



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

NAYARA SOARES KLEIN

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL
PELA AREIA DE BRITAGEM NO COMPORTAMENTO DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

Londrina
2008

NAYARA SOARES KLEIN

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL
PELA AREIA DE BRITAGEM NO COMPORTAMENTO DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientadora: Profª. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari.

Londrina
2008

**Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

K64i Klein, Nayara Soares.

Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável / Nayara Soares Klein. – Londrina, 2008.
xvii, 155f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles Carbonari.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2008.

Bibliografia: f. 145-155.

1. Concreto auto-adensável – Construção – Teses. 2. Argamassa auto-adensável – Construção – Teses. 3. Concreto – Areia de britagem – Teses. I. Carbonari, Berenice Martins Toralles. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 691.32

NAYARA SOARES KLEIN

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL
PELA AREIA DE BRITAGEM NO COMPORTAMENTO DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Berenice M. Toralles Carbonari
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette
Universidade Federal de Santa Catarina

Londrina, 31 de março de 2008.

“Para ser sábio, é preciso primeiro temer a

Deus, o Senhor.”

Pv 1:7 - NTLH

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a meu Senhor Deus, meu Pai. Pelo amor, pela vida, pelo raciocínio, pela força e pelo caráter. Por guiar os meus passos até o presente momento, me coloco diante de Ti em agradecimento, meu Pai, dando-lhe graças juntamente a Jesus Cristo e ao Espírito Santo.

Aos meus pais, Maria Cândida e João Carlos, agradeço pelo amor, pela educação e pelo exemplo de força e honestidade, fundamentais à minha vida e responsáveis pela perseverança manifestada em mim ao longo de todo o meu caminho. Agradeço ao meu irmão, Jackson, pela paciência, pela cumplicidade e pela alegria capaz de transformar o pior dos problemas em gargalhadas.

Agradeço à professora Berenice Toralles Carbonari, pela amizade, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e pela confiança em minha capacidade de realização deste trabalho, assim como de trabalhos futuros.

Aos meus familiares, agradeço pelas orações. Em especial, aos meus tios, Francisco e Rosa, agradeço por acolherem-me em sua casa e por me dedicarem respeito e muito carinho.

Pelo apoio nos momentos difíceis, pelo constante incentivo, pela prontidão, e pela convivência ao longo dos últimos dois anos, agradeço as amigas: Francielle, Janaína, Ana Carolina, Thamara e Danielle. Vocês me mostraram que os laços de sangue não são necessários à formação de uma família, mas sim o amor e a compreensão.

Aos professores, Wellington Longuini Repette e Vicente Coney Campiteli, agradeço pelas críticas, sempre construtivas, e pelas sugestões expressas no exame de qualificação, para melhor desenvolvimento deste estudo.

Por toda a ajuda conferida durante a realização dos ensaios que integram o programa experimental, agradeço ao professor Francisco Morato Leite, ao técnico do laboratório de materiais de construção da UEL, senhor Anselmo Borges, ao engenheiro civil Roger Guizilini e aos alunos de graduação Caio Cezar Catiste Silva, Jairo Makoto Doi, José Gustavo Macedo,

Mauro Sérgio Pinheiro Lima, João Lucas Móvio, Luiz Cláudio Carvalho Júnior, Renan Cesar de Souza, Saulo Pandini e Wellington Bortoli Araújo.

À Plaenge empreendimentos, por meio do engenheiro Paulo Duarte, pela doação do cimento Portland.

Às pedreiras: Ica, Expressa, Urbalon e Guaravera, pela doação dos agregados.

Ao senhor Jefferson Carollo, da empresa Basf, pela doação do aditivo superplastificante.

Ao senhor Carlos Sanches Gomes, da empresa Concretol, pela doação da cinza volante.

Ao senhor Cláudio Cunha, da empresa Rio Pardo Indústria e Comércio de Resíduos Industriais Ltda, pela doação da escória granulada de alto forno.

KLEIN, Nayara Soares. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

RESUMO

O presente estudo busca avaliar os efeitos da substituição da areia natural pela areia de britagem, no concreto auto-adensável (CAA). A areia natural, comumente utilizada em concretos, vem se tornando cada vez mais escassa, devido ao esgotamento das jazidas localizadas próximas aos grandes centros de consumo, assim como às restrições impostas pelos órgãos de fiscalização ambiental para a extração deste material. A areia de britagem, então, passa a ser uma alternativa à utilização da areia natural em concretos, porém, esta areia é um material que produz diferentes efeitos ao concreto, quando comparada à areia natural. Para análise dos efeitos da areia de britagem no CAA, no estado fresco e endurecido, o presente estudo foi dividido em etapas, sendo estas: pasta, argamassa e concreto. Foram realizados ensaios para verificação das propriedades do CAA, no estado fresco e endurecido. Buscou-se avaliar, primeiramente, um concreto produzido somente com areia natural – sendo considerado parâmetro de referência. Após isso, substituiu-se a areia natural pela areia de britagem, sendo os resultados obtidos comparados com a referência. Analisou-se, também, o efeito da substituição de porcentagens da areia natural. Buscou-se observar, durante o estudo, a relação existente entre a auto-adensabilidade apresentada por argamassas e concretos. Os concretos estudados consideram consumos de cimento entre 300 e 380 kg/m³ e resistência à compressão, aos 28 dias, maiores que 30 MPa. Os resultados obtidos mostram que, para a areia de britagem utilizada, é viável, tecnicamente, a substituição da areia natural, em concreto auto-adensável (CAA), na proporção de 30% de areia de britagem, em relação ao agregado miúdo total. No estado endurecido, observou-se aumento da massa específica e resistência mecânica – compressão e tração – para concretos com 15% de cinza volante como adição mineral. A análise comparativa entre argamassas e concretos auto-adensáveis, mostra que o estudo em argamassa é válido para a definição de parâmetros iniciais para a produção do concreto.

Palavras-chave: Areia de britagem. Concreto auto-adensável. Argamassa auto-adensável.

KLEIN, Nayara Soares. **Influence of the substitution of natural sand by artificial sand on the behavior of self-compacting concrete.** 2008. 167p. Dissertation (Master Degree on Building Engineering and Sanitation) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

ABSTRACT

This study has the purpose of evaluate the effects of the substitution of natural sand by artificial sand, in self-compacting concrete (SCC). The natural sand, which is a usual component of concretes, has becoming more and more rare due to the deplete of deposits located close to the huge urban centers, as well as the extraction's restrictions imposed by environmental organizations. Therefore, the artificial sand becomes an alternative for the use of natural sand in concretes, even though this sand produces different effects on concrete than those caused by natural sand. To analyze the effects of artificial sand on SCC, on fresh and hardened states, the study was shared on steps: paste, mortar and concrete. Tests to verify the properties of SCC were performed on fresh and hardened states. Firstly, the evaluation of SCC produced only with natural sand was held, being considered a reference parameter. After that, the substitution of natural by artificial sand was made, being the results compared with the reference. It was also analyzed the effect of the substitution of percentages of natural sand. The relation between self-compactability of mortars and concretes were observed. All the concretes produced had a consumption of cement between 300 e 380 kg/m³ and compressive strength, at 28 days, higher than 30 MPa. The obtained results show that, considering the artificial sand used, it is possible the substitution of 30% of natural sand, in SCC, by artificial sand. At the hardened state, an increase on density and mechanical strength was verified to concretes with 15% of fly ash as mineral admixture. A comparative analysis between self-compacting mortars and concretes allowed the conclusion that the study on mortars is worth to define initial parameters to concrete production.

Keywords: Artificial sand. Self-compacting concrete. Self-compacting mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado miúdo	38
Figura 02 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado graúdo	39
Figura 03 – Classificação do grau de arredondamento dos agregados, segundo SHEPARD e PAWERS, 1953 (Fonte: SUGUIO, 1980)	40
Figura 04 – Britador de impacto de eixo vertical, ou VSI – <i>vertical shaft impactors</i>	43
Figura 05 – Mecanismo de ação dos aditivos superplastificantes – repulsão eletrostática (Fonte: AÏTCIN, 2000)	46
Figura 06 – Mecanismo de ação dos aditivos superplastificantes – repulsão estérica (Fonte: AÏTCIN, 2000).....	46
Figura 07 – Esquema de representação da deformação de um fluido: força aplicada – tensão de escoamento inicial – e relação entre força aplicada e gradiente de velocidade – viscosidade (Fonte: adaptado de FERRARIS, 1999).....	51
Figura 08 – Modelo de Bingham (Fonte: adaptado de FERRARIS, 1999).....	52
Figura 09 – Comportamento reológico de diferentes tipos de concreto (NUNES, 2001).....	53
Figura 10 – Comportamentos reológicos de diferentes tipos de fluidos (adaptado de BARTOS, 1992 apud FERRARIS, 1999)	53
Figura 11 – Esquema de representação do reômetro de dois pontos de Tattersal (Fonte: adaptado de FERRARIS, 1999).....	55
Figura 12 – BTRHEOM, desenvolvido na França (Fonte: HU; DE LARRARD, 1995).....	56
Figura 13 – Comparação entre concretos que apresentam apenas um dos parâmetros reológicos idênticos. (a) Tensão de escoamento igual e viscosidade plástica diferente; (b) Viscosidade plástica igual e tensão de escoamento inicial diferente (Fonte: adaptado de FERRARIS, 1999).....	57
Figura 14 – (a) Ensaio de <i>slump flow</i> ; (b) Ensaio de funil em V, ambos para argamassas (Fonte: adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003)	58

Figura 15 – Equipamento utilizado no ensaio de <i>slump flow</i> do CAA (Fonte: adaptado de FURNAS, 2004a).....	59
Figura 16 – Anel japonês	61
Figura 17 – Funil em V de seção retangular (Fonte: adaptado de FURNAS, 2004b).....	62
Figura 18 – (a) Caixa em L; (b) Esquema de ensaio para caixa em L, vista lateral (Fonte: adaptado de FURNAS, 2004c)	64
Figura 19 – Comparação entre as proporções de materiais utilizados no CAA e em concretos convencionais (Fonte: adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003)	69
Figura 20 – Esquema do método utilizado por Okamura e Ozawa para obtenção da auto-adensabilidade (Fonte: adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003).....	69
Figura 21 – Fluxograma do método de dosagem Repette-Melo (Fonte: MELO, 2005).....	72
Figura 22 – Areia natural A1. Grãos de dimensão 2,4mm.....	77
Figura 23 – Curvas granulométricas das areias naturais – enquadramento nas faixas dadas pela NBR 7211/2005	78
Figura 24 – Curvas granulométricas das areias naturais – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.....	79
Figura 25 – Curvas granulométricas para as areias de britagem – enquadramento nas faixas dadas pela NBR 7211/2005	81
Figura 26 – Curvas granulométricas para as areias de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.....	82
Figura 27 – Mesa de consistência, para ensaio em argamassas. O cone em questão apresenta dimensões descritas no item 2.3.2.....	83
Figura 28 – Resultados de espalhamento das argamassas – tempo para atingir o diâmetro de 250 mm.....	85
Figura 29 – Resultados de espalhamento de argamassas – espalhamento final.....	86
Figura 30 – Curva granulométrica da areia de britagem.....	88
Figura 31 – Areia de britagem – grãos de dimensão 2,4mm	89
Figura 32 – Curvas granulométricas das combinações binárias de areia natural e areia de britagem – enquadramento nas faixas propostas pela NBR 7211/2005	90

Figura 33 – Curvas granulométricas das combinações binárias de areia natural e areia de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo	91
Figura 34 – Curvas granulométricas da brita ½ e 0	93
Figura 35 – Ensaio de compacidade – resultados comparativos de massa unitária e índice de vazios.....	95
Figura 36 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante	109
Figura 37 – Ensaio de <i>slump flow</i> e funil em V – argamassas com parâmetros ajustados	116
Figura 38 – Ensaio de caixa em L, verificação de exsudação e segregação do agregado graúdo, para concreto com 25% de cinza volante, combinação 30-70% de areia natural A2 e areia de britagem	120
Figura 39 – Curvas granulométricas da areia natural e das composições 50-50 e 70-30% de areia natural e areia de britagem – enquadramento nas faixas propostas pela NBR 7211/2005	122
Figura 40 – Curvas granulométricas da areia natural e das composições 50-50 e 70-30% de areia natural e areia de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.....	122
Figura 41 – Ensaio de caixa em L, verificação da retenção do agregado graúdo nas barras de armaduras, para concreto com 15% de cinza volante, composição 50-50% de areia natural e areia de britagem	125
Figura 42 – Ensaio realizados em concreto, para a composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.....	127
Figura 43 – Ensaio de caixa em L, verificação do nivelamento adequado, para concreto com 25% de escória de alto forno, composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.....	129
Figura 44 – Ensaio de massa específica, para o concreto com 25% de escória de alto forno, composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.....	130
Figura 45 – Equipamento utilizado na medição do ar incorporado ao concreto.....	131
Figura 46 – Equipamento PUNDIT, utilizado na verificação da homogeneidade do CAA.....	132
Figura 47 – Corpos-de-prova rompidos à tração, por compressão diametral, com 15% de cinza volante, (a) 100% areia natural; (b) 30% areia de britagem.....	133

Figura 48 – Corpos-de-prova rompidos à tração, por compressão diametral, com 25% de escória de alto forno, (a) 100% areia natural; (b) 30% areia de britagem	133
Figura 49 – Evolução da resistência à compressão com o tempo, para os concretos com 15% de cinza volante.....	135
Figura 50 – Evolução da resistência à compressão com o tempo, para os concretos com 25% de escória de alto forno	137
Figura 51 – Ensaio de resistência à compressão do CAA.....	138
Figura 52 – Ensaio de resistência à tração do CAA.....	139
Figura 53 – Ensaio de resistência à tração do CAA, após ruptura.....	140
Figura 54 – Comparação entre os módulos de deformação, obtidos pela determinação da tangente, para os modelos apresentados.....	143
Figura 55 – Ensaio de módulo de deformação do CAA	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Compostos químicos presentes no cimento Portland e na escória de alto forno	33
Tabela 02 – Propriedades e mecanismos que as governam o CAA, no estado fresco	50
Tabela 03 – Efeitos de diferentes materiais sobre a reologia das argamassas.....	54
Tabela 04 – Classes de <i>slump flow</i> e viscosidade considerando T ₅₀	59
Tabela 05 – Dimensões do funil em V	62
Tabela 06 – Classes de avaliação da viscosidade, considerando funil em V	63
Tabela 07 – Classes de avaliação da habilidade de passagem, considerando h ₂ /h ₁	64
Tabela 08 – Limites de aceitação para CAA (Fonte: MELO, 2005).....	71
Tabela 09 – Composição química do cimento Portland CP V ARI RS	74
Tabela 10 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS	74
Tabela 11 – Características químicas do cimento Portland CP V ARI RS	74
Tabela 12 – Características físicas da cinza volante e da escória de alto forno	75
Tabela 13 – Características químicas da cinza volante e da escória de alto forno.....	76
Tabela 14 – Análise granulométrica das areias naturais	78
Tabela 15 – Massa específica, massa unitária e absorção de água das areias naturais	80
Tabela 16 – Teor de material pulverulento das areias de britagem.....	82
Tabela 17 – Consumo dos materiais para a produção das argamassas.....	84
Tabela 18 – Seqüência de mistura dos materiais, velocidade do equipamento e tempos de mistura para a produção das argamassas.....	84
Tabela 19 – Características da sílica ativa.....	84
Tabela 20 – Resultados de espalhamento das argamassas, obtidos no ensaio de <i>slump flow</i>	85
Tabela 21 – Análise granulométrica da areia de britagem	87
Tabela 22 – Massa específica, massa unitária e absorção de água da areia de britagem.....	89
Tabela 23 – Análise granulométrica da brita ½ e 0	92
Tabela 24 – Massa específica, massa unitária – estado solto e compactado – absorção de água, teor de material pulverulento e índice de forma, para as britas ½ e 0	94
Tabela 25 – Ensaio de compacidade, para as proporções das britas ½ e 0	94

Tabela 26 – Porcentagens dos componentes do concreto, em volume – início do estudo.....	97
Tabela 27 – Porcentagem dos materiais componentes do concreto, em volume, traço unitário do concreto, em volume e em massa – início do estudo	99
Tabela 28 – Porcentagem dos materiais componentes da argamassa, em volume, traço unitário do concreto, em volume e em massa – início do estudo	100
Tabela 29 – Consumos de materiais para a produção da argamassa – início do estudo.....	101
Tabela 30 – Consumo dos materiais para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.....	102
Tabela 31 – Seqüência de mistura dos materiais, para produção das pastas.....	103
Tabela 32 – Seqüência de mistura dos materiais, para produção das argamassas	104
Tabela 33 – Limites fixados para os ensaios de <i>slump flow</i> e funil em V, para argamassas.....	104
Tabela 34 – Seqüência e tempos de mistura dos materiais, para a produção dos concretos.....	106
Tabela 35 – Limites para os ensaios de auto-adensabilidade do concreto, segundo Gettu et al. (2004) e Efnarc (2002).....	106
Tabela 36 – Número de corpos-de-prova a serem ensaiados em cada idade.....	107
Tabela 37 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.....	108
Tabela 38 – Resultados de <i>slump flow</i> e funil em V para a argamassa inicial, considerando os parâmetros de concreto	110
Tabela 39 – Resultados de <i>slump flow</i> e funil em V para as argamassas com areia natural, considerando os parâmetros de concreto.....	110
Tabela 40 – Resultados de <i>slump flow</i> e funil em V para as argamassas com areia de britagem e composições de areia natural A2 e de britagem, considerando os parâmetros de concreto	113
Tabela 41 – Parâmetros utilizados para a produção de argamassas – ajustados através de ensaios em concreto.....	115
Tabela 42 – Resultados de <i>slump flow</i> e funil em V para as argamassas produzidas, com parâmetros corrigidos pelo concreto.....	115
Tabela 43 – Resultados de <i>slump flow</i> e funil em V para as argamassas produzidas com escória de alto forno	117

Tabela 44 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 25% de cinza volante	118
Tabela 45 – Resultados dos ensaios para os concretos, com 25% de cinza volante	119
Tabela 46 – Porcentagens ajustadas dos componentes do concreto, em volume.....	121
Tabela 47 – Parâmetros ajustados, para a produção de concretos.....	123
Tabela 48 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 15% de cinza volante	123
Tabela 49 – Resultados dos ensaios para os concretos com 15% de cinza volante	124
Tabela 50 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 25% de escória de alto forno	126
Tabela 51 – Resultados dos ensaios para os concretos, com 25% escória de alto forno	128
Tabela 52 – Velocidade de ondas ultra-sônicas, através do comprimento de CPs.....	132
Tabela 53 – Massa específica do CAA, aos 28 dias.....	134
Tabela 54 – Resistência à compressão para o concreto com 15% de cinza volante e 100% de areia natural A1	135
Tabela 55 – Resistência à compressão para o concreto com 15% de cinza volante e combinação 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem	135
Tabela 56 – Resistência à compressão para o concreto com 25% de escória e 100% de areia natural A1.....	136
Tabela 57 – Resistência à compressão para o concreto com 25% de escória e combinação 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem	136
Tabela 58 – Resistência à tração, para os concretos estudados.....	138
Tabela 59 – Relação (ft/fc), para os concretos	139
Tabela 60 – Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), para os concretos estudados	140
Tabela 61 – Resistência à compressão, para os CPs ensaiados na obtenção de E_{ci}	141
Tabela 62 – Comparações entre os valores de módulo de deformação obtidos experimentalmente, e modelos dados na literatura, aos 28 dias.....	142
Tabela 63 – Módulo de deformação dinâmico e relação E_{ci}/E_{cd}	144
Tabela 64 – Custo do m ³ dos concretos com 15% de cinza volante	145
Tabela 65 – Custo do m ³ dos concretos com 25% de escória de alto forno.....	145

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETO DE ESTUDO	18
1.2 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.3 CONTEXTO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	18
1.4 QUESTÃO DA PESQUISA	21
1.5 OBJETIVOS	21
1.5.1 Objetivo Geral	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	22
1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2 O CONCEITO AUTO-ADENSÁVEL	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.1.1 Aplicações do CAA	24
2.1.2 Vantagens e Desvantagens	25
2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES	26
2.2.1 Cimento Portland	27
2.2.2 Adições Minerais	28
2.2.3 Agregados	34
2.2.4 Aditivos	44
2.2.5 Água	48
2.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	49
2.3.1 Reologia do Concreto	50
2.3.2 Métodos de Ensaio para Auto- Adensabilidade de Argamassas	57
2.3.3 Métodos de Ensaio para Auto- Adensabilidade de Concretos	59
2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	65
2.4.1 Resistência Mecânica	65
2.4.2 Módulo de Deformação	66
2.5 ESTUDO DE DOSAGEM	67
2.5.1 Método de Dosagem Proposta por Okamura	68
2.5.2 Método de Dosagem Proposto por Repette-Melo	70

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	73
3.1.1 Cimento Portland.....	73
3.1.2 Adição Mineral.....	74
3.1.3 Agregado Miúdo.....	76
3.1.4 Agregado Graúdo	91
3.1.5 Aditivo Químico	95
3.2 DOSAGEM.....	96
3.3 ENSAIOS EM PASTA	101
3.4 ENSAIOS EM ARGAMASSA	103
3.5 ENSAIOS EM CONCRETO	105
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	108
4.1 ENSAIOS EM PASTA	108
4.2 ENSAIOS EM ARGAMASSA	109
4.2.1 Estudo Inicial, com Cinza Volante.....	109
4.2.2 Verificação da Auto-Adensabilidade das Argamassas, Após a Realização do Concreto, com Cinza Volante.....	114
4.2.3 Verificação da Auto-Adensabilidade das Argamassas, Após a Realização do Concreto, com Escória Granulada de Alto Forno.....	116
4.3 ENSAIOS EM CONCRETO	117
4.3.1 Estado Fresco.....	117
4.3.2 Estado Endurecido.....	131
4.3.3 Análise de Custo dos Concretos	144
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	147
5.1 CONSIDERAÇÕES QUANTO A AREIA DE BRITAGEM	147
5.2 CONSIDERAÇÕES QUANTO A RELAÇÃO ENTRE A AUTO- ADENSABILIDADE DE ARGAMASSAS E CONCRETOS	149
5.3 CONSIDERAÇÕES QUANTO A INFLUÊNCIA DA AREIA DE BRITAGEM NO CAA NO ESTADO FRESCO	149
5.4 CONSIDERAÇÕES QUANTO A INFLUÊNCIA DA AREIA DE BRITAGEM NO CAA NO ESTADO ENDURECIDO	150
5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	151

REFRÊNCIAS 152

ANEXO 161

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETO DE ESTUDO

Esta pesquisa consiste no estudo da viabilidade técnica de substituição da areia natural pela areia de britagem, no concreto auto-adensável (CAA), em proporções de 100, 90, 80, 70, 60, 50 e 30%. O estudo foi dividido em etapas, sendo estas: pasta, argamassa e concreto. Foram consideradas como parâmetros de análise, as propriedades, no estado fresco e endurecido, apresentadas pelos concretos produzidos com as combinações de areia natural e areia de britagem. Essas propriedades foram, então, comparadas com as propriedades apresentadas por concretos produzidos apenas com areia natural. Foi realizada, também, uma análise comparativa da auto-adensabilidade apresentada por argamassas e concretos, tomando como parâmetros os resultados obtidos nos ensaios de verificação da auto-adensabilidade descritos por Domone (2006b), para argamassas, e Gettu et al. (2004), para concretos.

1.2 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo em questão prevê a incorporação de areia de britagem em concreto auto-adensável (CAA). A areia de britagem é um material que confere ao concreto fresco, efeitos diferentes dos advindos da areia natural, como consistência mais seca. O CAA, porém, é um concreto que demanda elevada fluidez, no estado fresco. Dessa forma, o problema de pesquisa refere-se à análise dos efeitos da areia de britagem no CAA, nos estados fresco e endurecido.

1.3 CONTEXTO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A obtenção de areia natural para utilização em concreto vem se tornando cada vez mais difícil devido ao esgotamento de jazidas localizadas próximas aos grandes

centros urbanos e às restrições impostas pelos órgãos de fiscalização ambiental para a extração deste material. A exaustão das jazidas de areia natural, resultado de um longo período de exploração, tem tornado necessária a busca do material em locais cada vez mais distantes, fazendo com que o custo do material seja elevado. Da mesma forma, o Código Florestal Brasileiro (1965), por meio da Lei 4.771/65, considera como áreas de preservação permanentes as florestas e demais formas de vegetações naturais situadas ao longo dos rios ou cursos d'água. Como a areia natural é obtida, principalmente, através da extração em leito de rios, as licenças para exploração deste material têm sido suspensas, tornando a areia natural um material mais caro e escasso (SILVA et al., 2005; ALMEIDA; SILVA, 2005).

Uma alternativa à utilização da areia natural em concreto, seria a substituição deste material pela areia de britagem. A norma brasileira NBR 9935 (2005) designa areia de britagem como material pétreo, com granulometria entre 4,75mm e 150 μ m, proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas. A areia pode ser submetida, ou não, a processos de classificação para a retirada das partículas de dimensões inferiores a 75 μ m.

A areia de britagem é obtida através da rebitagem de rochas, sendo o pedrisco – dimensões entre 12,5 mm e 4,75 mm, segundo a NBR 9935 (2005) – mais comumente utilizado, pois este material é encontrado em quantidades significativas nos pátios de pedreiras, sendo gerado durante a produção da brita. O acúmulo do pedrisco nos pátios de produção de agregados ocorre, pois este material é pouco utilizado na construção civil, de modo que este acúmulo vem se tornando um problema de logística de grande importância para as pedreiras, assim como um problema ambiental (CHAVES, 2005).

Observa-se, então, que a substituição da areia natural pela areia de britagem no concreto, resulta em benefícios ao meio ambiente, através da minimização do uso da areia natural, não sendo necessária sua extração. Da mesma forma, o destino dado ao pedrisco é um outro benefício, pois este deixa de ser um material depositado nos pátios das pedreiras, sujeito à ação do vento, e considerado um resíduo do processo de produção da brita. No que concerne aos custos do agregado miúdo, a proximidade entre as pedreiras e os centros de consumo permite que a areia de britagem tenha um custo inferior ao da areia natural. Esta relação de custo favorece, ainda, a areia de britagem, pois esta não sofre restrições tão severas quanto às aplicadas à areia natural, por parte dos órgãos de fiscalização ambiental.

A aplicação da areia de britagem, porém, irá produzir efeitos no concreto diferentes dos produzidos pela areia natural, em especial nas propriedades no estado fresco, como diminuição da plasticidade e aumento na demanda de água. Isso ocorre, pois a britagem,

em geral, confere ao material uma maior porcentagem de material pulverulento – dimensões inferiores a 75 µm. A textura e a forma dos grãos é um outro fator que pode colaborar para a modificação das características do concreto no estado fresco (ALMEIDA, 2005).

Essas modificações do concreto no estado fresco, conferidas pela areia de britagem, podem dificultar a aplicação deste material, em especial quando são considerados concretos que necessitam maior fluidez, como os concretos auto-adensáveis.

O concreto auto-adensável (CAA) é caracterizado por apresentar alta fluidez, capaz de fazer com que o material preencha as fôrmas onde é aplicado, passando entre as barras das armaduras e consolidando-se somente pela ação de seu peso próprio, sem apresentar segregação e sem necessidade de qualquer tipo de vibração interna ou externa (GETTU; AGULLÓ, 2003).

Muitas são as vantagens provenientes da aplicação do CAA em obras, como a eliminação da etapa de vibração do concreto, que resulta em economia de energia pela ausência do vibrador e eliminação do ruído causado por este equipamento, tornando o ambiente de trabalho mais sadio e dando melhores condições de segurança ao trabalhador. A redução nas atividades de espalhamento e a eliminação da vibração tornam possíveis, também, o estabelecimento de menores prazos para a execução da obra, pois a concretagem é mais rápida, havendo diminuição de mão-de-obra. Tecnicamente, é possível a realização da concretagem mesmo em estruturas densamente armadas, com excelente acabamento e maior durabilidade (EFNARC, 2005).

