, C. F.; KWAN, A. K. H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 3, p. 351-358, Mar. 2000.

MOTA, L. M. F.; MELO, K. A.; ANDRADE, A. F.; QUEIROZ, M. M.; CARNEIRO, A. M. P. Análise das propriedades do estado endurecido de concretos empregando metacaulim e aditivo superplastificante. In: Congresso Brasileiro do Concreto - CBC, 48., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

NASVIK, J. The ABCs of SCC. **Concrete Construction**, Mar. 2003.

NEHDI, M.; PARDHAN, M.; KOSHOWSKI, S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high volume replacement composite cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2103-2112, Nov. 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 738 p.
NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198 p. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2001.

NUNES, S.; FIGUEIRAS, H.; OLIVEIRA, P. M.; COUTINHO, J. S.; FIGUEIRAS, J. A methodology to assess robustness of SCC mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 12, p. 2115-2122, Dec. 2006.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas** – Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224 p.

OKAMURA, H. Self-compacting high performance concrete. **Concrete International**, v. 19, n. 7, p. 50-54, July 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, April 2003.

PAPO, A.; PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2097-2101, Nov. 2004.

PATEL, R.; HOSSAIN, K. M. A.; SHEHATA, M.; BOUZOUBAÂ, N.; LACHEMI, M. Development of statistical models for mixture design of high-volume fly ash self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 4, p. 294-302, Jul/Aug. 2004.

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 842-849, May 2005.

PERA, J.; HUSSON, S.; GUILHOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. **Cement & Concrete Composites**, v. 21, n. 2, p. 99-105, Apr. 1999.

PERA, J. Metakaolin and calcined clays – Guest Editorial. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, n. 6, Dec. 2001.

PETIT, J.-Y.; WIRQUIN, E. Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 235-241, Feb. 2010.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1968. 664 p.

PRADO, A.; MELO, K. A.; LIRA, E. M.; CARNEIRO, A. M. P. Comparação das propriedades do concreto no estado endurecido produzido com diferentes misturas de agregados e uso de metacaulim. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: Implications for high performance concretes. 2000. 189 p. Tese – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2000.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p. 133-138, Jan. 2002.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v.98, n. 6, p. 429-439, Nov./Dec. 2001.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (Ed.). **Tratamento de minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570 p.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. v. 1. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1989. 408 p.

SANTOS, L. F.; BARBOSA, M. P.; FANTUCCI, F. M.; SALLES, F. M. Técnicas de caracterização de pastas e argamassas do concreto auto-adensável. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 50., Salvador, 2008. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2008.

SCHWARTZENTRUBER, L. A.; ROY, R. L.; CORDIN, J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1203-1213, Jul. 2006.

SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In: RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, 2., 2001. **Proceedings...** RILEM, 2001.

SHI, C.; WU, Y. Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. **ACI Materials Journal**, v. 102, n. 5, p. 355-363, Sept./Oct. 2005.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Engenharia Civil**, n. 15, Setembro 2002.

SU, N.; MIAO, B. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 215-222, Feb. 2003.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 37-50, Jan. 1997.

VIALIS-TERRISSE, H.; NONAT, A.; PEITI, J.-C. Zeta-Potential Study of Calcium Silicate Hydrates Interacting with Alkaline Cations. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 244, n. 1, p. 58-61, Dec. 2001.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler – effect of powder content and w/c ratio. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, Mar. 2005.

YANG, M.; NEUBAUER, C. M.; JENNINGS, H. M. Interparticle Potential and Sedimentation Behavior of Cement Suspensions – Review and Results from Paste. **Advances in Cement Based Materials**, v. 5, n. 1, p. 1-7, Jan. 1997.

ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B.; GARCIA, T. AGULLÓ, L. GETTU, R. Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete. **Materials and Structures**, v. 42, n. 7, p. 947-960, Aug. 2009.

ZHU, W.; GIBBS, J. C. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1457-1462, Aug. 2005.

APÊNDICE A – MÉTODOS DE ENSAIO PARA O CAA

O CAA é caracterizado, principalmente, por meio de suas propriedades no estado fresco, de forma que os métodos aplicados na caracterização dos concretos convencionais não são adequados para este material. Isto faz com que sejam necessários métodos de ensaio próprios para este tipo de concreto.

A seguir, estão descritos os principais ensaios aplicados para a avaliação do CAA.

Espalhamento ou *Slump flow*

O ensaio de espalhamento determina a capacidade de preenchimento, ou deformabilidade, do CAA, sob ação do seu peso próprio. Consiste na medição do diâmetro de abertura da mistura após seu espalhamento, e é realizado no cone de Abrams, empregado no ensaio de abatimento do concreto convencional. O procedimento de ensaio se dá medindo-se o diâmetro em duas direções, perpendiculares entre si, fazendo-se a média entre eles para a determinação do resultado do ensaio. Considera-se aceitável o concreto que apresentar diâmetro entre 600 e 800 mm.

No ensaio do espalhamento, é importante realizar uma avaliação visual da mistura para verificar a ocorrência de segregação ou exsudação. No caso de um estudo em argamassas, o espalhamento pode ser medido utilizando-se um molde com dimensões reduzidas. Na Figura A.1 estão ilustrados os equipamentos para ensaio em concreto e argamassa.

Funil-V

O ensaio do Funil-V é realizado por meio do preenchimento de um funil de seções retangulares com o CAA, medindo-se o tempo gasto para o escoamento completo da mistura. Expressa uma avaliação da capacidade do concreto de passar por seções estreitas, sendo também um indicativo da coesão da mistura (e medida indireta da viscosidade) e, conseqüentemente da tendência à segregação. Os tempos de escoamento devem estar

preferencialmente entre 2 e 12 s, segundo Coppola (2001) ou entre 6 e 12 s, conforme determinações da EFNARC (2002).

Este ensaio pode ser realizado em argamassas com um funil de dimensões reduzidas quando comparado ao funil utilizado em concreto, os quais estão mostrados na Figura A.2.

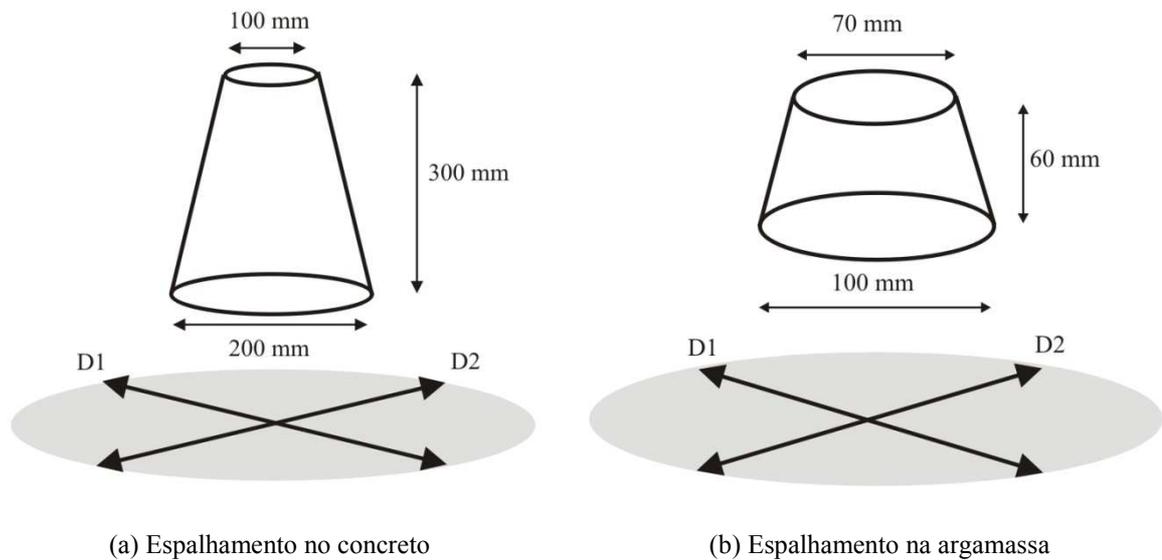


Figura A.1 – Cone para ensaio de espalhamento ou *Slump flow* (NUNES, 2001)

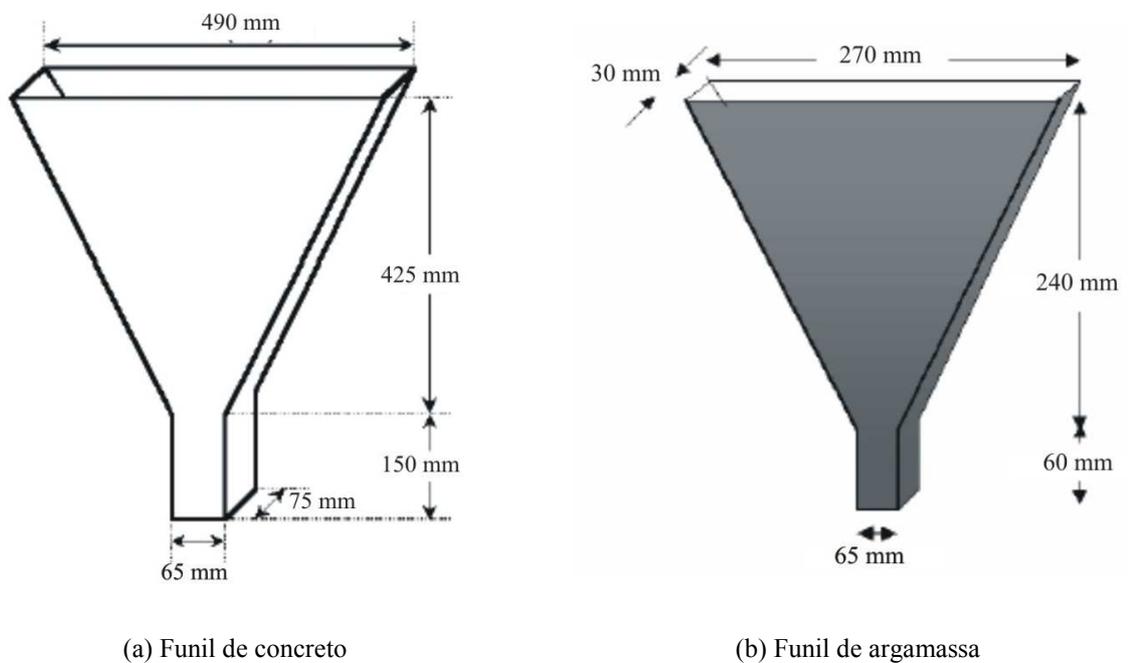


Figura A.2 – Funil-V (NUNES, 2001)

Segundo Schwartzentruber et al. (2006) o ensaio de espalhamento está bastante relacionado à tensão de escoamento, enquanto que a viscosidade tem relação com a viscosidade da mistura. Desta forma, Felekoğlu et al. (2007) indicam que quando o tempo de escoamento no Funil-V é menor do que o limite especificado, pode haver indício de segregação do CAA.

Caixa-L

Neste ensaio, determina-se a capacidade do concreto de passar por restrições, simulando-se as armaduras, bem como sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação. A determinação é feita a partir do preenchimento da parte vertical da caixa em formato L, permitindo-se passagem do material para a parte horizontal após este escoar pelas barras verticais existentes. O resultado é obtido pela razão entre as alturas nas partes horizontal (H_2) e vertical (H_1) da caixa, que deve ser maior ou igual a 0,8.

Pode-se também medir o tempo decorrido para que o concreto atinja as distâncias de 20 e 40 cm ao longo do eixo horizontal, definindo-se como adequados tempos menores que 1 e 2 segundos, respectivamente (GOMES, 2002). A Figura A.3 ilustra o equipamento de ensaio.

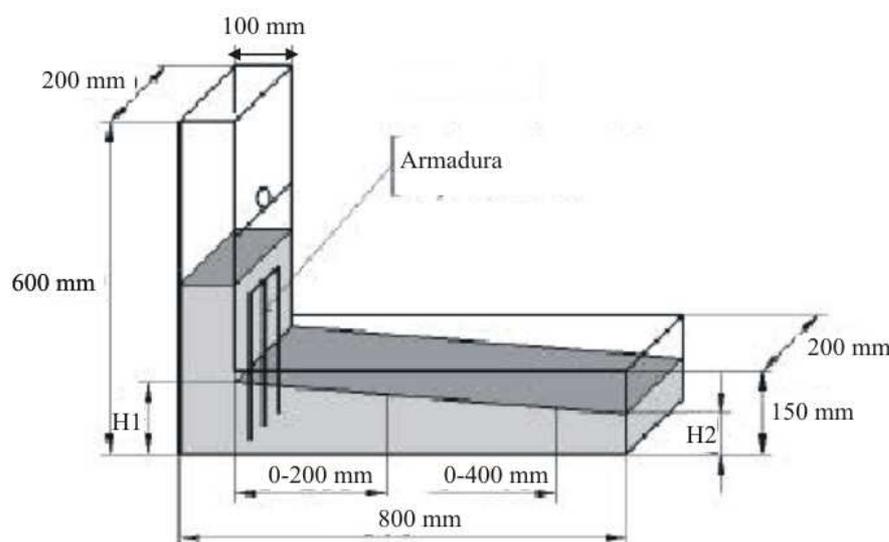


Figura A.3 – Ensaio da Caixa-L (EFNARC, 2002)

Caixa-U

O ensaio da Caixa-U é bastante completo pois mede a auto-compactabilidade do concreto, além de dar indicativos sobre a viscosidade. Consiste em uma caixa com dois compartimentos isolados entre si por uma comporta, onde um deles é preenchido pelo concreto e então é permitida sua passagem para o outro lado. Desta forma, o concreto atravessa obstáculos similares a armaduras. Avalia-se, então, a altura atingida pelo material na segunda parte da caixa, conforme mostrado na Figura A.4, que deve resultar em mais de 300 mm.

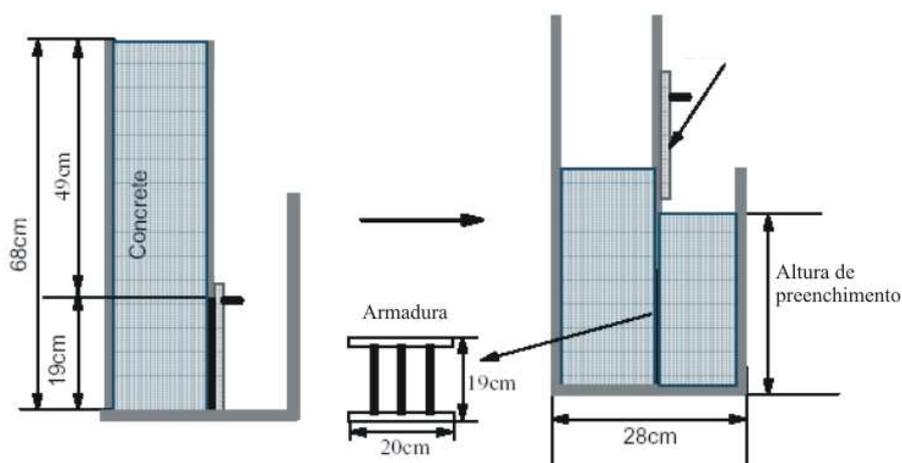


Figura A.4 – Ensaio da Caixa-U (GOMES, 2002)

Tubo-U

O ensaio do Tubo em U, desenvolvido por Gomes (2002), tem como finalidade verificar a ocorrência de segregação no CAA. Consiste em três segmentos de tubos de PVC acoplados, compondo as duas partes verticais e a parte horizontal do U. Estes tubos são serrados ao meio e fixados por meio de braçadeiras.

O concreto é lançado dentro do equipamento e, após adquirir alguma consistência, as metades dos tubos são separadas e são retiradas amostras de concreto de três seções posicionadas conforme ilustrado na Figura A.5. As amostras são lavadas sobre a peneira de abertura 4,8 mm, de modo a se separar as frações referentes ao agregado graúdo, as quais são pesadas e comparadas, verificando-se se houve uma distribuição adequada da brita ao longo de todo o

tubo. Esta determinação se dá fazendo-se a razão entre as massas das amostras 2 e 3 com relação à amostra 1, devendo-se obter um valor maior ou igual a 0,9.

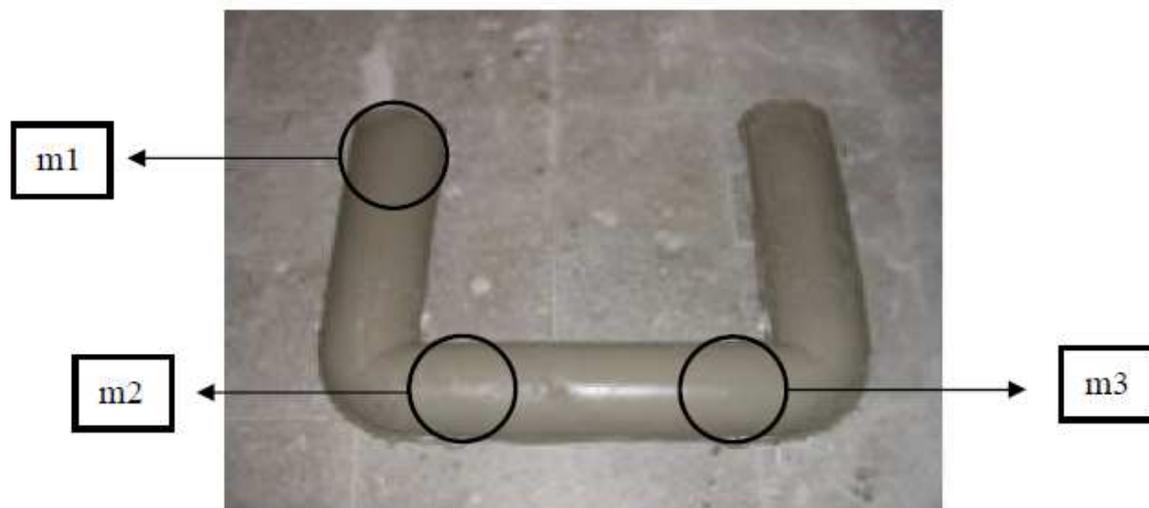


Figura A.4 – Ensaio do Tubo-U (CAVALCANTI, 2006)

APÊNDICE B – ESTUDO PILOTO

A1 - Escolha e caracterização dos materiais

Nesta etapa, foi empregado o cimento do tipo CP II Z 32, que consiste em um cimento composto com pozolanas, as quais consistem em argilas calcinadas na região de estudo. A escolha deste cimento se deve à sua grande utilização na região de estudo. Na Tabela A.1 abaixo tem-se o laudo fornecido pelo fabricante.