Para que o CAA tenha fluidez e coesão necessárias, porém, é preciso que a quantidade de material fino presente no concreto seja aumentada, em geral, através do uso de cimento ou adição mineral, o que irá resultar na elevação do custo do concreto (OKAMURA et al., 2000). Dessa forma, a incorporação da areia de britagem no CAA se apresenta de forma positiva, pois pode vir a contribuir para o aumento do material fino, uma vez que possui maiores porcentagens desse material em sua composição granulométrica, quando comparada à areia natural.

Observa-se, então, que uso de CAA confere muitos benefícios à construção civil, assim como a aplicação da areia de britagem em concretos. A união destes dois materiais – CAA e areia de britagem – seria, então, muito vantajosa à construção civil, de modo que será realizado, no presente trabalho, um estudo de substituição da areia natural pela areia de britagem, em CAA.

1.4 QUESTÃO DE PESQUISA

Quais as influências advindas da incorporação da areia de britagem no concreto auto-adensável (CAA), em proporções de 100, 90, 80, 70, 60, 50 e 30%, desta areia em relação ao agregado miúdo total, e em substituição à areia natural.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Geral

Estudar a viabilidade técnica da substituição da areia natural pela areia de britagem, em concreto auto-adensável (CAA).

1.5.2 Objetivos Específicos

Realizar uma análise comparativa da auto-adensabilidade apresentada por argamassas e concretos.

Produzir CAA, com areia de britagem, e resistência à compressão maior ou igual a 30 MPa ($f_{c28} \geq 30$ MPa).

Produzir CAA, com areia de britagem, e com consumos de cimento entre 300 e 380 kg/m³, considerando, para este cálculo, tanto as adições minerais adicionadas durante a produção do concreto como as adições já incorporadas ao cimento utilizado. Este objetivo foi especificado, visando controle de custos para futura aplicação do concreto em obras.

1.6 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Recentemente, a dificuldade na obtenção da areia natural, ou o custo elevado apresentado por este material, tem levado os engenheiros e construtores a buscarem alternativas ao uso deste agregado. Verifica-se, então, que a substituição da areia natural pela areia de britagem no concreto vem sendo realizada, pois esta apresenta vantagens econômicas e ambientais, sendo facilmente encontrada em pedreiras próximas aos grandes centros urbanos. Da mesma forma, o concreto auto-adensável (CAA) é um material inovador, que apresenta benefícios técnicos e ambientais, assim como um elevado potencial de uso no futuro. Assim, torna-se relevante o estudo de viabilização técnica da substituição da areia natural pela areia de britagem, em CAA.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema de pesquisa, sendo contemplados o objeto de estudo, a colocação do problema, o contexto geral do desenvolvimento da pesquisa, a questão, objetivos e relevância da pesquisa, e a estruturação deste documento.

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica acerca do CAA, com ênfase para o estudo realizado. São apresentados aspectos referentes ao surgimento do CAA, sua definição, vantagens e desvantagens advindas do uso, materiais constituintes, propriedades no estado fresco e endurecido e métodos de dosagem.

O programa experimental desenvolvido para estudo do CAA é apresentado no capítulo 3, sendo este dividido em seleção e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, dosagem, ensaios em pasta, ensaios em argamassa e ensaios em concreto.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos quando da realização dos ensaios descritos no programa experimental.

As considerações finais e conclusões acerca do estudo e dos resultados obtidos encontram-se no capítulo 5. Também neste capítulo, apresentam-se sugestões para pesquisas futuras.

2 O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca do concreto auto-adensável (CAA), reunindo o conhecimento existente na literatura com ênfase para o estudo realizado. São tratados aqui aspectos referentes ao surgimento do CAA, sua definição, vantagens e desvantagens advindas do uso, materiais constituintes, propriedades no estado fresco e endurecido e métodos de dosagem.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto auto-adensável (CAA) foi proposto pelo professor Hajime Okamura, da Kochi University of Technology, em 1986 no Japão. Neste país, problemas de durabilidade das estruturas em concreto vinham se agravando continuamente, devido à redução do número de trabalhadores da construção civil qualificados para a execução de elementos estruturais. A solução encontrada para o problema, então, foi a busca de um concreto especial – o concreto auto-adensável (CAA) – capaz de apresentar boa durabilidade, independentemente das atividades de adensamento exercidas pelos trabalhadores no momento da concretagem (OKAMURA et al., 2000; OKAMURA; OUCHI, 2003).

O CAA consiste em um concreto com alta fluidez, capaz de preencher a fôrma onde é aplicado, compactando-se pela ação única de seu peso próprio e sem necessitar de qualquer tipo de vibração interna ou externa. Este concreto deve, ainda, ser capaz de sustentar os grãos do agregado graúdo, mantendo-os homogeneamente distribuídos no interior da mistura, quando o concreto flui através de obstáculos – como as barras de armaduras – e também quando o concreto encontra-se em repouso (OKAMURA, 1997; GETTU; AGULLÓ, 2003; EFNARC, 2005).

Dessa forma, o CAA deve apresentar, basicamente, três propriedades que são essenciais a este tipo de concreto, no estado fresco, e que não competem ao concreto convencional (RILEM, 2006):

- Habilidade de preenchimento: preencher a fôrma onde é aplicado e se auto-compactar, sem vibração, mantendo-se homogêneo;

- Habilidade de passagem: passar através de obstáculos, como as barras de armaduras, sem apresentar bloqueio de partículas de agregados;
- Resistência à segregação ou estabilidade: manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e a aplicação.

Daczko (2002) e Schwartzentruber et al. (2006), evidenciam, ainda, a existência de dois tipos de estabilidade, a dinâmica – referente à resistência à segregação e bloqueio durante a moldagem – e a estática – referente à resistência a exsudação e segregação dos componentes do concreto, estando este já na fôrma, em seu período de cura e endurecimento. Caso o concreto apresente-se instável dinamicamente ou estaticamente, podem ocorrer alguns problemas, como bloqueio do agregado graúdo pelas armaduras. Como resultado, tem-se um preenchimento insuficiente e heterogêneo da fôrma, ou segregação do agregado graúdo, assim como movimentação da água de amassamento em direção à superfície do concreto, resultando em queda da resistência mecânica e aumento da permeabilidade do concreto.

Dessa forma, fazem-se necessários estudos adequados da reologia do concreto no estado fresco, de modo que os parâmetros reológicos que caracterizam o material possam ser controlados – em geral no momento da dosagem, através do uso de adições minerais e aditivos químicos – para que se tenham resultados adequados de fluidez e estabilidade do concreto fresco, de forma que o material apresente o auto-nivelamento e a coesão esperados (DACZKO; CONSTANTINER, 2001; BANFILL, 2003).

2.1.1 Aplicações do CAA

Relatos de OKAMURA et al. (2000) indicam que o primeiro protótipo de CAA foi desenvolvido no ano de 1988 utilizando materiais usualmente aplicados em concretos convencionais, tendo apresentado bons resultados de desempenho. Após isso, os estudos acerca do novo tipo de concreto cresceram em todo o mundo, desde instituições de ensino e pesquisa até grandes companhias construtoras, de modo que o CAA vem sendo cada vez mais utilizado.

No Japão, teve-se a primeira aplicação do CAA em obra, em junho de 1990; seguida pela aplicação do concreto nas torres da ponte Shin-kiba Ohashi, em 1991. Após esse

período, não somente no Japão como em todo o mundo, o CAA passou a ser utilizado largamente, em diversas situações: pontes, edifícios, túneis, elementos estruturais pré-moldados, tanques e produtos de concreto em geral.

Estudos sobre CAA vêm sendo desenvolvidos desde 1992, no Canadá, com aplicação voltada especialmente para pavimentação e reparos. Em Taiwan, investigações vêm ocorrendo desde 1994, com diversas aplicações estruturais já realizadas. Nos Países Baixos, o CAA foi aplicado em uma edificação em 1997, que resultou na formação de um grupo de pesquisa com objetivo de estudar aplicação deste material em produtos de concreto. Na Suécia, em 1998 foram realizadas aplicações bem sucedidas do material em pontes, com planejamento de uso do CAA em edificações residenciais. Além destas, se tem relatos da investigação acerca do CAA em países como EUA, Áustria, Reino Unido, França, Tailândia, entre outros (OKAMURA et al., 2000).

No Brasil, poucas obras foram realizadas com o CAA, acreditando-se que a esse fato deva-se à falta de estudos e adaptação da tecnologia à nossa realidade (TUTIKIAN et al., 2005). Porém, essa situação vem mudando com o passar do tempo, de modo que diversas instituições de ensino e pesquisa, assim como grandes empresas construtoras, em todo o país vêm buscando conhecimento acerca do novo material, com o objetivo de introduzir este tipo de concreto no mercado brasileiro.

2.1.2 Vantagens e Desvantagens

O crescente interesse acerca do CAA e o aumento contínuo dos estudos e aplicações do material em todo o mundo é justificado pelos inúmeros benefícios apresentados quando da aplicação deste concreto em obras. Algumas das vantagens advindas da aplicação do CAA são apresentadas a seguir, e foram descritas por diversos autores, entre os quais se destacam: Okamura et al. (2000), Gettu e Agulló (2003), Efnarc (2005).

Dentre as vantagens, um grande destaque deve ser dado ao fato de que o uso de CAA garante excelente compactação do material no estado fresco, mesmo em áreas densamente armadas, evitando-se, assim, a presença de nichos no interior do elemento estrutural e garantindo excelente acabamento ao concreto. Essa situação permite a produção de uma estrutura mais durável.

A eliminação da etapa de vibração do concreto resulta, também, em uma importante vantagem, pois com a eliminação do ruído causado pelo vibrador, há uma melhora na qualidade do ambiente de trabalho, uma vez que os trabalhadores deixam de estar expostos a taxas de ruídos elevadas. Além disso, esse fato favorece ainda a concretagem em áreas urbanas, onde os ruídos em muitas situações são limitantes à construção.

Uma terceira consequência benéfica da elevada fluidez é a possível diminuição da equipe de trabalho, uma vez que não é necessária a presença de muitas pessoas no canteiro de obras para realização das atividades de lançamento e espalhamento do concreto, que se auto-compacta. Por fim, a eliminação de uma etapa na produção da edificação – vibração – permite reduzir o tempo de construção, o que, juntamente com os aspectos apresentados anteriormente, pode ser responsável por uma diminuição no custo global da obra.

Porém, de acordo com Okamura et al. (2000) a produção de CAA exige uma diminuição na quantidade de agregado graúdo presente no concreto, e aumento da quantidade de finos, podendo ser estes cimento ou adições minerais. Com isso, faz-se necessário cuidado extra durante a cura do CAA, para se evitar ocorrência de fissuras por retração do concreto no momento da pega e endurecimento.

Uma outra desvantagem do CAA é o custo elevado do material quando considerado o metro cúbico do concreto, tanto devido ao aumento na quantidade de cimento para se obter auto-adensabilidade, quanto à necessidade de uso de aditivos químicos. Embora haja redução do custo global da obra, este ainda é um fator limitante da utilização do CAA em obras.

Diante do apresentado, acredita-se que as vantagens advindas da utilização do CAA são suficientes para superação das possíveis desvantagens que podem ocorrer. Além disso, verifica-se que os aspectos negativos citados podem ser controlados, e até eliminados desde que cuidados especiais sejam observados.

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

São apresentadas, a seguir, algumas características e propriedades acerca dos materiais constituintes do CAA, de modo a se ter uma verificação dos efeitos causados por esses materiais no concreto produzido. Ressalta-se que o CAA é composto pelos mesmos

materiais utilizados na produção de um concreto convencional, havendo diferenças na dosagem e, em alguns casos, nos tipos de aditivos químicos adicionados.

2.2.1 Cimento Portland

Na construção civil, utiliza-se para a produção de concretos e argamassas o cimento Portland, que é um aglomerante hidráulico cujo endurecimento ocorre por meio de reações químicas quando este material entra em contato com a água – hidratação – havendo a formação de um produto final estável em meio aquoso (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A hidratação do cimento sofre influência das características físicas do material, assim como de sua composição química, de modo que existem no mercado, diversos tipos de cimento Portland, com características específicas para cada aplicação. Na produção de CAA é possível a utilização de qualquer um dos tipos de cimento existente, porém, conforme ocorre em concretos convencionais, a utilização de determinado tipo de cimento irá produzir um concreto com características específicas.

Para a produção de CAA, é necessária a presença de um elevado teor de finos para que o concreto apresente viscosidade adequada, sendo o cimento o material que contribui com grande parte destes finos. O aumento no consumo de cimento, porém, pode gerar efeitos indesejáveis no concreto fresco e endurecido, como aumento da liberação de calor de hidratação e aumento da retração plástica. O uso de cimentos com algum tipo de adição em sua composição ou a incorporação de adições minerais ao concreto, então, pode ser uma solução a para se evitar, ou minimizar, os efeitos negativos ao concreto causados pelo cimento. Além disso, as adições minerais são, em geral, subprodutos industriais, o que faz com que seu custo seja reduzido quando comparado ao custo do cimento.

A velocidade de liberação de calor de hidratação pelo concreto sofre influências da composição química do cimento, sendo os compostos C_3S e C_3A os que se hidratam mais rapidamente, liberando maior quantidade de calor. É importante, então, a utilização de adições minerais conjuntamente com os cimentos que apresentam alta concentração destes compostos. O composto C_2S , porém, sofre hidratação mais lenta, de

modo que os cimentos que apresentam concentração elevada deste composto apresentam baixa liberação de calor (MEHTA; MOTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Uma característica do cimento de grande importância para o CAA é a finura. Sabe-se que quanto maior a área específica do cimento, livre para hidratação, maior é a viscosidade da mistura, pois o número de partículas presente é maior, havendo diminuição da distância e aumento da colisão entre estas (NUNES, 2001). Neville (1997) ressalta, ainda, que cimentos mais finos hidratam-se mais rapidamente, apresentando, por consequência, maior rapidez no desenvolvimento da resistência. A resistência a idades avançadas, porém, não sofre influência da finura do cimento.

Um outro aspecto de grande importância para o CAA é a adsorção do aditivo superplastificante pelo cimento. Jolicoeur e Simard (1998) apresentam que esta adsorção ocorre preferencialmente com os aluminatos (C_3A e C_4AF) expostos nas superfícies das partículas de cimento, de modo que a utilização de cimentos com quantidades moderadas desses compostos é recomendada.

Em geral, observa-se que a produção de CAA pode ocorrer por meio da utilização de vários tipos de cimento, porém, cuidados especiais serão necessários no uso de cimentos muito finos ou que apresentem porcentagem elevada de aluminatos em sua composição. O uso de adições minerais como material fino no CAA é recomendado, e em muitos casos, necessário.

2.2.2 Adições Minerais

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as adições minerais são definidas como materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, em geral na faixa de 20% a 100% da massa do cimento Portland.

2.2.2.1 Vantagens

Os motivos pelos quais esses materiais são adicionados ao concreto são vários, e contemplam diversos aspectos. Sob a perspectiva financeira, a utilização de adições

minerais apresenta vantagem, pois substitui parte do cimento utilizado na produção do concreto, o que proporciona diminuição no custo do material final, uma vez que o cimento é o material com custo mais elevado utilizado na produção do concreto.

Considerando aspectos ambientais, salienta-se que a produção de cimento Portland é um processo que causa impactos muito severos ao meio ambiente. Além de utilizar grande quantidade de energia no processo de produção, é responsável pelo lançamento de grandes quantidades de CO_2 na atmosfera, sendo este gás considerado o principal causador do efeito estufa e do aquecimento global (BILODEAU; MALHOTRA, 2000).

Deve-se considerar, também, que muitas das adições minerais utilizadas na produção de concretos são subprodutos industriais, gerados em grandes quantidades e descartados em aterros, causando sérios problemas de poluição ambiental. Assim, a utilização destes subprodutos no concreto faz com que haja maior sustentabilidade no processo industrial gerador do resíduo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Por fim, é fato comprovado que a utilização de adições minerais em concretos causa manifestações químicas e físicas nos materiais finais, agindo de modo a modificar a estrutura interna da pasta de cimento hidratada (BENTZ; GARBOCZI, 1991; ACI, 1994; KECK, 2001; DAL MOLIN, 2005). Em geral, as adições minerais promovem redução da permeabilidade do concreto, com conseqüente aumento da durabilidade, e aumento da resistência mecânica a idades avançadas. Porém, o tipo de adição utilizada, o consumo de cimento, a porcentagem de substituição do cimento pela adição e a relação água/cimento têm grande influência sobre o papel desempenhado pelas adições minerais presentes nos concretos (YAMAMOTO; KOBAYASHI, 1982; JIANG et al., 1999).

2.2.2.2 Efeito Químico e Físico

Durante o processo de hidratação do cimento, os compostos C_3S e C_2S formam silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, e também, o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo este composto solúvel em água, podendo esta evaporar da mistura, deixando vazios na pasta e aumentando a permeabilidade do concreto (KECK, 2001). Dessa forma, o efeito químico das adições minerais beneficia o concreto, uma vez que possibilita a diminuição das quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre, pois a sílica e alumina presentes nas adições minerais reagem

com este composto, fazendo com que se diminua sua quantidade, formando mais C-S-H – reação pozolânica (ACI, 1994).

Dal Molin (2005) descreve duas formas de ocorrência do efeito físico das adições minerais. A primeira é chamada de efeito microfíler e ocorre devido ao tamanho reduzido das partículas das adições minerais, que permite que estas preencham os espaços vazios existentes entre as partículas do cimento. A segunda está associada ao refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação, causada pelas pequenas partículas das adições que agem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Assim, há a formação de cristais de C-S-H nos poros ocupados pelas adições e pela água, e não somente a partir dos grãos de cimento.

2.2.2.3 Classificação

As adições minerais são classificadas em três grupos, de acordo com sua ação físico-química, sendo estes:

- Material pozolânico;
- Material cimentante;
- Fíler.

O material pozolânico é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que quando finamente dividido e na presença de umidade reage com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes (ABNT NBR 12653, 1992).

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, porém, a quantidade destes compostos formada, como o C-S-H, por exemplo, é em geral, insuficiente para aplicação desses materiais para fins estruturais e sua hidratação é normalmente lenta. Quando o material cimentante é usado como adição, em substituição de parte do cimento Portland, o hidróxido de cálcio e a gipsita presentes no cimento, aceleram sua hidratação (DAL MOLIN, 2005).

Por fim, o filer é uma adição mineral finamente dividida que atua, principalmente, através do efeito físico microfíler e como pontos de nucleação no momento da hidratação (DAL MOLIN, 2005).

A seguir, serão apresentados alguns aspectos referentes a cinza volante e a escória de alto forno, pois estas adições minerais foram utilizadas para a produção dos concretos, nesta pesquisa.

2.2.2.4 Cinza Volante

É denominado cinza volante o material finamente dividido proveniente da queima do carvão pulverizado, cujo objetivo é a geração de energia, em usinas termoelétricas (ACI, 2001).

Os materiais pozzolânicos são classificados, de acordo com a ASTM C 618 (2003), em três classes. A primeira classe é chamada classe N, e contempla pozzolanas naturais, podendo ou não ter sofrido calcinação, como terras diatomáceas, pumicitas ou cinzas vulcânicas. A segunda classe, chamada classe F, apresenta atividade pozzolânica e engloba materiais provenientes da queima do antracito ou carvão betuminoso. A terceira e última classe, chamada classe C, se refere a cinzas volantes provenientes da queima do lignito ou carvão sub-betuminoso. Estas cinzas apresentam atividade pozzolânica, assim como propriedades cimentícias. De acordo com Dal Molin (2005), as cinzas volantes da classe F da ASTM são as mais utilizadas no Brasil para a confecção de concretos, argamassas e pastas.

Observa-se que as cinzas volantes das classes F e C, apresentam diferenças nas quantidades dos compostos presentes, sendo, em geral, verificada a soma do dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Nas cinzas de classe C, verifica-se que a soma destes compostos deve ser superior ou igual a 50%. Já nas cinzas de classe F, esta soma deve ser superior ou igual a 70%. Verifica-se, também, que as cinzas de classe C apresentam quantidades de cálcio entre 15 e 25%, o que torna o desempenho destas cinzas diferente do apresentado pelas cinzas de classe F, que apresentam baixo teor de cálcio em sua composição (ACI, 2001).

Um aspecto importante das cinzas volantes é a sua área específica, pois esta influencia na reatividade da adição mineral. Assim, as cinzas volantes têm área específica variando entre 300 a 700m²/kg, estando próxima a do cimento, entre 350 e 600m²/kg (DAL MOLIN, 2005).

Muitos estudos buscam entender os efeitos da substituição do cimento pela cinza volante em concretos, argamassas e pastas. Mais recentemente, porcentagens de

substituição entre 40 e 70% foram investigadas com o objetivo de se diminuir drasticamente o consumo de cimento, visando especialmente aspectos ambientais (JIANG et al., 1999; BILODEAU; MALHOTRA, 2000). No entanto, a prática mais comumente utilizada busca porcentagens de substituição de 10 a 30%, que contribuem positivamente ao concreto em termos de durabilidade e resistência mecânica (YAMAMOTO; KOBAYASHI, 1982; BENTZ; GARBOCZI, 1991).

Por ser um subproduto industrial, o uso de cinza volante contribui para minimizar impactos ambientais devido ao re-direcionamento do resíduo, evitando sua disposição em aterros. Sob o ponto de vista técnico, a cinza volante pode conferir melhora da trabalhabilidade ao concreto e redução na demanda de água. Se a cinza apresentar quantidade elevada de carbono em sua composição, porém, o controle da quantidade de ar incorporado ao concreto pode ser dificultado. No estado fresco, o uso da cinza volante colabora, ainda, para redução da exsudação e segregação e melhora da consolidação do concreto nas fôrmas. Quanto ao calor de hidratação liberado pelo concreto, verifica-se que as cinzas das classes N e F, apresentam redução na taxa de liberação de calor. As cinzas de classe C, porém, apresentam taxa de liberação de calor elevada, sendo muitas vezes, maiores que as do concreto produzido somente com cimento Portland. Esse aspecto demanda que se tenha cuidado no uso de quantidades elevadas de cinzas de classe C (ACI, 2001).

No estado endurecido, o uso de cinza volante no concreto contribui para o aumento da resistência à compressão, a idades avançadas. Estudos mostram que, enquanto concretos de cimento Portland ganham cerca de 30% de resistência, após os 28 dias, os concretos com adição de cinza volante chegam a ganhar de 50 a 100% de resistência, após esta idade. Isso ocorre devido à reação química da adição com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento. Nas primeiras idades, porém, o desenvolvimento da resistência é mais lento em concretos onde a cinza volante substitui parte do cimento, pois a quantidade deste material disponível para hidratação é menor (ACI, 2001).

Quanto à permeabilidade do concreto, verifica-se que esta é diminuída com a presença de cinza volante, havendo, por conseqüência, aumento da resistência contra o ataque de substâncias químicas, como sulfatos e cloretos. Em geral, as cinzas de classe F melhoram a resistência do concreto contra o ataque de sulfatos de forma mais eficiente do que as cinzas de classe C. A supressão da expansão devido à reação álcalis-agregado é verificada, também, em concreto com incorporação de cinza volante, pois a reação da adição com o hidróxido de cálcio faz com que os álcalis se mantenham na pasta, evitando que estes cheguem até o agregado (ACI, 2001).

2.2.2.5 Escória Granulada de Alto Forno

A escória granulada de alto forno é um subproduto do tratamento de minério de ferro, em alto forno, de modo que sua obtenção sob forma granulada ocorre por resfriamento brusco. A escória é constituída, principalmente, de silicatos e aluminos-silicatos de cálcio (NBR 5735/1991).

Durante a produção do minério de ferro – ferro-gusa – a escória se forma pela fusão das impurezas deste minério com o calcário e a dolomita – adicionados ao processo, como fundentes. Após a fusão, a forma de resfriamento sofrida pela escória irá influir nas características apresentadas por esta, sendo necessário um resfriamento brusco para que seja formada a escória granulada de alto forno (DAL MOLIN, 2005).

A escória granulada de alto forno é um material bastante reativo, considerado um material cimentante, que quando moído, pode ser usado na fabricação de cimento, substituindo o clínquer, ou como adição ao concreto (ACI, 2001).

A norma ASTM C 595 (1994) prevê a fabricação de cimentos compostos, com substituição de até 70% do clínquer por escória granulada de alto forno. No Brasil, a norma NBR 11578/1991 define o cimento Portland composto com escória – CP II E – com teores de 6 a 34% de escória. Já a norma NBR 5735/1991 define o cimento Portland de alto forno – CP III – contendo de 35 a 70% de escória em relação à massa total de aglomerantes.

Observando a literatura, verifica-se que é comum o uso da escória como adição mineral incorporada diretamente ao concreto, em quantidades de até 30%, em relação à massa de cimento.

Os compostos químicos presentes na escória são os mesmos encontrados nos cimentos, porém, em diferentes proporções, conforme apresentado pela tabela 01.

Tabela 01 – Compostos químicos presentes no cimento Portland e na escória de alto forno.

Compostos químicos (%)	Cimento Portland	Escória de alto forno
CaO	60-66	32-45
SiO ₂	19-24	32-42
Al ₂ O ₃	3-8	7-16
Fe ₂ O ₃	1-5	0,1-1,5
MgO	0-5	5-15

Fonte: adaptado de ACI E3-01, 2001

Tecnicamente, a adição de escória granulada de alto forno em concretos pode ser responsável pela diminuição do calor de hidratação, assim como por um desenvolvimento da resistência mais lento, de modo que, em idades iniciais, as resistências à compressão são, em geral, mais baixas do que as de concretos com cimento Portland sem adição. O aumento da dosagem de escória no concreto está associado à diminuição da permeabilidade deste. Assim, concretos com dosagens superiores a 35% em massa, de escória, em relação aos materiais cimentícios totais, demonstraram aumento na resistência contra o ataque de sulfatos e supressão da expansão álcali-agregado (ACI, 2001).

2.2.3 Agregados

Os agregados são tradicionalmente tratados como materiais de enchimento dentro do concreto, pelo fato de não apresentarem reações químicas complexas quando entram em contato com a água, sendo considerados inertes. Porém, esse tratamento secundário dado aos agregados se mostrou errôneo diante de descobertas acerca da influência que os agregados exercem na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Essas descobertas sobre a importância dos agregados, porém, só foram possíveis devido à aplicação em larga escala do concreto, ao longo do tempo, tornando-se o papel do agregado mais evidente em anos recentes, quando se deu início ao esgotamento das jazidas de agregado natural de boa qualidade perto dos grandes centros consumidores. Houve, então, um aumento nos custos de transporte e na competitividade entre os produtores de concreto, o que permitiu a conscientização sobre a real importância dos agregados (SBRIGHI NETO, 2005).

Neville e Brooks (1990) enfatizam que a qualidade do agregado é de extrema importância, sendo em algumas situações, componente limitante da resistência mecânica do concreto endurecido – em especial em concretos de alto-desempenho (CAD). Além disso, as características dos agregados podem ter grande influência sobre a durabilidade e o desempenho estrutural dos elementos moldados.

No caso do CAA, verifica-se que há necessidade de uma minimização na porcentagem do agregado graúdo utilizado, dando espaço ao uso de partículas finas, necessárias para se obter uma viscosidade adequada. O volume total de agregados, assim

como a proporção entre os agregados graúdo e miúdo têm grande influência nas propriedades reológicas do concreto, sendo as características apresentadas por estes de grande importância (MELO, 2005).

2.2.3.1 Classificação

Os agregados para concreto podem ser classificados quanto a sua origem, quanto à dimensão dos grãos e quanto à sua massa unitária.

Quanto à origem os agregados podem ser classificados, segundo SBRIGHI NETO (2005), em naturais, britados, artificiais e reciclados. São chamados de agregados naturais àqueles encontrados na natureza já preparados para o uso sem outro tipo de beneficiamento que não seja a lavagem, sendo provenientes das rochas existentes na crosta terrestre que estão sujeitas a processos de intemperismo. Alguns exemplos de agregados naturais são areia de rio, areia de cava ou pedregulho.

Os agregados britados são aqueles provenientes de processos de cominuição mecânica de rochas. Esses agregados são produzidos em pedreiras, instaladas nos entornos de afloramentos de rocha, sendo sua obtenção feita através do uso de técnicas de desmonte com explosivos, seguida por britagem e seleção granulométrica das frações de agregados provenientes dos britadores. Como exemplo de agregados britados temos a pedra britada e a areia de britagem.

Os agregados artificiais são aqueles derivados de processos industriais, como é o caso da argila expandida, e os agregados reciclados são resíduos com propriedades adequadas ao uso como agregado em concreto, submetidos ou não a beneficiamento, como entulho de construção ou demolição.

Quanto à dimensão dos grãos, os agregados se classificam segundo a norma NBR 7211/2005 em graúdo e miúdo, sendo o agregado graúdo aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a norma NM 248/2003. Os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150 μ m, em ensaio realizado de acordo com a norma NM 248/2003.

Ainda com relação à dimensão dos grãos, a NBR 9935/2005 denomina de filer todo o material granular que passa na peneira com abertura de malha 150 μm ; e de material pulverulento as partículas com dimensão inferior a 75 μm . As porcentagens admissíveis de material pulverulento presente nas areias são, de acordo com a NBR 7211/2005, de 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos de desgaste superficial, podendo esses limites ser expandidos para 10 e 12%, respectivamente, desde que seja comprovado por análise petrográfica que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto.

Por fim, quanto à massa unitária tem-se que os agregados naturais apresentam massa unitária entre 1520 e 1680 kg/m^3 e são responsáveis por produzirem concretos normais, com massa específica aproximada de 2400 kg/m^3 . Para finalidades especiais, porém, existem os agregados leves – com massa unitária inferior a 1120 kg/m^3 - e os agregados pesados – com massa unitária superior a 2080 kg/m^3 (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.2.3.2 Propriedades

Dentre as propriedades e características dos agregados, as de maior importância são, segundo Mehta e Monteiro (1994):

- Massa específica e massa unitária;
- Absorção e umidade superficial;
- Resistência à compressão, resistência à abrasão e módulo de deformação;
- Sanidade;
- Dimensão máxima e composição granulométrica;
- Forma e textura superficial;
- Substâncias deletérias.

Em geral, o conhecimento da massa específica, da composição granulométrica e do teor de umidade é exigido para a dosagem dos concretos. Já a composição granulométrica, juntamente com forma e textura das partículas, tem influência nas propriedades do concreto no estado fresco (MEHTA; MONTEIRO, 1994), o que as torna importantes para o CAA.

A distribuição granulométrica do agregado é importante, pois um agregado contínuo – que apresenta uma distribuição uniforme de dimensão dos grãos – confere ao concreto maior trabalhabilidade. Além disso, a continuidade granulométrica é responsável por diminuir a quantidade de poros no interior do concreto endurecido – os espaços vazios são ocupados pelos grãos de menor dimensão – o que irá melhorar a resistência mecânica do produto final (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Um agregado com granulometria descontínua pode ser responsável por problemas como elevação no consumo de cimento, redução da fluidez e formação de vazios entre partículas de agregados de maior dimensão (CHEN et al., 2003 apud MELO, 2005), não sendo indicados para CAA. Neville (1997) ressalta, ainda, que agregados com distribuição granulométrica descontínua podem produzir concretos com maior tendência à segregação.

Na literatura, observam-se faixas granulométricas adequadas ao uso de agregados em concretos, definidas pela norma NBR 7211/2005. Essas faixas granulométricas, porém, foram definidas considerando o uso dos agregados em concretos convencionais, de modo que podem sofrer algumas alterações quando considerado o CAA, que demanda características específicas dos agregados. Melo (2005) apresenta faixas granulométricas ideais para agregados a serem utilizados em CAA. Essas faixas foram definidas a partir de observações, na literatura existente, de curvas de agregados usualmente empregados neste tipo de concreto por diversos autores.

As figuras 01 e 02 apresentam as faixas granulométricas, ótima e utilizável, dadas pela NBR 7211/2005, juntamente com as faixas ideais ao CAA, propostas no método de dosagem Repette-Melo (MELO, 2005).

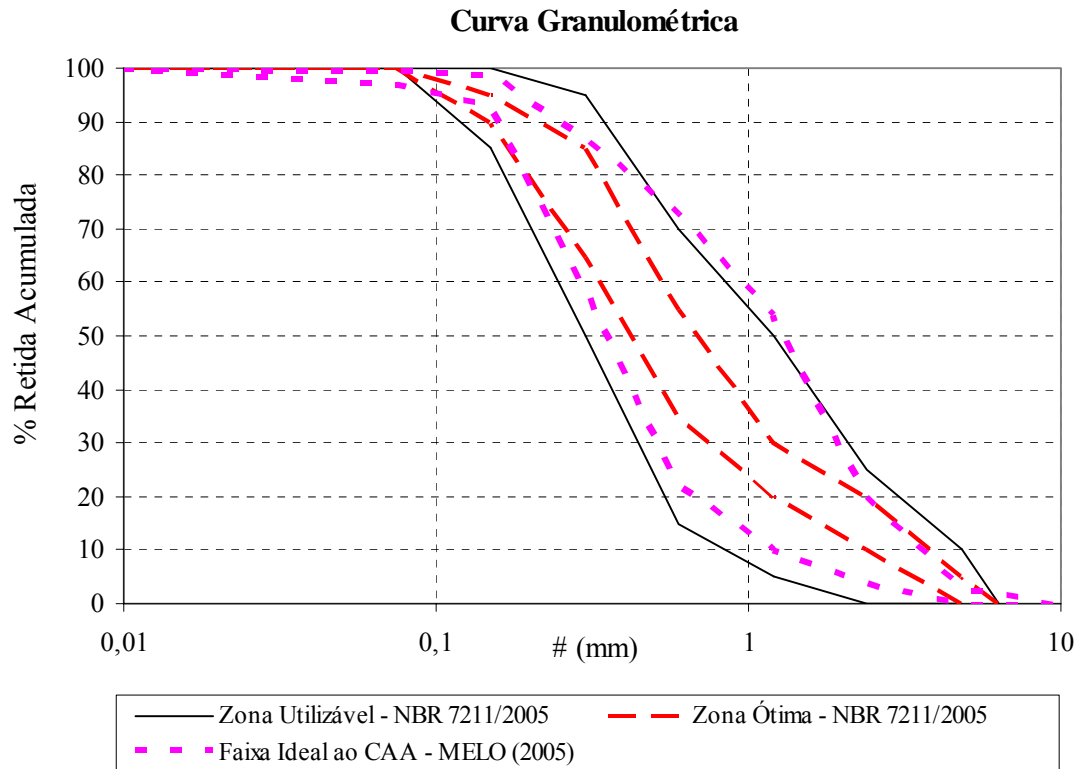


Figura 01 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado miúdo.

Observando-se a figura 01, é possível verificar que, em geral, as curvas propostas pela norma NBR 7211/2005 e pelo método Repette-Melo (MELO, 2005), são muito próximas. Verifica-se que os limites da zona utilizável da norma são um pouco mais abrangentes que os apresentados em Melo (2005), salvo quando se considera o limite superior, com granulometrias próximas a 1mm.

Uma pequena diferença é verificada nas frações mais finas, onde a curva proposta no método Repette-Melo apresenta um limite mais abrangente para a presença destas partículas – em especial, grãos de dimensão inferior a $75\mu\text{m}$ – do que os limites impostos pela norma NBR 7211/2005. Este fato deve-se, provavelmente, à demanda elevada de material fino pelo CAA, para que este apresente viscosidade adequada. Dessa forma, os grãos de menores dimensões do agregado miúdo deixam de ser prejudiciais ao concreto e passam a ser usados para promoção da viscosidade.

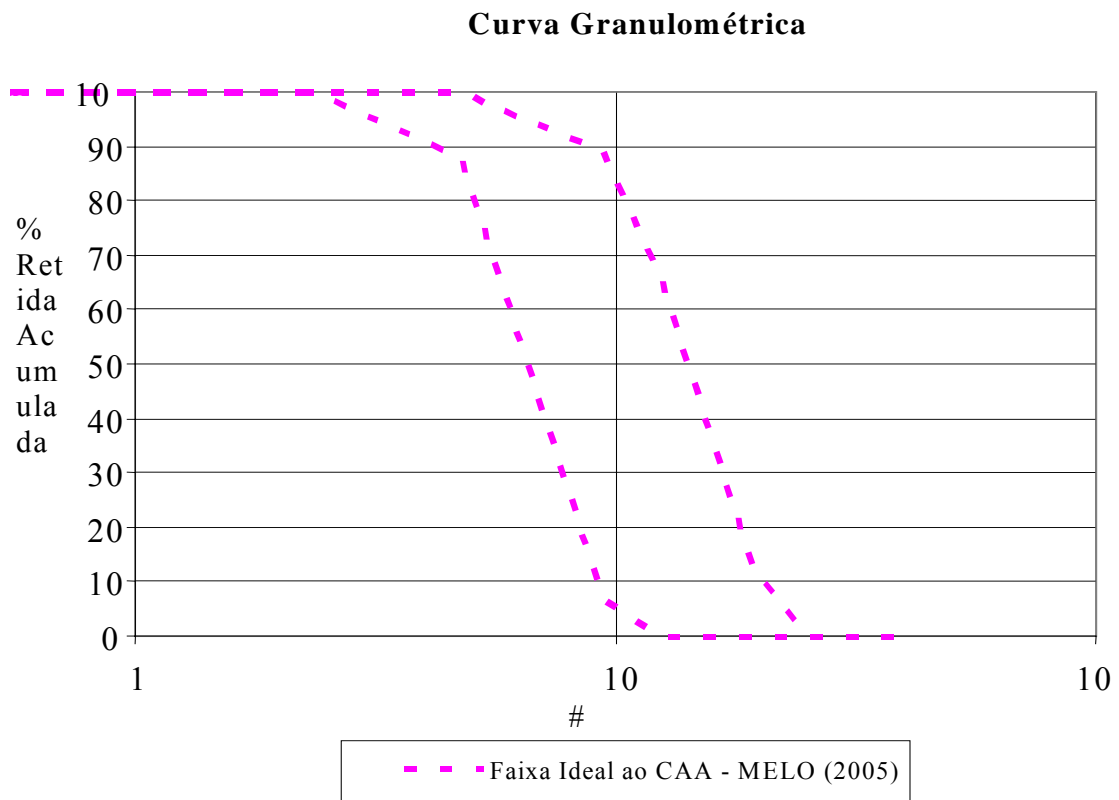


Figura 02 – Faixas granulométricas consideradas na literatura, para o agregado graúdo.

Para o agregado graúdo, verifica-se pela figura 02, que não foi feita uma comparação entre as faixas dadas pela norma NBR 7211/2005 e pelo método Repette-Melo (MELO, 2005). Essa comparação não foi realizada, pois a norma em questão apresenta as curvas ótimas considerando a dimensão máxima característica do agregado. A faixa ideal ao CAA, dada em MELO (2005), porém, não faz essa consideração, podendo as curvas diferir muito umas das outras.

A forma da partícula diz respeito às características geométricas dos grãos, que segundo Mehta e Monteiro (1994), podem ser:

- Arredondadas: partículas formadas por atrito, que tendem a perder os vértices e arestas;
- Angulosas: partículas, em geral, equidimensionais, que possuem vértices e arestas bem definidos;
- Lamelares ou achatadas: partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação a outras duas dimensões;

- Alongadas: partículas cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões.

Uma outra classificação dos grãos do agregado quanto à forma é dada por Shepard e Pawers (1953) apud Suguio (1980), que estabelecem seis grupos, conforme apresentado na figura 03.

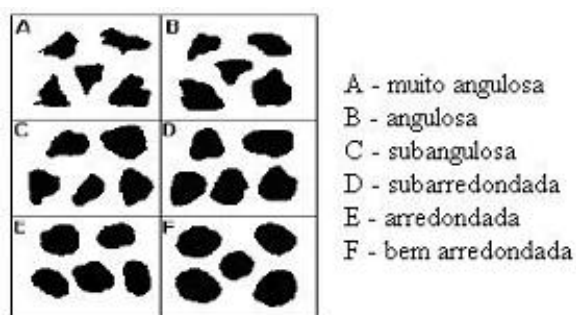


Figura 03 – Classificação do grau de arredondamento dos agregados, segundo Shepard e Pawers, (1953)

Fonte: (SUGUIO, 1980).

A classificação do agregado a ser utilizado na produção de concreto quanto à forma, é feita através de análise visual, comparando-se esta com uma das classificações existentes. Para análise dos agregados miúdos, Silva et al. (2005) utilizaram análise de imagem das partículas retidas nas peneiras da série normal, com auxílio de lupa, microcomputador e câmera digital, para facilitar a visualização das partículas pequenas.

Araújo et al., (2003, apud SILVA et al., 2005) define esfericidade como a relação entre o diâmetro do círculo com uma área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula, podendo esta relação variar de 0 – alongada – a 1 – esférica. Esta análise, porém, leva em consideração aspectos bidimensionais da partícula, o que pode levar, em algumas situações, a conclusões errôneas acerca da forma das partículas. Silva et al. (2005) ressalta que uma partícula achatada cuja projeção aproximar-se de um círculo irá produzir resultados próximos de 1 – para os cálculos considerados – classificando a partícula como esférica, quando esta é, na realidade, achatada.

Para a determinação da forma de partículas maiores, em especial dos agregados graúdos, a norma NBR 7809/1983 apresenta um procedimento para cálculo através da utilização de paquímetro.

A textura superficial é verificada pela análise da superfície do agregado, podendo ser esta lisa ou áspera, sendo a propriedade baseada em uma avaliação visual das partículas. A dureza, granulação e porosidade da rocha matriz – assim como a exposição da rocha ao atrito – influenciam diretamente na textura superficial dos agregados. Em geral, partículas de textura áspera e de forma angulosas, lamelares e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis quando comparadas a partículas lisas e arredondadas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No caso dos agregados miúdos, verifica-se que as areias naturais, provenientes dos leitos de rios ou depósitos eólicos apresentam-se mais lisas e arredondadas, devido à sua longa exposição aos agentes de intemperismo. Dessa forma, essas areias produzem concretos com boa trabalhabilidade. Já as areias provenientes da britagem são mais ásperas e lamelares quando comparadas as areia naturais, produzindo concretos mais secos e, desse modo, não sendo indicadas para o uso em CAA (MEHTA; MONTEIRO, 1994; ALMEIDA, 2005). Porém, o tipo de britador utilizado na produção da areia pode melhorar a forma das partículas, dando maior arredondamento. Assim, apesar de não aconselhado, pode ser possível o uso de areias de britagem em CAA.

A resistência à compressão, à abrasão e o módulo de deformação do agregado são propriedades inter-relacionadas, fortemente influenciadas pela porosidade, que têm maior influência no concreto endurecido. Da mesma forma, a sanidade do agregado está relacionada com durabilidade do concreto, no estado endurecido, de modo que um agregado instável apresenta mudanças em seu volume, induzidas pelo intemperismo – ciclos alternados de umedecimento e secagem ou congelamento e descongelamento – o que resulta na deterioração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Por fim, substâncias deletérias são aquelas que estão presentes em pequenas proporções nos agregados graúdos e miúdos, capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e endurecimento e as características de durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A seguir, são apresentadas características específicas acerca das areias de britagem, sendo necessário esse conhecimento para que se cumpram os objetivos do presente trabalho, onde se busca a substituição total da areia natural por areia de britagem, na produção do CAA.

2.2.3.3 Areia de Britagem

A norma brasileira NBR 9935 (2005) designa areia de britagem como material pétreo, proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas, com granulometria entre 4,75mm e 150 μ m. A areia pode ser submetida, ou não, a processos de classificação para a retirada das partículas de dimensões inferiores a 75 μ m.

Em pedreiras, a britagem de rochas para a produção de agregado graúdo para a construção civil gera quantidades significativas de pedrisco – dimensão abaixo de 11 mm. Dessa forma, esse material passa novamente pela britagem para ser utilizado como areia (CHAVES, 2005).

O uso da areia de britagem só traz benefícios ao meio ambiente, pois os resíduos gerados da britagem de rochas, para a produção de agregados ao concreto – finos de pedreira – são raramente utilizados, constituindo-se em um problema ecológico devido à dispersão destes pelo vento e pelas águas. Além disso, a substituição da areia natural por areia de britagem é positiva, pois a exploração crescente das jazidas de areia natural – responsável pelo esgotamento destas, em geral, as mais próximas aos grandes centros consumidores – tem feito com que haja diminuição na oferta desse tipo de agregado, sendo necessária busca de areia natural em locais mais afastados, resultando em elevação do custo deste material, assim como em poluição do meio ambiente também devido ao transporte (ALMEIDA, 2005; ALMEIDA; SILVA, 2005).

Dessa forma, buscando evitar danos ainda mais severos ao meio ambiente, os órgãos fiscalizadores ambientais aumentaram as restrições existentes, referentes à extração de areia natural. O Código Florestal Brasileiro (1965), por meio da Lei 4.771/65, considera como áreas de preservação permanentes as florestas e demais formas de vegetações naturais situadas ao longo dos rios ou cursos d'água. Como a areia natural é obtida, principalmente, através da extração em leito de rios, as licenças para exploração deste material têm sido suspensas, o que tem contribuído, também, para tornar a areia natural um material mais caro e escasso (SILVA et al., 2005; ALMEIDA; SILVA, 2005).

As partículas das areias de britagem são, em geral, angulosas, apresentando superfícies recém-criadas pela britagem; não expostas aos processos de intemperismo, como as superfícies das partículas das areias naturais. Além disso, estão presentes nas areias de britagem quantidades significativas de silte e/ou argila e grandes porcentagens de material pulverulento – com dimensão inferior a 75 μ m. Esses fatores contribuem, então, para a

diminuição da plasticidade das argamassas e concretos, dificultando a aplicação e exigindo maior vibração, maiores quantidades de água, com conseqüente aumento do consumo de cimento. O aumento do atrito interno das partículas sólidas da mistura, juntamente com os fatores citados, somam-se de modo a prejudicar em demasiado a utilização destes agregados em argamassa e concreto (ALMEIDA, 2005; CHAVES, 2005). Estes inconvenientes se tornam ainda mais graves quando é considerada a utilização dos agregados em concretos que necessitam elevada fluidez, como os CAA.

Para a superação destes inconvenientes, então, tem-se como alternativa a aplicação de aditivos químicos – plastificantes e superplastificantes. Como medida intermediária, existe ainda a possibilidade do uso combinado de areia natural e areia de britagem, que pode vir a eliminar, ou diminuir, os aspectos negativos citados (ALMEIDA, 2005).

Uma outra solução aos problemas apresentados, seria a minimização da angulosidade dos grãos das areias de britagem, pois as partículas, quando arredondadas, se tornariam mais próximas das partículas das areias naturais, quanto à forma, tendo um menor impacto na trabalhabilidade das misturas no estado fresco.

É possível a produção da areia de britagem cuja forma seja mais arredonda através da utilização de um britador VSI – *vertical shaft impactors* – ou britador de impacto de eixo vertical, apresentado na figura 04. Esse equipamento possui uma tecnologia diferente das utilizadas pelos britadores cônicos, sendo a redução do tamanho dos grãos feita pelo impacto de partícula contra partícula, de modo que ao entrarem em contato com outro grão, as arestas presentes irão se desfazer, ocorrendo arredondamento acentuado do produto (CHAVES, 2005).



Figura 04 – Britador de impacto de eixo vertical, ou VSI – *vertical shaft impactors*.

Assim, observa-se que com o controle das características da areia de britagem, em especial quanto à forma e porcentagem de finos, este agregado pode vir a apresentar um bom desempenho quando aplicado em argamassas e concretos, sendo este desempenho semelhante ao conferido por areias naturais (ALMEIDA; SILVA, 2005; BASTOS, 2005).

2.2.4 Aditivos

O uso de aditivos em concretos, pastas e argamassa vêm crescendo significativamente em todo o mundo. Alguns dados mostram que de 70 a 80% de todo o concreto produzido no mundo contenham um ou mais aditivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os aditivos são definidos por Paillère et al. (1992) como materiais orgânicos ou inorgânicos, no estado sólido ou líquido, adicionados aos concretos, argamassas ou pastas em quantidades não superiores a 5% sobre a massa de cimento ou materiais cimentícios. Esses aditivos interferem na hidratação do cimento, por meio de efeitos químicos ou físicos, modificando uma ou mais propriedades do concreto, argamassa ou pasta no estado fresco ou endurecido.

Diversos são os tipos de aditivos existentes, tendo estes composições químicas diferenciadas e, conseqüentemente, produzindo efeitos diferenciados sobre o concreto. Os aditivos mais comumente utilizados são os redutores de água ou plastificantes, redutores de água de alta efetividade ou superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores de pega e retardadores de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Porém, o avanço tecnológico tem permitido a utilização de diversos outros tipos de aditivos, de modo que atualmente a variedade de aditivos existente no mercado é maior, cada qual com uma função específica.

São tratados, a seguir, os aspectos referentes aos aditivos superplastificantes, comumente adicionados aos CAA para a obtenção da fluidez e viscosidade necessárias ao concreto.

2.2.4.1 Aditivos Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes exercem sobre o concreto uma função semelhante à exercida pelos aditivos plastificantes: permite reduzir a quantidade de água de amassamento necessária ao concreto sem alterar a consistência do material no estado fresco ou, aumentar a fluidez do concreto fresco sem que para isso seja aumentada a quantidade de água presente na mistura (NEVILLE, 1997).

Dessa forma, a diferença entre os dois tipos de aditivos concentra-se na composição química apresentada por cada um, que conseqüentemente é responsável por diferenças na intensidade de ação. Enquanto os aditivos plastificantes – à base de lignossulfonatos – permitem reduções de 10% a 15% da água de amassamento, os superplastificantes – polímeros sintéticos de cadeias lineares – podem promover reduções de até 30% (COLLEPARDI, 1998).

Entre os aditivos capazes de maiores reduções da água de amassamento estão os superplastificantes à base de ácidos sulfônicos de naftaleno formaldeído e melamina formaldeído, que promovem a dispersão das partículas finas principalmente por meio de repulsão eletrostática. Estes aditivos causam, também, diminuição da tensão superficial do meio aquoso, e por conseqüência, diminuição da viscosidade da pasta, podendo colaborar para a segregação. Há, também, aditivos superplastificantes produzidos à base de policarboxilatos, que agem por meio de repulsão estérica, não tendo influência na diminuição da viscosidade da pasta. Para a produção do CAA, verifica-se a necessidade de uso de aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos (REPETTE, 2005).

A repulsão eletrostática consiste na defloculação das partículas de cimento e liberação da água de amassamento aprisionada por essas partículas, podendo essa água ser usada para lubrificação. A defloculação ocorre quando os compostos do aditivo – que apresentam cargas negativas – são atraídos pelas partículas de cimento de carga positiva, passando todas as partículas de cimento a ter cargas negativas, vindo a se repelirem, conforme figura 05 (MEHTA; AİTCIN, 1990; AİTCIN et al., 1994).

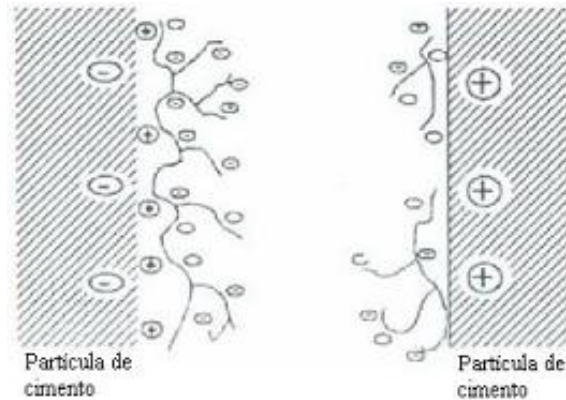


Figura 05 – Mecanismo de ação dos aditivos superplastificantes – repulsão eletrostática

Fonte: (AİTCIN, 2000).

O segundo mecanismo de ação, por repulsão estérica, ocorre quando são utilizados aditivos superplastificantes à base de éteres de policarboxilatos. Neste caso, a repulsão é decorrente do arranjo dos átomos, entre duas moléculas de superplastificante adsorvidas em dois grãos de cimento adjacentes, conforme apresentado na figura 06 (AİTCIN, 2000). O impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas do aditivo impede a aproximação das partículas de cimento.

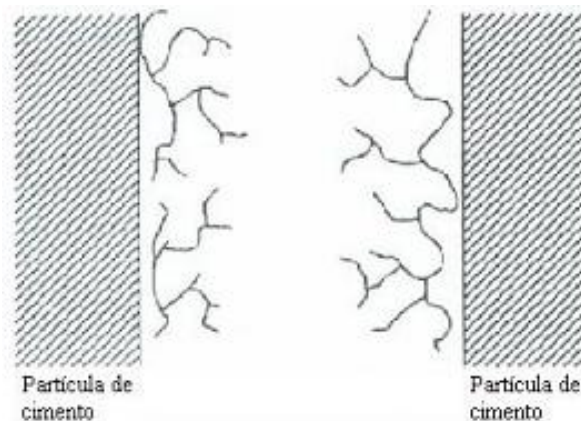


Figura 06 – Mecanismo de ação dos aditivos superplastificantes – repulsão estérica

Fonte: (AİTCIN, 2000).

Um aspecto importante da utilização de aditivos é a quantidade a ser adicionada aos concretos, argamassas e pastas. Sabe-se que a viscosidade da pasta de cimento diminui com o aumento da quantidade de superplastificante, o que ocorre até um determinado

ponto, quando mesmo aumentando-se a dosagem do superplastificante, não há uma redução significativa na viscosidade. Esse teor ótimo de superplastificante é chamado ponto de saturação, que é quando se obtém a dispersão máxima das partículas de cimento. Doses maiores de aditivo podem causar efeitos negativos como atraso na pega, segregação e aumento do custo do concreto (AÏTCIN et al., 1994; RONCERO; GETTU, 1998).

O ponto de saturação varia de um cimento para outro quando usado o mesmo superplastificante e, da mesma forma, varia de um superplastificante para o outro quando usado o mesmo tipo de cimento. Portanto, para cada combinação cimento-superplastificante, há uma dosagem ótima de superplastificante (AÏTCIN et al., 1994).

O momento de adição do superplastificante à mistura é outra questão de extrema importância. A incorporação do superplastificante sobre o cimento pré-hidratado causa um aumento da trabalhabilidade, já que a quantidade de aditivo adsorvido pelas faces já hidratadas é menor, restando mais aditivo livre para dispersar-se na mistura (MASOOD; AGARWAL, 1994; RONCERO; GETTU, 1998).

Segundo Toralles-Carbonari (1996), a adição tardia do superplastificante melhora tanto a trabalhabilidade como proporciona uma menor redução da fluidez com o tempo, quando comparado com casos de adição imediata do superplastificante. Ainda segundo esta autora, o tempo ótimo para a adição do superplastificante, para se obter a maior trabalhabilidade é de, aproximadamente, 2 minutos a partir da adição da água ao cimento, que corresponde ao início do período de dormência da hidratação do cimento sem o aditivo.

Um grande problema associado ao uso dos aditivos superplastificantes é a rápida perda da fluidez do concreto no estado fresco, que é influenciada pelo valor inicial da consistência, tipo e quantidade do superplastificante empregado, tipo e quantidade do cimento, tempo de adição do superplastificante, umidade, temperatura, critério de mistura e a presença de outros aditivos na mistura (MALHOTRA, 1981).

Concretos contendo cimentos com altos teores de C_3A (maior que 9%) tendem a perder a consistência mais rapidamente, sendo que o contrário ocorre com concretos feitos com cimentos com baixos teores de C_3A (menor que 5%). No caso da temperatura, quanto mais alta ela for, mais rápida será a perda da consistência. O aumento da temperatura conduz ao aumento da demanda de água por parte do cimento, para manter a mesma consistência, provocando o deslocamento da água livre na mistura para as partículas de cimento, diminuindo a fluidez (MALHOTRA, 1981; RONCERO; GETTU 1998).