Tabela A.1 – Características do cimento CP II Z 32

Ensaio químicos	Perda ao fogo (%)	5,27
	MgO (%)	2,24
	SO ₃ (%)	2,53
	Resíduo insolúvel (%)	12,09
	CaO livre (%)	1,47
Ensaio físico e mecânicos	Blaine (cm ² /g)	3850
	Massa específica (g/cm ³)	3,08
	# 200 (%)	3,3
	# 325 (%)	13,7
	Consistência normal (%)	28,7
	Início de pega (h:min)	3:30
	Fim de pega (h:min)	4:15
Resistência à compressão	Expansibilidade a Quente (mm)	0,50
	1 dia	-
	3 dias	24,2
	7 dias	31,4
	28 dias	41,0

Como adição mineral utilizou-se o metacaulim devido à sua disponibilidade na região, e em função de pesquisas anteriores (BALTAR et al., 2007; MELO et al., 2006; MOTA et al., 2006) que empregaram este material para a produção de concretos convencionais. Foram utilizados três tipos de metacaulim de coloração avermelhada, com massa específica de 2,56 g/cm³, sendo sua principal diferença a superfície específica, denominando-se –

Metacaulim Fino (MF), Metacaulim Normal (MN), Metacaulim Grosso (MG). O metacaulim foi incorporado às misturas em porcentagens de substituição à massa de cimento.

Na Tabela A.2 tem-se as características de finura dos três tipos de adição, e na Figura A.1 as curvas granulométricas dos finos. Estes valores foram obtidos através de ensaios realizados em um granulômetro a laser do tipo Mastersizer 2000, pertencente ao Departamento de Engenharia de Minas, da UFPE.

Tabela A.2 – Características das amostras de metacaulim

Tipo de metacaulim	Tipo de moagem	Superfície específica	Superfície específica
		(cm ² /g) Blaine (fabricante)	(cm ² /g) Granulômetro a laser
Metacaulim MF	Moinho pendular	24000	7580
Metacaulim MN	Moinho pendular	22000	7430
Metacaulim MG	Moinho de martelos	7000	4190

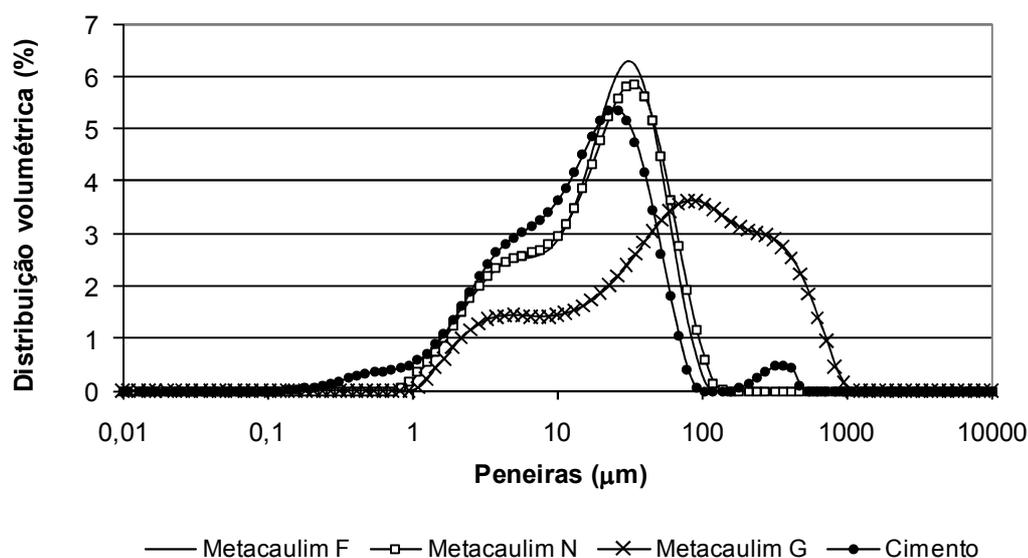


Figura A.6 – Distribuição granulométrica do cimento e do metacaulim

Da Tabela A.2 e da Figura A.6, percebe-se que há grande semelhança entre os dois primeiros tipos de metacaulim MF e MN, e estes, por sua vez, se distanciam da amostra mais grossa MG.

Foram utilizados os mesmos agregados citados no corpo do trabalho (item 3.2.1.4).

Utilizou-se também um aditivo superplastificante de base policarboxilatos, para garantir a fluidez da mistura.

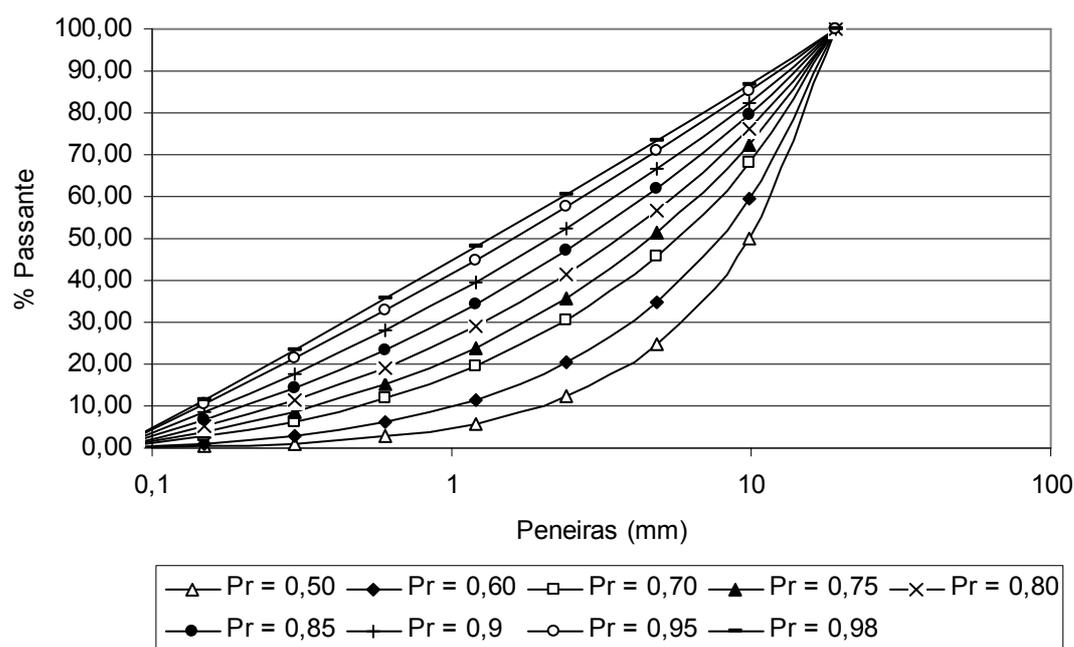


Figura A.7 – Curvas granulométricas das misturas de agregados

Para cada uma das composições apresentadas foi medida a massa unitária e, com o intuito de auxiliar na escolha da curva granulométrica ideal, foram determinados alguns parâmetros de dosagem definidos na literatura para a produção de CAA, como as relações volumétricas: (agregado miúdo)/(argamassa), (agregado graúdo)/(total de agregados), (agregado graúdo/concreto). Na Tabela A.5 tem-se os valores encontrados.

Tabela A.5 – Parâmetros de dosagem do CAA para cada mistura de agregados

	Pr = 0,50	Pr = 0,60	Pr = 0,70	Pr = 0,75	Pr = 0,80	Pr = 0,85	Pr = 0,9	Pr = 0,95	Pr = 0,98
Vag/Vat ¹	0,7529	0,6509	0,5412	0,4862	0,4326	0,3814	0,3336	0,2897	0,2653
Vag/Vconc ²	0,4518	0,3906	0,3247	0,2917	0,2595	0,2289	0,2002	0,1738	0,1592
Vam/Varg ³	0,2704	0,3437	0,4077	0,4353	0,4598	0,4813	0,4999	0,5159	0,5243

¹ Vag/Vat = Volume de agregado graúdo/Volume total de agregados

² Vag/Vconc = Volume de agregado graúdo/Volume de concreto

³ Vam/Varg = Volume de agregado miúdo/Volume de argamassa

Conforme a literatura, os valores aceitáveis para estes parâmetros são: Vag/Vat = 0,5, Vag/Vconc = 0,28 a 0,35 e Vam/Varg = 0,4 a 0,5. Desta forma as misturas de Pr = 0,7 e 0,75 são as que atendem satisfatoriamente às condições desejadas.

Para confirmar os resultados, preparou-se uma mistura seca dos agregados para alguns valores de Pr, nas quais fez-se uma análise visual e medida da massa unitária. Na Tabela A.6 tem-se suas massas unitárias e na Figura A.8 estas misturas podem ser visualizadas.

Tabela A.6 – Massas unitárias das misturas de agregados

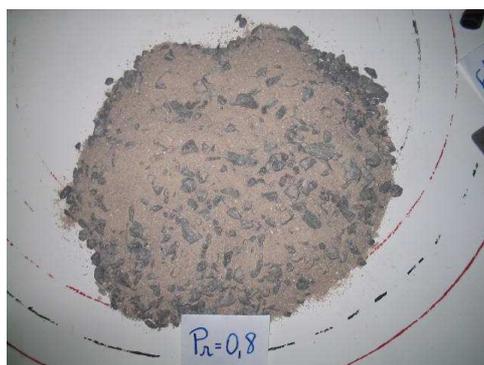
Mistura	Massa unitária (g/cm ³)
Pr = 0,50	1,99
Pr = 0,70	1,93
Pr = 0,80	1,93
Pr = 0,90	1,85



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.8 – Misturas ternárias de agregados: (a) Pr = 0,5; (b) Pr = 0,7; (c) Pr = 0,8; (d) Pr = 0,9

Da Tabela A.6 e das imagens da Figura A.8 nota-se que, quanto maior o valor de Pr maior a quantidade de areia na mistura. Na Figura A.8 (a), que corresponde ao Pr de 0,5, observa-se uma grande quantidade de brita e pouca areia, o que dá indício de não adequação desta mistura para a produção do CAA devido ao risco de segregação e bloqueio. Com relação às massas unitárias, na medida em que se aumentou o Pr e, conseqüentemente, a quantidade de areia, houve um decréscimo no seu valor, o que representa um aumento no teor de vazios. Diante dos resultados, decidiu-se escolher a composição granulométrica referente ao Pr de 0,7, pois atende aos parâmetros de dosagem do CAA sem uma quantidade excessiva de

agregado graúdo e com teor de vazios não muito elevado. A proporção de cada material na mistura adotada é: brita 19 mm = 31,84%, brita 9,5 mm = 22,28% e areia = 45,88%.

A3 - Estudo em pasta – Parte 1

Para a produção das pastas foram utilizados: cimento, água, aditivo superplastificante e o metacaulim.

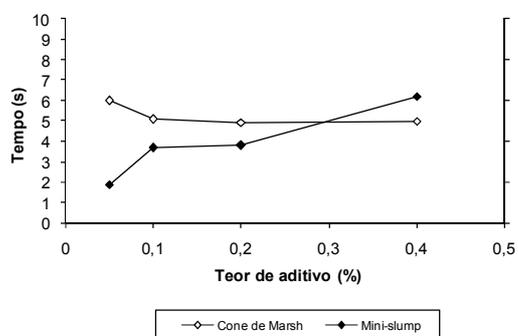
As pastas foram ensaiadas com o intuito de se determinar o teor de saturação do aditivo superplastificante e verificar indiretamente seu comportamento no que diz respeito aos aspectos reológicos de viscosidade e tensão de escoamento. A partir daí, seria possível avaliar misturas adequadas para a futura produção de CAA, nas quais seriam incorporados os agregados. A determinação do teor de aditivo se deu através do Cone de Marsh, cujo procedimento encontra-se no item 3.2.2.1.

As primeiras pastas foram produzidas com o metacaulim de maior superfície específica (MF) nos teores de 5%, 10%, 17,5%, 35%, 50% e 75% em substituição à massa de cimento. Estes valores foram adotados seguindo-se o estudo desenvolvido por Cyr et al. (2006) que, utilizando pó de quartzo, filer calcário e cinza volante, procuraram determinar a influência dos efeitos físicos e químicos destas adições na hidratação do cimento e na resistência à compressão de argamassas. Conforme os resultados obtidos por estes autores, para adições minerais inertes, quando a superfície específica era pequena (da ordem de 23 m²/kg) não houve interferência na hidratação, observando-se redução da resistência, independente do teor de adição; por outro lado, quando a superfície específica era da ordem de 100 m²/kg houve um aumento da resistência. Utilizando-se adições pozolânicas observou-se também um aumento de resistência à compressão.

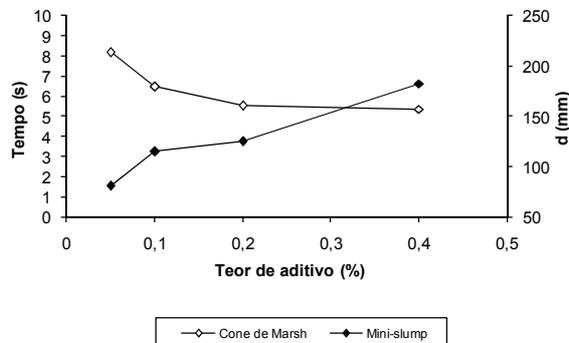
No presente estudo a relação água/finos foi fixada inicialmente em 0,5 para todas as misturas, seguindo as recomendações dos referidos autores.

Quando se utilizou 50% e 75% desta adição, as pastas não apresentaram propriedades compatíveis com as características do CAA, especialmente devido ao aumento da coesão, que impedia a mistura de escoar através do cone mesmo com teores elevados de aditivo. Para que os ensaios fossem realizados, foi necessário aumentar a relação água/finos em 0,8 para o teor de 50% e 1,1 para 75%, valores extremamente elevados, que podem comprometer a resistência caso sejam reproduzidos na produção dos concretos.

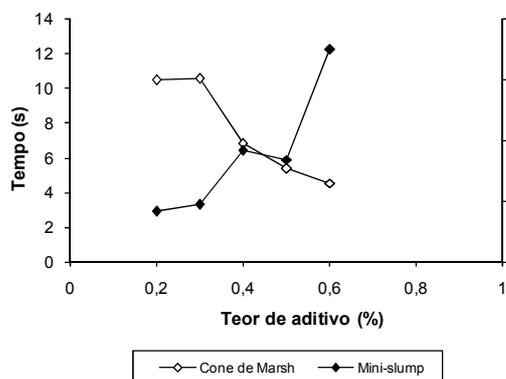
Na Figura A.9 podem-se visualizar as curvas obtidas a partir da variação do teor de aditivo nas pastas para determinação do ponto de saturação.



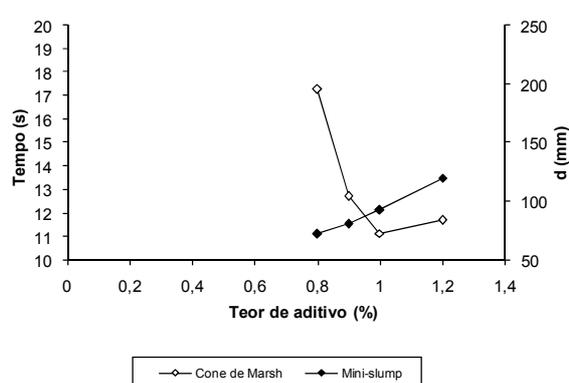
(a)



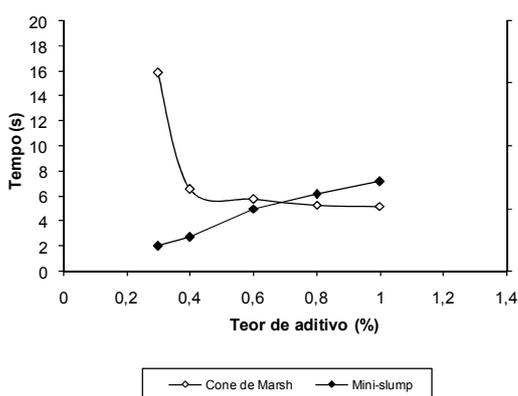
(b)



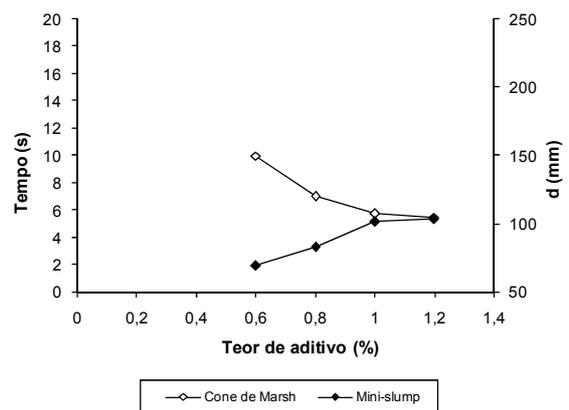
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura A.9 – Ensaio nas pastas: (a) 5%-MF; (b) 10%-MF; (c) 17,5%-MF; (d) 35%-MF; (e) 50%-MF; (f) 75%-MF

Com isto, na Tabela A.7 estão apresentados os pontos de saturação determinados no Cone de Marsh e os resultados dos ensaios nestes pontos.