Pode-se tentar minimizar a perda da consistência pela adição de maiores dosagens de superplastificantes – desde que cuidados com a superdosagem sejam tomados, pois esta pode causar retardamento elevado de pega ou segregação. A adição dos superplastificantes em diferentes intervalos de tempo e a adição do superplastificante imediatamente antes do lançamento do concreto, ou incluindo algum tipo de retardador na sua formulação, também pode auxiliar na redução da perda de fluidez com o tempo (RAMACHANDRAN, 1989; TORALLES-CARBONARI et al., 2006). Tais procedimentos podem trazer problemas como: danos ao caminhão betoneira por transportar concretos com baixa relação água-cimento antes da adição do superplastificante e a adição descontínua ou atrasada do superplastificante pode causar variações na trabalhabilidade, dificultando o controle da consistência do concreto e do tempo de colocação (JOHNSTON et al., 1979).

Novas gerações dos superplastificantes têm conseguido minimizar este problema, mas mesmo assim esta é uma desvantagem que limita, em alguns casos, a utilização destes aditivos e acaba por comprometer as vantagens que ele oferece (RAMACHADRAN, 1989).

2.2.5 Água

A qualidade da água de amassamento utilizada é de fundamental importância para a produção de concretos de adequado desempenho, pois a presença de impurezas pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto, por causar manchamentos na superfície deste material ou até mesmo provocar corrosão das armaduras. Dessa forma, a água de amassamento não deve conter matéria orgânica indesejável nem substâncias inorgânicas em teores excessivos. Em geral, diz-se que a água de amassamento deve ser boa para beber, mesmo sabendo-se que em muitos casos algumas águas não adequadas para beber podem ser utilizadas de forma satisfatória para o preparo de concretos – desde que apresentam pH entre 6,0 e 8,0, sem serem salobras (NEVILLE, 1997).

2.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

As características do concreto no estado fresco é que diferenciam o CAA dos concretos convencionais, sendo o controle das propriedades neste estado fundamental à obtenção de qualidade. Além disso, o desempenho do concreto durante sua vida útil é influenciado pelas características que o material apresenta desde a sua mistura, nas primeiras idades.

O CAA deve apresentar, obrigatoriamente, três propriedades no estado fresco, que não competem ao concreto convencional (RILEM, 2006):

- Habilidade de preenchimento: preencher a fôrma onde é aplicado e se auto-compactar, sem vibração, mantendo-se homogêneo;
- Habilidade de passagem: passar através de obstáculos, como as barras de armaduras, sem apresentar bloqueio de partículas de agregados;
- Resistência à segregação ou estabilidade: manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e a aplicação.

Para que o concreto tenha habilidade de preenchimento é necessário que a fluidez da pasta e da argamassa seja elevada, porém, juntamente com esta propriedade o concreto deve apresentar coesão elevada, para que, ao preencher a fôrma onde é aplicado, este permaneça homogêneo. Da mesma forma, a habilidade de passagem está relacionada à coesão de concreto, pois um material coeso contribui para a homogeneidade em situações onde há áreas restritas ou com alta quantidade de armaduras (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A estabilidade do concreto fresco é uma propriedade de grande importância, sendo um índice simultâneo da capacidade de retenção de água – oposto da exsudação, que é o afloramento de água e/ou pasta na superfície do concreto, depois de lançado – e da capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco – oposto da segregação, que é a separação do agregado graúdo dos demais componentes do concreto, tornando a mistura heterogênea. A resistência do concreto à exsudação e à segregação é chamada de coesão do material (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Gomes (2002) apresenta as propriedades exigidas ao CAA no estado fresco, juntamente com os mecanismos que governam cada uma delas, conforme tabela 02.

Tabela 02 – Propriedades e mecanismos que as governam o CAA, no estado fresco.

Propriedade	Mecanismos que governam
Habilidade de preenchimento	Fluidez elevada e coesão da mistura
Habilidade de passagem	Viscosidade moderada da pasta e argamassa; e propriedades dos agregados, em especial, dimensão máxima do agregado graúdo
Resistência à segregação ou estabilidade	Viscosidade e coesão da mistura

Fonte: (GOMES, 2002)

A seguir, são apresentados aspectos referentes a reologia do concreto, de grande importância para a caracterização física do material, sendo apresentadas, também, as formas de medição dos parâmetros reológicos dos concretos. Domone (2006b) ressalta que há uma relação entre a reologia das argamassas e dos concretos, sendo possível a realização de ensaios em argamassa para a previsão do comportamento do concreto. Dessa forma, apresenta-se uma breve descrição de ensaios utilizados para a previsão da auto-adensabilidade de argamassas. Dá-se seqüência, por fim, a uma apresentação acerca dos diferentes ensaios comumente usados em laboratório para a verificação das propriedades do CAA, no estado fresco.

2.3.1 Reologia do Concreto

Para uma adequada caracterização do concreto no estado fresco são recomendados estudos relativos a reologia deste, em especial ao se tratar de CAA, pois desse modo torna-se possível a determinação de parâmetros fisicamente mensuráveis (DACZKO; CONSTANTINER, 2001; SCHWARTZENTRUBER et al., 2006).

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos fluidos, sendo estes definidos como substâncias que se deformam continuamente quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, não importando quão pequena possa ser essa tensão (STREETER, 1974).

O CAA é um fluido que apresenta dois parâmetros reológicos para sua caracterização, a tensão de escoamento inicial (τ_0) e a viscosidade plástica (η). A tensão de

escoamento inicial consiste na tensão de cisalhamento mínima que precisa ser aplicada ao fluido – concreto – para que a deformação seja iniciada. Já a viscosidade plástica está relacionada ao gradiente de velocidade gerado quando da aplicação da tensão de cisalhamento, sendo a relação entre esta última e a taxa de escoamento (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003).

A figura 07 considera um fluido subdividido em lâminas: a força aplicada na lâmina superior gera um gradiente de velocidade – taxa de escoamento – que age sobre as demais, porém, o deslocamento sofrido pelas lâminas diminui quando são consideradas as lâminas superiores em relação às inferiores. Essa proporcionalidade existente entre a força aplicada – tensão de escoamento inicial – e o gradiente de velocidade, é a viscosidade do fluido (STREETER 1974; FERRARIS, 1999).

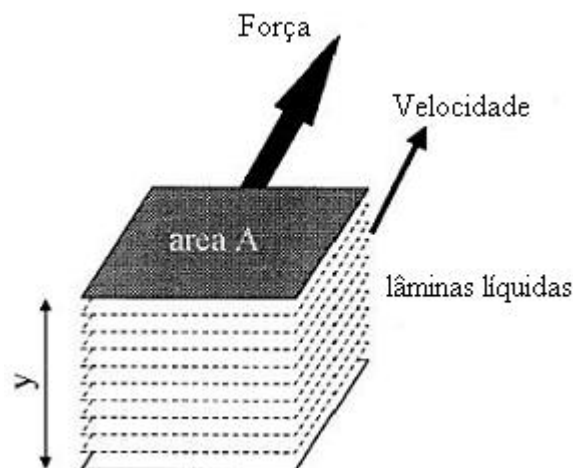


Figura 07 – Esquema de representação da deformação de um fluido: força aplicada – tensão de escoamento inicial – e relação entre força aplicada e gradiente de velocidade – viscosidade

Fonte: (adaptado de FERRARIS, 1999).

O modelo que descreve a reologia do CAA é chamado de modelo de Bingham, cuja Lei é apresentada pela equação 01 e pela figura 08 (FERRARIS et al., 2001; BANFILL, 2003; WÜSTHOLZ, 2005).

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

(01)

Onde:

τ : tensão de escoamento;

τ_0 : tensão de escoamento inicial;

η : viscosidade plástica;

γ : taxa de escoamento.

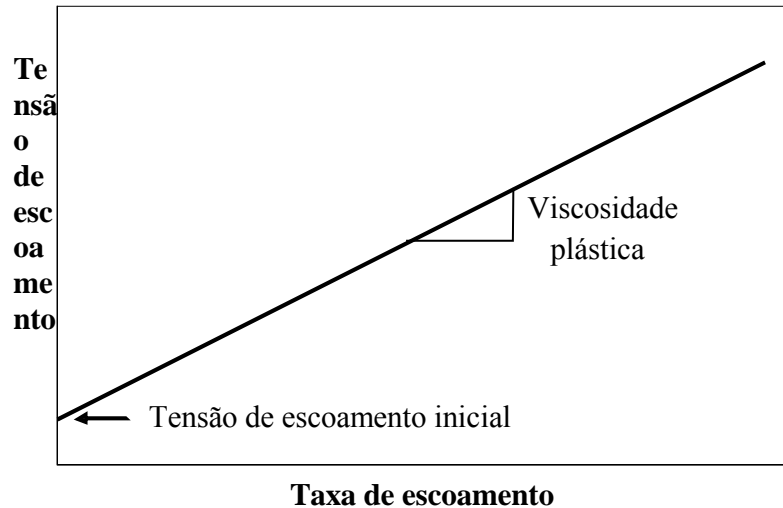


Figura 08 – Modelo de Bingham

Fonte: (adaptado de FERRARIS, 1999).

A tensão de escoamento inicial é frequentemente necessária para a caracterização de compósitos, como concreto, sendo resultado da força de atração existente entre as partículas presentes no material. A estabilidade resultante dessa força é abalada pela deformação da matéria. Desse modo, a tensão de escoamento inicial está relacionada com a deformabilidade do concreto (BANFILL, 2003). A viscosidade plástica, por sua vez, está relacionada à frequência de contato entre as partículas constituintes do concreto (NUNES, 2001).

Gomes (2002) relata que a tensão de escoamento inicial, para CAA, deve apresentar-se baixa, garantindo a fluidez necessária ao concreto. A viscosidade plástica, por sua vez, apresenta valores mais altos, sendo assim estabelecido para que possa dar estabilidade à mistura. Porém, quando são considerados os parâmetros reológicos aplicados aos concretos convencionais, observa-se uma inversão de comportamento. Khayat et al, (1999) salienta que quando o CAA apresenta baixa viscosidade, este enfrenta dificuldades em manter a dispersão homogênea dos materiais constituintes. A figura 09 apresenta faixas adequadas para o comportamento reológico em diferentes tipos de concreto.

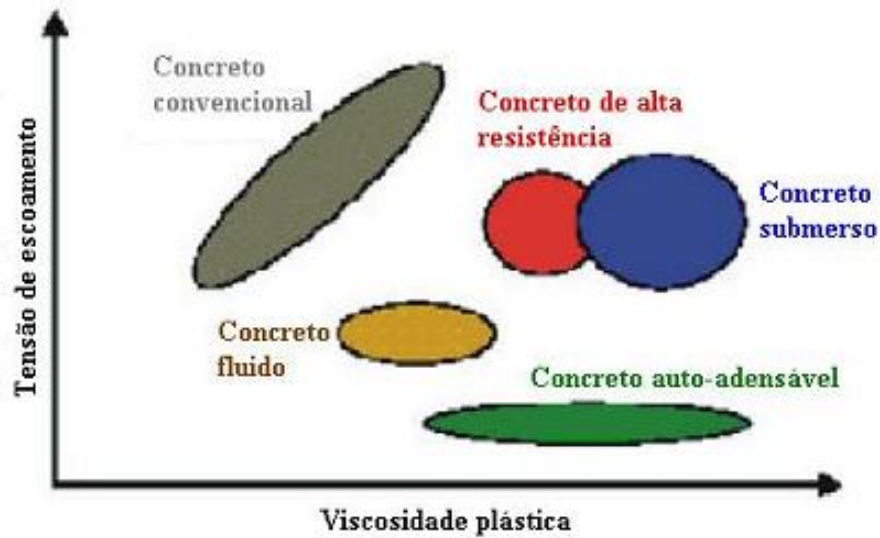


Figura 09 – Comportamento reológico de diferentes tipos de concreto (NUNES, 2001).

Outros tipos de fluidos podem apresentar comportamentos reológicos diferentes quando comparados ao concreto. A água, por exemplo, é considerado um fluido Newtoniano, não necessitando da tensão de escoamento inicial para sua caracterização. A figura 10 apresenta comportamentos reológicos de diferentes tipos de fluidos (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003).

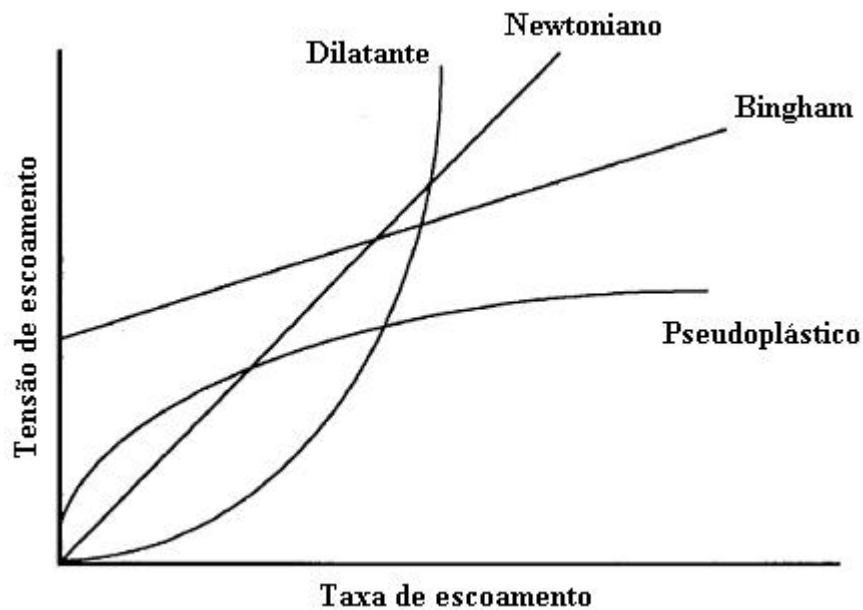


Figura 10 – Comportamentos reológicos de diferentes tipos de fluidos

Fonte: (adaptado de BARTOS, 1992 apud FERRARIS, 1999).

Os tipos e quantidades dos materiais utilizados na produção do concreto têm influência direta sobre a reologia da argamassa, cujos efeitos podem ser considerados estendidos para o concreto. As influências destes materiais sobre a tensão de escoamento e a viscosidade são apresentadas por Banfill (1994), e mostradas na tabela 03.

Tabela 03 – Efeitos de diferentes materiais sobre a reologia das argamassas.

Ação	Efeito	
	Tensão de escoamento	Viscosidade plástica
Aumento no volume de água	Redução	Redução
Aumento na quantidade de agregado miúdo	Aumento	Aumento
Aumento na quantidade de cimento	Aumento	Aumento
Aumento da finura do agregado miúdo	Aumento	Aumento/Sem efeito
Uso de aditivo plastificante	Redução	Sem efeito
Uso de aditivo incorporador de ar	Sem efeito	Redução
Substituição de parte do cimento por cinza volante	Redução	Redução
Substituição de parte do cimento por sílica ativa	Aumento	Redução

Fonte: (BANFILL, 1994)

Quanto à energia utilizada durante a mistura dos materiais componentes do concreto, Banfill (1994) salienta que os valores encontrados para a tensão de escoamento inicial e viscosidade plástica serão menores, quanto maior for a energia empregada. Esse fato pode ser decorrente de uma melhor dispersão das partículas finas, quebra dos produtos iniciais de hidratação da superfície do cimento e maior incorporação de ar dados pela maior intensidade de mistura.

Por fim, observa-se que diversos são os autores que apresentam a reologia como forma mais adequada de definir o comportamento do concreto no estado fresco, de modo que, quando possível, a determinação dos parâmetros reológicos constitui importante papel na caracterização do concreto. Para a determinação dos parâmetros reológicos são utilizados equipamentos chamados reômetros ou viscosímetros, apresentados a seguir.

2.3.1.1 Medição dos Parâmetros Reológicos

Para a medição dos parâmetros reológicos dos concretos são necessários equipamentos chamados reômetros ou viscosímetros, existindo diversos tipos destes equipamentos no mercado.

O primeiro instrumento desenvolvido com o propósito de mensurar os parâmetros reológicos do concreto fresco é chamado de reômetro de dois pontos de Tattersal. Este reômetro consiste em um recipiente onde é colocado determinado volume de concreto fresco, sendo, então, um impulsor – sofrendo rotação no interior do concreto – mergulhado na amostra, conforme figura 11. O impulsor permite a medição da velocidade de rotação e do torque, sendo possível observar a resistência imposta ao impulsor pelo material. Assim, com aumento da velocidade de rotação pode-se obter uma curva de torque por velocidade de rotação, sendo esta linear e, quando extrapolada à velocidade zero obtém-se a tensão de escoamento inicial. A viscosidade do material obtém-se através da declividade da curva (DOMONE et al., 1999; FERRARIS, 1999).

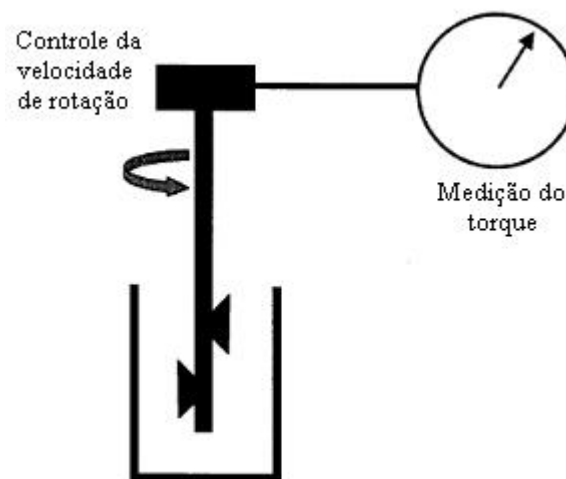


Figura 11 – Esquema de representação do reômetro de dois pontos de Tattersal

Fonte: (adaptado de FERRARIS, 1999).

Semelhantemente ao reômetro de dois pontos de Tattersal, o equipamento Vane tem sido muito utilizado para a determinação das propriedades reológicas de concretos e argamassas, apresentando bons resultados em ensaios realizados. Em geral, o método consiste

em mergulhar o equipamento Vane em uma amostra do material a ser ensaiado. Na seqüência, o equipamento sofre rotação à velocidade constante, sendo o início do escoamento definido ao se atingir o torque máximo (BAUER et al., 2007).

Outros reômetros foram desenvolvidos por outros pesquisadores, visando comercialização, apresentando aquisição automática de dados através do uso de computadores – como o reômetro IBB (FERRARIS, 1999 apud BEAUPRÉ, 1998) ou o viscosímetro BML (FERRARIS, 1999 apud WALLEVIK; GJORV, 1988). Outro reômetro disponível comercialmente é o reômetro BTRHEOM (HU; DE LARRARD, 1995), desenvolvido na França e apresentado na figura 12.

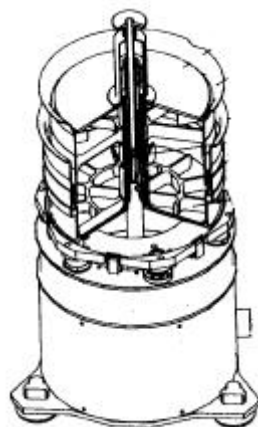


Figura 12 – BTRHEOM, desenvolvido na França

Fonte: (HU; DE LARRARD, 1995).

Os reômetros permitem a determinação dos parâmetros reológicos necessários à completa caracterização do concreto fresco. A figura 13 apresenta a curva de dois concretos que possuem um dos parâmetros idênticos, porém o segundo parâmetro variando, um em relação ao outro. A literatura nos mostra que esses concretos podem apresentar escoamentos bem diferenciados, afirmando a necessidade da completa caracterização do material através da determinação dos dois parâmetros reológicos (BANFILL, 2003; WÜSTHOLZ, 2005).

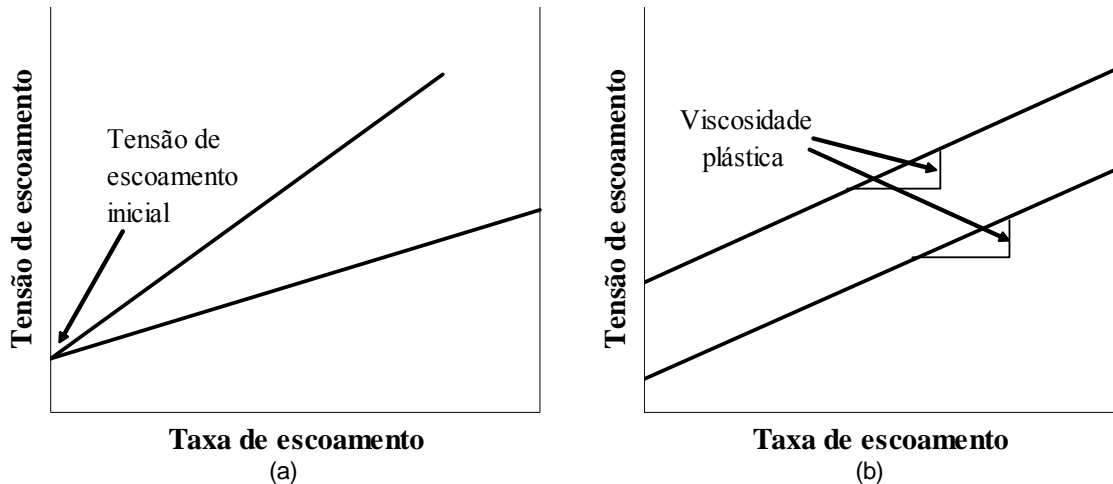


Figura 13 – Comparação entre concretos que apresentam apenas um dos parâmetros reológicos idênticos. (a) Tensão de escoamento igual e viscosidade plástica diferente; (b) Viscosidade plástica igual e tensão de escoamento inicial diferente

Fonte: (adaptado de FERRARIS, 1999).

2.3.2 Métodos de Ensaio para Auto-Adensabilidade de Argamassas

Segundo Domone (2006b), no CAA, as partículas do agregado graúdo são envoltas em uma camada de argamassa que deve ser suficientemente espessa para promover a fluidez necessária, assim como conferir ao concreto adequada estabilidade e habilidade de passagem. Dessa forma, há uma relação entre a reologia desses dois materiais, sendo possível a realização de ensaios em argamassa para a previsão do comportamento do concreto.

Os ensaios *slump flow* e funil em V, cujos equipamentos são apresentados na figura 14, apresentam correlação com os constantes do modelo de Bingham, tensão de escoamento inicial e viscosidade plástica, respectivamente. O uso combinado desses dois testes, então, permite uma descrição adequada da reologia das argamassas, na ausência de um equipamento mais sofisticado, como reômetros e viscosímetros (DOMONE, 2006b).

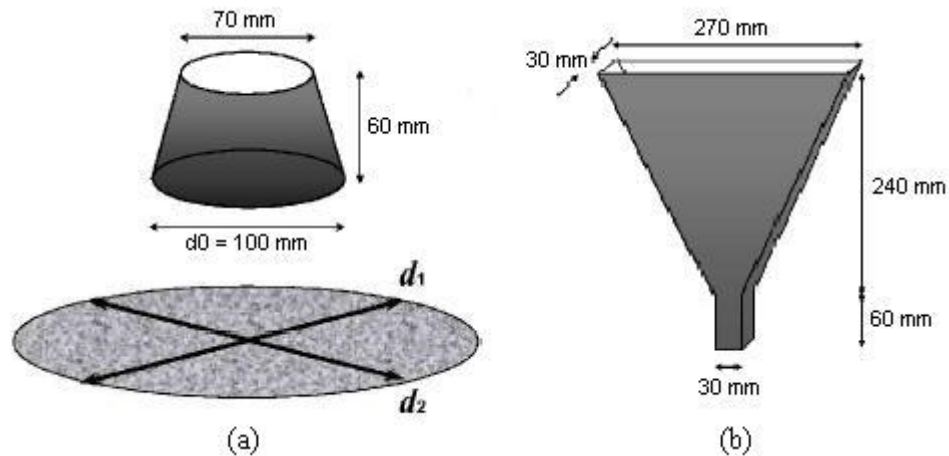


Figura 14 – (a) Ensaio de *slump flow*; (b) Ensaio de funil em V, ambos para argamassas

Fonte: (adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003).

O ensaio consiste, no caso do *slump flow*, em preencher o cone com argamassa, retirando este e verificando o diâmetro de espalhamento da argamassa. São medidos dois diâmetros, perpendiculares entre si. No ensaio de funil em V, preenche-se o funil com argamassa, e após isso, abre-se uma portinhola na base do funil, deixando a argamassa livre para fluir por uma abertura de dimensões pré-estabelecidas, medindo-se o tempo que a argamassa leva para escoar por esta abertura.

Domone (2006b) propõe equações que correlacionam os resultados obtidos para os ensaios em argamassa e concreto, que são:

$$sf_{\text{conc}} = 4,8 sp_{\text{mor}} - 800 \quad (02)$$

Onde sf_{conc} é o valor do *slump flow* do concreto e sp_{mor} é o valor do espalhamento para argamassa, em centímetros, e:

$$Vf_{\text{conc}} = 1,8 Vf_{\text{mor}} + 1,5 \quad (03)$$

Onde Vf_{conc} é o tempo de escoamento pelo funil em V do concreto e Vf_{mor} da argamassa, em segundos. O autor considera a validade das equações nos intervalos de 230 a 340 mm, para o *slump flow*, e 1,5 a 17 segundo, para o funil em V.

Estes ensaios são utilizados, também, no desenvolvimento do método de dosagem Repette-Melo para CAA, apresentado em Repette (2005) e Melo (2005). Este método determina que o teor de aditivo superplastificante deva ser especificado para que se

obtenha uma argamassa com *slump flow* entre 200 e 280 mm, e tempo de escoamento pelo funil em V de 3,5 a 10 segundos.

O método de dosagem de Okamura considera, também, o uso de ensaios em argamassa para a avaliação dos materiais presentes na mistura de concreto, como as adições minerais, a areia e o aditivo superplastificante, ou para a correção do proporcionamento do concreto quando este não se apresente suficientemente auto-adensável.

2.3.3 Métodos de Ensaio para Auto-Adensabilidade de Concretos

2.3.3.1 Slump Flow

O ensaio de *slump flow* é baseado no ensaio de *slump test* para a determinação da consistência dos concretos convencionais, de modo que em ambos os ensaios utilizam-se como equipamento o cone de Abrams. No ensaio de *slump flow*, porém, devido a alta fluidez do concreto, mede-se o espalhamento do concreto após a retirada do cone, sendo necessária uma base firme onde são marcadas circunferências de 200 mm – para se centrar o cone – e 500 mm – para determinação do tempo que o concreto leva para atingir esse diâmetro (T_{50}). A extensão final do fluxo do concreto (d_f) corresponde ao diâmetro final alcançado pelo material, sendo este a média aritmética de dois diâmetros perpendiculares.

A figura 15 apresenta os equipamentos de ensaio do *slump flow* com as devidas medidas.

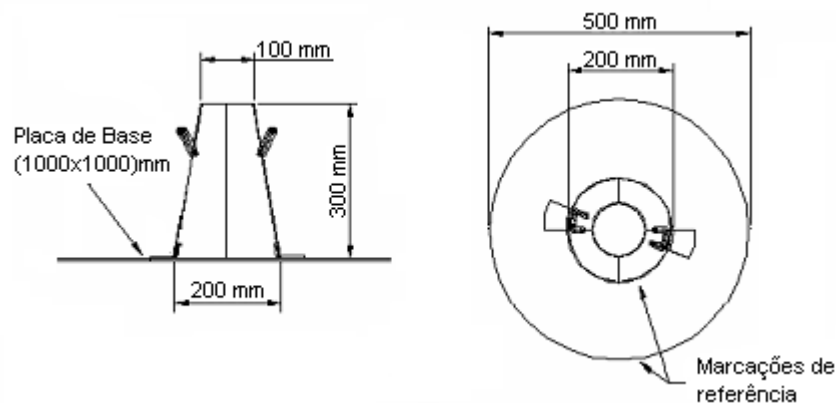


Figura 15 – Equipamento utilizado no ensaio de *slump flow* do CAA

Fonte: (adaptado de FURNAS, 2004a).