Tabela A.7 – Resultados do Estudo Piloto nas pastas

Pasta	Relação água/finos	Aditivo (%m. c.)	Espalhamento (mm)	Tempo de escoamento (s)
5%	0,5	0,1	142,0	5,10
10%	0,5	0,2	125,0	5,53
17,5%	0,5	0,5	134,5	5,38
35%	0,5	1,0	93,0	11,15
50%	0,8	0,4	77,5	6,58
75%	1,1	1,0	102,0	5,74

Nas pastas com mesma relação água/finos, com o aumento da porcentagem de metacaulim foram empregados maiores teores de aditivo.

Até 17,5% de metacaulim os tempos de escoamento no cone foram semelhantes indicando que as pastas eram equivalentes no que diz respeito à coesão. Por outro lado, quando a adição foi utilizada no teor de 35%, o ponto de saturação foi bastante elevado – 1% da massa de cimento, sendo que o tempo de escoamento no cone aumentou e o diâmetro de espalhamento foi reduzido, em relação às pastas anteriores. Isto demonstra que, apesar de ter sido possível realizar o ensaio com esta quantidade de metacaulim, um aumento no volume de água possibilitaria a obtenção de pastas mais fluidas, com menor consumo de aditivo.

O aumento na relação água/finos foi satisfatório para a pasta com 50% de metacaulim em relação ao tempo de escoamento no cone, apesar disso, o espalhamento foi bastante reduzido, o que indica que a mistura ainda precisa ser melhorada no tocante à fluidez. No caso da pasta de 75%, chegou-se a um volume de água grande, acompanhado de um consumo de aditivo também elevado, para que fossem obtidos resultados adequados ao material em estudo – o CAA. Observou-se ainda nesta mistura uma rápida perda de fluidez com o tempo. Tudo isto vem confirmar que substituições de 50% e 75% da massa de cimento por metacaulim são excessivas, e comprometem o desempenho das misturas no estado fresco.

A4 - Produção do CAA

Com os concretos estudados procurou-se avaliar o comportamento do CAA variando-se a superfície específica e o teor do metacaulim, e o volume de pasta.

Os concretos foram produzidos com os teores de 5%, 17,5%, 35% e 75% de metacaulim, que representam misturas com características diferentes entre si, em relação ao teor de aditivo encontrado nas pastas e às propriedades do estado fresco. Os primeiros concretos tiveram volume de pasta equivalente a 0,4. O volume de pasta foi fixado inicialmente em 0,4 em relação ao volume de concreto, conforme valores comumente adotados na literatura.

Os concretos com 17,5% e 35% de metacaulim apresentaram-se inicialmente bastante “secos”, ou seja, a fluidez não estava adequada aos requisitos desejados, bem como foi observada elevada coesão, não sendo possível realizar os ensaios de espalhamento e Funil-V. Isto ocorreu mesmo com o emprego de grande quantidade de aditivo. Diante deste fato, decidiu-se aumentar a relação água/finos destas misturas, a qual ficou em 0,6 para o teor de 17,5% e 0,7 para 35%. Estes valores, segundo Powers (1968), estão longe do ideal, pois podem ocasionar falta de coesão e exsudação com desenvolvimento de fissuras internas. A título de investigação, novas pastas foram produzidas com estes teores de água, resultando nos pontos de saturação de 0,2% e 0,6%, respectivamente. As curvas de saturação podem ser visualizadas nas Figuras A.10 e A.11.

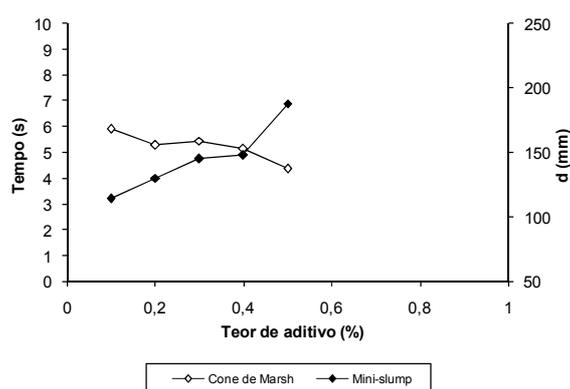


Figura A.10 – Ensaio na pasta com 17,5% de metacaulim e água/finos de 0,6

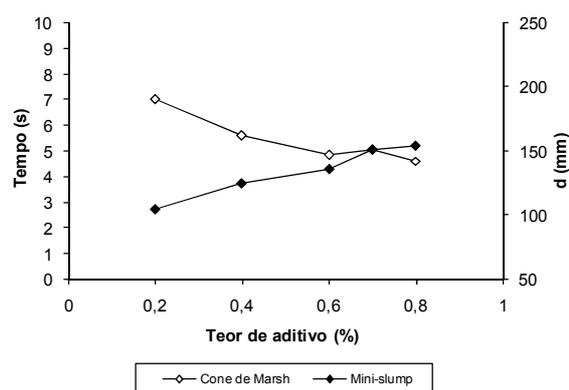


Figura A.11 – Ensaio na pasta com 35% de metacaulim e água/finos de 0,7

No caso do concreto com 75% de metacaulim, chegou-se a utilizar quase 2% de aditivo (em relação à massa de cimento), mas a mistura não conseguiu atingir o espalhamento necessário ou sequer escoar pelo funil. Como a relação água/finos determinada na pasta já era bastante alta (1,1) não seria prudente aumentá-la, de modo que se optou por eliminar esta mistura, confirmando a inviabilidade de substituir o cimento por uma quantidade tão elevada do metacaulim empregado neste trabalho, para a produção de CAA.

O teor de aditivo determinado nas pastas não foi suficiente para que os concretos atingissem a auto-compactabilidade, de modo que foi feito um ajuste por meio dos ensaios de espalhamento e Funil-V. Na Tabela A.8 tem-se o resumo das características das misturas e dos resultados obtidos nos estados fresco e endurecido, para o volume de pasta de 0,4.

Tabela A.8 – Resultados do Estudo Piloto nos concretos com volume de pasta 0,4

Tipo de metacaulim	Mistura	Aditivo (%m. c.) ¹	Aditivo (%m. f.) ²	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	fc 7 dias (MPa)	fc 56 dias (MPa)	fc 240 dias (MPa)
MF	5%	0,38	0,36	630	6,39	34,27	38,41	54,90
	17,5%	0,56	0,46	660	2,33	32,57	27,45	44,34
	35%	0,87	0,57	605	2,77	21,55	23,81	37,12
MN	5%	0,40	0,38	640	3,67	31,86	35,98	51,70
	17,5%	0,53	0,43	605	3,15	28,53	27,45	42,80
	35%	0,74	0,48	600	2,83	18,93	21,63	31,76
MG	5%	0,37	0,35	730	6,29	29,78	41,39	44,05
	17,5%	0,49	0,40	630	2,27	25,25	23,50	44,80
	35%	0,60	0,39	670	2,13	16,64	20,90	29,99

¹ % de aditivo em relação à massa de cimento

² % de aditivo em relação à massa de finos

Da tabela observa-se que, quanto maior o teor e maior a superfície específica do metacaulim, aumentou-se também o consumo de aditivo para que fossem atingidos resultados semelhantes, especialmente no que diz respeito ao espalhamento. Mesmo nas misturas em que o diâmetro não atendeu à faixa pretendida de 600 a 650 mm – 17,5% MF, 5% MG e 35% MG, foi possível observar a atuação da adição mineral. O efeito da superfície específica foi mais expressivo quando se utilizaram maiores quantidades de metacaulim.

Para os ensaios de resistência à compressão foram moldados 10 corpos-de-prova de 10x20 cm para cada mistura, os quais foram ensaiados no estado endurecido avaliando-se a resistência à compressão aos 7, 56 e 240 dias, conforme NB 5739 (ABNT, 1994b). Desde a moldagem até

a idade de rompimento, os corpos-de-prova permaneceram em câmara úmida sob condições de 90% de umidade e $20\pm 1^\circ\text{C}$ de temperatura, para cura (NBR 5738 – ABNT, 1994a). Antes da determinação da resistência, as superfícies dos corpos-de-prova foram preparadas por meio de capeamento com enxofre. As Figuras A.12 a A.14 ilustram o comportamento observado aos 7, 56 e 240 dias, respectivamente.

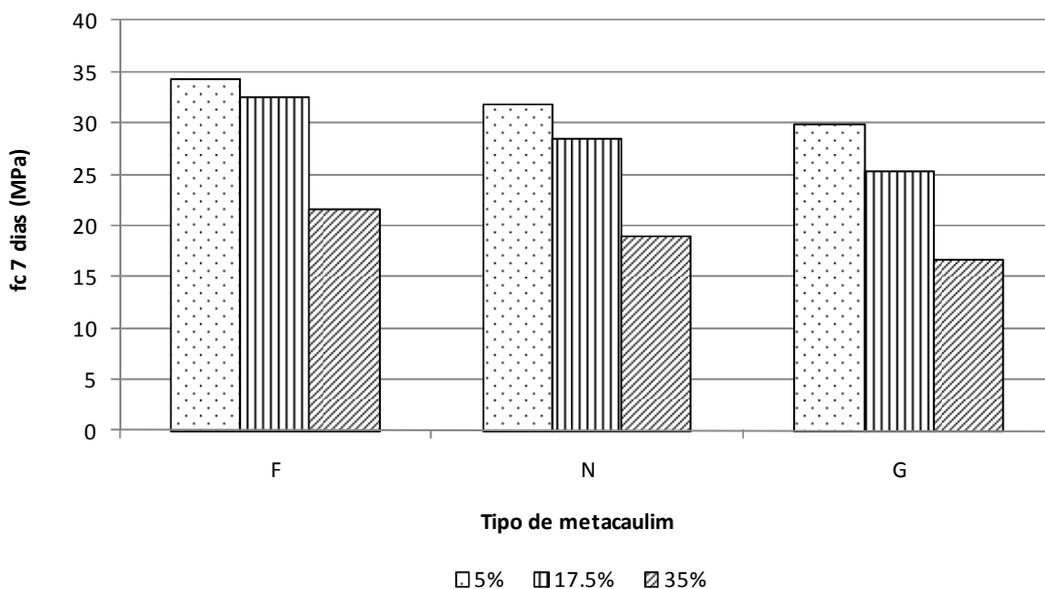


Figura A.12 – Resistência à compressão aos 7 dias do CAA com volume de pasta 0,4

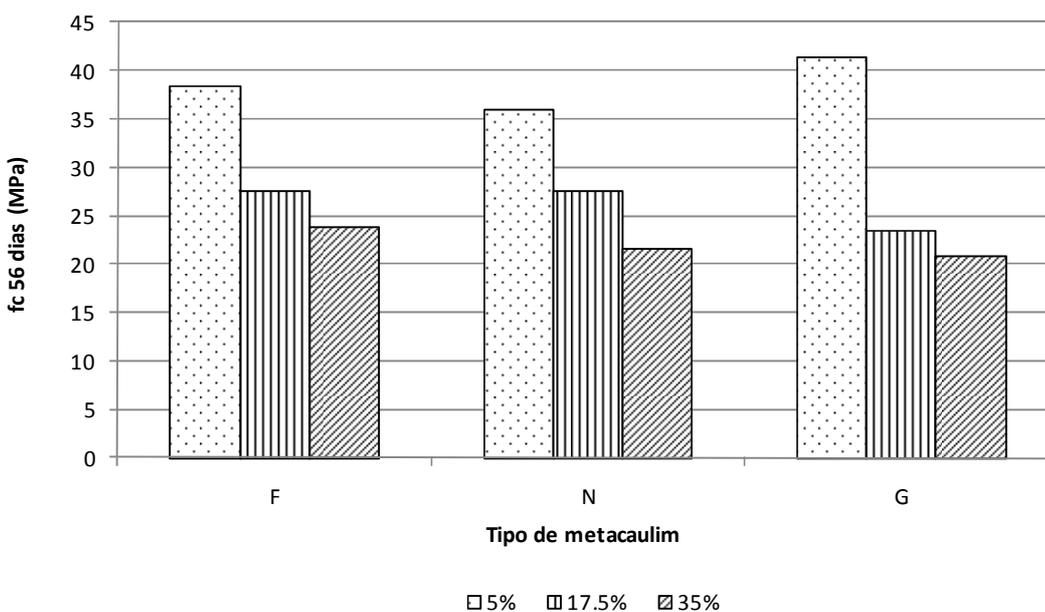


Figura A.13 – Resistência à compressão aos 56 dias do CAA com volume de pasta 0,4

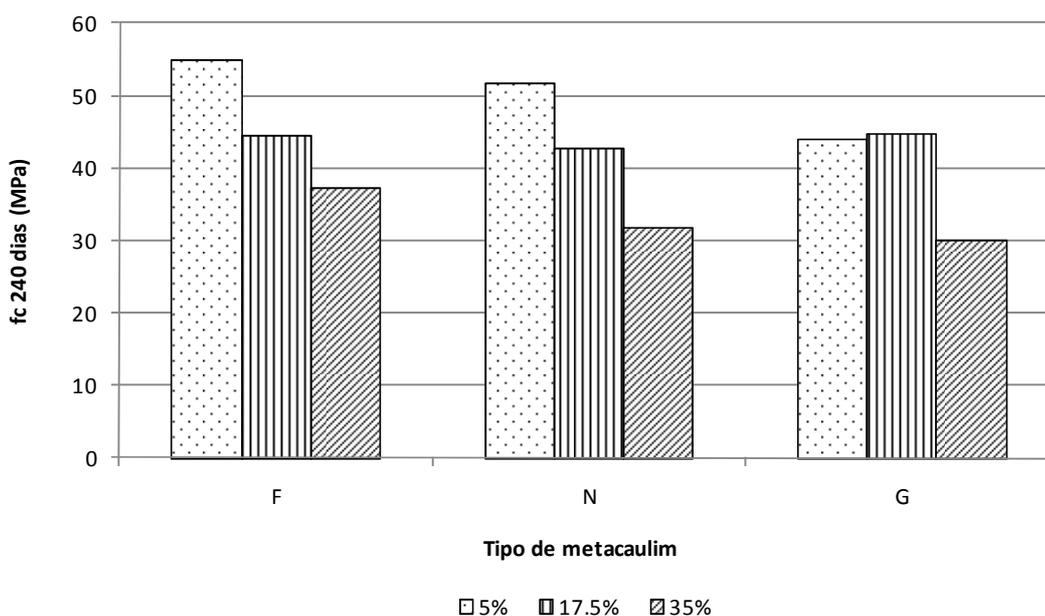


Figura A.14 – Resistência à compressão aos 240 dias do CAA com volume de pasta 0,4

Verifica-se que a resistência à compressão diminui com o aumento na quantidade de metacaulim. Aos 7 dias, comportamento semelhante é observado à medida que se reduz sua superfície específica. No entanto, aos 56 dias, o concreto com 5% de metacaulim obteve maior resistência quando utilizado o metacaulim MG (de menor superfície específica). Alguns pontos apresentaram menor resistência aos 56 dias do que aos 7 dias. Este resultado inesperado pode ter decorrido do processo de cura, tendo em vista problemas ocorridos com a câmara úmida, e/ou do capeamento.

Em seguida, foram misturados concretos com o metacaulim MN nos teores extremos (5% e 35%) para os quais se variou o volume de pasta em 0,45, 0,5 e 0,55. Os resultados encontram-se na Tabela A.9. A exceção do concreto com 5% de metacaulim e $V_p=0,55$, as misturas tiveram comportamento semelhante em relação ao espalhamento, facilitando assim a avaliação de parâmetros como o teor de aditivo.

Tabela A.9 – Ensaio do CAA com diferentes volumes de pasta

Volume de pasta	Mistura	Aditivo (%m. c.)	Aditivo (%m. finos.)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	fc 7 dias (MPa)	fc 56 dias (MPa)	fc 240 dias (MPa)
0,45	5%	0,18	0,17	620	2,47	26,62	34,07	48,98
	35%	0,68	0,44	612,5	3,00	17,26	26,27	31,40
0,50	5%	0,13	0,12	623	2,26	28,76	29,95	49,29
	35%	0,47	0,30	610	2,15	19,47	21,63	32,69
0,55	5%	0,11	0,10	760	1,69	22,77	31,57	48,04
	35%	0,26	0,17	640	2,28	19,13	23,96	29,53

Comparando-se as porcentagens de aditivo necessárias para garantir a auto-compactabilidade dos concretos, verifica-se que há uma redução significativa na medida em que o volume de pasta é aumentado. Esta verificação está de acordo com Powers (1968) quando afirma que a quantidade de água da pasta e o volume de pasta são dependentes, ou seja, para se manter a mesma consistência, ao se aumentar o volume de pasta, a quantidade de água é reduzida. Isto ocorre porque a pasta facilita o rolamento das partículas, aumentando desta forma a fluidez do concreto. Nos concretos produzidos neste Estudo Piloto, pode-se atribuir ao aditivo o efeito da água, tendo em vista tratar-se de misturas fluidas, uma vez que este é reduzido quando se aumenta o volume de pasta. Na Figura A.15 tem-se a variação do teor de aditivo tanto em relação à massa de cimento como à de finos, incluindo-se as misturas com $V_p=0,4$, apresentadas anteriormente.

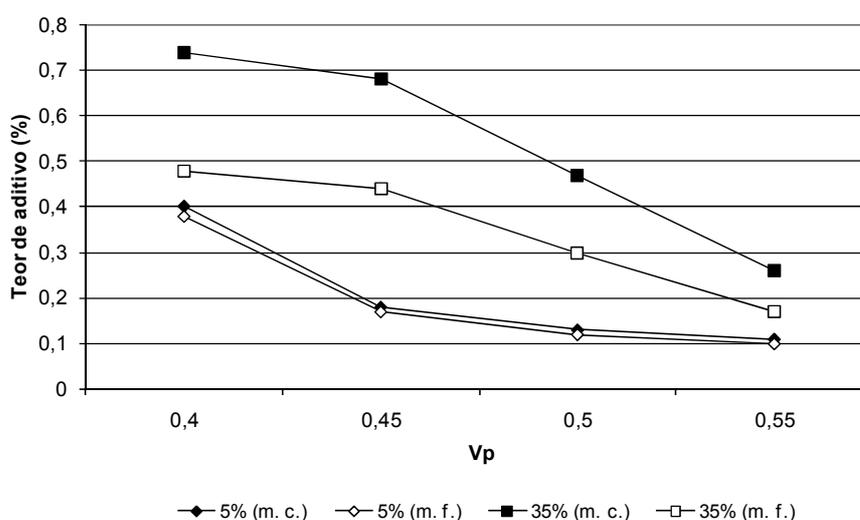


Figura A.15 – Variação do teor de aditivo nos concretos em função do volume de pasta

Através de uma análise visual, percebeu-se que no concreto com menor quantidade de pasta há maior homogeneidade na distribuição dos componentes, enquanto que na mistura de maior V_p é possível observar uma “sobra” de pasta ao redor dos agregados. Isto foi mais evidente nas misturas com menor quantidade de metacaulim (5%).

Nas Figuras A.16 a A.18 pode-se observar a variação da resistência em função do volume de pasta aos 7, 56 e 240 dias, respectivamente.

Observa-se que em todas as idades a resistência à compressão caiu quando o teor de metacaulim atingiu os 35% de substituição, repetindo o resultado anterior. A variabilidade dos resultados em função do volume de pasta é pequena, principalmente aos 240 dias. Por outro lado, é nesta idade em que há maior diferença em função do teor de metacaulim.

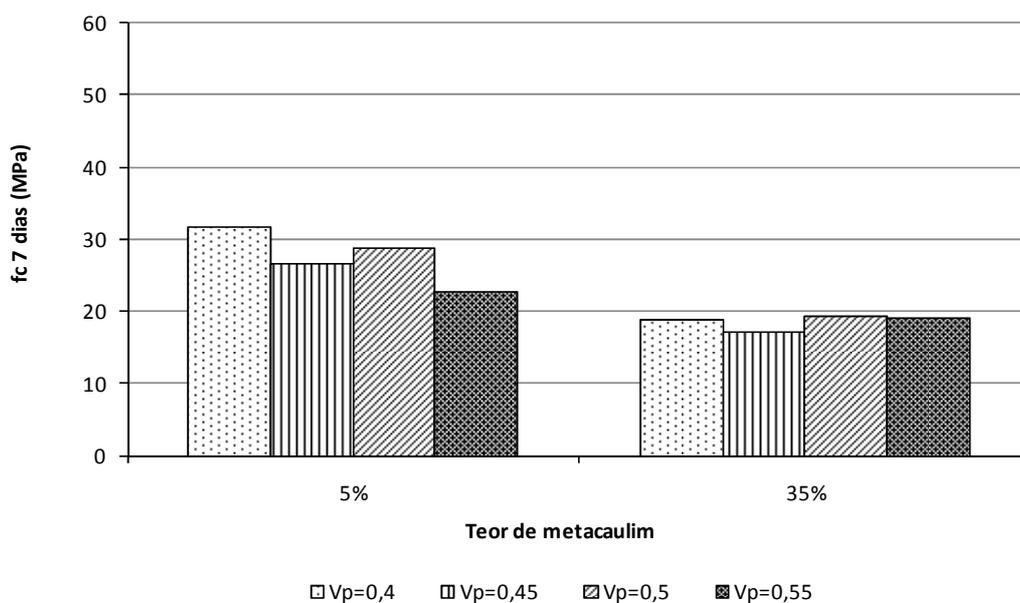


Figura A.16 – Variação da resistência à compressão aos 7 dias em função do volume de pasta

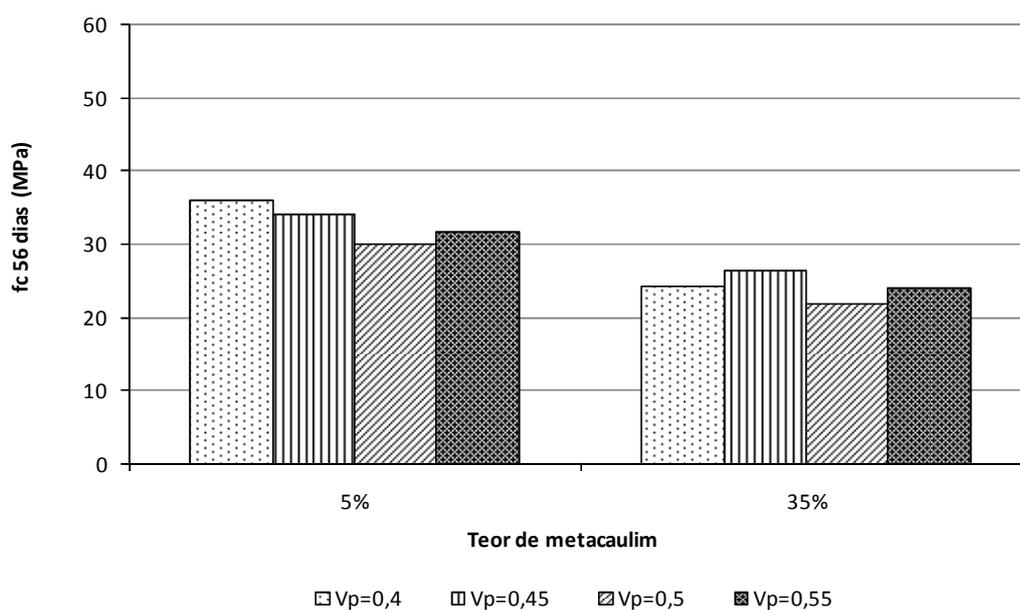


Figura A.17 – Variação da resistência à compressão aos 56 dias em função do volume de pasta

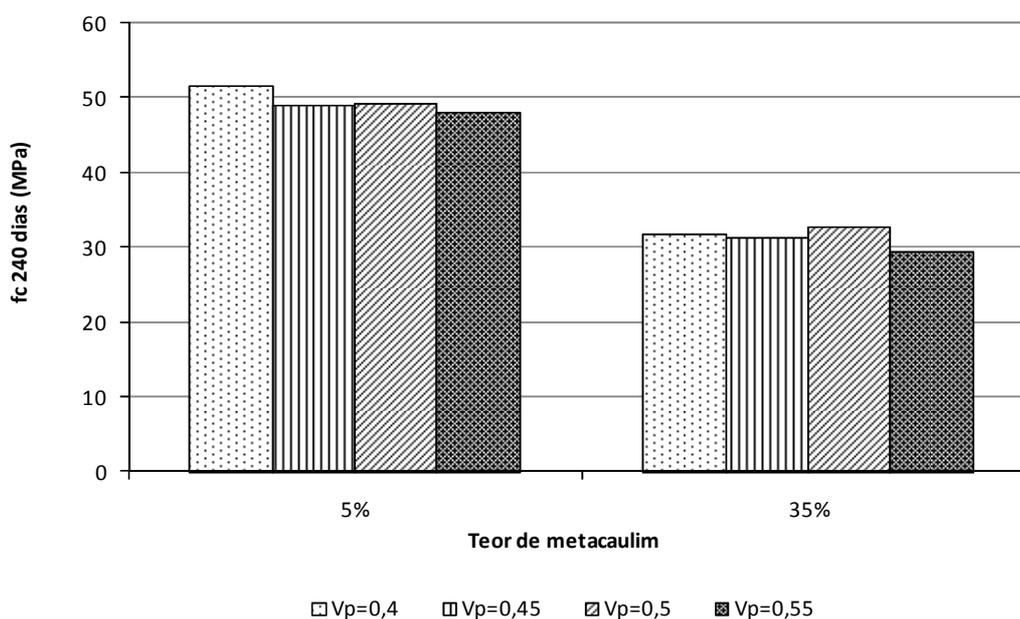


Figura A.18 – Variação da resistência à compressão aos 240 dias em função do volume de pasta

Em todos os concretos confeccionados, é possível perceber que os tempos de escoamento no Funil-V são bastante baixos, inferiores aos limites definidos na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura, ou próximos ao limite inferior definido por Coppola (2001), apresentado no Quadro A.1.

Quadro A.1 – Comparação entre os limites de aceitação para o ensaio do Funil-V definidos na literatura e obtidos no presente trabalho

Nunes (2001)	Coppola (2001)	EFNARC (2002)	Gomes (2002)	Melo (2007) (1)
10 s	2 – 12 s	6 – 12 s	10 – 15 s	1,69 – 6,39 s

(1) Valores obtidos no presente trabalho em todas as misturas produzidas

Apesar do risco de segregação que as misturas com tempo de escoamento reduzido podem apresentar, não foi verificada sua ocorrência em nenhuma das misturas estudadas. Estes resultados indicam que os teores e o tipo de adição mineral empregada neste trabalho foram adequados para a produção do CAA com viscosidade otimizada, demonstrada pela ausência de segregação. O metacaulim tem a capacidade de elevar consideravelmente a coesão de misturas de concreto, a qual se dá sem prejuízos para a fluidez quando a quantidade de água disponível na mistura é suficiente para envolver bem as partículas, evidenciando seu efeito de lubrificação.

Na Figura A.19 tem-se o aspecto do CAA com 35% do metacaulim MN e volume de pasta de 0,45 no estado fresco, onde se percebe que o agregado graúdo acompanhou toda a mistura no ensaio de espalhamento. Na Figura A.20 podem ser visualizadas as seções longitudinais de alguns corpos-de-prova após a ruptura, onde se verifica a distribuição uniforme do agregado graúdo.



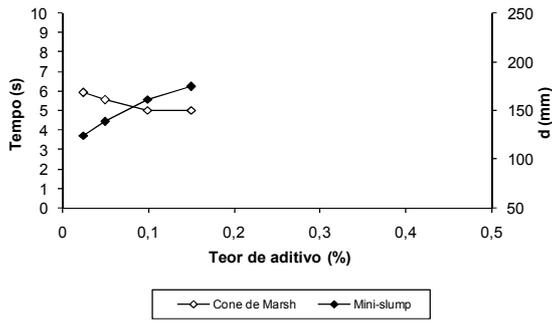
Figura A.19 – Distribuição dos agregados no ensaio de espalhamento (35% N, $V_p=0,45$)



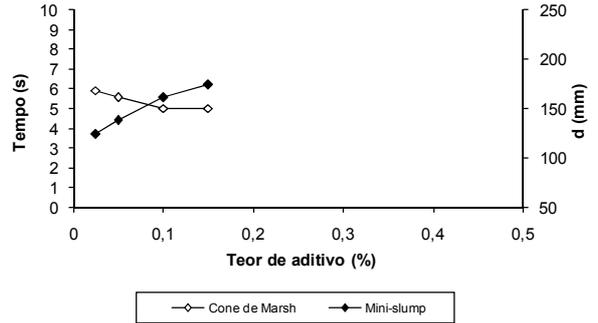
Figura A.20 – Aspecto dos concretos após o rompimento: (a) 5% MF, $V_p=0,4$; (b) 17,5% MN, $V_p=0,4$; (c) 35% MN, $V_p=0,5$; (d) 5% MG, $V_p=0,4$

A5 - Estudo em pasta – Parte 2

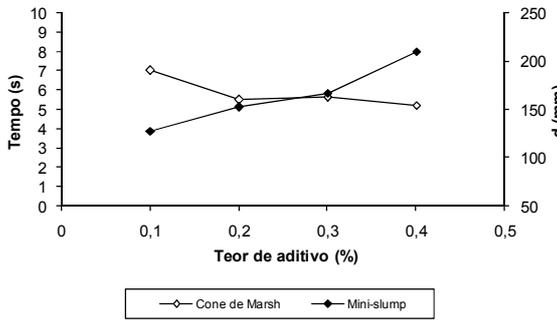
A partir dos resultados obtidos nos concretos, foram estudadas as pastas produzidas com os dois tipos de metacaulim de menor superfície específica (MN e MG) nos teores de 5%, 17,5% e 35%. Nas Figuras A.21 e A.22 estão os resultados dos ensaios de espalhamento e Cone de Marsh realizados nestas pastas.



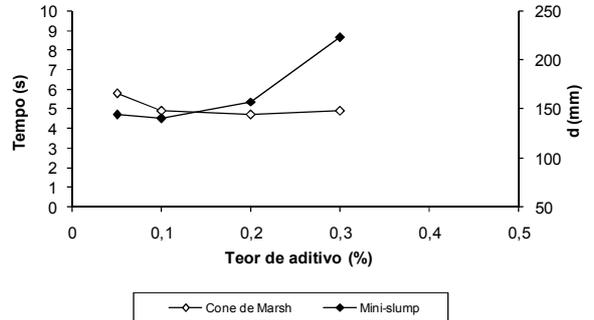
(a) 5% de metacaulim; água/finos=0,5



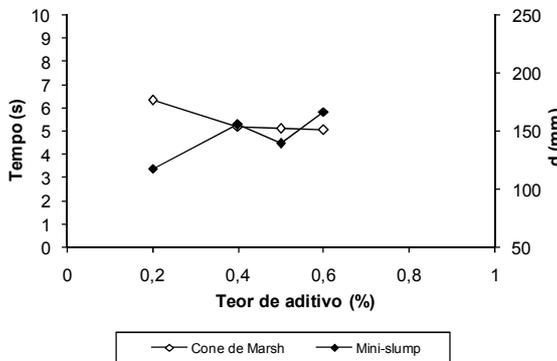
(a) 5% de metacaulim; água/finos=0,5



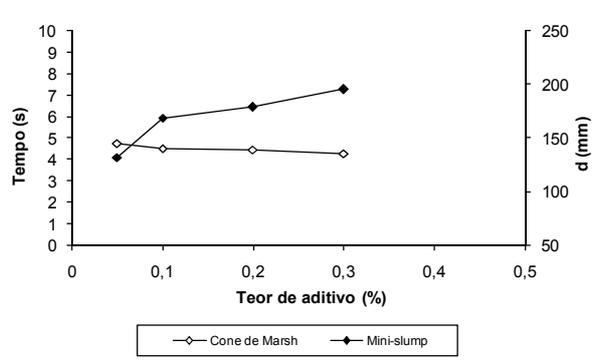
(b) 17,5% de metacaulim; água/finos=0,6



(b) 17,5% de metacaulim; água/finos=0,6



(c) 35% de metacaulim; água/finos=0,7



(c) 35% de metacaulim; água/finos=0,7

Figura A.21 – Pastas com Metafort N

Figura A.22 – Pastas com Metafort G

Na Tabela A.10 tem-se um resumo dos pontos de saturação obtidos em todas as pastas.

Tabela A.10 – Teores de saturação do aditivo nas pastas do Estudo Piloto

% Metacaulim	MF	MN	MG
5%	0,1	0,1	0,1
17,5%	0,2	0,2	0,1
35%	0,6	0,4	0,1

Observa-se que, assim como nos concretos, quanto maior a superfície específica do metacaulim, maior foi o consumo de aditivo para um determinado tempo de escoamento. Quando o teor de adição foi de 5%, o ponto de saturação foi o mesmo para todos os tipos de material. Aumentando-se para 17,5%, o efeito da superfície específica foi sentido com relação ao metacaulim mais grosso, já que para os demais o comportamento foi semelhante. No entanto, quando utilizado 35% das adições minerais, pode-se perceber claramente o efeito da sua superfície específica. Nas pastas contendo metacaulim MG, o consumo de aditivo foi o mesmo para todas as porcentagens de metacaulim, o que demonstra que para o valor de superfície específica deste material não são observadas variações em função do seu teor.

A6 - Estudo em argamassa

Foram produzidas argamassas com os traços dos concretos desenvolvidos na etapa anterior excluindo-se o agregado graúdo. O teor de substituição de metacaulim à massa de cimento foi variado nos valores de 5%, 10%, 15%, 17,5% e 20%, em função dos resultados obtidos nas pastas e nos concretos. Para este estudo foi empregado o metacaulim MF.

As misturas foram realizadas na argamassadeira mostrada na Figura 9 (item 3.2).

Este estudo foi desenvolvido em complementação às etapas anteriores, com o objetivo de identificar os teores ideais de utilização das adições minerais de modo a garantir misturas com bom desempenho tanto no estado fresco como no estado endurecido. Optou-se por ensaios em argamassa devido à maior facilidade de manipular os materiais e corpos-de-prova quando comparado a ensaios em concretos, permitindo, assim, uma resposta mais rápida. Segundo López et al. (2009), além da facilidade no desenvolvimento experimental, o estudo em argamassas pode estimar o desenvolvimento da resistência à compressão, objetivo principal desta etapa do trabalho.

As argamassas foram avaliadas quanto ao consumo de cimento, espalhamento e resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Figura A.23). O diâmetro de abertura no espalhamento foi medido utilizando-se a mesa de consistência e o tronco de cone destinados ao ensaio de consistência de argamassas convencionais, descritos na NBR 13276 (ABNT, 2002a). Para a avaliação da resistência foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm, os quais permaneceram em cura úmida, conforme condições descritas no item anterior.