O ensaio de *slump flow* busca avaliar quantitativamente a capacidade de fluir do concreto mediante a ação de seu peso próprio e, também, realizar uma análise visual qualitativa da ocorrência de segregação e exsudação no material. A avaliação quantitativa é feita, então, através dos parâmetros T_{50} e d_f , onde Gettu et al. (2004) considera limites para T_{50} variando entre 1 e 10s, e para d_f entre 60 e 80cm. Efnarc (2002) considera o concreto como auto-adensável quando T_{50} varia de 2 a 5s e d_f varia entre 65 e 80cm. Efnarc (2005) faz modificações na forma de avaliação, quando comparada ao documento publicado em 2002, sendo consideradas classes de *slump flow*, e de avaliação da viscosidade de acordo com o tempo para atingir 50cm (T_{50}), conforme apresentado na tabela 04.

Tabela 04 – Classes de *slump flow* e viscosidade considerando T_{50} .

Classe	Slump Flow	
	d_f (mm)	T_{50} (s)
SF1	550 a 650	-
SF2	660 a 750	-
SF3	760 a 850	-
VS1	-	= 2
VS2	-	> 2

Fonte: (adaptado de EFNARC, 2005)

A avaliação visual de segregação é feita pela observação dos agregados graúdos, que tendem a permanecer próximos ao centro quando a resistência à segregação não é suficiente. Por fim, a exsudação é avaliada pela presença de uma auréola de pasta ou argamassa em torno de todo o diâmetro do concreto.

2.3.3.2 Slump Flow com o Anel Japonês

O ensaio de *slump flow* com o anel japonês, em inglês chamado *japanese ring* ou *J-Ring*, busca avaliar conjuntamente a habilidade do concreto de fluir e de passar através de obstáculos. O equipamento consiste, basicamente, em um anel metálico com diâmetro médio de 300mm, em cujo perímetro são dispostas barras perpendiculares ao plano

do anel separadas umas das outras por distância apropriada, considerando-se a dimensão máxima do agregado graúdo.

O ensaio de *slump flow* é realizado com a presença do anel japonês – apresentado na figura 16 – em torno do cone de Abrams. Após a retirada do cone e cessado o fluxo do concreto, então, mede-se o diâmetro final de extensão de fluxo (d_{jf}) – média aritmética de dois diâmetros perpendiculares – para a avaliação quantitativa da capacidade de fluir do concreto. Para avaliação quantitativa do bloqueio imposto pelas barras metálicas, medem-se as alturas do concreto no centro do anel (h_1) e fora deste (h_2).

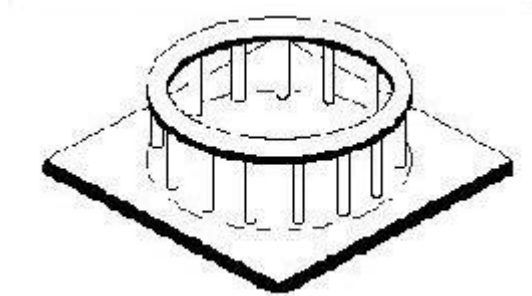


Figura 16 – Anel japonês.

Considera-se que o concreto apresenta boa capacidade de fluir e de passar por obstáculos quando o diâmetro final de espalhamento do concreto com a presença do anel japonês (d_{jf}) é maior que o diâmetro final obtido sem a presença do anel menos 50mm ($d_f - 50\text{mm}$), de acordo com Gettu et al. (2004). Estes autores, juntamente com Efnarc (2002), consideram, ainda, que a diferença entre as alturas do concreto dentro e fora do anel japonês deve ser menor que 10mm.

Realiza-se, também, neste ensaio, avaliação visual da existência de segregação e exsudação do concreto da mesma forma em que se procede no ensaio de *slump flow* sem a presença do anel japonês.

2.3.3.3 Funil em V

O ensaio de funil em V, chamado em inglês de *V-funnel*, busca avaliar a capacidade do concreto em fluir através de áreas restringidas – pequenas aberturas – na direção vertical, mediante seu peso próprio. É possível a avaliação da tendência à segregação e bloqueio mediante observação da variação da velocidade de fluxo.

O funil em V pode apresentar geometria da seção transversal circular ou retangular, sendo esta segunda mais comumente utilizada. Ao fundo do funil tem-se uma abertura, devendo a seção deste canal de saída considerar o tamanho máximo do agregado, de modo que se recomenda dimensão mínima superior a três vezes o tamanho máximo do agregado graúdo.

A figura 17 apresenta o funil em V de seção retangular, suas dimensões são apresentadas na tabela 05, conforme Furnas (2004b), Gettu et al. (2004), Efnarc (2002) e Efnarc (2005). Observa-se que as dimensões do funil em V foram modificadas, ao se considerar a revisão realizada por Efnarc.

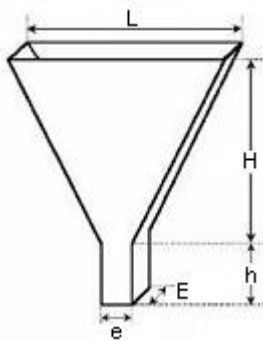


Figura 17 – Funil em V de seção retangular
Fonte: (adaptado de FURNAS, 2004b).

Tabela 05 – Dimensões do funil em V.

Fonte	Dimensões do equipamento (mm)				
	L	H	h	E	e
FURNAS (2004b); EFNARC (2005)	515	450	150	75	65
GETTU et. al. (2004); EFNARC (2002)	490	425	150	75	65

Para realização do ensaio, preenche-se o funil com concreto, abrindo-se, em seguida, a portinhola que veda a abertura da base, permitindo que o volume total de concreto flua através do funil, e medindo-se o tempo de fluxo. Durante a medida, deve-se observar o interior do funil, de modo que a contagem do tempo é encerrada ao primeiro sinal de luz na abertura da base. Para funil de seção retangular de 65 x 75 mm – utilizado no presente trabalho – considera-se que o tempo de fluxo é adequado quando varia de 5 a 25 segundos, segundo Gettu et al. (2004) e de 8 a 12 segundos, de acordo com Efnarc (2002). Efnarc (2005) determina classes de avaliação da viscosidade, conforme apresentado na tabela 06.

Tabela 06 – Classes de avaliação da viscosidade, considerando funil em V.

Classe	Funil em V
	t (s)
VF1	= 8
VF2	9 a 25

Fonte: (adaptado de EFNARC, 2005)

A natureza do fluxo – contínua ou descontínua – permite uma avaliação visual do concreto, de modo que um fluxo contínuo e sem interrupções indica elevada resistência à segregação e ao bloqueio.

2.3.3.4 Caixa em L

O ensaio da caixa em L, em inglês *L-Box*, busca determinar a capacidade de passagem do concreto por barras de armadura. A caixa em L é constituída por um depósito vertical com uma abertura para um canal horizontal, sendo esta abertura fechada por uma comporta, que se abre para a passagem do concreto, conforme figura 18 (a). Atrás dessa comporta são colocadas barras de armaduras espaçadas umas das outras a uma distância mínima de três vezes o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado, segundo recomendações de Efnarc (2002) e Gomes (2002).

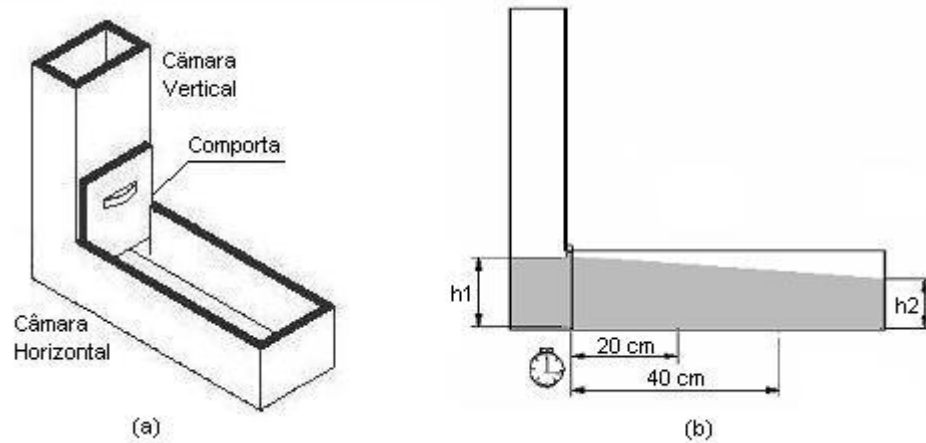


Figura 18 – (a) Caixa em L; (b) Esquema de ensaio para caixa em L, vista lateral

Fonte: (adaptado de FURNAS, 2004c).

Para a realização do ensaio, então, preenche-se o depósito vertical com concreto, abrindo-se a comporta em seguida, de modo que o concreto flua pelo canal horizontal, passando através das barras metálicas. Em seguida, com o concreto em repouso, são medidas as alturas nos dois extremos do canal horizontal, sendo h_1 próxima à comporta e h_2 ao final do canal, conforme figura 18 (b), de modo que a razão h_2/h_1 é definida como coeficiente de bloqueio, devendo ser superior a 0,80 para que a resistência ao bloqueio do concreto seja considerada satisfatória, conforme Gettu et al. (2004). Efnarc (2002) considera que o coeficiente de bloqueio deve ser superior a 0,80 e inferior a 1,00. Efnarc (2005) determina classes de avaliação da habilidade de passagem do concreto, conforme apresentado na tabela 07.

Tabela 07 – Classes de avaliação da habilidade de passagem, considerando h_2/h_1 .

Classe	Caixa em L
	h_2/h_1
PA1	= 0,80, com 2 barras
PA2	= 0,80, com 3 barras

Fonte: (adaptado de EFNARC, 2005)

No ensaio com a caixa em L é possível, também, a determinação do tempo que o concreto leva para percorrer determinada distância como um parâmetro de caracterização da capacidade de fluir do material. Considera-se que para se percorrer a distância de 20 cm (T_{20}), o tempo deve ser inferior a 1,5 s, e para se percorrer a distância de 40 cm (T_{40}), o tempo deve ser inferior a 2,5 s.

Para avaliação qualitativa da segregação do concreto observa-se o acúmulo do agregado graúdo atrás e/ou entre as barras da armadura, de modo que isso não deve ocorrer – o agregado graúdo deve estar uniformemente distribuído ao longo de todo o canal horizontal – para que o concreto apresente boa resistência à segregação.

2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Desde a introdução do CAA na indústria da construção civil, teve-se sempre grande interesse nas propriedades deste material no estado fresco, de modo que estas foram e continuam a ser muito estudadas por pesquisadores em todo o mundo. Porém, quando se tem em vista o uso estrutural do concreto, são as propriedades do material no estado endurecido que ganham maior importância, exigindo estudos que permitam sua previsão (DOMONE, 2006).

Em geral, SCC EPG (2005) considera comparáveis as propriedades, no estado endurecido, entre CAA e concretos convencionais vibrados, sendo as diferenças, quando existentes, atribuídas à forma de produção e dosagem do material.

Serão estudadas, no presente trabalho, as propriedades de resistência mecânica à compressão, à tração e módulo de deformação do CAA, no estado endurecido. A seguir, são apresentados parâmetros referentes a estas propriedades do concreto.

2.4.1 Resistência Mecânica

A resistência à compressão é, geralmente, a característica mais relevante do concreto endurecido, sendo determinada através de um ensaio padrão de compressão uniaxial,

e aceita universalmente, na idade de 28 dias, como um índice geral da resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

É de conhecimento geral que a relação água/cimento de um concreto é a principal responsável pela porosidade da matriz de cimento e da zona de transição entre matriz e agregado graúdo, que têm influência direta na resistência do concreto, de modo que quanto maior a porosidade do material, menor será sua resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Porém, fatores como adensamento, dimensões e mineralogia dos agregados, presença de adições minerais, aditivos e composição do concreto, em geral, influenciam fortemente as propriedades do concreto no estado endurecido. Desse modo, no CAA a combinação desses fatores faz com que o material apresente uma microestrutura mais homogênea, com uma menor porosidade quando comparada a concretos convencionais. Esse fato faz com que a resistência à compressão dos CAA possa se apresentar ligeiramente maior que a de concretos convencionais, para a mesma relação água/cimento (SCC EPG, 2005; MELO, 2005).

A durabilidade do concreto é influenciada, também, pela resistência à compressão e porosidade, de modo que o CAA apresenta maior durabilidade quando comparados a concretos convencionais, devido a melhoria apresentada pela microestrutura, mais homogênea e menor incidência de falhas (REPETTE, 2005).

Da mesma forma, a resistência à tração também pode ser comparável, de modo que o comportamento observado em CAA é o mesmo que ocorre em concretos convencionais vibrados (LEITE, 2007). Em alguns casos, porém, a relação entre resistência à tração e resistência à compressão ser um pouco maior para CAA, devido à microestrutura mais homogênea e menor porosidade na interface entre matriz e agregado graúdo (HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002).

2.4.2 Módulo de Deformação

O módulo de deformação é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea sofrida pelo concreto, no estado endurecido, sendo dependente das características dos materiais constituintes, assim como da dosagem da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Proske e Graubner (2005) e SCC EPG (2005) relatam que quanto maior a quantidade de agregado de alta rigidez presente no concreto, maior será o módulo de elasticidade apresentado por este. Da mesma forma, a diminuição do volume de agregado, e conseqüente aumento do volume de pasta da mistura, irão proporcionar uma diminuição no valor do módulo de deformação apresentado.

Dessa forma, tem-se que o CAA, em geral, apresenta menor módulo de elasticidade quando comparado a concretos convencionais, pois apresenta maiores quantidades de materiais finos e aditivos, assim como de pasta de cimento, necessária à fluidez. A análise de um banco de dados permitiu a conclusão de que o CAA pode chegar a apresentar módulo de elasticidade 20% inferior ao apresentado por concretos convencionais, que possuam a mesma resistência à compressão e mesmos agregados presentes na mistura (HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002).

O módulo de elasticidade pode ser determinado de forma estática ou dinâmica, sendo, no primeiro caso, a declividade da curva tensão/deformação obtida para um concreto submetido a carregamento uniaxial – carga estática. O módulo de elasticidade dinâmico, porém, fornece resultados mais precisos, através de carregamentos dinâmicos que resultam em deformações instantâneas muito pequenas. Em geral, o módulo de elasticidade dinâmico é 20, 30 e 40 % maior que o módulo de elasticidade estático, para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.5 ESTUDO DE DOSAGEM

Segundo Aïtcin (2000), o método de dosagem tem por objetivo determinar uma combinação adequada – técnica e economicamente – dos materiais constituintes do concreto.

Diversos são os métodos de dosagem existentes para o proporcionamento de CAA, sendo o primeiro desenvolvido por Okamura e Ozawa, em 1995, e utilizado ainda hoje por diversos pesquisadores. Após isso, com o desenvolvimento de estudos, no mundo, acerca de CAA outros métodos foram criados, baseando-se no estudo dos agregados e esqueleto granular ótimo, ou na demanda de água dos materiais constituintes, métodos para a produção de concretos convencionais ou concretos de alta resistência.

A seguir são descritos os métodos propostos por Okamura e Ozawa, em 1995, e Repette-Melo, em 2005. A descrição destes métodos fundamenta-se na existência de etapas de estudos em argamassas, conforme busca-se realizar neste trabalho.

2.5.1 Método de Dosagem Proposto por Okamura

Para promover alta fluidez da pasta ou argamassa e, simultaneamente, resistência à segregação – separação do agregado graúdo e argamassa – no momento em que o concreto flui através de áreas restritas ou barras de armaduras, Okamura e Ozawa propuseram, em 1995, um método baseado em três princípios (OKAMURA; OUCHI, 2003):

- 1) Conteúdo limitado de agregados no concreto;
- 2) Baixa relação água/finos;
- 3) Uso de aditivo superplastificante.

A limitação do consumo de agregado graúdo no CAA é justificada, pois esses agregados promovem um alto consumo de energia quando suas partículas encontram-se muito próximas umas das outras, provocando colisões e resultando em bloqueios, em regiões próximas a obstáculos. Deve-se observar, também, que a tensão no interior do concreto aumenta quando o conteúdo de agregado é elevado, de modo que a energia necessária ao concreto para fluir é consumida para estabilização dos agregados no interior da mistura, tendo como consequência, novamente, bloqueio ao passar por obstáculos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A baixa relação água/finos e o uso de aditivo superplastificante são justificados pela necessidade em se obter uma pasta fluída, porém, com alta viscosidade, de modo que esta seja capaz de manter estável o agregado graúdo em seu interior e transportá-lo no momento de passagem por obstáculos, como barras de armadura. A alta viscosidade da pasta previne, também, aumento localizado de tensão interna, devido à aproximação das partículas do agregado graúdo (OKAMURA; OUCHI, 2003).

As figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, uma comparação entre as proporções de materiais utilizados no CAA e nos concretos convencionais e, o esquema do método utilizado por Okamura e Ozawa para obtenção da auto-adensabilidade.

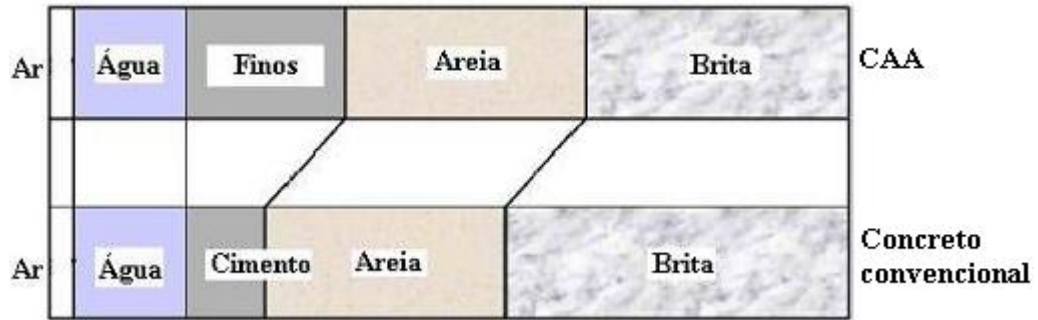


Figura 19 – Comparação entre as proporções de materiais utilizados no CAA e em concretos convencionais

Fonte: (daptado de OKAMURA; OUCHI, 2003).

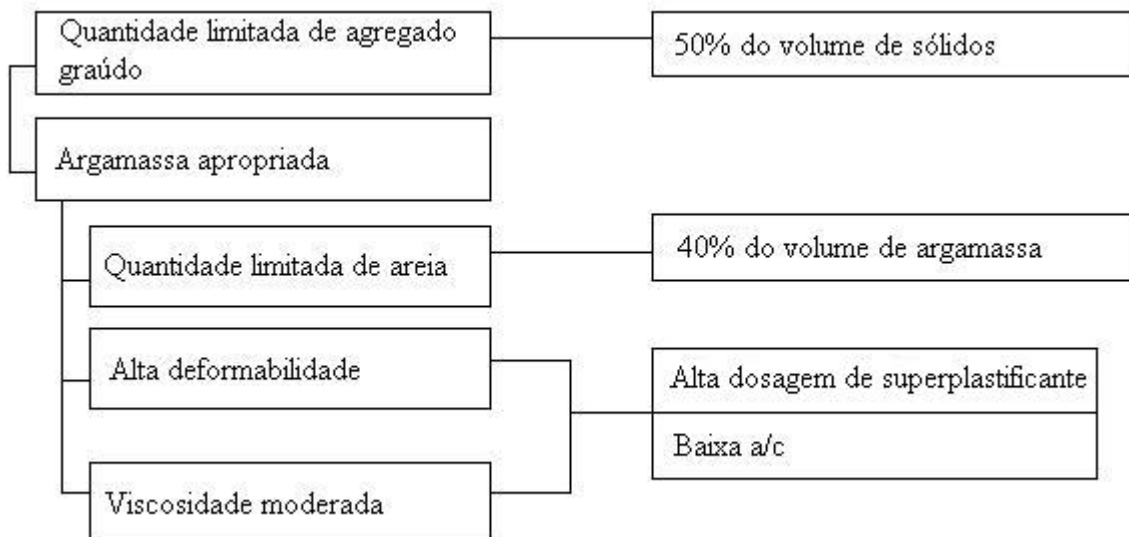


Figura 20 – Esquema do método utilizado por Okamura e Ozawa para obtenção da auto-adensabilidade

Fonte: (adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003).

Para a verificação da auto-adensabilidade do concreto, assim como a tendência à segregação do material, os autores sugerem a realização do ensaio de caixa em U, *slump flow* e funil em V. Nesses ensaios, caso o concreto não se apresente suficientemente auto-adensável, é necessária a correção do proporcionamento do material. Essa correção pode ser realizada através de ensaios em argamassa de *slump flow* e funil em V, em escala reduzida, conforme apresentado no item 2.3.2.

2.5.2 Método de Dosagem Proposto por Repette-Melo

O método de dosagem Repette-Melo para CAA baseia-se no estabelecimento de composições de CAA para resistências à compressão previamente requeridas, estando estas resistências entre 20 e 45 MPa. A descrição do método encontra-se em Repette (2005) e Melo (2005) e é resumida a seguir.

O método divide-se em ensaios em pasta, argamassa e concreto, de modo que os materiais constituintes são definidos em cada uma destas etapas. Inicia-se a dosagem, determinando-se a relação água/cimento a ser utilizada, com base no tipo de cimento empregado e nas resistências requeridas – exige-se o emprego mínimo de três resistências para a formação de uma família de CAA. A seguir, define-se a relação filer/cimento para cada relação água/cimento estabelecida, buscando corrigir a instabilidade da pasta, através da eliminação de exsudação e segregação, com a adição do filer. A incorporação do filer pode ser feita em intervalos de 5%, em volume.

Passa-se, então, ao estudo da argamassa, onde se determina o teor de agregado miúdo e de aditivo superplastificante. Nesta etapa, ajustam-se os teores buscados apenas para a relação água/cimento intermediária – ensaios realizados com diferentes teores de agregado miúdo e aditivo superplastificante – sendo o valor encontrado utilizado, também, para as relações água/cimento dos extremos. O método prevê, ainda, que o volume de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa deve encontrar-se, preferencialmente, entre 35 a 55%, partindo-se do valor inferior adotado a incrementos de 5%, ou menores porcentagens, na necessidade de um ajuste mais fino. O aditivo superplastificante é incorporado em intervalos de 0,05%, ou inferior, partindo-se de 0,1% (massa de sólidos em relação à massa de cimento).

Os ensaios adotados para a verificação das argamassas são o *slump flow* e o funil em V, de modo que os resultados buscados são o diâmetro de espalhamento da argamassa entre 200 e 280 mm, e o tempo de escoamento no funil em V entre 3,5 e 10 segundos. No ensaio de funil V, devem ser descartadas as argamassas que apresentem tendência à segregação. Por fim, o volume ideal de agregado miúdo é selecionado dentre as misturas cujos valores dos ensaios estão dentro dos limites, sendo a que contém o maior teor deste material.

Devido ao uso do aditivo superplastificante, a quantidade de adição definida na pasta pode ser aumentada, para que sejam obtidas misturas mais econômicas. Os estudos

apresentados para a composição do método mostram que um aumento de 5%, em relação ao valor definido inicialmente, é satisfatório. Assim, as argamassas são avaliadas novamente, variando-se o teor do aditivo superplastificante em intervalos de 0,05%, partindo do teor definido na etapa de ajuste do agregado miúdo, e novos limites são estabelecidos para os ensaios, estando o diâmetro de espalhamento da argamassa entre 250 e 280 mm e o tempo de escoamento no funil em V entre 5 e 10 segundos.

Por fim, iniciam-se os estudos em concreto, buscando a determinação do teor de agregado graúdo da mistura. Empregando-se a argamassa com relação água/cimento intermediária, definida na etapa anterior, preparam-se concretos com diferentes teores de agregados graúdos, sendo propostos os teores de 27; 28,5; 30; 31,5 e 33%, em relação ao volume total de concreto. Os ensaios são iniciados, então, utilizando o menor teor de agregado graúdo, prosseguindo-se com os demais teores.

São realizados os ensaios de *slump flow*, funil em V e caixa em L, ajustando-se o teor de aditivo para que se atinjam os requisitos exigidos sempre que houver perda nas propriedades de auto-adensabilidade, devido ao aumento de agregado. Os limites de aceitação para o CAA, de acordo com o método proposto são apresentados na tabela 08.

Tabela 08 – Limites de aceitação para CAA

Método de ensaio	Valores aceitáveis para o CAA
Espalhamento (d)	600 a 700 mm
Funil-V (t)	< 10 s
Caixa-L (H ₂ /H ₁)	≥ 0,8

Fonte: (MELO, 2005).

O teor ideal de agregado graúdo é o máximo possível para que sejam atendidos os requisitos de ensaio, empregando-se um teor de aditivo, preferencialmente, inferior a 0,3%. A escolha deve se dar, também, a partir da análise da uniformidade na distribuição das partículas do agregado, verificando-se a existência de pasta no espalhamento, a ocorrência de bloqueio e segregação. Deve-se observar o tamanho máximo do agregado graúdo.

Após a definição dos materiais constituintes do concreto, resta apenas o ajuste final do aditivo superplastificante, feito através da variação do teor deste e realizando os ensaios de *slump flow*, funil em V e caixa em L, tendo como teor inicial o definido para

argamassa, podendo ser acrescentado em 0,05%. Deve-se observar a ocorrência da perda de fluidez com o tempo dos concretos, através de ensaios adequados. A resistência à compressão deve ser avaliada, tanto para as argamassas, objetivando detectar erros antes da produção de concretos, quanto para os concretos.

A figura 21 apresenta o fluxograma do método de dosagem Repette-Melo.

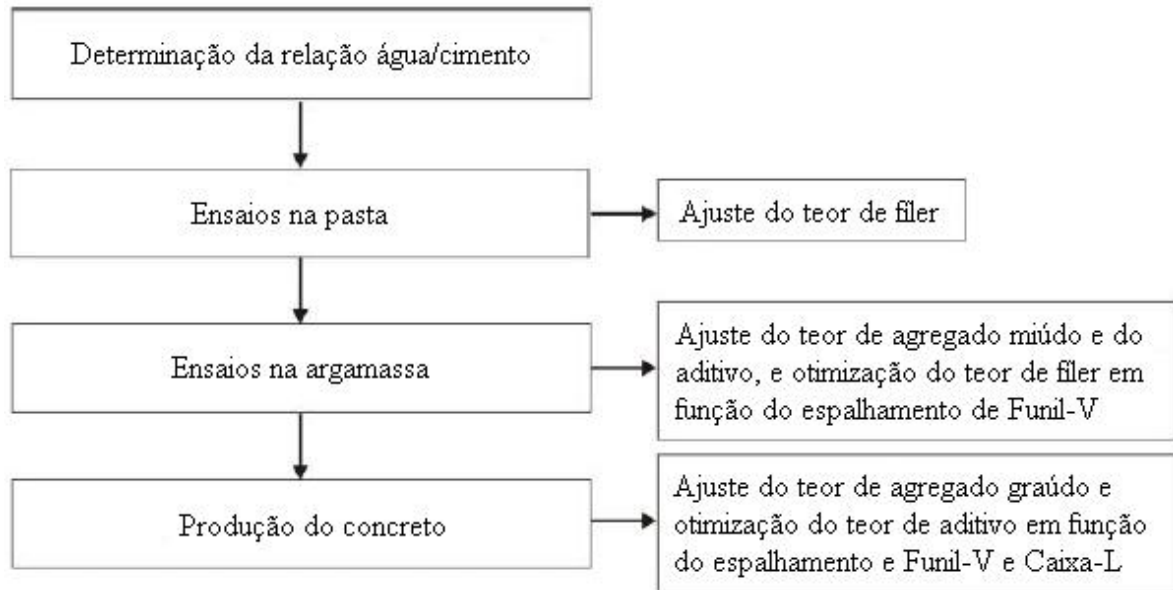


Figura 21 – Fluxograma do método de dosagem Repette-Melo

Fonte: (MELO, 2005).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental desenvolvido para estudo do concreto auto-adensável, sendo este dividido em escolha e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, dosagem, ensaios em pasta, argamassa e concreto.