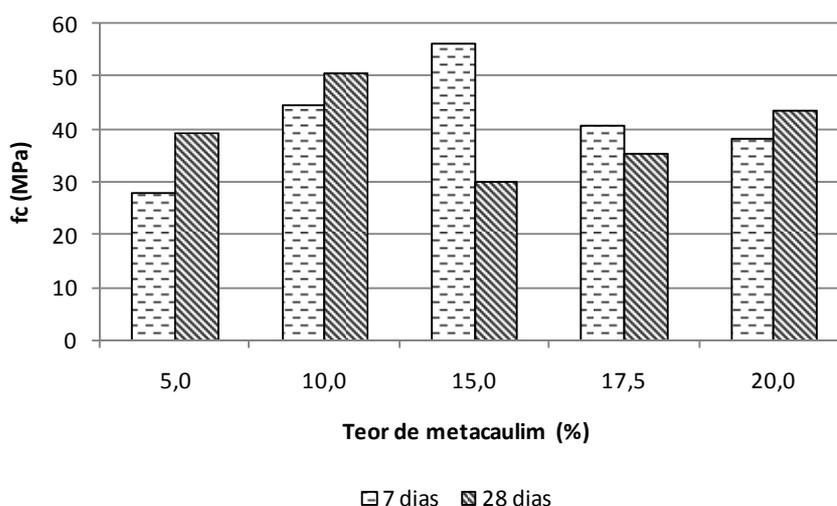


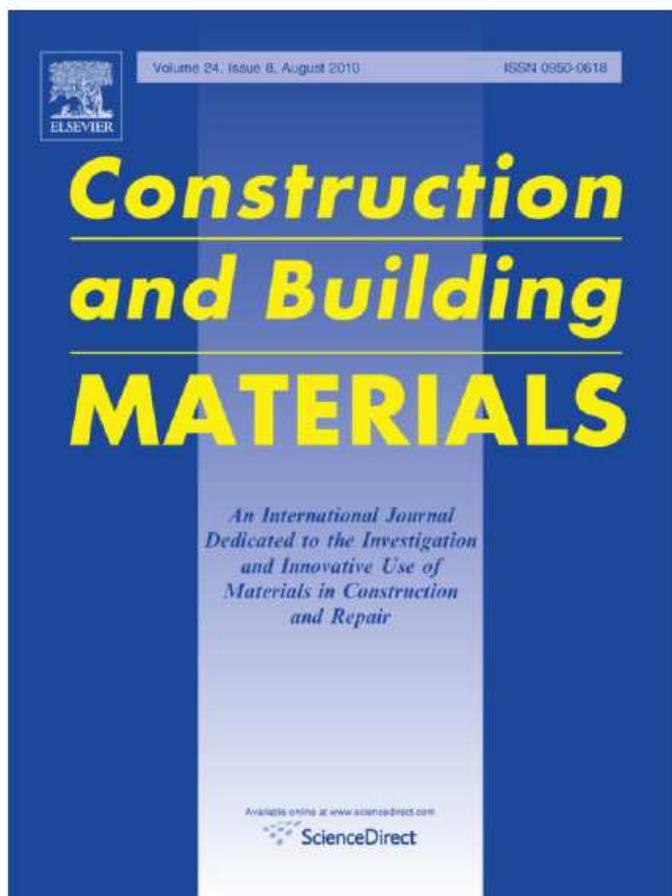
Figura A.23 – Resistências à compressão das argamassas

Observa-se que aos 7 dias a resistência aumentou com o aumento da quantidade de metacaulim até o teor de 15%, quando então passou a decrescer. Já aos 28 dias, o ponto referente a 15% apresentou queda brusca de resistência, resultando em valor menor até mesmo do que foi obtido aos 7 dias. Este comportamento não condiz com o esperado e pode ter sido ocasionado por problemas de moldagem, capeamento ou operação do equipamento de compressão. Com o teor de 20% houve uma recuperação da resistência obtida nos teores menores.

Assim, observa-se mais uma vez que há um limite de incorporação de metacaulim para que não haja prejuízos para a resistência à compressão. Para este estudo em argamassa, e para o tipo de metacaulim utilizado neste trabalho, este limite deve estar em torno dos 15% de substituição da massa de cimento.

APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete

Karoline A. Melo, Arnaldo M.P. Carneiro *

Department of Civil Engineering, Federal University of Pernambuco, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 November 2008

Received in revised form 2 February 2010

Accepted 2 February 2010

Available online 7 March 2010

Keywords:

Aggregates composition

Metakaolin

Paste

Self-consolidating concrete

ABSTRACT

Self-consolidating concrete is characterized by its high deformability or its capability of filling all the spaces without external forces, maintaining the stability, without segregation or blocking. SCC needs high content of fines, which could be mineral admixtures, superplasticizer and low content of aggregates with limited maximum dimensions. Present work intends to verify the effect of the finesses and content of Metakaolin in SCC properties with different paste volumes, at fresh and hardened states. Metakaolin was used at three different finesses and at 5% and 35% of substitution to cement mass. It was found that the superplasticizer consumption increased with higher finesses and content of Metakaolin. Increasing the paste volume, less superplasticizer was necessary. Better mixtures were obtained with the paste contents of 0.45 and 0.50, by total volume, which presented good cohesion and a reduced admixture consumption. However, for the compressive strength, a reduction occurred at high paste volumes.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Self-consolidating concrete (SCC) is a high performance material characterized by a high fluidity, or deformability, which leads to the complete filling of the formwork, without vibration. The use of SCC comes from the need to improve the structures' quality when it's difficult to consolidate the concrete. Besides the fluidity, SCC has to be proportioned for other properties, which are: resistance to segregation and resistance to the blockage at narrow spaces.

Due to the complex and differentiated properties, the self-compactability of the concrete is evaluated by specific test methods. The slump flow test indicates the deformability of the concrete; it consists in the measure of the flow diameter and uses the Abram's cone; the results should be from 600 mm to 800 mm [1–3]. The V-funnel test indicates the time that the mixture takes to flow through a funnel of rectangular sections; it simulates the blockage due to the reduction of the section.

The production of SCC is possible thanks to the diversity of new types of mineral and chemical admixtures. The composition of the concrete is an important factor that governs its final properties. Compared to a conventional concrete, SCC demands a high quantity of fines, that are constituted of cement and mineral admixtures. The fines give the stability, or viscosity, necessary to the mixture. This improvement in stability can also be obtained with the use of viscosity modifying admixtures (VMA), instead of the fines, but this may result in more expensive concrete.

In this paper Metakaolin is used as a mineral admixture. It consists of clay calcined at high temperatures –650–800 °C, resulting in a high finesses material with pozzolanic properties [4]. The advantages of the use of Metakaolin as mineral admixture in concretes and mortars are: improvements in workability, microstructure and compressive strength; reduction of the setting time; reduced permeability and autogeneous shrinkage; greater durability; control of alkali-aggregate reaction [5].

Other important components of SCC are the aggregates. The choice of these materials should be rigorous, because small variations in their characteristics can modify the final concrete properties. The main factors that should be controlled are the moisture, for the fine aggregate; and the maximum diameter and content of the coarse aggregate, which should be reduced to help avoid segregation and blockage.

An important point about the aggregates is their particle size distribution. Through the combination of different types of aggregates it is possible to obtain optimized particle size curves, improving the distribution of the grains and the voids filling. Aggregates with continuous particle distribution lead to the production of mixtures with reduced cementitious materials contents and water demand, reducing, consequently, problems related to shrinkage and crack.

Some methods are presented in the literature to obtain optimized particle size curves [2,6,7]. In present work, the procedure adopted proposes that the grain size distribution obey a geometric progression, by the expression presented in Eq. (1) [8].

$$A = 100 \cdot \left(\frac{1 - P_r}{1 - P_r^n} \right) \quad (1)$$

* Corresponding author. Tel.: +55 81 2126 8220; fax: +55 81 2126 8219.
E-mail address: amp@ufpe.br (A.M.P. Carneiro).

with A is the first term of the sum, it corresponds to the amount of material retained in the sieve of maximum opening; P_r , the ratio of mass retained between each sieve; n , the number of terms in geometric progression.

Regards to the chemical admixtures, the usage of a superplasticizer is indispensable to the SCC, since it guarantees the high fluidity. The viscosity modifying admixture can be adopted to help the mixture to reach the necessary viscosity, as cited above.

This paper presents a study of self-compacting mixtures using Metakaolin as mineral admixture, which is a common material at the region of study. This work is a first part of a research for SCC optimization, starting from pastes, using different mineral admixtures.

2. Materials and methods

2.1. Materials

The cement used was a Brazilian pozzolan composite type – CP II Z. Table 1 gives the characteristics of this cement. The mineral admixture used was the Metakaolin at three finesses classes, which are presented in Table 2. It can be seen that there is a great similarity between the Metakaolin F (fine) and N (normal), which are much finer than the third one – C (coarse). The particle size distribution and the binders' finesses were determined by a laser technique using the equipment Mastersizer 2000, in which the particle diameter is related to the diffraction angles of the rays. In Table 3 the characteristics of the Metakaolin are presented and its grading distribution is shown in Fig. 1. This material was incorporated into the mixture as replacement of cement mass.

The fine aggregate was a quartz sand with unit weight of 2620 kg/m³ when tested in accordance with NBRNM 52 [9]. The coarse aggregate used was two types of granitic gravels, a 9.5 and a 19 mm maximum particle diameter, and 2650 kg/m³ unit weight, according to NBRNM 53 [10]. The grain size distributions of the aggregates are in Fig. 2. The aggregates were used at dry state and their absorption coefficients were not considered.

Table 1

Characteristics of Portland cement used.

Loss of ignition – LOI,%	5.27
MgO,%	2.24
SO ₃ ,%	2.53
Pozzolans,%	12.09
Na ₂ O equivalent,%	1.29
Free CaO,%	1.47
Blaine specific surface, m ² /kg	385
Unit weight, kg/m ³	3080
Retained at 0.075 mm sieve (200 mesh),%	3.3
Retained at 0.044 mm sieve (325 mesh),%	13.7
Initial setting time, h:min	03:30
Final setting time, h:min	04:15

Table 2

Finesses of Metakaolin.

Metakaolin	Type of grinding	Specific surface area (m ² /kg)
Fine – F	Pendulum mill	758
Normal – N	Pendulum mill	743
Coarse – C	Hammer mill	419

Table 3

Characteristics of Metakaolin.

Retained at 0.075 mm sieve,%	<0.2
Retained at 0.044 mm sieve,%	<5.0
Unit weight, kg/m ³	2650
Color	Red
Stability	Stable
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ ,%	94.0
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ ,%	4.81
Loss of ignition – LOI,%	0.91

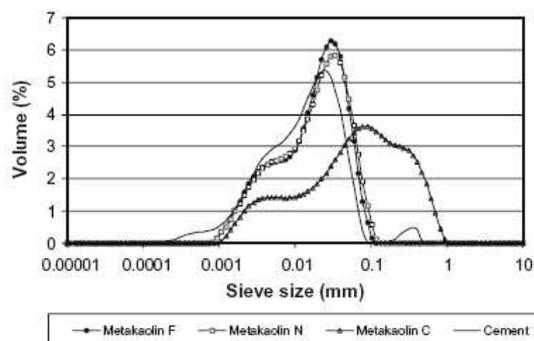


Fig. 1. Particle size distribution of cement and Metakaolin.

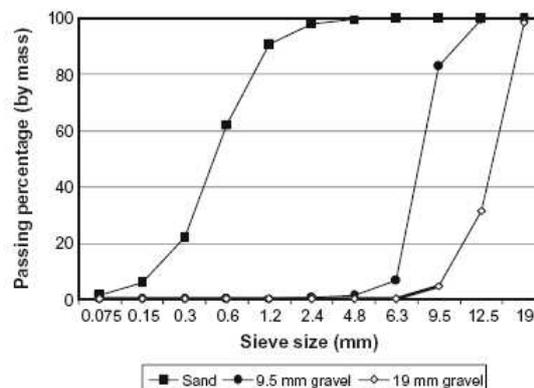


Fig. 2. Particle size distribution of aggregates.

A polycarboxylate based superplasticizer, with a solid content of 30%, was used to achieve the fluidity of the mixtures.

2.2. Aggregates composition

The aggregates were used as a grade composition. This way it was possible to obtain a good voids filling among the grains. The optimized curves were determined using the Eq. (1) [8]. From the particle size distribution of the sand and the two types of gravel, presented in Fig. 2, the P_r is varied and the curves are formed with the passing percentage.

As an example of the method adopted, Table 4 shows the composition determined for $P_r = 0.50$. The sieve sizes follow the normal series from NBRNM 248 [11], from 19 mm to 0.075 mm, resulting in eight sieve sizes intervals ($n = 8$ in Eq. (1)). For this case, the parameter A results in 50.20% of retained mass for the

Table 4

Example of aggregate composition for $P_r = 0.50$.

Sieve size (mm)	% Mass retained	% Accumulated mass retained	% Mass passing
19	0	0	100
9.8	50.20	50.20	49.80
4.8	25.10	75.25	24.71
2.4	12.55	87.84	12.16
1.2	6.27	94.12	5.88
0.6	3.14	97.25	2.75
0.3	1.57	98.82	1.18
0.15	0.78	99.61	0.39
0.075	0.39	100	0

Table 5
Mixture proportions of concretes with Metakaolin N.

Paste volume	Metakaolin (%)	Cement (kg/m ³)	Metakaolin (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	9.5 mm gravel (kg/m ³)	19 mm gravel (kg/m ³)	Water (L/m ³)
0.4	5	452	24	721	354	506	238
	35	246	133				265
0.45	5	509	27	661	325	464	268
	35	272	146				301
0.50	5	566	30	601	295	422	298
	35	302	163				335
0.55	5	622	33	541	266	380	327
	35	332	179				368

Table 6
% Passing of aggregates composition.

Sieve size (mm)	$P_r = 0.5$	$P_r = 0.6$	$P_r = 0.7$	$P_r = 0.75$	$P_r = 0.8$	$P_r = 0.85$	$P_r = 0.9$	$P_r = 0.95$	$P_r = 0.98$
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.8	49.80	59.32	68.16	72.22	75.97	79.38	82.44	85.14	86.60
4.8	24.71	34.91	45.88	51.38	56.74	61.86	66.64	71.03	73.47
2.4	12.16	20.26	30.28	35.76	41.36	46.96	52.42	57.63	60.59
1.2	5.88	11.47	19.36	24.04	29.06	34.30	39.62	44.89	47.98
0.6	2.75	6.20	11.72	15.25	19.21	23.53	28.10	32.79	35.62
0.3	1.18	3.04	6.37	8.65	11.34	14.39	17.73	21.29	23.51
0.15	0.39	1.14	2.62	3.71	5.04	6.61	8.40	10.37	11.63
0.075	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

maximum sieve size (9.8 mm). The other percentages of retained mass are calculated multiplying the antecedent percentage for P_r value. Then, the passing mass percentage is determined to generate the optimized composition.

Several ternary mixtures were defined among the aggregates, for which were determined some mixture proportion parameters presented in the literature for the production of SCC, as the ratios in volume: (fine aggregate)/(mortar) – V_{fa}/V_m , (coarse aggregate)/(total of aggregates) – V_{ca}/V_{ta} , (coarse aggregate)/(concrete) – V_{ca}/V_c . The definition of the ideal curve was based on the optimization of the grain sizes and in relation to the presented parameters.

2.3. Paste production

Before the concrete investigation, pastes mixtures were produced to provide some previous information about the mixtures behavior.

The pastes were composed of cement, Metakaolin, water and a superplasticizer. The replacement rates of cement by Metakaolin were 5% and 35%. These percentages were chosen for investigate a high range of mineral admixture content, although it was a pozzolan. The water–cementitious materials ratio (w/cm) and the saturation point of the superplasticizer were determined through the mini slump and Marsh cone tests. Additionally, it was possible to verify indirectly the rheological parameters on pastes – yield stress and viscosity.

Initially the w/cm was fixed in 0.5. However, it was observed through the tests that for the mixture with 35% of Metakaolin the paste presented high cohesion, and in this way the flow through the funnel was difficult, even when used a great amount of superplasticizer. As the objective was study the behavior of the Metakaolin, its content was maintained and this mixture was adjusted with the increase of water, resulting in a high w/cm of 0.7.

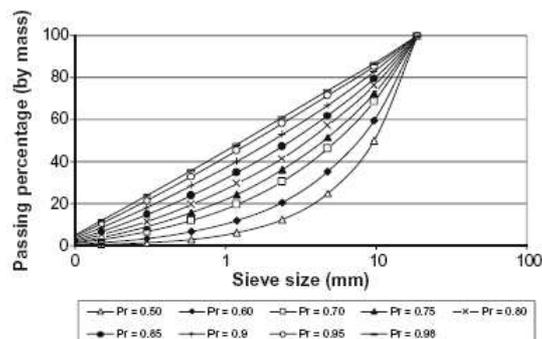


Fig. 3. Particle size distribution of aggregates compositions.

To obtain the saturation point of the superplasticizer, its content was varied according to the cement mass. A new paste was produced for each percentage of superplasticizer, because it does not recover its initial rheological state when submitted to an additional mixing time [12].

2.4. Concrete production

The concretes were produced with a paste volume of 40% ($V_p = 0.40$) of the total concrete volume. Only for the Metakaolin of medium finesses (N) the paste volume was varied at 0.45, 0.50 and 0.55. Thereby, the effects of amount and finesses of Metakaolin, and the paste volume on the concrete properties were measured. The concrete mixtures proportions in kg/m³ are presented in Table 5.

The amount of superplasticizer required was determined according to the fresh properties of concretes, through the slump flow and V-funnel tests. For a more coherent examination of the results, we tried to fix the diameters measured by slump flow in the interval of 600–650 mm, which was achieved for most of them. This test was chosen as reference because is more restrictive than the V-funnel.

The compressive strength was measured at 7 days and 56 days through cylindrical samples with 100 mm diameter × 200 mm height, according to NBR 5739 [13]. The samples were stored at under controlled humidity – 90%, and temperature -20 ± 1 °C.

3. Results

3.1. Aggregates composition

For each P_r value, it was calculated the passing mass percentages of the aggregates, similar to the presented in Table 4, in agree-

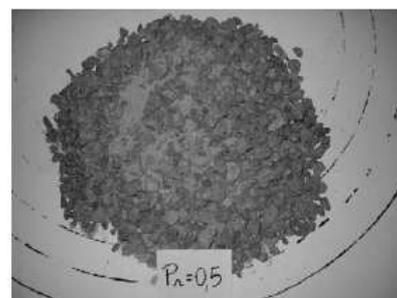


Fig. 4. Aggregates mixture for $P_r = 0.5$.

ment with the adopted methodology. Then, Table 6 was obtained and the curves of the aggregates mixtures were generated (Fig. 3).

To illustrate the distribution of aggregates, in Figs. 4–7 dry mixtures of ternary aggregates compositions (no water or cementitious materials) were reproduced to some P_r values. It is noticed that as larger the value of P_r , larger is the amount of sand in the mixture. In Fig. 4, which corresponds to $P_r = 0.5$, a great amount of gravel is observed, which confirms the non adaptation of this mixture for the production of SCC.