3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O programa experimental desenvolvido contempla a utilização dos seguintes materiais:

- Cimento Portland do tipo CP V ARI RS;
- Adições minerais: cinza volante e escória de alto forno;
- Agregado miúdo: areia natural e areia de britagem;
- Agregado graúdo: brita ½ e brita 0;
- Aditivo superplastificante, à base de éter de policarboxilatos;
- Água.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland do tipo CP V ARI RS foi escolhido pela praticidade que oferece ao permitir a desforma rápida, tanto de corpos-de-prova, em laboratório, como de elementos estruturais, em canteiros de obra. A agilidade requerida na construção e a limitação cada vez maior do tamanho dos canteiros de obra fazem com que fatores como tempo e espaço sejam de grande importância no processo de produção da edificação.

Segundo informações do fabricante do cimento, este obedece às exigências da norma brasileira NBR 5733/1980, estando sua composição química, características físicas, mecânicas e químicas em acordo com o especificado nas tabelas 09 a 11.

Tabela 09 – Composição química do cimento Portland CP V ARI RS.

Cimento	Gesso + Clínquer	Calcário
CP V ARI RS	95 a 100%	0 a 5%

Fonte: (adaptado da norma NBR 5733/1980)

Tabela 10 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS.

Finura	Resíduo na # 75 μ m (%)	≤ 6
	Área específica (m ² /kg)	≥ 300
Tempo de pega (h)	Início	≥ 1
	Término	≤ 10
Expansibilidade (mm)	A frio	≤ 5
	A quente	≤ 5
Resistência à compressão (Mpa)	1 dia	≥ 14
	3 dias	≥ 24
	7 dias	≥ 34
	28 dias	-

Fonte: (adaptado da norma NBR 5733/1980)

Tabela 11 – Características químicas do cimento Portland CP V ARI RS.

Resíduo insolúvel (%)	≤ 1
Perda ao fogo (%)	$\leq 4,5$
MgO (%)	$\leq 6,5$
SO ₃ (%)	$\leq 3,5$
CO ₂ (%)	$\leq 3,0$
S (%)	-

Fonte: (adaptado da norma NBR 5733/1980)

3.1.2 Adição Mineral

O uso de adições minerais na produção do CAA é de grande importância, pois a viscosidade requerida neste tipo de concreto é obtida pela presença de grande

quantidade de material fino. A necessidade da elevada viscosidade fundamenta-se na ação de transportar os agregados presentes no concreto, sem que ocorra segregação destes.

Optou-se nesta pesquisa pela substituição de parte do cimento por dois tipos de adições minerais: a cinza volante e a escória granulada de alto forno, pois ambas apresentam desempenho técnico satisfatório quando incorporadas a concretos e argamassas. Além disso, essas adições são subprodutos industriais disponíveis na região de Londrina/PR. Esse fato torna o uso destas adições viável economicamente, assim como minimiza os impactos ambientais resultantes de suas disposições no meio ambiente.

Ressalta-se, no entanto, que a incorporação das adições ao concreto foi feita separadamente uma da outra, não sendo produzidos concretos com a incorporação simultânea destas adições minerais. Assim, foram produzidos apenas concretos com misturas binárias, sendo estas misturas de cimento e cinza volante, e cimento e escória de alto forno.

As características físicas e químicas apresentadas pela cinza volante e pela escória de alto forno são dadas pelos fabricantes dos materiais, estando apresentadas nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Características físicas da cinza volante e da escória de alto forno.

Características físicas	Cinza volante	Escória de alto forno
Massa Específica (g/cm ³)	2,35	2,82
Massa Unitária (g/cm ³)	1,20	-
Finura na peneira 325 (% retida)	11,2	1,4
Área específica Blaine (cm ² /g)	3.484	6.910
Diâmetro dos grãos (micra)	7,49	-
Retração por secagem (%)	0,013	-

Fonte: (fornecedor)

Tabela 13 – Características químicas da cinza volante e da escória de alto forno.

Características químicas		Cinza volante	Escória de alto forno
Reatividade com álcalis	Redução expansão (%)	82,9	-
	Expansão argamassa (%)	0,010	-
Índice de atividade pozolânica	Água requerida (%)	100,6	-
	Com cimento (%)	80,2	-
	Com cal (%)	9,0	-
Análise química (%)	Umidade	0,60	-
	Perda ao fogo	5,22	0,28
	SiO ₂	55,25	40,16
	Fe ₂ O ₃	8,58	1,76
	Al ₂ O ₃	20,85	22,28
	CaO	3,14	31,9
	MgO	0,27	1,44
	SO ₃	0,69	0,55
	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	29,43	24,04
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	84,68	64,2
	Na ₂ O (disponível)	0,55	-
	K ₂ O (disponível)	1,20	-
	Equiv. alcalino Na ₂ O (disp.)	1,34	-
	Resíduo insolúvel (RI)	-	1,43
	Sulfato de cálcio (CaOSO ₄)	-	0,94

Fonte: (fornecedor)

3.1.3 Agregado Miúdo

Conforme citado anteriormente, nesta pesquisa busca-se a substituição da areia natural necessária ao concreto por areia de britagem. Esta substituição é justificada, pois as jazidas de areia natural vêm sofrendo um processo contínuo de esgotamento, especialmente nas proximidades dos grandes centros consumidores. Desse modo, o custo desse material vem se tornando cada vez maior, por razão do aumento nas restrições referentes à extração desta areia, impostas pelos órgãos fiscalizadores ambientais.

Assim, o presente estudo faz uso da areia natural e da areia de britagem como agregado miúdo. No início da pesquisa, utiliza-se a areia natural para a produção de argamassas e concretos auto-adensáveis, sendo estes considerados parâmetros de comparação

de resultados, quando da substituição total, assim como de porcentagens deste agregado, pela areia de britagem. Ressalta-se o uso de duas areias naturais diferentes, uma a ser usada em concretos com 100% de areia natural, e outra a ser usada em concretos com combinações das areias natural e de britagem.

3.1.3.1 Caracterização da Areia Natural

Para a caracterização da areia natural utilizada foram realizados os seguintes ensaios, cujos procedimentos são descritos nas normas técnicas correspondentes:

- Composição granulométrica e dimensão máxima, segundo norma NM 248/2003;
- Massa específica, segundo norma brasileira NBR 9776/1986;
- Massa unitária, no estado solto, segundo norma brasileira NM 45/2002;
- Absorção de água, segundo norma brasileira NM 30/2001.

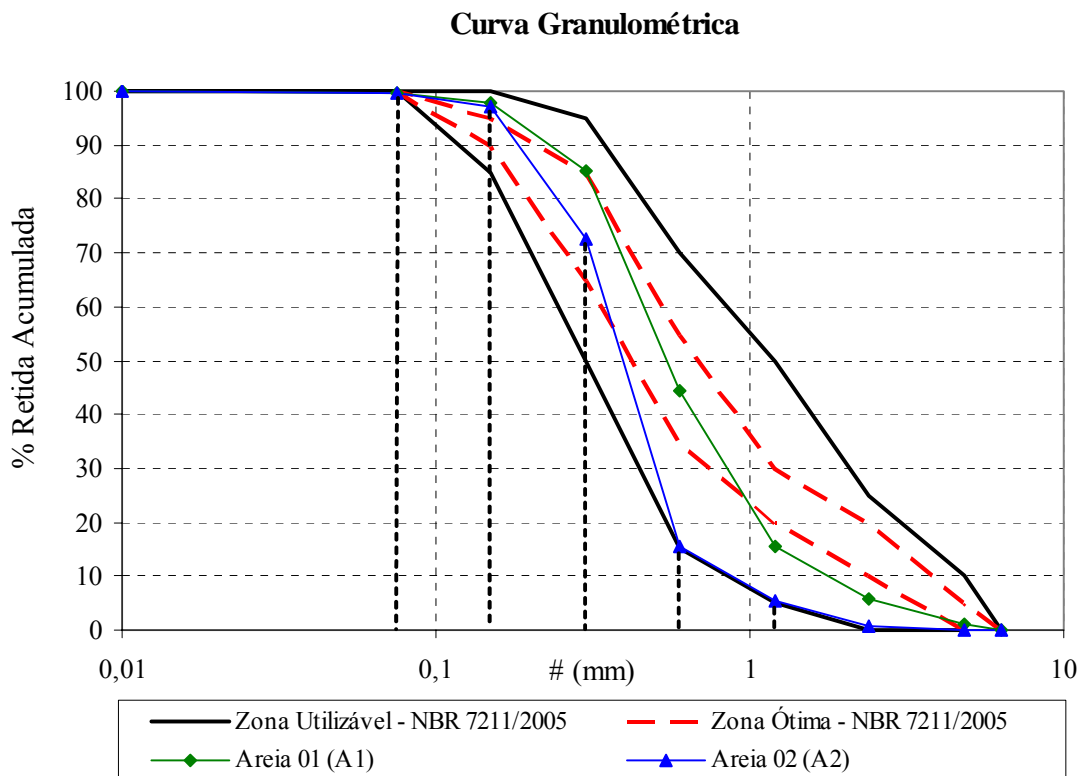
As areias naturais utilizadas na pesquisa são apresentadas na figura 22 – grãos de dimensão 2,4mm. Apresentam-se na tabela 14 e nas figuras 23 e 24 os resultados obtidos na realização do ensaio de composição granulométrica das areias naturais.



Figura 22 – Areia natural A1. Grãos de dimensão 2,4mm.

Tabela 14 – Análise granulométrica das areias naturais.

#	Areia 01 (A1)			Areia 02 (A2)		
	Massa Retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	10	1,00	1,00	0	0	0
2,4	48	4,77	5,76	8	0,84	0,84
1,2	99	9,89	15,65	44	4,43	5,27
0,6	286	28,68	44,33	101	10,12	15,40
0,3	406	40,74	85,07	571	57,06	72,46
0,15	128	12,86	97,93	247	24,68	97,14
0,075	18	1,84	99,78	26	2,63	99,77
Fundo	2	0,22	100	2	0,23	100
Total	997	100		1000	100	

**Figura 23** – Curvas granulométricas das areias naturais – enquadramento nas faixas dadas pela NBR 7211/2005.

Observa-se, pela figura 23, que ambas as curvas granulométricas encontram-se dentro da zona considerada utilizável pela norma NBR 7211/2005. Porém, para

as dimensões de 1,2 e 0,6mm, para ambas as areias, e 0,3mm para a areia A2, as curvas encontram-se fora da zona considerada ótima por esta norma. Verifica-se que a areia A1 apresenta-se contínua, enquanto há descontinuidade na areia A2. Esta última possui uma pequena quantidade de grãos de dimensão superior a 0,6mm – 15,40% – enquanto a quantidade de agregado retido nas peneiras de malha 0,3 e 0,15mm soma 81,74% do total.

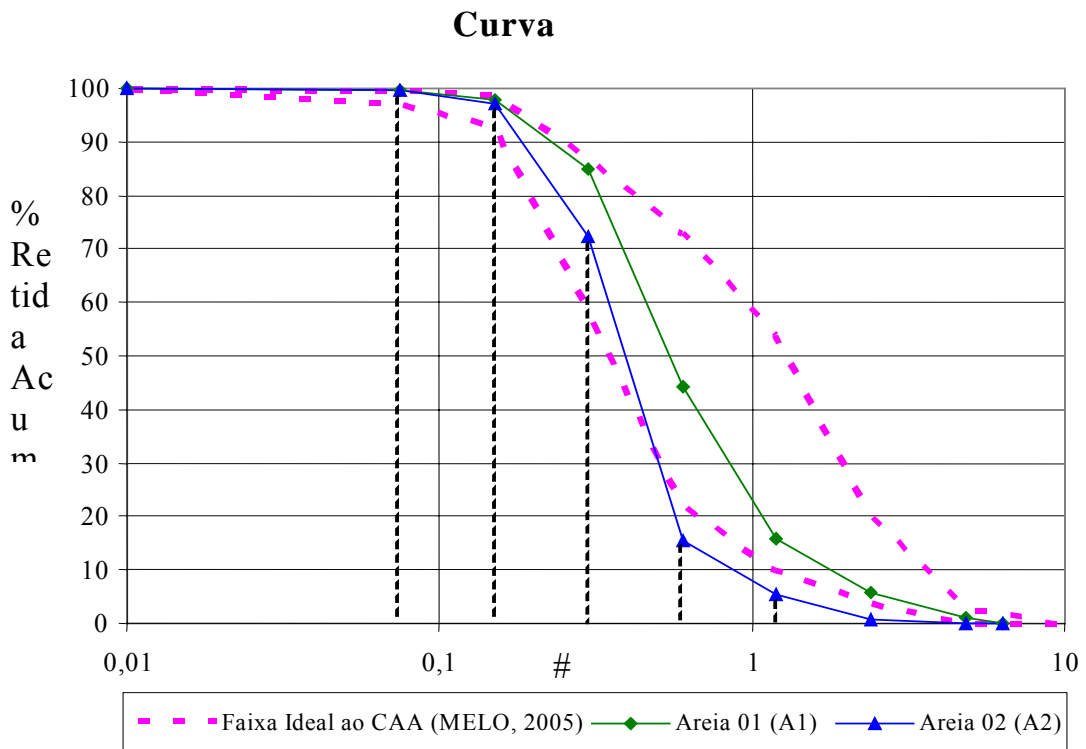


Figura 24 – Curvas granulométricas das areias naturais – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.

A figura 24 nos permite analisar as curvas granulométricas das areias naturais com relação à faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo (MELO, 2005). Nesta figura, verifica-se que apenas para os grãos de dimensões 1,2, 0,6 e 0,3mm, da areia A2, encontram-se fora dos limites sugeridos. Observa-se que a areia A1 foi utilizada para a produção de argamassas e concretos com 100% de areia natural, sendo os resultados obtidos com essas misturas considerados parâmetros de comparação. A areia A2, porém, foi utilizada em argamassas e concretos onde houve combinação das areias naturais e areias de britagem.

A areia A1 apresenta módulo de finura de 2,50, dimensão máxima característica de 4,8mm e teor de material pulverulento de 0,22 %. A areia A2 apresenta

módulo de finura de 1,91, dimensão máxima característica de 2,4mm e teor de material pulverulento de 0,23%. É possível verificar, analisando-se visualmente, que os grãos de ambas as areias naturais são mais lisos e arredondados que os grãos das areias de britagem.

A tabela 15 apresenta os resultados de massa específica, massa unitária, no estado solto e absorção de água das areias naturais, respectivamente.

Tabela 15 – Massa específica, massa unitária e absorção de água das areias naturais.

Ensaio	Areia 01	Areia 02
Massa específica (kg/m ³)	2610	2610
Massa unitária, estado solto (kg/m ³)	1600	1510
Absorção de água (%)	0,53	0,53

3.1.3.2 Seleção da Areia de Britagem

Para a escolha da areia de britagem mais adequada à realização da pesquisa, foram analisadas amostras de quatro pedreiras distintas, da região de Londrina/PR. Os resultados obtidos nos ensaios realizados para cada uma dessas areias foram comparados com os resultados obtidos para a areia natural.

Primeiramente, realizou-se o ensaio de análise granulométrica das areias, de acordo com a norma NM 248/2003. Neste ensaio foi possível observar a distribuição dos grãos, assim como a porcentagem de material pulverulento presente em cada uma das areias. Em seguida, foram produzidas argamassas com cada uma das areias de britagem, para realização do ensaio de *slump flow*, descrito no item 2.3.2. Neste ensaio, buscou-se verificar a capacidade de fluir das argamassas. A análise dos resultados obtidos em ambos os ensaios, então, permitiu a seleção da areia de britagem mais adequada à realização da pesquisa.

Análise Granulométrica:

Os resultados de análise da composição granulométrica para as areias de britagem, e seu enquadramento dentro das faixas estabelecidas pela norma NBR 7211/2005, assim como por MELO (2005), são apresentadas nas figuras 25 e 26, respectivamente.

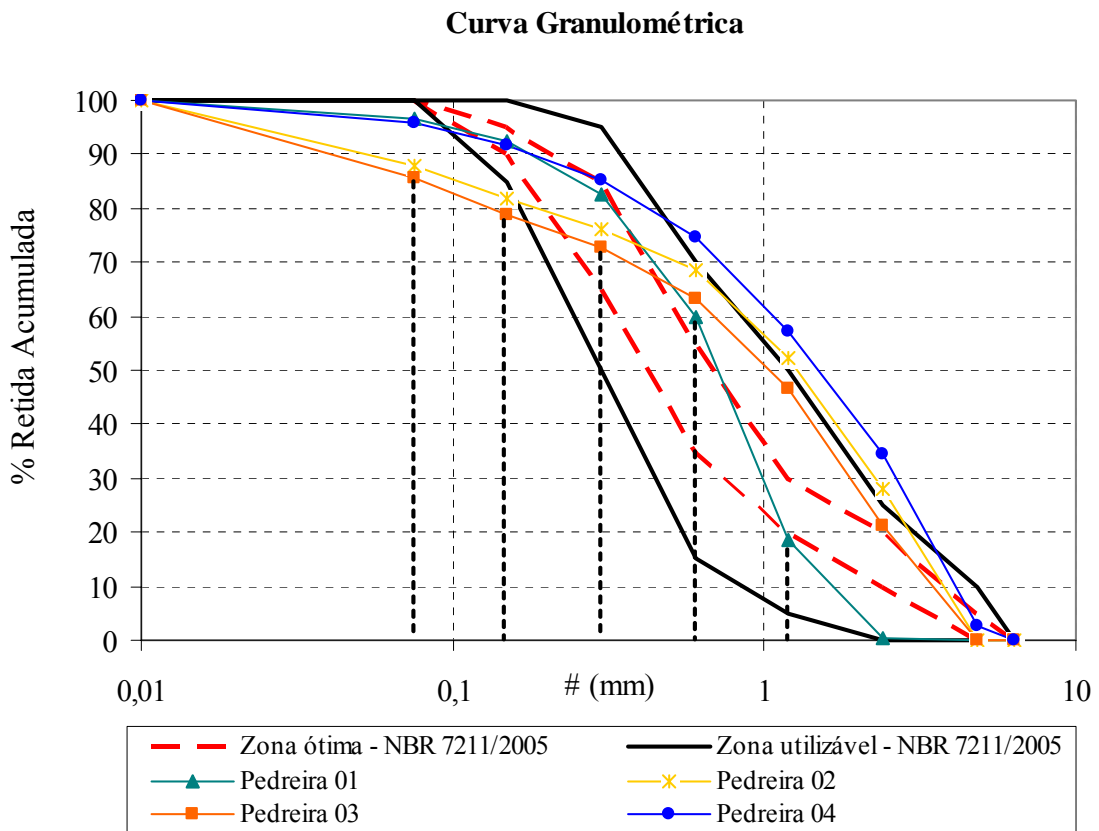


Figura 25 – Curvas granulométricas para as areias de britagem – enquadramento nas faixas dadas pela NBR 7211/2005.

A análise da figura 25 permite a verificação de que nenhuma das areias de britagem apresenta curva granulométrica localizada inteiramente dentro da zona considerada ótima pela NBR 7211/2005. A areia proveniente da pedreira 04 apresenta, ainda, porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de dimensões 1,2, 0,6 e 0,3mm localizadas acima do limite superior da zona utilizável desta norma. Para as frações mais finas, observa-se que as curvas das areias provenientes das pedreiras 02 e 03 encontram-se muito abaixo do limite inferior da zona utilizável da norma em questão.

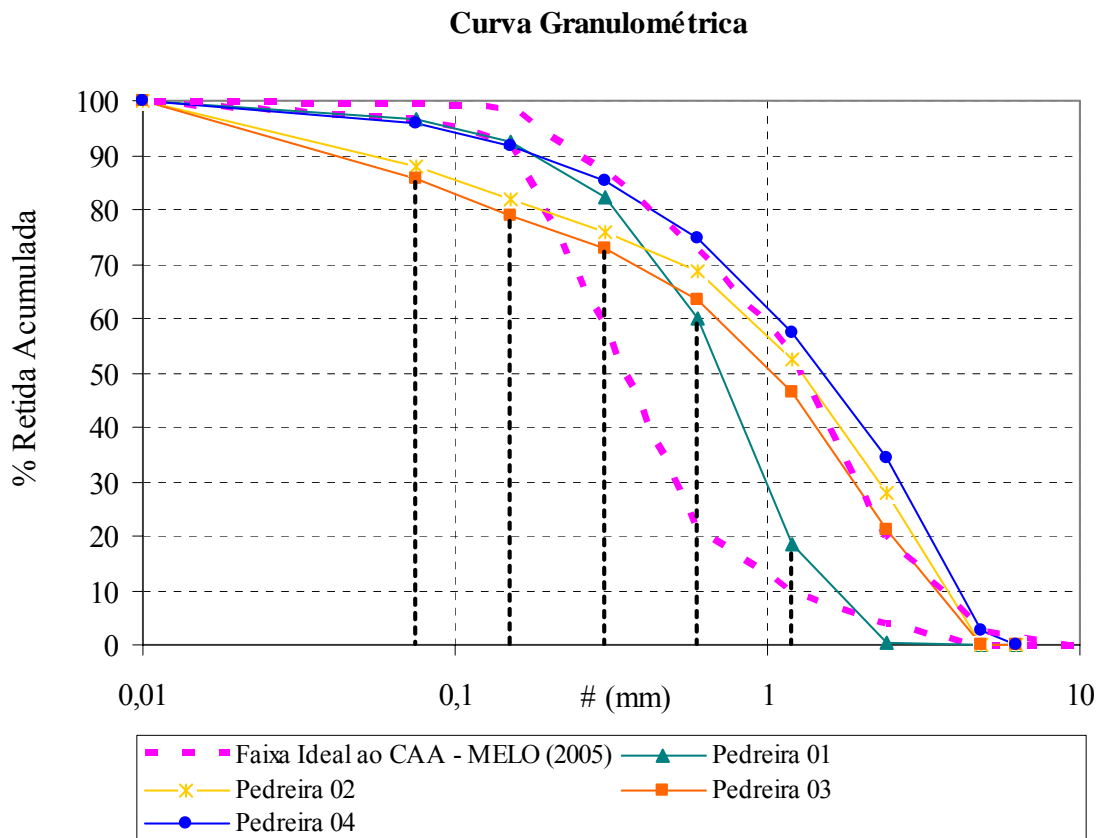


Figura 26 – Curvas granulométricas para as areias de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.

Ao observar a figura 26, verifica-se que, para as menores dimensões, as curvas granulométricas das areias provenientes das pedreiras 01 e 04 encontram-se muito próximas ao limite inferior estabelecido pelo método Repette-Melo. As areias provenientes das pedreiras 02 e 03, porém, têm suas curvas abaixo desse limite. Nota-se, também, que a areia proveniente da pedreira 04 possui porcentagens retidas acumuladas de grãos nas peneiras de dimensões 1,2, 0,6 e 0,3mm localizadas acima do limite superior considerado.

O teor de material pulverulento – passante na peneira 75 μm – é apresentado na tabela 16.

Tabela 16 – Teor de material pulverulento das areias de britagem.

Areia	Pedreira 01	Pedreira 02	Pedreira 03	Pedreira 04
Teor de material pulverulento (%)	3,57	13,41	14,24	4,20

A análise da tabela 13 permite observar uma quantidade elevada de material pulverulento presente nas areias provenientes das pedreiras 02 e 03, o que faz com que a curva granulométrica dessas areias encontre-se fora dos limites estabelecidos tanto pela NBR 7211/2005, quanto por Melo (2005).

As areias provenientes das pedreiras 01 e 04 apresentam teor de material pulverulento superior ao limite de 3%, para concreto submetido a desgaste superficial, porém, inferior ao limite de 5%, para concreto protegido do desgaste superficial, conforme estabelecido pela norma NBR 7211/2005. Essa mesma norma, no entanto, permite a alteração desses limites de 3% para 10%, e de 5% para 12%, se comprovado, por análise petrográfica, que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto, estando livres, por exemplo, de materiais micáceos, ferruginosos e argilo-minerais expansivos.

Produção das Argamassas:

Procedeu-se, então, a confecção de argamassas com cada uma das areias estudadas, para a realização do ensaio de *slump flow*, descrito no item 2.3.2. Os equipamentos utilizados neste ensaio são apresentados na figura 27. O propósito da realização deste ensaio consiste em verificar a capacidade de fluir de cada uma das argamassas, sendo este aspecto influenciado pela areia utilizada, devido a fatores como distribuição granulométrica, teor de material pulverulento ou forma das partículas.



Figura 27 – Mesa de consistência, para ensaio em argamassas. O cone em questão apresenta dimensões descritas no item 2.3.2.

As tabelas 17 e 18 apresentam o consumo, a seqüência e tempo de mistura dos materiais, e a velocidade do equipamento para a produção das argamassas, respectivamente.

Tabela 17 – Consumo dos materiais para a produção das argamassas.

Cimento (g)	Areia (g)	Sílica ativa (g)	Água (ml)	Aditivo superplastificante (ml)
550	1650	55	375	1,65

Tabela 18 – Seqüência de mistura dos materiais, velocidade do equipamento e tempos de mistura para a produção das argamassas.

Material	Velocidade	Duração (s)
Cimento + Sílica ativa	baixa	60
	alta	60
Água	baixa	60
	alta	60
Aditivo superplastificante	baixa	240
	alta	300
Areia	baixa	60
	alta	60

Observa-se nestas tabelas a utilização de sílica ativa como adição mineral, sendo esta adição usada devido à falta momentânea, no laboratório, de cinza volante. Como, porém, busca-se apenas selecionar a areia de britagem, considerou-se que a substituição não apresentaria influência no decorrer da pesquisa. A tabela 19 apresenta as características da sílica ativa utilizada.

Tabela 19 – Características da sílica ativa.

Características	Valores
Massa Específica (g/cm ³)	2,20
Massa Unitária (g/cm ³)	0,55
Área Específica (cm ² /g)	20.000
Formato	esférico

Fonte: (fabricante)

Os resultados obtidos no ensaio de *slump flow* estão apresentados na tabela 20 e nas figuras 28 e 29.

Tabela 20 – Resultados de espalhamento das argamassas, obtidos no ensaio de *slump flow*.

Areia	Tempo para atingir 25 cm (s)	Espalhamento final (cm)
Natural - Areia 01	4,32	35,5
Pedreira 01	-	18,5
Pedreira 02	18,37	27,5
Pedreira 03	29,54	25,5
Pedreira 04	7,12	32,8

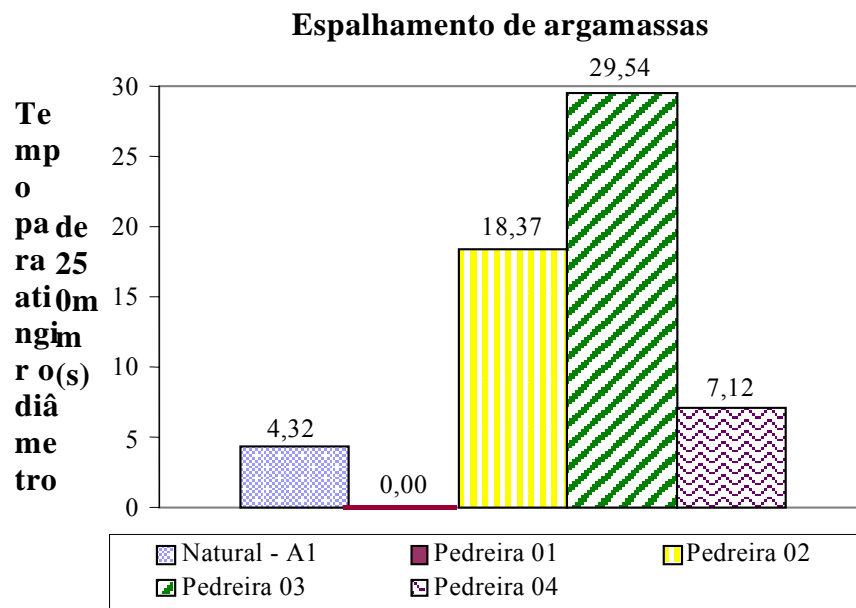


Figura 28 – Resultados de espalhamento das argamassas – tempo para atingir o diâmetro de 250 mm.