Fig. 5. Aggregates mixture for $P_r = 0.7$.

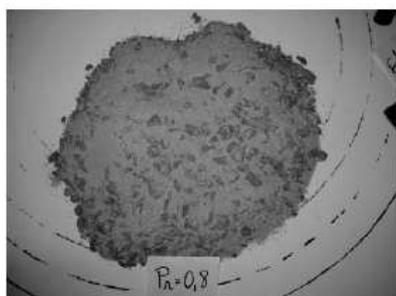


Fig. 6. Aggregates mixture for $P_r = 0.8$.

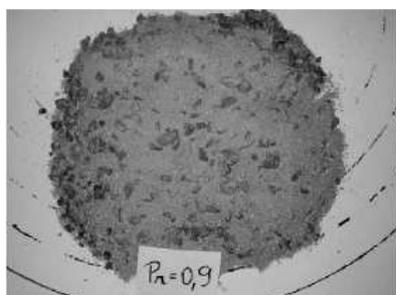


Fig. 7. Aggregates mixture for $P_r = 0.9$.

The mixture proportion parameters adopted for SCC for each aggregates composition, previously mentioned, were calculated with the intention of facilitate the choice of the ideal particle size distribution. The results are in Table 7. According to the literature [2,3,14], the acceptable values for these parameters are: $V_{ca}/V_{ta} = 0.5$, $V_{ca}/V_c = 0.28$ – 0.35 and $V_{fa}/V_m = 0.4$ – 0.5 . It can be seen in this table that the mixtures of $P_r = 0.70$ and 0.75 satisfactorily corresponded to the required conditions.

On account of higher values of P_r , the grain size distribution will be more continuous and the mixture will have larger compactness, however, a reduction of workability can occur [8]. With the results, it was decided to choose the composition of $P_r = 0.7$, since the mixture proportion parameters of SCC were reached without an excessive amount of coarse aggregate. The proportion of each material was then calculated:

- 19 mm diameter gravel: 100% less 68.16% = 31.84%;
- 9.5 mm diameter gravel: 68.16% less 45.88% = 22.28%;
- sand: 45.88%.

3.2. Pastes

For pastes with 5% and 35% of Metakaolin at the three classes of finesses, with w/cm of 0.5 and 0.7, respectively, the curves from mini slump and Marsh cone tests are observed in Figs. 8–10.

With the resultant curves it is possible to determine the saturation point of the admixture, since the diameter measured in mini slump and the flow time through the cone are not modified after the saturation point [12]. In the present work, it is observed that the curves of the mini slump follow an inverse tendency in relation to the time, but with smaller precision in the definition of the ideal superplasticizer percentage. For this reason, this parameter was obtained from the Marsh cone curves.

In Table 8 the saturation points are summarized for all pastes, and also the results of the tests in these points. It is observed that as higher the finesses of the Metakaolin higher was the superplasticizer consumption. When the mineral admixture content was of 5% (w/cm = 0.5), the saturation point was the same for all the finesses. However, when it was used 35% (w/cm = 0.7), it is clearly noticed that the variation of the superplasticizer consumption is a function of the finesses. In the pastes containing metakaolin C, the amount of chemical admixture was the same at all the percentage, which demonstrates that for this class of finesses, variations due to the content are not observed.

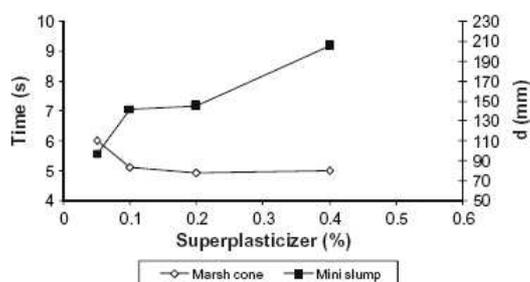
3.3. Self-consolidating concrete

The amount of superplasticizer obtained from the paste tests was not sufficient to promote the self-compactability of the concretes, and so an adjustment was made through the slump flow and V-funnel tests.

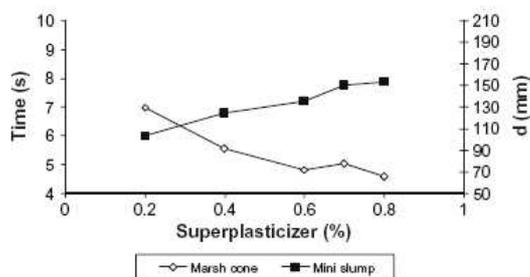
From Table 9, one can observe the characteristics of the mixtures with $V_p = 0.40$. As higher the content and higher the finesses of the Metakaolin, higher was the consumption of superplasticizer to reach similar results, especially from slump flow. Even in the mixtures that the diameters were not in the intended interval of

Table 7
Mixture proportion parameters to each aggregates composition.

	$P_r = 0.5$	$P_r = 0.6$	$P_r = 0.7$	$P_r = 0.75$	$P_r = 0.8$	$P_r = 0.85$	$P_r = 0.9$	$P_r = 0.95$	$P_r = 0.98$
V_{ca}/V_{ta}	0.752	0.650	0.541	0.486	0.432	0.381	0.333	0.289	0.265
V_{ca}/V_c	0.451	0.390	0.324	0.291	0.259	0.228	0.200	0.173	0.159
V_{fa}/V_m	0.270	0.343	0.407	0.435	0.459	0.481	0.499	0.515	0.524

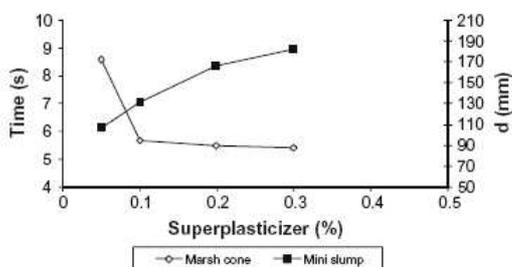


(a) Paste with 5% of metakaolin (w/cm=0.5)

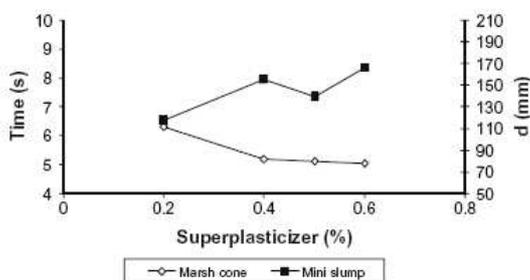


(b) Paste with 35% of metakaolin (w/cm=0.7)

Fig. 8. Results of pastes using Metakaolin F.



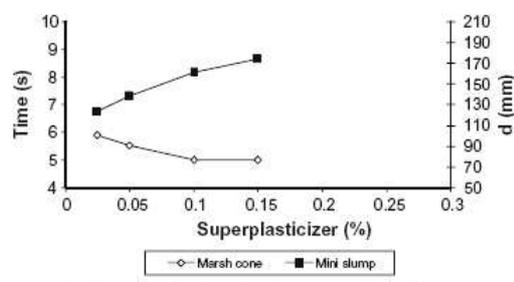
(a) Paste with 5% of metakaolin (w/cm=0.5)



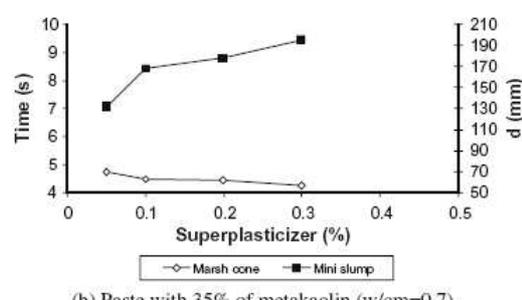
(b) Paste with 35% of metakaolin (w/cm=0.7)

Fig. 9. Results of pastes using Metakaolin N.

600–650 mm –5% C and 35% C, it was possible to observe the influence of the mineral admixture. The effect of the finesses was more expressive when using high content of Metakaolin.



(a) Paste with 5% of metakaolin (w/cm=0.5)



(b) Paste with 35% of metakaolin (w/cm=0.7)

Fig. 10. Results of pastes using Metakaolin C.

Table 8

Results of tests in pastes.

Metakaolin	Metakaolin (%)	w/cm	Superplasticizer (%cm) ^a	Mini slump (mm)	Time at marsh cone (s)
F	5	0.5	0.1	142.0	5.10
	35	0.7	0.6	135.5	4.83
N	5	0.5	0.1	132.0	5.69
	35	0.7	0.4	155.5	5.19
C	5	0.5	0.1	161.0	4.99
	35	0.7	0.1	168.5	4.50

^a Superplasticizer percentage by cement mass.

The concretes produced with Metakaolin N, where the paste volume was varied, can be analyzed in Table 10. Comparing the percentages of superplasticizer necessary to guarantee the self-compactability of the concretes, it is shown that there is a significant reduction with the increase in paste volume. This happens because the paste facilitates the rolling of the particles, increasing the concrete fluidity. The variation of the superplasticizer content in relation to paste volume is showed in Fig. 11.

To the end of a visual analysis, it is noticed that in concretes with lower amount of paste there are more homogeneity in the distribution of the components, while in mixtures of higher V_p exist an excess of paste around the aggregates. These results were more evident in mixtures with smaller amount of Metakaolin.

For the compressive strength of mixtures with $V_p = 0.40$, Fig. 12 illustrates the behavior observed at 7 days and 56 days. It is verified that the compressive strength decreased with the increase in Metakaolin amount. This can demonstrate that the percentage of 35% exceeded the limit of incorporation of this material to obtain improvements in the strength. Some studies show that the best result in the concrete is obtained when the cement is replaced by 10% of this admixture [15]. Another factor is the high w/cm of the mixtures with 35% of Metakaolin.

1534

K.A. Melo, A.M.P. Carneiro / Construction and Building Materials 24 (2010) 1529–1535

Table 9
Results of tests in concretes (to $V_p = 0.4$).

Metakaolin	Metakaolin (%)	w/cm	Superplasticizer		Slump flow (mm)	V-funnel (s)	fc 7d (MPa)	fc 56d (MPa)
			(%cm) ^a	(L/m ³) ^b				
F	5	0.5	0.38	5.2	630	6.39	34.3	38
	35	0.7	0.87	8.1	605	2.77	21.5	24
N	5	0.5	0.40	5.5	640	3.67	31.9	36
	35	0.7	0.74	6.9	600	2.83	18.9	21.6
C	5	0.5	0.37	5.1	730	6.29	29.8	41.4
	35	0.7	0.60	5.6	670	2.13	16.6	20.9

^a Superplasticizer percentage by cement mass.

^b Superplasticizer volume by m³ of concrete.

Table 10
Tests in SCC for different paste volumes for mixtures with Metakaolin N.

Paste volume	Metakaolin (%)	w/cm	Superplasticizer		Slump flow (mm)	V-funnel (s)	fc 7d (MPa)	fc 56d (MPa)
			(%cm) ^a	(L/m ³) ^b				
0.40	5	0.5	0.40	5.5	640	3.67	31.86	35.98
	35	0.7	0.74	6.9	600	2.83	18.93	21.63
0.45	5	0.5	0.18	2.9	620	2.47	26.62	34.07
	35	0.7	0.68	6.3	612.5	3.00	17.26	26.27
0.50	5	0.5	0.13	2.3	623	2.26	28.76	29.95
	35	0.7	0.47	4.3	610	2.15	19.47	21.63
0.55	5	0.5	0.11	2.0	760	1.69	22.77	31.57
	35	0.7	0.26	2.4	640	2.28	19.13	23.96

^a Superplasticizer percentage by cement mass.

^b Superplasticizer volume by m³ of concrete.

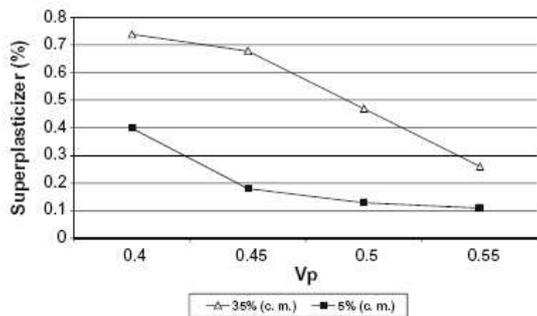


Fig. 11. Variation of superplasticizer content with paste volume for mixtures with Metakaolin N.

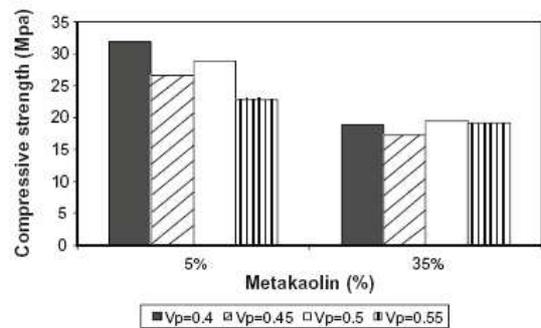


Fig. 13. Variation of compressive strength at 7 days with paste volume using Metakaolin N.

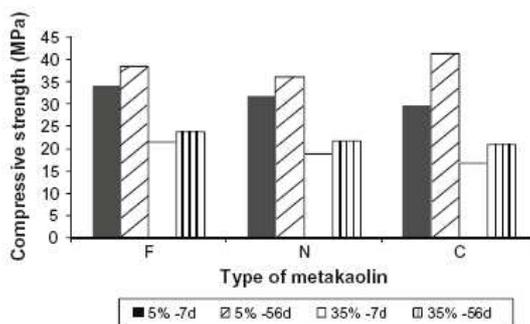


Fig. 12. Compressive strength at 7 days and 56 days for $V_p = 0.40$.

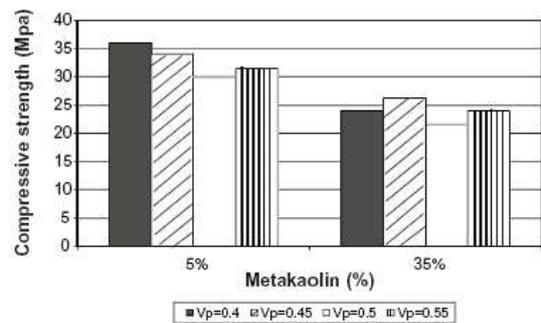


Fig. 14. Variation of compressive strength at 56 days with paste volume using Metakaolin N.

By way of 7 days, similar behavior was observed when the finesses was reduced. However, at 56 days the concrete with 5% of Metakaolin presented a little increase in compressive strength when using Metakaolin C.

It can be observed the compressive strength variation at 7 days and 56 days, in Figs. 13 and 14, as a function of the paste volume. There was a reduction tendency with the decrease of paste volume, main at 7 days and 5% of Metakaolin. This result agrees with the effect on homogeneity loss verified for the pastes with low Metakaolin content, especially when more paste was incorporated. For the content of 35% the mixtures presented more robustness for the paste variation.

4. Conclusions

From the results presented it is concluded that:

- Regardless of the Metakaolin finesses, as the Metakaolin content increased so did the requirement for more superplasticizer; this was observed in both the pastes and concretes.
- Lower the finesses of the Metakaolin, there was lower demand for superplasticizer to reach the properties of self-compactability.
- The influence of the finesses was more evident for the higher percentages of the Metakaolin.
- An increase in the paste volume improved the fluidity of the mixtures thus reducing the superplasticizer demand. It is important to highlight that, in spite of this improvement of the fresh properties, the paste volume should be just the amount necessary to fill the voids among the grains and still sufficient to involve them through a layer that facilitates the rolling.
- The compressive strength of concrete decreased with the increase in the Metakaolin amount (and w/cm) and with the reduction of its finesses, as well as with the increase of the paste volume, at the two studied ages.

In general, the use of Metakaolin in concrete can improve the viscosity of the mixture. This affects the consumption of superplasticizer and water, as confirmed. The Metakaolin's finesses is a very important factor to optimize the SCC production in terms of w/cm and superplasticizer content. On the other hand, the quantity of Metakaolin may be limited to prevent negative results for compressive strength and uneconomical mixtures (with high

consumption of superplasticizer, for example). Its important to highlight that the cost of the materials was not considered in this work.

Acknowledgments

Authors are thankful to FAPEAL – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas for its financial support to the research. Thanks to Votorantin Cement for the cement supply, to Grace for providing the superplasticizer, to Metafort for the Metakaolin supply and to Guarany Quarry for the aggregates.

References

- [1] Nunes Sandra Conceição Barbosa. Self-consolidating concrete: technology and properties. Doctoral Thesis in Civil Engineering Structures. University of Porto, Porto, Portugal; 2001. p. 198.
- [2] Gomes Paulo César Correia. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Doctoral Thesis in Civil Engineering. Polytechnic University of Cataluña, Cataluña, Spain; 2002. p. 139.
- [3] EFNARC. Specifications and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, United Kingdom; 2002. p. 32.
- [4] Pera Jean. Metakaolin and calcined clays – guest editorial. *Cem Concr Compos* 2001;23(6).
- [5] Rojas Moisés Frías, Cabrera Joseph. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of Metakaolin–lime–water systems. *Cem Concr Res* 2002;32(1):133–8.
- [6] Brouwers HJH, Radix HJ. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. *Cem Concr Res* 2005;35(11):2116–36.
- [7] Jamkar SS, Rao CBK. Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. *Cem Concr Res* 2004;34(11):2021–7.
- [8] Carneiro Amaldo Manoel Pereira. Contribution to the study of the aggregate effect on the properties of mortars composed from grading curves. Doctoral Thesis in Civil Engineering, University of São Paulo, São Paulo, Brazil; 1999. p. 170.
- [9] NBRNM 52. Fine aggregate – determination of unit weight and apparent unit weight. ABNT, Rio de Janeiro, Brazil; July 2003.
- [10] NBRNM 53. Coarse aggregate – determination of unit weight, apparent unit weight and water absorption. ABNT, Rio de Janeiro, Brazil; July 2003.
- [11] NBRNM 248. Aggregates – determination of grade composition. ABNT, Rio de Janeiro, Brazil; July 2003.
- [12] Schwartzentruber L D'Aloia, Roy R Le, Cordin J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self compacting concrete (SCC). *Cem Concr Res* 2006;36(7):1203–13.
- [13] NBR 5739. Concrete – compressive strength of cylindrical samples. ABNT, Rio de Janeiro, Brazil; July 1994.
- [14] Okamura H. Self-compacting high performance concrete. *Concr Int* 1997;19(7):50–4.
- [15] Li Zongjin, Ding Zhu. Property improvement of Portland cement by incorporating with Metakaolin and slag. *Cem Concr Res* 2003;33(4):579–84.

APÊNDICE D – CURVAS DE TEOR DE SATURAÇÃO DO ADITIVO NAS PASTAS

A seguir estão ilustradas as curvas obtidas nas pastas por meio dos ensaios de Cone de Marsh e espalhamento (*mini-slump*) para definição do teor de saturação do aditivo superplastificante.

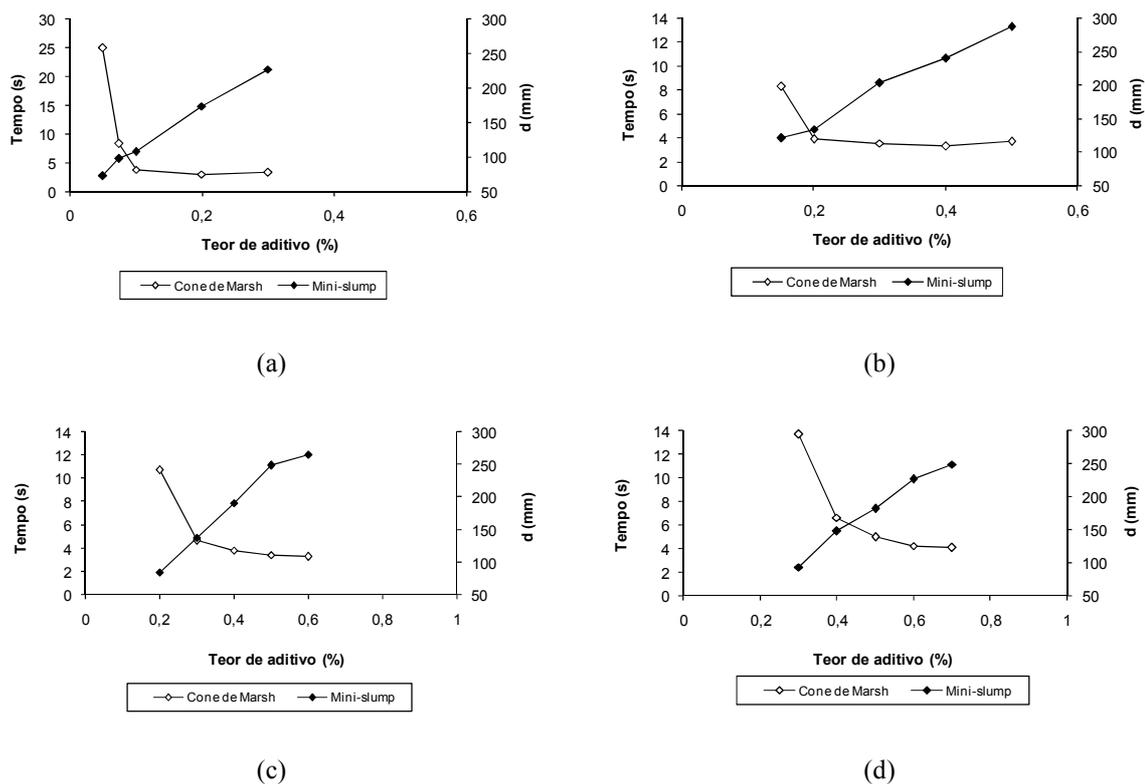


Figura A.24 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MF-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

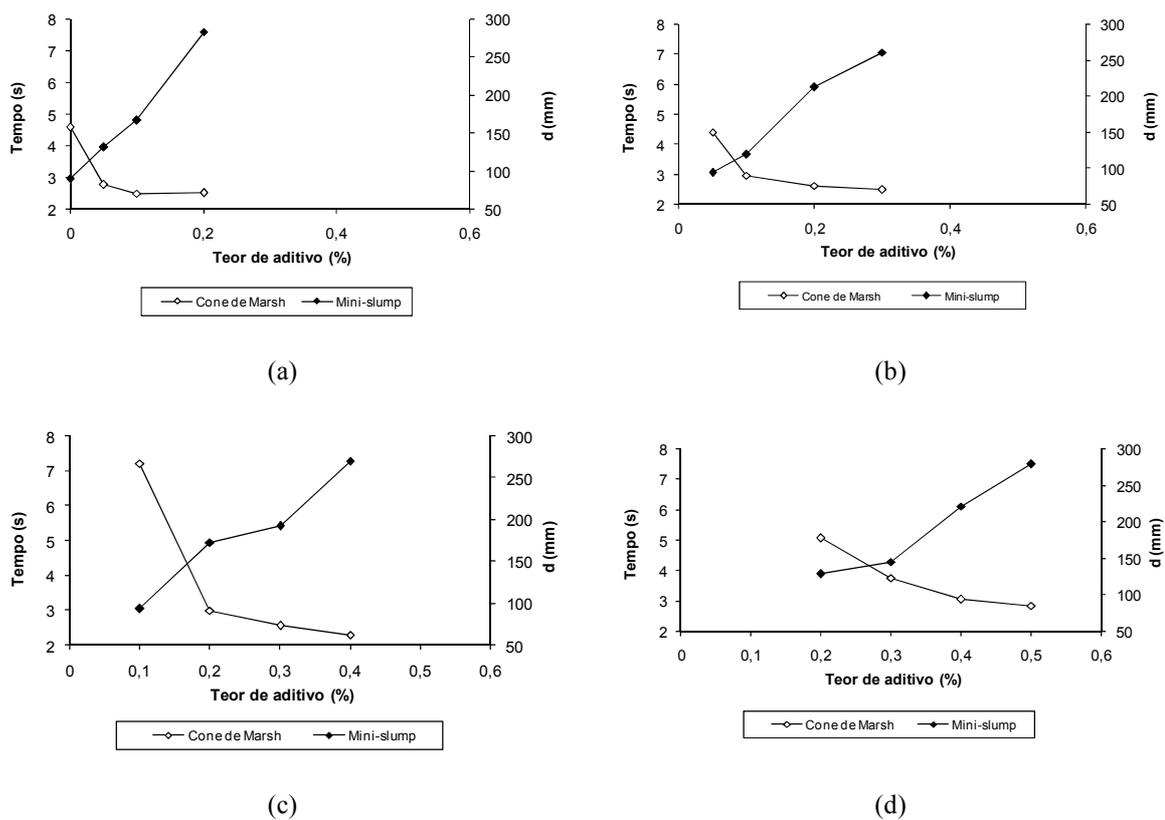


Figura A.25 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MF-0,5: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

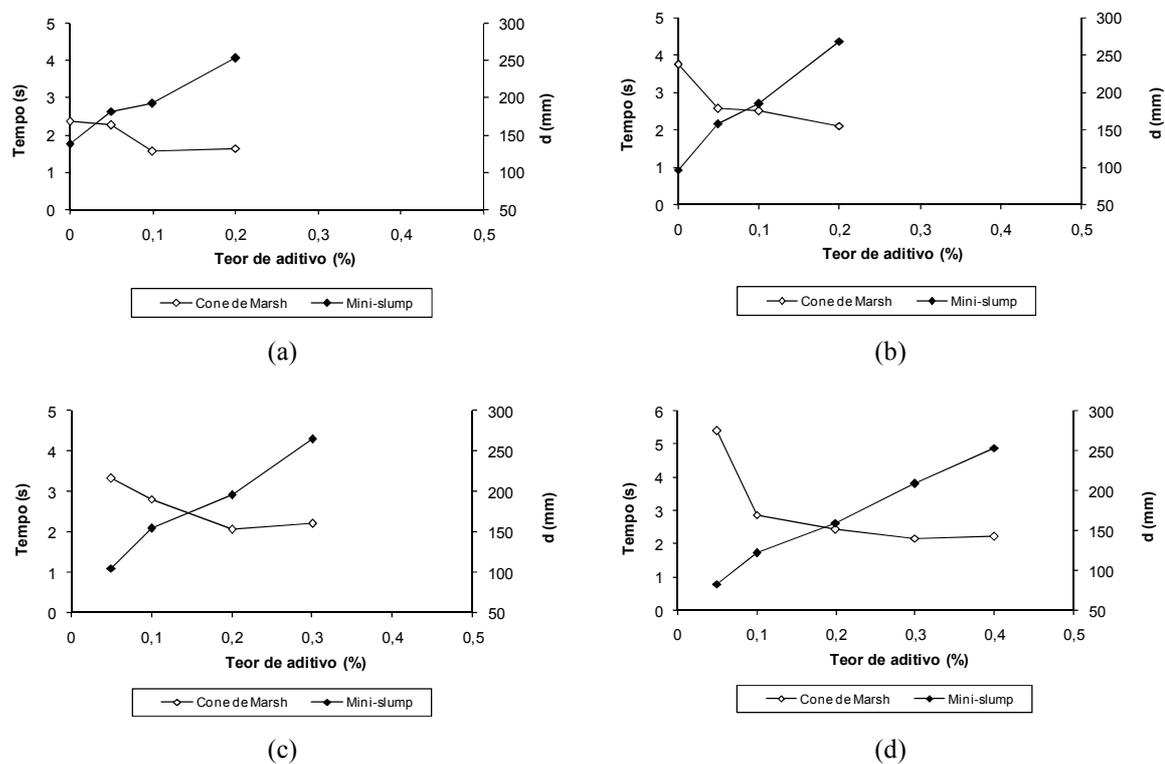


Figura A.26 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MF-0,6: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

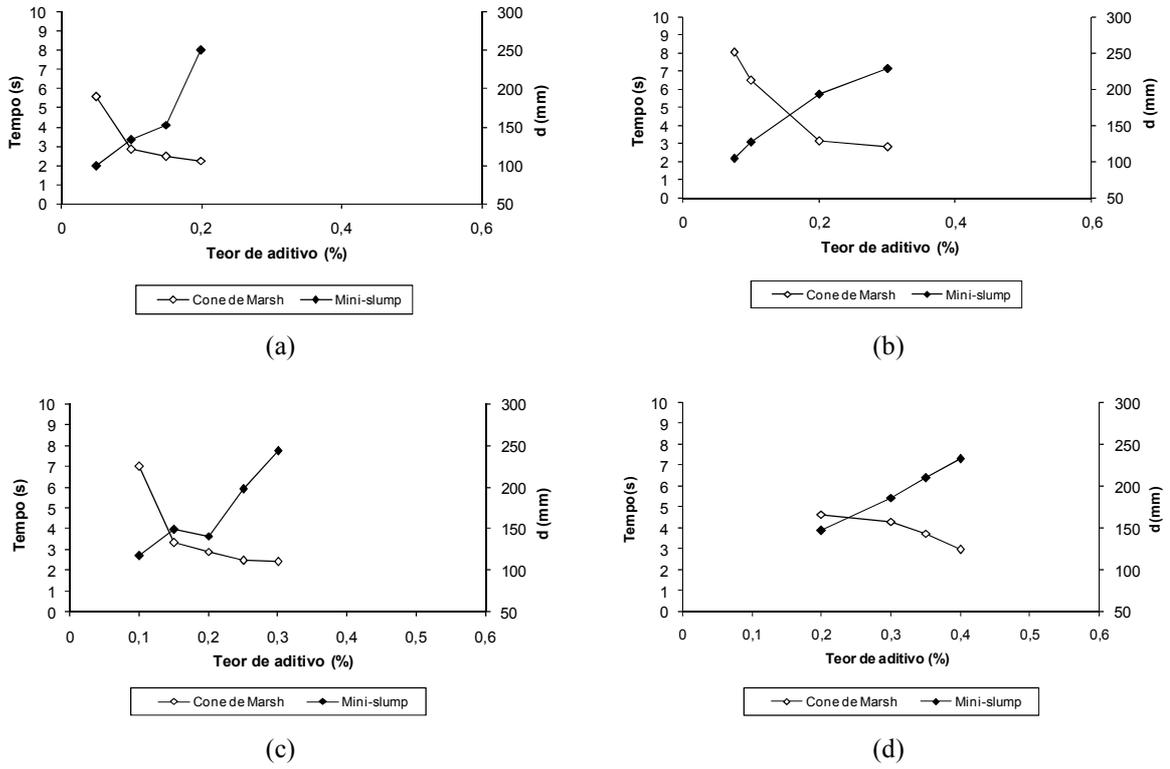


Figura A.27 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MG-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

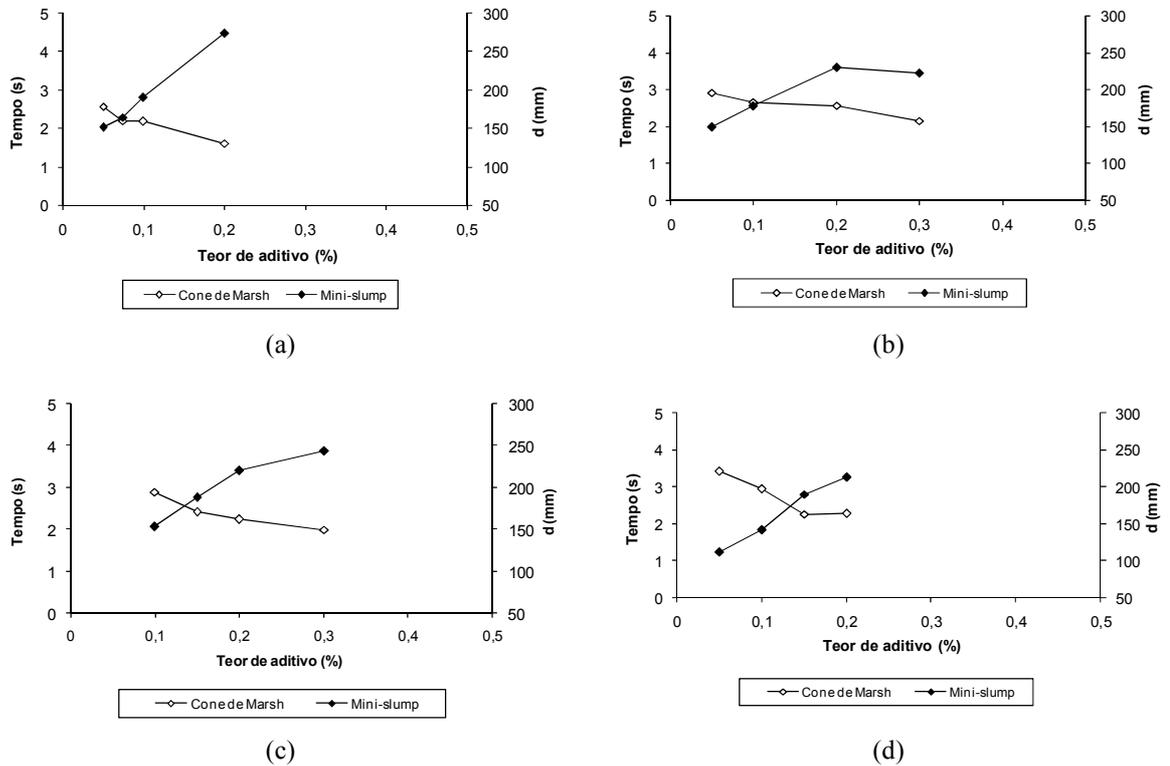


Figura A.28 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MG-0,5: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

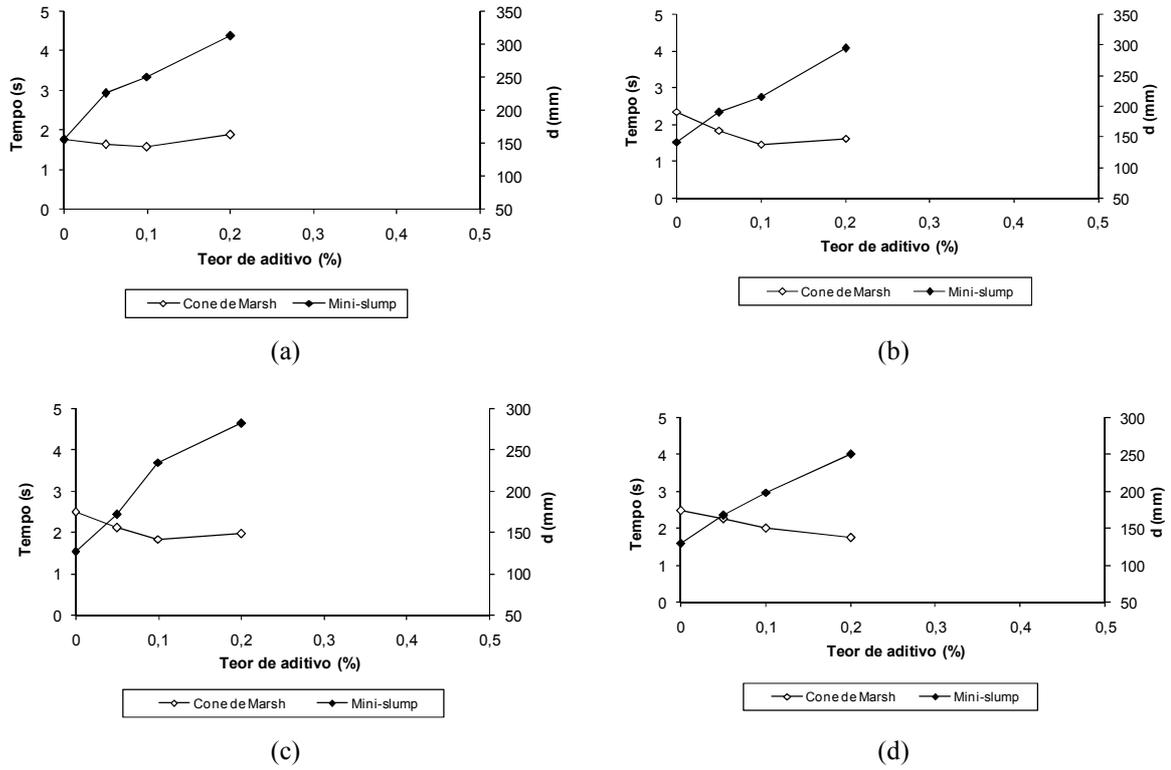


Figura A.29 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas MG-0,6: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