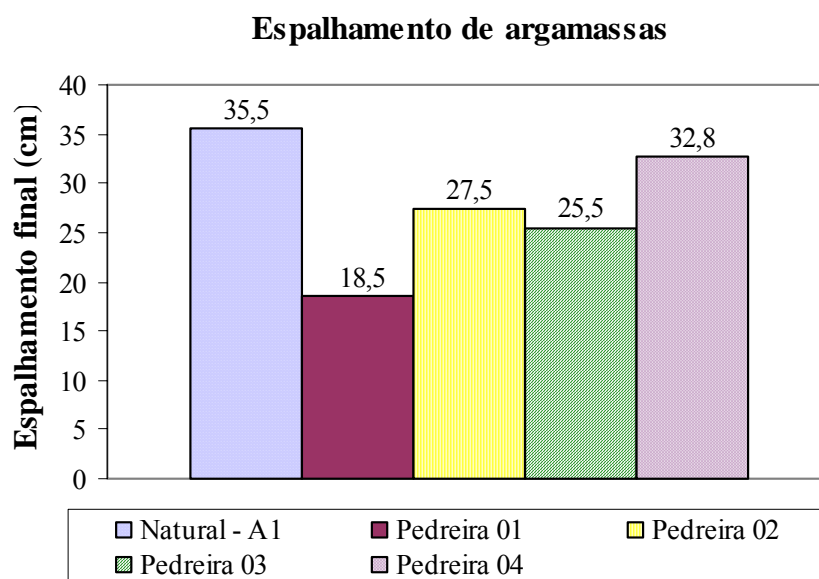


Figura 29 – Resultados de espalhamento de argamassas – espalhamento final.

A análise da tabela 20, e das figuras 28 e 29, nos permite verificar que a argamassa que atingiu o diâmetro de espalhamento de 250mm em menor tempo, assim como obteve o maior espalhamento final, foi a produzida com areia natural A1. Isso ocorreu, pois as partículas que compõem a areia natural são mais lisas e arredondadas, pelo fato de estarem expostas a processos de intemperismo há um longo tempo. As partículas constituintes da areia de britagem, porém, se apresentam mais ásperas e angulosas, com superfícies frescas, recém-criadas pela britagem, fazendo com que as argamassas produzidas com essas areias apresentem diminuição do valor obtido no ensaio de consistência.

Dentre as areias de britagem, porém, verificou-se um melhor desempenho da areia proveniente da pedreira 04 em ambas as situações avaliadas – tempo para atingir diâmetro de 250mm e espalhamento final. A avaliação visual das areias de britagem permitiu verificar que a forma das partículas é variada, sendo que a areia proveniente da pedreira 04 apresenta-se mais arredondada do que as demais areias, cuja forma é mais próxima do lamelar. Este fato era esperado, devido à utilização de britador do tipo VSI pela pedreira 04, pois este tipo de britador, em geral, produz partículas de agregado mais arredondadas. Acredita-se, então, ao se comparar as areias provenientes das pedreiras 01 e 04 – com porcentagens aproximadas de material pulverulento – que o arredondamento das partículas pode ter contribuído decisivamente nos resultados obtidos, dando à argamassa produzida com a areia de britagem da pedreira 04 uma consistência mais fluida.

Seleção da areia de britagem:

Dessa forma, selecionou-se a areia de britagem proveniente da pedreira 04 para o desenvolvimento da pesquisa, pois esta apresenta teor de material pulverulento dentro dos limites estabelecidos por norma, quando confirmado por análise petrográfica que os grãos não interferem nas propriedades do concreto. O ensaio de análise petrográfica foi realizado, e o laudo encontra-se no anexo 01. Da mesma forma, a argamassa produzida com esta areia apresentou um melhor desempenho, em termos de consistência, quando relacionada às argamassas produzidas com as demais areias.

A curva granulométrica da areia proveniente da pedreira 04 apresenta deficiência em algumas dimensões de agregado, porém, caso essa deficiência prejudique o desempenho do concreto, ela poderá ser corrigida pelo uso combinado desta areia com areia natural.

3.1.3.3 Caracterização da Areia de Britagem Selecionada

Uma vez selecionada a areia de britagem utilizada na pesquisa, procedeu-se à caracterização desta. Os ensaios realizados foram os mesmos utilizados na caracterização da areia natural, tendo como base as normas técnicas correspondentes. Apresenta-se na tabela 21 e na figura 30 os resultados de composição granulométrica da areia de britagem, proveniente de rocha basáltica – basalto de superfície.

Tabela 21 – Análise granulométrica da areia de britagem.

#	Massa Retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	25	2,48	2,48
2,4	329	32,05	34,53
1,2	233	22,69	57,22
0,6	180	17,53	74,75
0,3	107	10,43	85,18
0,15	68	6,63	91,81
0,075	41	3,99	95,80
Fundo	43	4,20	100
Total	1026	100	

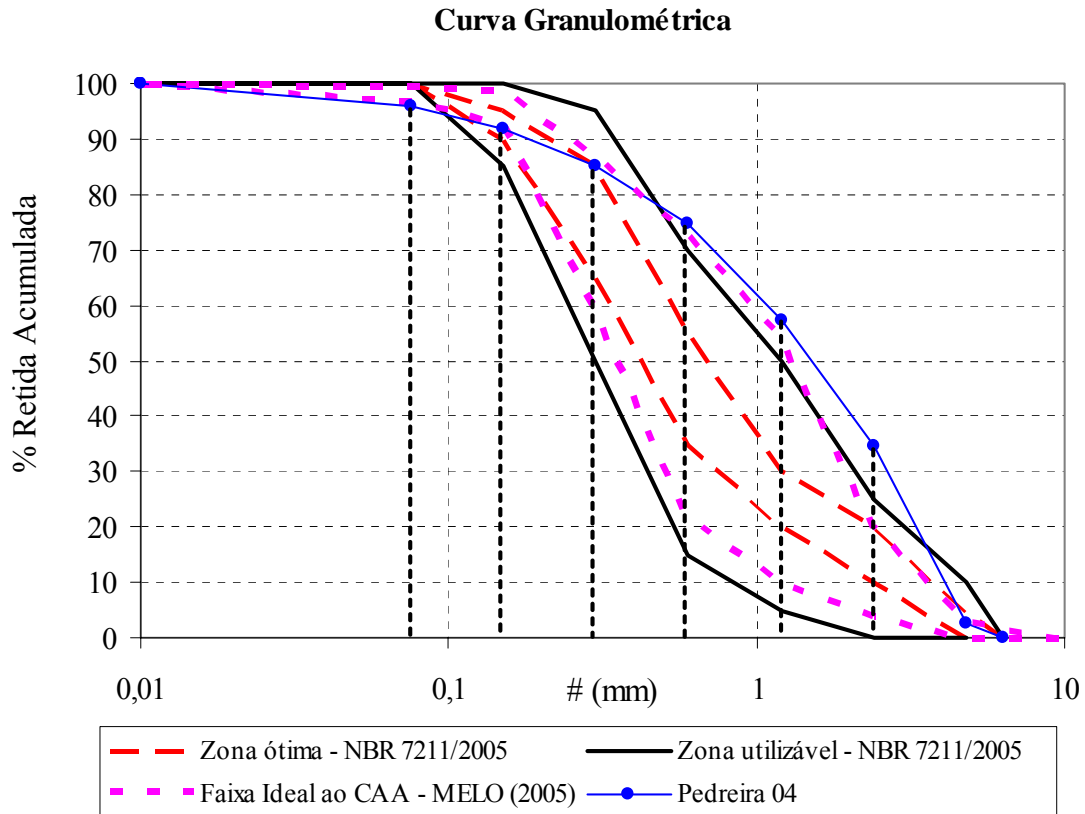


Figura 30 – Curva granulométrica da areia de britagem.

Observa-se que a curva granulométrica da areia de britagem encontra-se fora da zona considerada utilizável pela norma NBR 7211/2005, porém, muito próxima ao limite superior proposto pelo método Repette-Melo (MELO, 2005), para as peneiras de dimensões 2,4, 1,2 e 0,6mm. Verifica-se, também, que a areia apresenta 57,22% dos grãos retidos na peneira 1,2mm, ou em peneiras anteriores a esta, gerando, assim, uma descontinuidade na composição granulométrica. A correção desta descontinuidade pode ser realizada pela combinação desta areia com a areia natural A2, que apresenta pequena quantidade de grãos de dimensões superiores a 0,6mm – 15,40% – e uma maior quantidade de material retido nas peneiras 0,3 e 0,15mm – 81,74%.

Quanto aos grãos de dimensões mais finas, verifica-se a presença de uma quantidade elevada destes, o que faz com que a curva fique novamente fora da zona considerada utilizável pela NBR 7211/2005. No entanto, observa-se que a curva granulométrica se encontra muito próxima da faixa ideal ao CAA sugerida no método Repette-Melo.

A figura 31 apresenta a areia de britagem selecionada – grãos de dimensão 2,4mm. Esta areia possui módulo de finura de 3,46, dimensão máxima característica de 4,8 mm e teor de material pulverulento de 4,20 %. Através da observação visual é possível verificar que os grãos da areia de britagem são mais ásperos e lamelares que os grãos da areia natural.



Figura 31 – Areia de britagem – grãos de dimensão 2,4mm.

A tabela 22 apresenta os resultados de massa específica, massa unitária no estado solto, e absorção de água da areia de britagem, respectivamente.

Tabela 22 – Massa específica, massa unitária e absorção de água da areia de britagem.

Ensaio	Areia de Britagem
Massa específica (kg/m ³)	2900
Massa unitária, estado solto (kg/m ³)	1707
Absorção de água (%)	1,00

Para a caracterização da areia de britagem foi realizado, ainda, o ensaio de determinação de impurezas orgânicas húmicas, segundo a norma brasileira NBR 7220/1987, que demonstrou que a areia de britagem apresenta teor de matéria orgânica inferior a 3%, de acordo com o permitido por esta norma.

Por fim, foi realizado o ensaio de análise petrográfica, pelo laboratório do IPT/São Paulo, onde se mostrou que os grãos constituintes desta areia estão livres de materiais que possam interferir nas propriedades do concreto – laudo apresentado no anexo 01.

3.1.3.4 Combinações Binárias da Areia Natural e Areia de Britagem

Foram realizados ensaios de análise granulométrica das combinações binárias de areia natural e areia de britagem utilizadas na produção das argamassas e concretos, com o objetivo de corrigir as falhas granulométricas observadas na areia de britagem. Para isso, utilizou-se a areia natural A2, que apresenta módulo de finura de 1,91 e dimensão máxima característica de 2,4mm. As curvas granulométricas obtidas são apresentadas nas figuras 32 e 33.

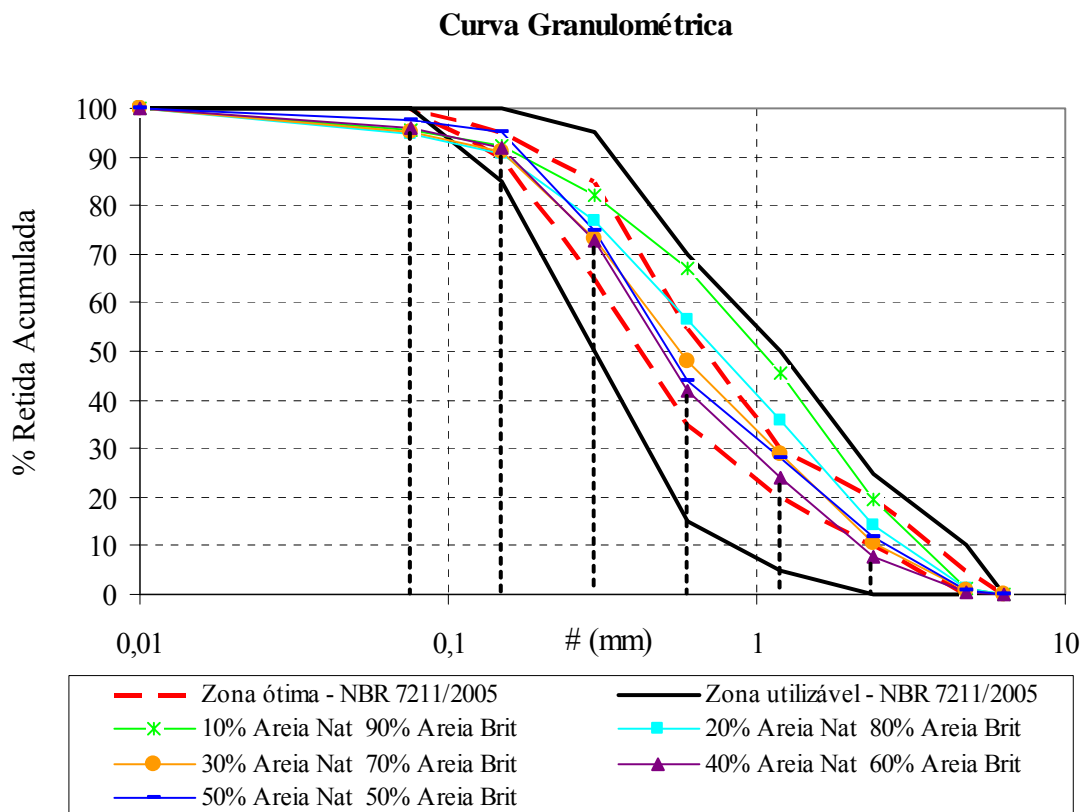


Figura 32 – Curvas granulométricas das combinações binárias de areia natural e areia de britagem – enquadramento nas faixas propostas pela NBR 7211/2005.

Analisando a figura 33, é possível verificar que a correção granulométrica da areia de britagem foi ocorrendo conforme se substituiu parte desta pela areia natural A2. A adição de porcentagens de 10 e 20% de A2 não foi suficiente para fazer com que a curva se posicionasse dentro da zona considerada ótima pela norma NBR 7211/2005, porém, trouxe

estas curvas para a zona utilizável. Nota-se que as combinações com percentagens de 30 a 50% de areia natural encontram-se dentro da zona considerada ótima, pela norma em questão.

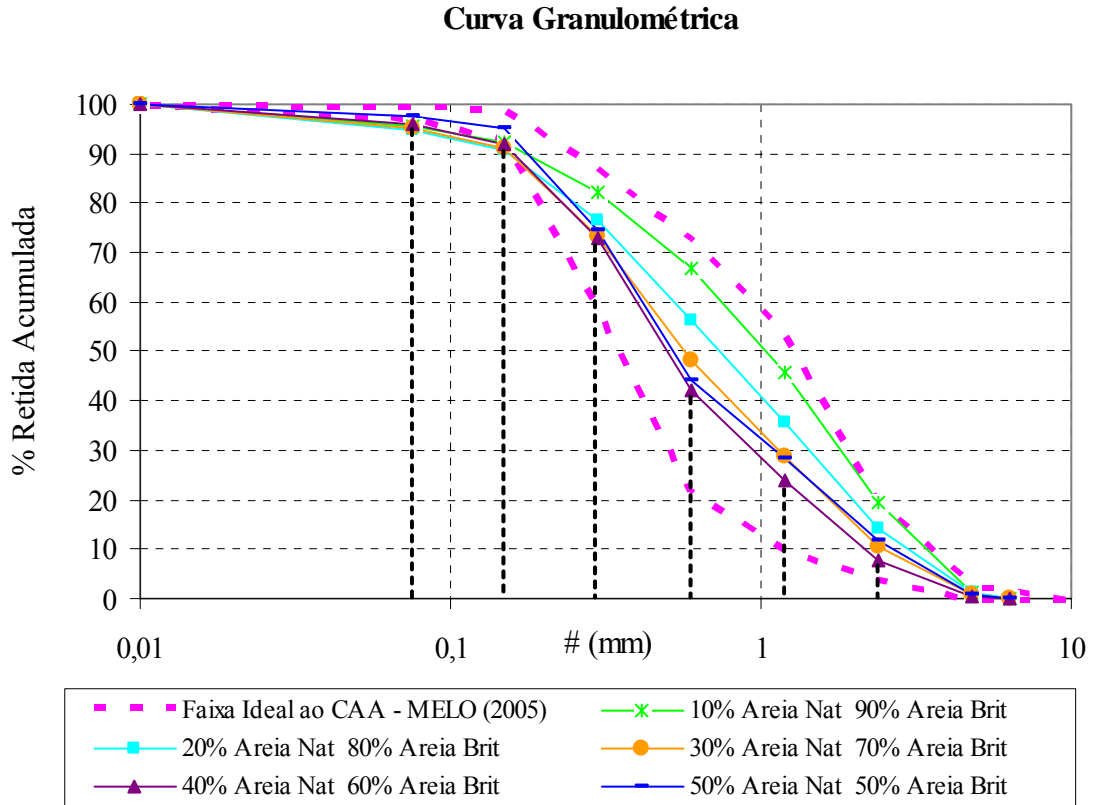


Figura 33 – Curvas granulométricas das combinações binárias de areia natural e areia de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.

A figura 34 nos mostra que todas as curvas granulométricas, resultantes das combinações realizadas entre a areia natural e a areia de britagem, encontram-se dentro dos limites ideais ao CAA, propostos no método Repette-Melo.

3.1.4 Agregado Graúdo

Para a caracterização adequada do agregado graúdo foram realizados os seguintes ensaios, cujos procedimentos são descritos nas normas técnicas correspondentes:

- Composição granulométrica e dimensão máxima, segundo norma NM 248/2003;
- Teor de material pulverulento, segundo a norma NM 46/2001;
- Massa específica aparente e absorção de água, segundo norma NM 53/2002;
- Massa unitária, no estado solto e compactado, segundo norma NM 45/2002;
- Forma e textura das partículas, segundo a norma brasileira NBR 7809/1983;
- Compacidade, segundo TORALLES-CARBONARI (1996) e HELENE e TERZIAN (1992).

Apresenta-se na tabela 23 e na figura 34 os resultados obtidos na realização do ensaio de composição granulométrica da brita ½ e da brita 0.

Tabela 23 – Análise granulométrica da brita ½ e 0.

#	B1/2			B0		
	Massa Retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12,5	2	0	0	0	0	0
9,5	414	20,66	20,76	0	0	0
4,8	1568	78,20	98,96	1722	86,47	86,47
2,4	17	0,82	99,79	268	13,45	99,92
1,2	1	0	99,83	1	0	99,95
0,6	0	0	99,83	0	0	99,96
0,3	0	0	99,84	0	0	99,96
0,15	0	0	99,84	0	0	99,96
0,075	0	0	99,86	0	0	99,96
Fundo	3	0	100	1	0	100
Total	2005	100		1991	100	

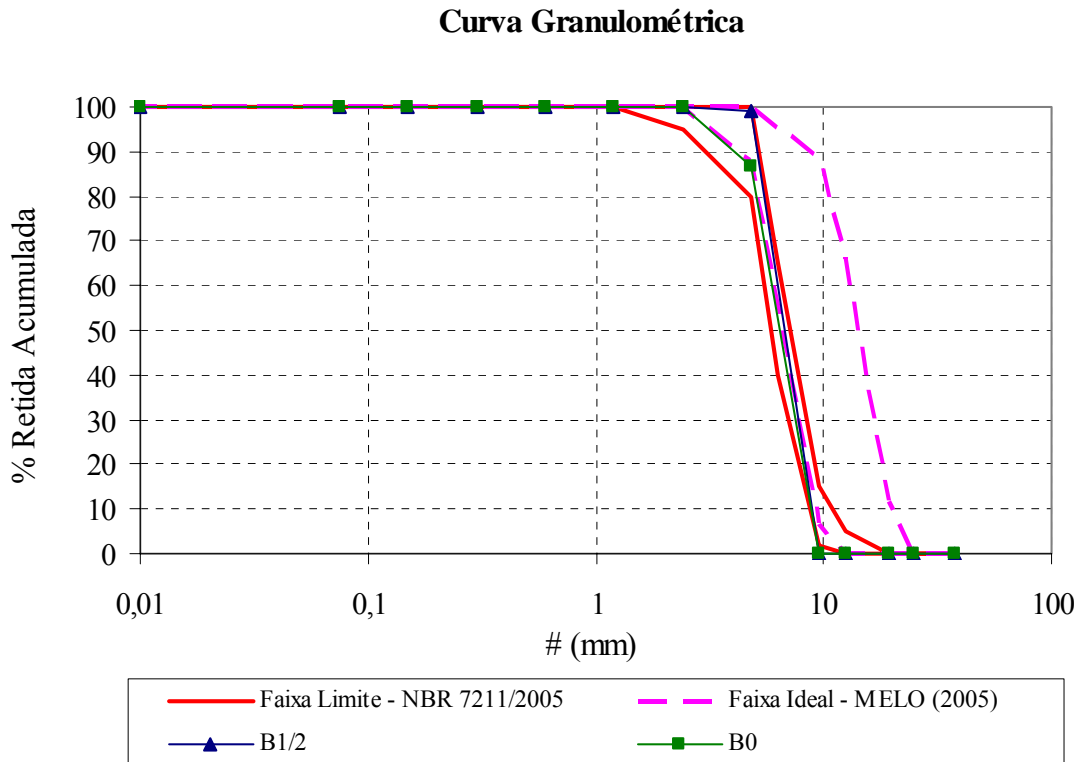


Figura 34 – Curvas granulométricas da brita $\frac{1}{2}$ e 0.

Observa-se que as curvas granulométricas de ambas as britas encontram-se dentro das faixas estabelecidas, tanto pela norma NBR 7211/2005, como pelo método Repette-Melo (MELO, 2005). Ressalta-se, porém, que a faixa limite dada pela norma brasileira é específica para agregados com dimensão máxima característica de 12,5mm. A faixa proposta por Repette-Melo, no entanto, não estabelece uma dimensão máxima característica, pois foi definida por meio de observações, na literatura, das faixas de agregados mais comumente utilizados em CAA. Verifica-se que o limite estabelecido no método Repette-Melo contempla agregados de 9,5 a 19mm, de modo que as britas aqui utilizadas têm suas curvas próximas ao limite inferior dado.

O módulo de finura para a brita $\frac{1}{2}$ é de 6,19 e a dimensão máxima característica é de 12,5mm. Para a brita 0, o módulo de finura é de 5,86 e a dimensão máxima característica é de 9,5mm.

A tabela 24 apresenta os resultados de massa específica, massa unitária no estado solto e compactado, absorção de água, teor de material pulverulento e índice de forma, obtidos para as britas.

Tabela 24 – Massa específica, massa unitária – estado solto e compactado – absorção de água, teor de material pulverulento e índice de forma, para as britas ½ e 0.

Ensaio	Brita 1/2	Brita 0
Massa específica (kg/m ³)	2959,36	2904,77
Massa unitária, estado solto (kg/m ³)	1393,67	1489,67
Massa unitária, estado compactado (kg/m ³)	1558,67	1628,00
Absorção de água (%)	1,2	1,6
Teor de material pulverulento (%)	2,45	1,47
Índice de forma	1,351	-

A tabela 25 e a figura 35 apresentam os resultados obtidos no ensaio de compactidade, para proporções das britas, sendo estas 10-90, 20-80, 30-70, 40-60 e 50-50% de brita 0 e brita ½, respectivamente.

Tabela 25 – Ensaio de compactidade, para as proporções das britas ½ e 0.

Composições	Massa Unitária do conjunto (kg/m ³)	IV (%)
100% B0	1628	43,95
50% B0 50% B1/2	1647	43,83
40% B0 60% B1/2	1643	44,06
30% B0 70% B1/2	1636	44,39
20% B0 80% B1/2	1617	45,17
10% B0 90% B1/2	1601	45,79
100% B1/2	1559	47,33

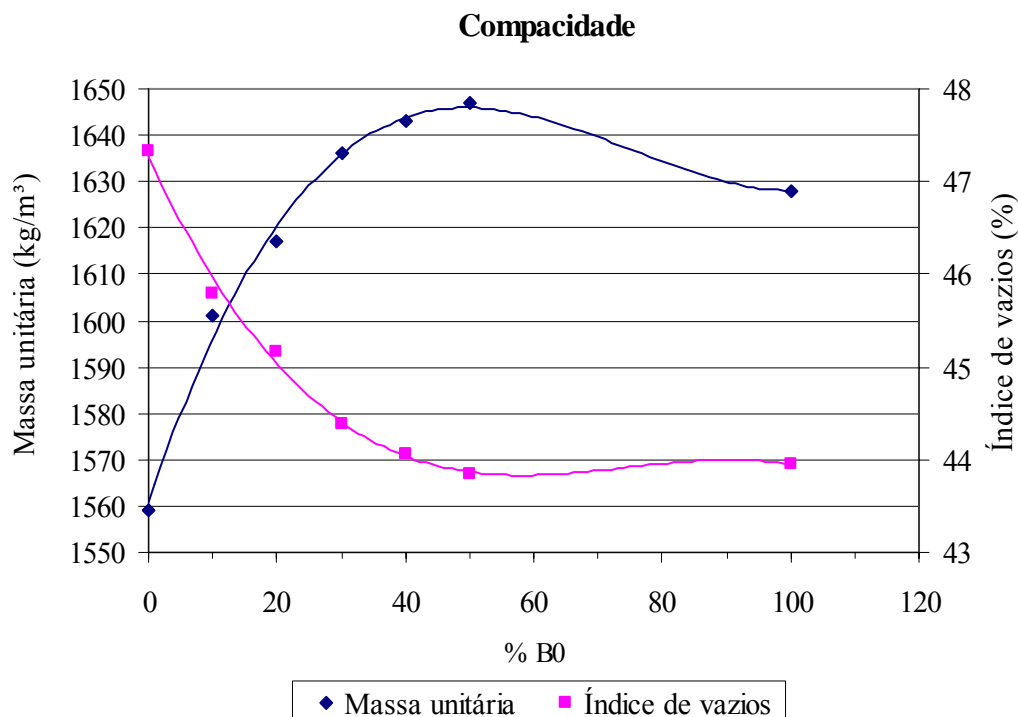


Figura 35 – Ensaio de compacidade – resultados comparativos de massa unitária e índice de vazios.

É possível observar, pela tabela 25 e pela figura 36, que a composição de 50-50% de brita 0 e brita ½ é a que apresenta maior massa unitária, no estado compactado, assim como menor índice de vazios. Desse modo, a compacidade apresentada por esse conjunto é maior que a dos demais, sendo a composição indicada para melhora do desempenho das propriedades do concreto no estado endurecido, assim como sua durabilidade.

3.1.5 Aditivo Químico

O uso do aditivo superplastificante é indispensável na produção de concretos auto-adensáveis para a obtenção da fluidez necessária, de modo que o uso deste vem sendo citado desde as primeiras tentativas de obtenção do CAA.

Segundo informações do fabricante, o aditivo superplastificante utilizado é à base de éter de policarboxilato e apresenta teor de sólidos de 30,07%. A massa específica deste aditivo é de $1,06 \pm 0,02$ kg/dm³.

Deve-se destacar que durante o processo de dosagem, o aditivo superplastificante foi dosado segundo seu teor de sólidos, sendo a parte líquida descontada da água de amassamento.

3.2 DOSAGEM

O estudo de dosagem fundamenta-se no estabelecimento de parâmetros para a produção do CAA – porcentagem de pasta, argamassa e concreto – através de levantamento de dados na literatura. Considerou-se, para o estabelecimento dos parâmetros, a busca de uma resistência à compressão maior, ou igual, a 30 MPa, e um consumo de cimento entre 300 e 380 kg/m³.

Para a determinação do consumo de cada material componente do concreto, fez-se uso de planilha eletrônica, cujos dados de entrada são:

- Porcentagem de pasta, areia e brita, em volume;
- Relação água/cimento;
- Porcentagem de aditivo superplastificante, fixado em função do ponto de saturação, para uma relação água/cimento pré-determinada;
- Porcentagem de adição mineral, em relação à massa de cimento e em substituição do mesmo.