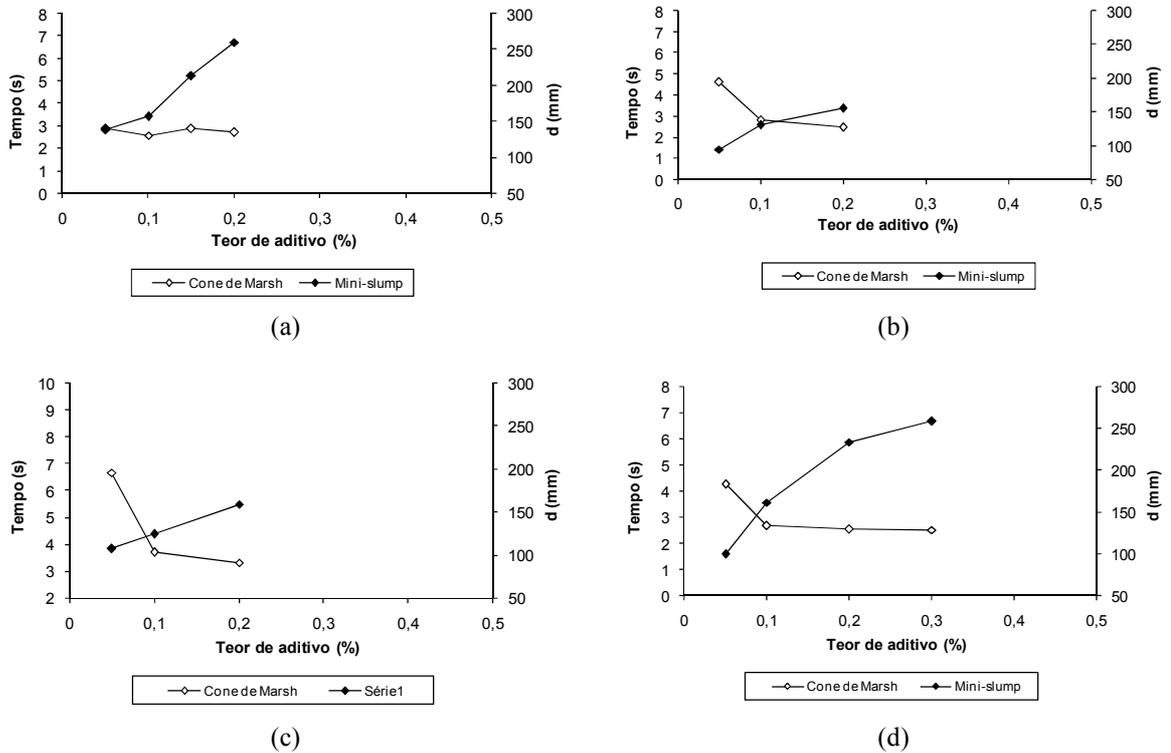


Figura A.30 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CF-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

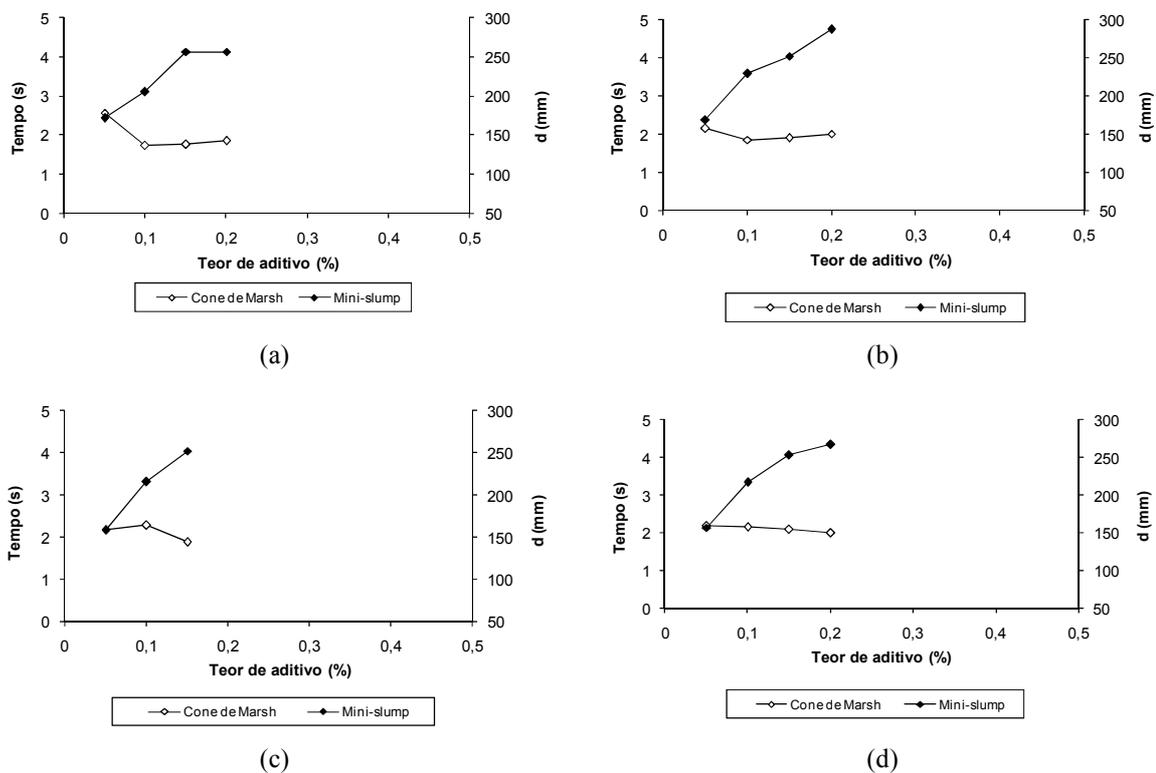


Figura A.31 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CF-0,5: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

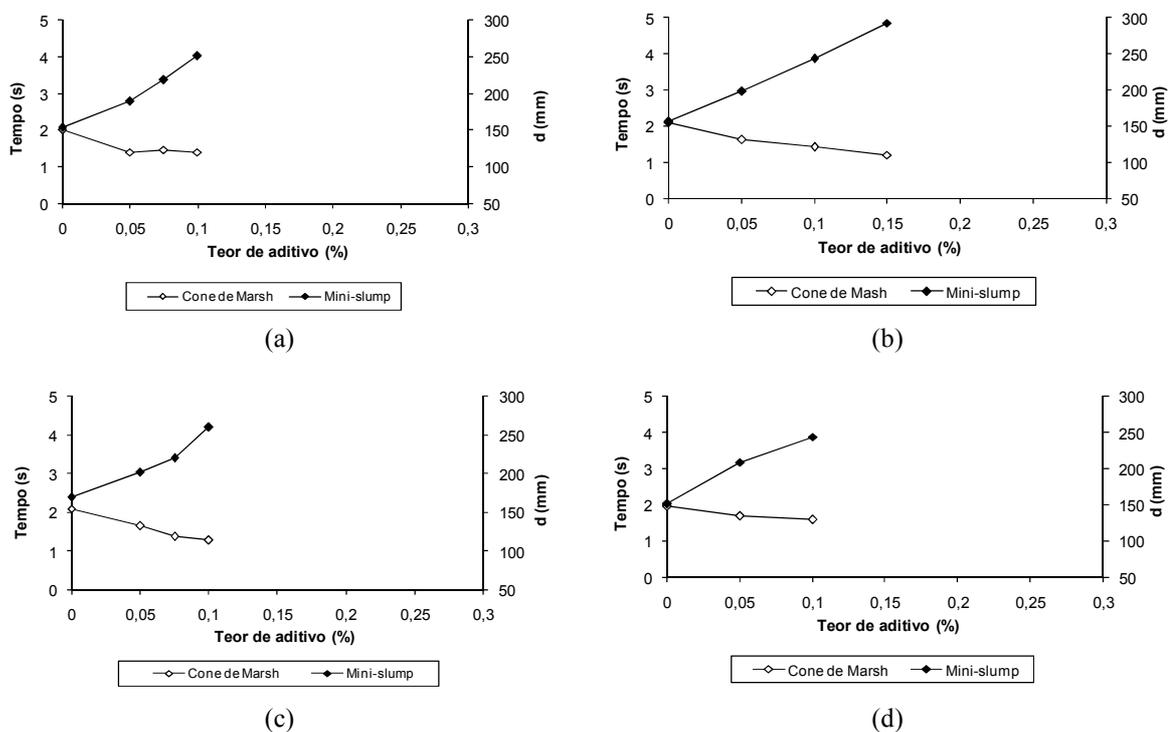


Figura A.32 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CF-0,6: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

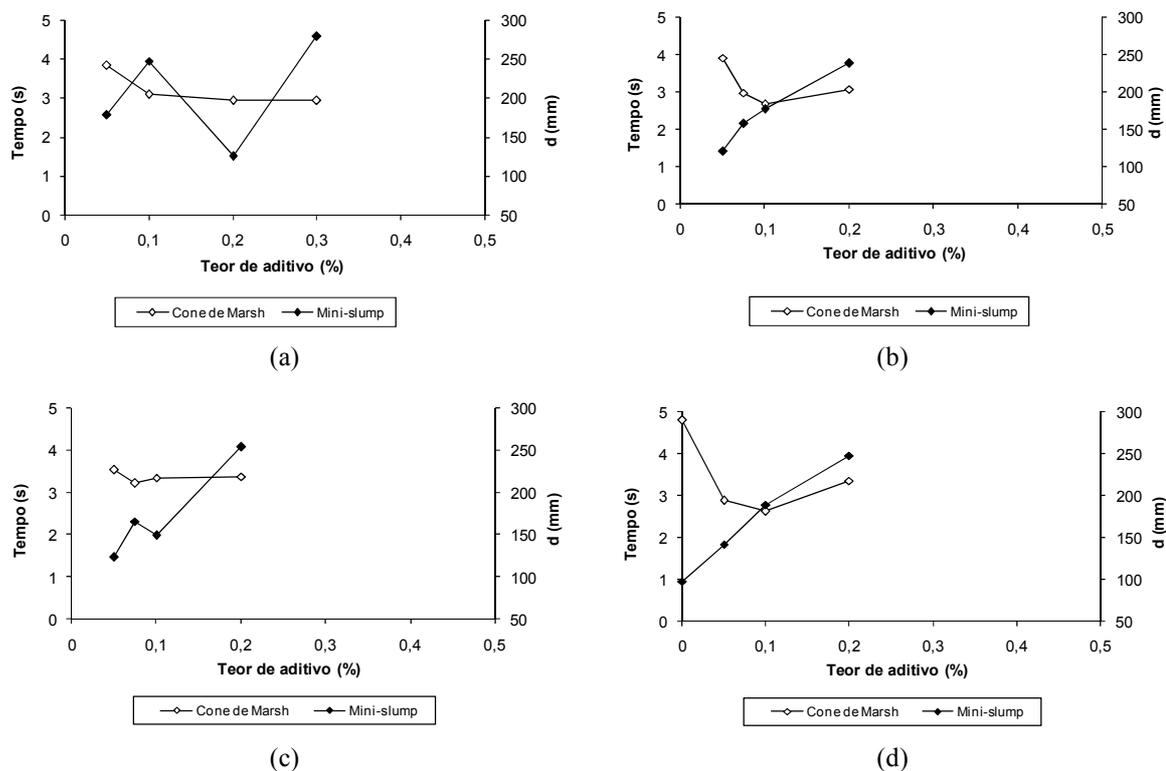


Figura A.33 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CG-0,4: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

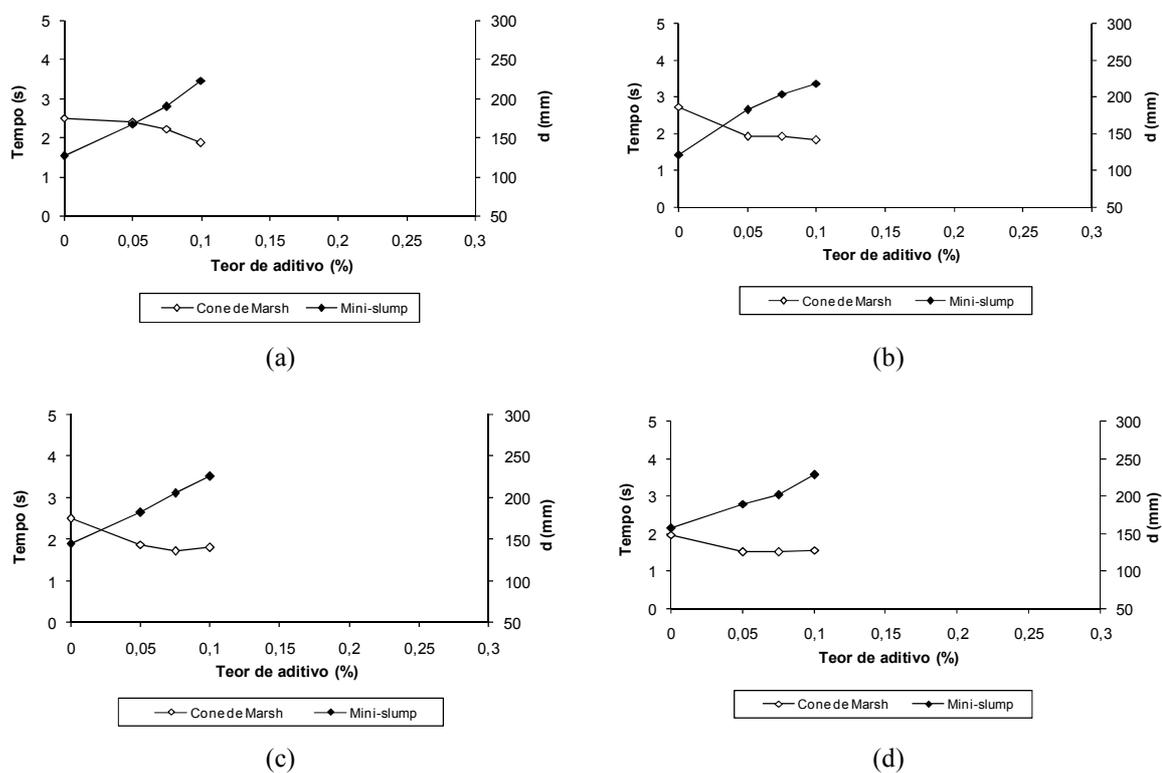


Figura A.34 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CG-0,5: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%

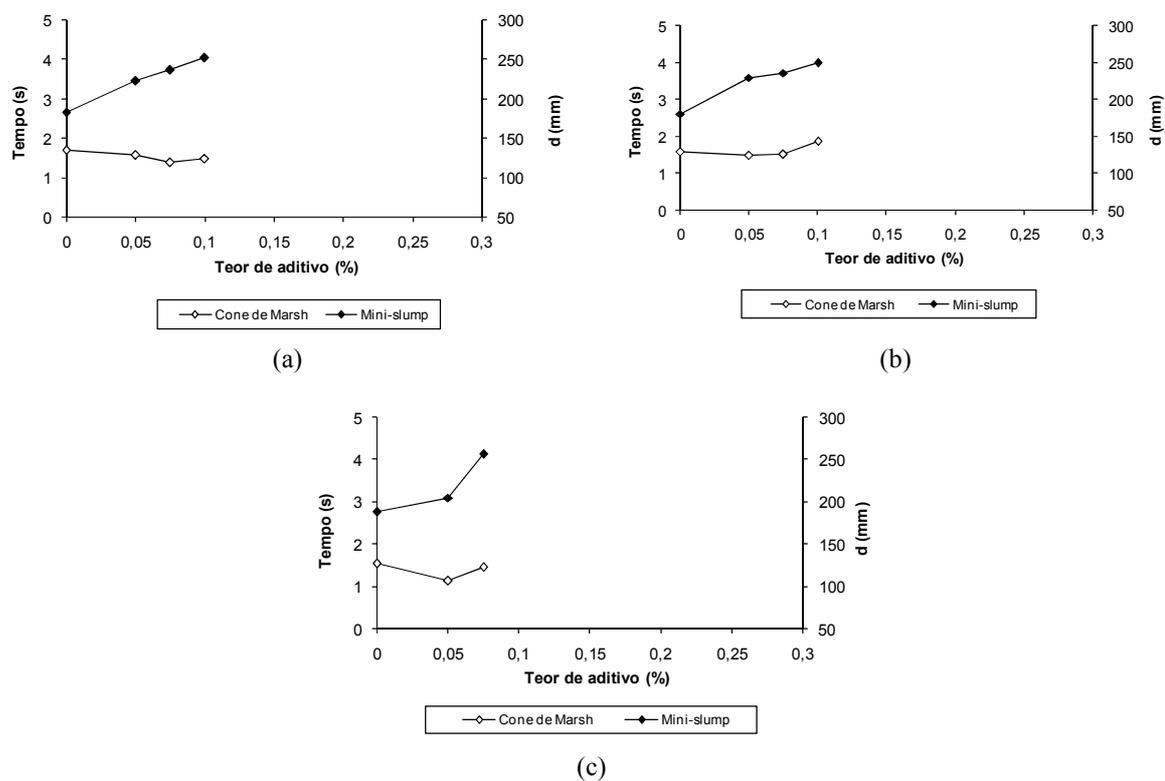


Figura A.35 – Curvas de saturação dos aditivos nas pastas CG-0,6: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)