Da mesma forma, foram fixadas as seguintes variáveis:

- Cimento Portland – CP V ARI RS;
- Finos – cinza volante ou escória de alto forno, e parte do agregado miúdo;
- Aditivo superplastificante – policarboxilato;
- Areia de britagem – basalto de superfície;
- Agregado graúdo de basalto – brita 0 e brita ½;
- Teor de ar incorporado ao concreto – 3%, em volume;
- Consumo de cimento do concreto – entre 300 e 380 kg/m³;
- Resistência à compressão, aos 28 dias \geq 30 MPa.

As porcentagens de pasta, areia e brita do concreto foram adotadas com base em experiência prévia e em dados da literatura, buscando sempre a utilização de volumes que gerem consumos de cimento dentro do especificado – 300 a 380 kg/m³. Este limite de consumo foi fixado considerando o consumo mínimo estabelecido pela norma NBR 12655/2000. Não foi considerado adequado o consumo superior a 380 kg/m³, pois o uso de grandes quantidades de cimento, além de ser prejudicial ao meio ambiente – pois o material requer grande quantidade de energia no processo de produção, sendo ainda responsável pelo lançamento de grandes quantidades CO₂ na atmosfera (BILODEAU; MALHOTRA, 2000) – eleva substancialmente o custo do metro cúbico do concreto.

Inicialmente, considerou-se uma porcentagem de pasta de 28%, ressaltando que um volume muito baixo de pasta pode prejudicar a auto-adensabilidade do concreto, assim como o aumento deste volume irá produzir um aumento significativo no consumo de cimento, o que também não é conveniente. As porcentagens iniciais do estudo, em volume, são apresentadas na tabela 26.

Tabela 26 – Porcentagens dos componentes do concreto, em volume – início do estudo.

Tentativa	% Pasta	% Areia	% Brita	% Ar	Σ
01	28	34	35	3	100

A determinação das porcentagens de areia e brita da mistura foram feitas de acordo com a literatura. Em geral, têm-se valores entre 35 e 55% de areia, em relação ao volume de argamassa, de modo que se buscou, aqui, utilizar o limite máximo para minimização do consumo de cimento do concreto. Os valores foram observados, também, para que o volume de brita não fosse muito superior ao de areia, sendo necessário um equilíbrio para a obtenção de um esqueleto granular adequado, compacto.

O estudo de dosagem foi, então, dividido em etapas, tendo início com ensaios em pasta, para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante, consequência da relação água/cimento utilizada. Adotou-se, inicialmente, a relação água/cimento de 0,45, tendo em vista a resistência à compressão, porém, com a intenção de manter esse fator inferior a 0,48, buscando a potencialização do aditivo superplastificante. Adotou-se como adição mineral, inicialmente, a cinza volante, com uma porcentagem de 20% em relação à massa de cimento, e em substituição a esta, com base na literatura.

Estando definidas, então, as porcentagens de pasta, areia e brita do concreto, em volume, a relação água/cimento, a porcentagem do aditivo superplastificante – ensaio de ponto de saturação realizado em pasta resultou em 0,3% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento – e a porcentagem de cinza volante; prosseguiu-se ao cálculo do consumo de cimento do concreto que seria produzido.

O primeiro passo, então, para o cálculo do consumo de cimento foi a determinação da porcentagem de cimento presente na pasta utilizada, considerando todos os materiais componentes desta – cimento, cinza volante (CV), aditivo superplastificante (SP) e água. A soma das quantidades desses materiais, em volume, seria a composição total da pasta – 100% desta – sendo igualada à unidade, conforme apresentado na equação 3.1.

$$1,00 = 1 \text{ Cimento} + 0,2 \text{ (CV) Cimento} + 0,003 \text{ (SP) Cimento} + 0,45 \text{ (a/c) Cimento} \quad (3.1)$$

$$1,00 = 1,653 \text{ Cimento} \Rightarrow \text{Cimento} = 60,5\% \text{ da pasta}$$

Dessa forma, foi possível determinar o volume de cimento no concreto, através da multiplicação do volume de cimento na pasta pelo volume de pasta no concreto, conforme apresentado na equação 3.2.

$$V_{\text{cim, conc}} \text{ (volume de cimento no concreto)} = (60,5 \cdot 28)/100 \quad (3.2)$$

$$V_{\text{cim, conc}} = 16,94\%$$

Como as quantidades de água, aditivo superplastificante e cinza volante são referentes à massa de cimento, foi possível determinar o volume de cada um dos materiais constituintes do concreto, assim como o traço unitário, em volume e massa, apresentados na tabela 27.

Tabela 27 – Porcentagem dos materiais componentes do concreto, em volume, traço unitário do concreto, em volume e em massa – início do estudo.

Materiais	Cimento	CV*	Água	SP*	Areia	Brita	Ar
Composição do concreto, em volume (%)	16,94	3,39	7,62	0,051	34	35	3
Traço unitário, em volume	1	0,2	0,45	0,003	2,01	2,07	-
Traço unitário, em massa	1	0,22	0,41	0,003	2,92	2,93	-

* CV: cinza volante

SP: aditivo superplastificante

$\gamma_{\text{cim}} = 1.100 \text{ kg/m}^3$ $\gamma_{\text{CV}} = 1.200 \text{ kg/m}^3$

$\gamma_{\text{areia}} = 1.600 \text{ kg/m}^3$ $\gamma_{\text{brita}} = 1.559 \text{ kg/m}^3$

Com o traço unitário, em massa, é possível calcular o consumo de cimento no concreto, através da equação 3.3. Para os parâmetros adotados neste início de estudo, obteve-se um consumo de cimento de $340,69 \text{ kg/m}^3$.

$$C_{\text{cim}} = 1 / [(1/\gamma_{\text{cim}}) + (CV/\gamma_{\text{CV}}) + (\text{areia}/\gamma_{\text{areia}}) + (\text{brita}/\gamma_{\text{brita}}) + (\text{SP}/\gamma_{\text{SP}}) + (\text{água}/\gamma_{\text{água}})] \quad (3.3)$$

Após isso, verificado que o consumo de cimento encontra-se dentro da faixa de 300 a 380 kg/m^3 , prossegue-se o estudo com ensaios em argamassa, onde se considerou a hipótese de que uma argamassa auto-adensável produzirá um concreto auto-adensável.

Passou-se, então, à determinação da porcentagem de pasta presente na argamassa. Através da tabela 23, verifica-se que os volumes considerados são de 28% para pasta e 34% para areia, sendo a soma destes valores o total de argamassa no concreto – 62%. Dividindo-se, então, o volume de pasta e areia da argamassa pelo volume de argamassa no concreto, conforme apresentado nas equações 3.4 e 3.5, determinou-se as quantidades de pasta e areia da argamassa.

$$V_{\text{pasta, arg}} (\text{volume de pasta na argamassa}) = (28/62) \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$V_{\text{pasta, arg}} = 45,16\%$$

$$V_{\text{areia, arg}} (\text{volume de areia na argamassa}) = (34/62) \cdot 100 \quad (3.5)$$

$$V_{\text{areia, arg}} = 54,84\%$$

Foi possível, então, determinar o volume de cimento na argamassa, multiplicando o volume de cimento na pasta pelo volume de pasta na argamassa, conforme apresentado pela equação 3.6.

$$V_{\text{cim, arg}} (\text{volume de cimento na argamassa}) = (60,5 \cdot 45,16)/100 \quad (3.6)$$

$$V_{\text{cim, arg}} = 27,32\%$$

Conforme ocorrido na determinação do consumo de cimento do concreto – pois as quantidades de água, aditivo superplastificante e cinza volante são referentes à massa de cimento – foi possível determinar o volume de cada um dos materiais constituintes da argamassa, assim como o traço unitário, em volume e massa, conforme apresentado na tabela 28.

Tabela 28 – Porcentagem dos materiais componentes da argamassa, em volume, traço unitário do concreto, em volume e em massa – início do estudo.

Materiais	Cimento	CV*	Água	SP*	Areia	Ar
Composição da argamassa, em volume	27,32	5,46	12,29	0,082	55	3
Traço unitário, em volume	1	0,2	0,45	0,003	2,01	-
Traço unitário, em massa	1	0,22	0,41	0,003	2,92	-

* CV: cinza volante

SP: aditivo superplastificante

$\gamma_{\text{cim}} = 1.100 \text{ kg/m}^3$ $\gamma_{\text{areia}} = 1.600 \text{ kg/m}^3$

$\gamma_{\text{CV}} = 1.200 \text{ kg/m}^3$

Com o traço unitário da argamassa, foi possível o cálculo dos consumos de material para a produção da argamassa e verificação da auto-adensabilidade desta, através de ensaios específicos. Considerando o equipamento a ser utilizado para a mistura, verificou-se conveniente a produção de um volume de 2,25 litros de argamassa, sendo necessário, dessa forma, 1200 g de cimento.

Considerou-se, neste momento, a dosagem do aditivo superplastificante segundo seu teor de sólidos, sendo a água presente no aditivo descontada da água de amassamento. Da mesma forma, adicionou-se à mistura a água referente à absorção do agregado miúdo. A tabela 29 apresenta os consumos dos materiais para a produção da argamassa, no início do estudo.

Tabela 29 – Consumos de materiais para a produção da argamassa – início do estudo.

Cimento (g)	CV* (g)	Água (ml)	SP* (ml)	Areia (g)
1200	262	501,58	11,29	3504

*CV: cinza volante

SP: aditivo superplastificante

Com os consumos apresentados na tabela 29 procedeu-se à confecção das argamassas e realização dos ensaios, descritos no item 2.3.2. De acordo com os resultados obtidos, foram feitos ajustes referentes às porcentagens previamente estabelecidas de pasta, areia e brita do concreto, além de mudanças na relação água/cimento e porcentagem de adição mineral incorporada. A cada mudança de parâmetros realizada, procedia-se novamente à verificação da adequação do consumo de cimento aos limites estabelecidos, sendo repetidos os ensaios em argamassa, até a obtenção de parâmetros adequados à produção de uma argamassa auto-adensável adequada à produção de CAA.

Com os resultados obtidos para as argamassas, então, passou-se à produção dos concretos, cujos traços já foram definidos, permitindo o cálculo do consumo dos materiais. Nesta etapa foram realizados novos ajustes – exigidos pela incorporação do agregado graúdo – para a obtenção do CAA. Com os resultados obtidos para o concreto é possível relacionar os aspectos de auto-adensabilidade das argamassas e dos concretos estudados.

3.3 ENSAIOS EM PASTA

Em pasta, realizou-se o ensaio de determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante. De acordo com Aïtcin et al. (1994) e Toralles et al. (2003), a medição do tempo que um volume determinado de pasta leva para fluir pelo cone de Marsh é uma forma efetiva de se medir a consistência desta pasta, de modo que adotou-se este método para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante. O volume adotado foi de 200ml.

Foram realizadas cinco misturas contendo cimento, cinza volante, aditivo superplastificante e água, para três diferentes relações água/cimento e porcentagens de cinza

volante, estando os consumos apresentados na tabela 30. É importante ressaltar que o aditivo superplastificante foi dosado considerando-se seu teor de sólidos.

Tabela 30 – Consumo dos materiais para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.

Materiais		% Aditivo Pto Saturação				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
a/c = 0,45 20% CV	Cimento (g)	1200	1200	1200	1200	1200
	Cinza volante (g)	300	300	300	300	300
	Aditivo superplastificante (ml)	3,76	7,53	11,29	15,06	18,82
	Água (ml)	537,37	534,73	532,10	529,47	526,84
a/c = 0,47 25% CV	Cimento (g)	1125	1125	1125	1125	1125
	Cinza volante (g)	375	375	375	375	375
	Aditivo superplastificante (ml)	3,53	7,06	10,59	14,12	17,65
	Água (ml)	526,28	523,81	521,35	518,88	516,41
a/c = 0,48 25% CV	Cimento (g)	1125	1125	1125	1125	1125
	Cinza volante (g)	375	375	375	375	375
	Aditivo superplastificante (ml)	3,53	7,06	10,59	14,12	17,65
	Água (ml)	537,53	535,06	532,60	530,13	527,66

O valor total de 1500 g de material cimentante, composto de cimento e cinza volante, foi adotado considerando-se a necessidade em se ter um volume adequado à capacidade do equipamento utilizado, pois mesmo buscando-se a produção de uma quantidade mínima de 800ml de mistura, a produção de baixos volumes de pasta poderia resultar em um material heterogêneo, devido a deficiências na mistura. Foram utilizadas as relações água/cimento de 0,45; 0,47 e 0,48, assim como a incorporação de 20 e 25% de cinza volante, em relação à massa de cimento, e em substituição a este, pois durante o estudo fez-se necessária a mudança dos parâmetros inicialmente estabelecidos.

A tabela 31 apresenta a seqüência de mistura dos materiais, velocidade do equipamento e tempos de mistura para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.

O tempo total da mistura com a presença do superplastificante foi fixado em nove minutos, em virtude de estudos prévios realizados pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Londrina, que mostrou que após esse tempo o éter de policarboxilato se mostra mais efetivo.

Tabela 31 – Seqüência de mistura dos materiais, para produção das pastas.

Material	Velocidade	Duração (s)
Cimento + Adição mineral	baixa	60
Água	baixa	60
	alta	60
Aditivo superplastificante	baixa	240
	alta	300

3.4 ENSAIOS EM ARGAMASSA

O estudo em argamassa teve início com a utilização da areia natural A1 como agregado miúdo, buscando-se a produção de uma argamassa auto-adensável, de modo que ao serem obtidos os parâmetros necessários à argamassa com a areia natural, estes necessitariam pequenas correções quando substituída esta areia pela areia de britagem.

Produziu-se, então, a argamassa referente às porcentagens inicialmente estabelecidas para o concreto, apresentadas na tabela 26, cujos consumos são apresentados na tabela 29. Foram realizados ensaios reduzidos de *slump flow* e funil em V, para argamassas, conforme descrito no item 2.3.2. Foram tomados como base os limites de ensaio estabelecidos por Domone (2006b) e pelo método Repette-Melo (REPETTE, 2005; MELO, 2005).

A tabela 32 apresenta a seqüência de mistura dos materiais, velocidade do equipamento e tempos de mistura para a confecção das argamassas.

À medida que os resultados eram obtidos, procedia-se à correção de parâmetros necessários para melhora da auto-adensabilidade da argamassa, utilizando-se de planilha do Microsoft Excel. Repetiu-se esse procedimento até a obtenção de uma argamassa cujos resultados apresentados fossem enquadrados dentro dos limites pré-estabelecidos, apresentados na tabela 33, sendo satisfatórios à auto-adensabilidade.

Tabela 32 – Sequência de mistura dos materiais, para produção das argamassas.

Material	Velocidade	Duração (s)
Cimento + Adição mineral	baixa	60
Água	baixa	60
	alta	60
Aditivo superplastificante	baixa	240
	alta	300
Areia	baixa	90
	alta	60

Tabela 33 – Limites fixados para os ensaios de *slump flow* e funil em V, para argamassas.

De acordo com:	Espalhamento (mm)	Funil em V - tempo (s)
Domone (2006)	230 a 340*	1,5 a 17*
Repette-Melo (2005)	200 a 280	3,5 a 10
	250 a 280**	5 a 10**

* equações propostas pelo autor são válidas para esse intervalo de valores

** correção da adição previamente estabelecida

Depois de atingidos os parâmetros buscados na argamassa confeccionada com areia natural A1, foram confeccionadas outras argamassas, sendo a areia natural substituída por areia de britagem. Foram produzidas, também, argamassas com porcentagens combinadas da areia natural A2 e da areia de britagem, sendo estas 10-90%, 20-80%, 30-70%, 40-60% e 50-50%, respectivamente.

Durante os ensaios de *slump flow* realizados neste estudo, verificou-se o tempo gasto pela argamassa para atingir o diâmetro de 250mm, sem a aplicação de golpes à mesa de consistência. Esse resultado foi considerado para análise.

A definição de parâmetros para argamassas auto-adensáveis permitiu o início do estudo em concreto, porém após este estudo, novas argamassas foram produzidas para a verificação do comportamento destas diante das modificações realizadas para o concreto.

Ressalta-se que o estudo foi iniciado com a cinza volante como adição mineral, de modo que as observações acerca do comportamento das argamassas e concretos produzidos com essa adição mineral foram consideradas no momento da utilização da escória

de alto forno. Assim, a produção de argamassas com esta adição foi menor, pois muitos ajustes já haviam sido realizados, tanto para argamassas como para concretos.

3.5 ENSAIOS EM CONCRETO

O estudo em concreto teve início considerando como pré-requisito os resultados obtidos para as argamassas, de modo que foram produzidos concretos cujas argamassas correspondentes se apresentaram auto-adensáveis. Tomou-se como referência o concreto produzido com 100% de areia natural A1, sendo os resultados obtidos para os concretos com areia de britagem comparados com o concreto de referência.

No início do estudo, foram considerados como agregado graúdo a brita ½ e a brita 0. Esses agregados foram escolhidos, pois agregados de dimensões maiores poderiam limitar a utilização do concreto, devido à dificuldade da argamassa em transportar agregados de dimensão máxima superior. No decorrer da pesquisa, porém, a necessidade de fluidez e a compactidade apresentada pela composição destes agregados levaram ao uso somente da brita ½. Ao se observar a tabela 23, apresentada anteriormente, verifica-se que a porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm é muito elevada, para ambas as britas, o que fez com que a composição destas apresentasse excesso de material desta dimensão. Além disso, a brita 0 não possui material retido na peneira 9,5 mm, fazendo com que, ao se combinar as britas ½ e 0 em proporções de 50% de cada, o material desta dimensão – 9,5 mm – presente na brita ½ fosse reduzido à metade.

No estado fresco, os ensaios realizados para a caracterização do concreto e verificação da auto-adensabilidade, foram:

- *Slump flow*, *slump flow* com o anel japonês, funil em V e caixa em L, segundo descrito em GETTU *et. al.* (2004);
- Massa específica, através da utilização de um recipiente de 5 litros, obtendo-se a massa deste recipiente preenchido com concreto e realizando os cálculos necessários;
- Ar incorporado, segundo procedimento descrito no manual do equipamento utilizado, sendo este 54CO170/D.

A tabela 34 apresenta a seqüência e os tempos de mistura dos materiais, para a produção dos concretos. A tabela 35 apresenta os limites estabelecidos por Gettu et al. (2004) e Efnarc (2002), para os ensaios de auto-adensabilidade dos concretos.

Tabela 34 – Seqüência e tempos de mistura dos materiais, para a produção dos concretos.

Material	Tempo de mistura (s)
Brita + Cimento + Adição mineral	30
70% Água	120
70% Ad. superplastificante	540
Areia	30
30% Água + 30% Ad. superplastificante	540

Tabela 35 – Limites para os ensaios de auto-adensabilidade do concreto, segundo Gettu et al. (2004) e Efnarc (2002).

Ensaio	GETTU <i>et. al.</i> (2004)	EFNARC (2002)
Slump Flow	$1 < T50 < 10s$	$2 < T50 < 5s$
	$60 < df < 80cm$	$65 < df < 80cm$
Anel Japonês	$ h1 - h2 \leq 10mm$	$ h1 - h2 \leq 10mm$
	$If \geq df - 50mm$	
Funil em V	$5 < t < 25s$	$8 < t < 12s$
		Após 5min: + 3s
Caixa em L	$T20 < 1,5s$	$0,80 < h2/h1 < 1,00$
	$T40 < 2,5s$	
	$h2/h1 > 0,80$	

Para cada traço realizado, produziu-se um volume de 190 litros de concreto, considerando o volume de material necessário ao preenchimento dos corpos-de-prova a serem moldados, para realização dos ensaios no estado endurecido, assim como ao volume necessário à realização dos ensaios. A tabela 36 apresenta o número de corpos-de-prova a serem ensaiados em cada idade.

Tabela 36 – Número de corpos-de-prova a serem ensaiados em cada idade.

Ensaio	Resistência à Compressão			Resistência à Tração	Módulo de Deformação	Total
	1 dia	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	
Nº CPs/Traço	4	4	6	4	6	24

No estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios:

- Resistência à compressão, segundo a norma NM 101/1996;
- Resistência à tração, segundo a norma brasileira NBR 7222/1994;
- Módulo de Deformação, segundo brasileira NBR 8522/2003;
- Ultra-som, segundo norma brasileira NBR 8802/1994.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos quando da realização dos ensaios definidos no programa experimental, bem como as análises e conclusões acerca desses resultados, com base na literatura existente.

4.1 ENSAIOS EM PASTA

Os resultados acerca da determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante são apresentados na tabela 37 e na figura 36.

Tabela 37 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.

% Aditivo Superplastificante	Tempo para fluir pelo cone de Marsh (s)		
	a/c = 0,45 20% CV	a/c = 0,47 25% CV	a/c = 0,48 25% CV
0,1	32,16	-	-
0,2	15,18	11,36	16,53
0,3	9,84	8,74	9,89
0,4	7,68	7,76	7,68
0,5	7,30	7,15	8

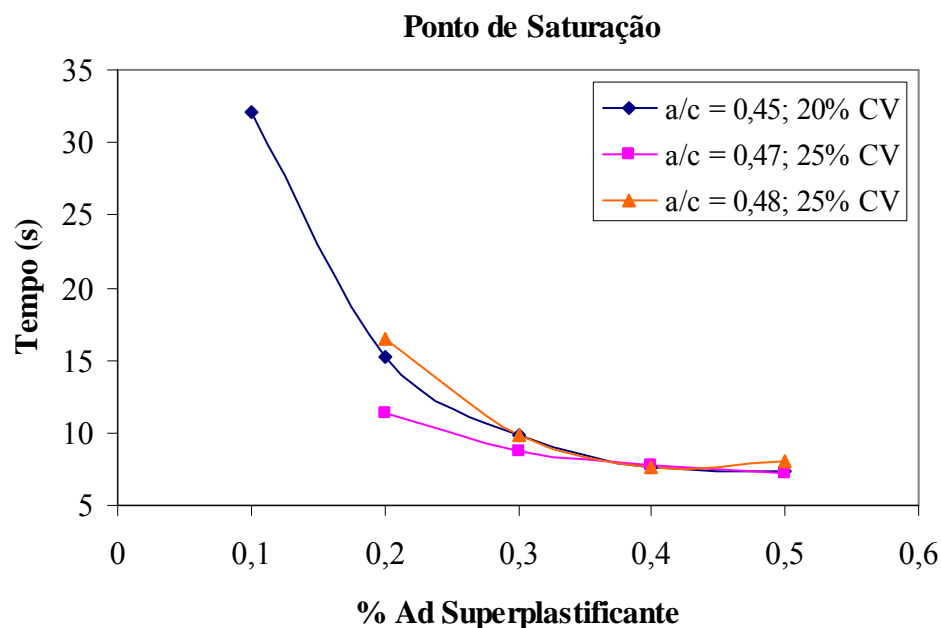


Figura 36 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.

Observa-se, pela tabela 37 e figura 36, que o ponto de saturação do aditivo superplastificante encontra-se entre 0,3 e 0,4%, pois o tempo que a pasta leva para fluir pelo cone de Marsh torna-se muito semelhante. Adotou-se, em um primeiro momento, então, a porcentagem de 0,3% como ponto de saturação, porém, essa porcentagem foi alterada para 0,4% no decorrer do estudo, pela necessidade de maior fluidez.

4.2 ENSAIOS EM ARGAMASSA

4.2.1 Estudo Inicial, com Cinza Volante

Os resultados de *slump flow* e funil em V para a argamassa produzida com a areia natural A1 e a cinza volante, referente às porcentagens inicialmente estabelecidas para o concreto – tentativa 01 – são apresentados na tabela 38.

Tabela 38 – Resultados de *slump flow* e funil em V para a argamassa inicial, considerando os parâmetros de concreto.

Tentativa	Componentes conc., em volume					Parâmetros			Slump Flow		Funil em V
	% Pasta	% Areia	% Brita	% Ar	Σ	a/c	% SP	% CV	T25 (s)	D _{final} (mm)	T (s)
01	28	34	35	3	100	0,45	0,3	20	-	175	não realizado
										170	

É possível observar pela tabela 38 que a argamassa inicialmente ensaiada não se apresentou auto-adensável, uma vez que não atingiu os parâmetros mínimos de fluidez no ensaio de *slump flow*. A consistência inadequada, ou seja, a elevada viscosidade, não permitiu a realização do ensaio de funil em V.

Dessa forma, foram necessários ajustes nas porcentagens dos materiais componentes do concreto, assim como nos parâmetros adotados, para a produção de outra argamassa, que seria novamente ensaiada pelo *slump flow* e funil em V. Repetiu-se esse procedimento até a obtenção de uma argamassa cujos resultados apresentados fossem enquadrados dentro dos limites pré-estabelecidos, sendo satisfatórios à auto-adensabilidade. Para isso, foram necessárias seis tentativas, utilizando a areia natural A1, estando os resultados dos ensaios destas argamassas apresentados na tabela 39.

Tabela 39 – Resultados de *slump flow* e funil em V para as argamassas com areia natural, considerando os parâmetros de concreto.

Tentativa	Componentes conc., em volume					Parâmetros			Slump Flow		Funil em V
	% Pasta	% Areia	% Brita	% Ar	Σ	a/c	% SP	% CV	T25 (s)	D _{final} (mm)	T (s)
02	30	32	35	3	100	0,45	0,3	25	-	200	15,70
										205	
03	30	32	35	3	100	0,47	0,3	25	-	240	9,41
										240	
04	30	32	35	3	100	0,48	0,3	25	20,12	260	7,92
										245	
05	31	32	34	3	100	0,47	0,3	25	12,84	260	8,42
										265	
06	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	8,21	270	8,69
										275	

Diante dos resultados apresentados na tentativa 01, viu-se a necessidade em se aumentar o teor de pasta da mistura, pois o aumento da relação água/cimento, apenas, não seria suficiente para produzir a fluidez e a viscosidade requeridas. Desse modo, na tentativa 02 utilizou-se um teor de 30% de pasta, diminuindo-se em 2% o volume de areia. Aumentou-se, ainda a porcentagem de cinza volante incorporada à mistura, de 20 para 25% em relação à massa de cimento, e em substituição a este material, de modo a buscar diminuir o consumo de cimento no concreto, que aumentará com o aumento no teor de pasta. Ainda nesta situação os resultados apresentados pela argamassa não foram satisfatórios, estando fora dos limites estabelecidos por Domone (2006), não atingindo os 250mm, no ensaio de *slump flow*, e fora dos limites estabelecidos por Melo (2005), no ensaio de funil em V.

Procedeu-se, então, à tentativa 03, onde foram mantidos o volume incorporado de cinza volante e as porcentagens dos componentes do concreto, em volume. Aumentou-se, nessa situação, a relação água/cimento de 0,45 para 0,47, buscando maior fluidez da argamassa. Essa mudança é favorável ao consumo de cimento no concreto, que diminuiu, porém, apesar de os resultados apresentados estarem dentro dos limites estabelecidos, estes se encontram nos extremos desses limites – em especial o do ensaio com o funil em V – de modo que se acredita ser mais adequada a obtenção de resultados que se posicionem mais ao centro dos limites estabelecidos. Nesta tentativa, não foi atingido o valor de 250mm, no ensaio de *slump flow*.

Em seguida, analisou-se duas opções, a primeira – tentativa 04 – seria aumentar novamente a relação água/cimento de 0,47 para 0,48, mantendo os demais parâmetros constantes. Apesar de não se considerar essa solução a mais adequada – pois se acredita que a presença do aditivo superplastificante não se justifica em misturas com relações água/cimento muito elevadas – o teste foi realizado. Teve-se uma diminuição no consumo de cimento no concreto, assim como uma pequena melhora nos resultados. Verificou-se que o espalhamento da argamassa no ensaio de *slump flow* se mostrou levemente irregular.

A segunda opção – tentativa 05 – seria aumentar novamente o teor de pasta da mistura, de 30 para 31%, diminuindo em 1% o volume de brita, mantendo os demais parâmetros constantes. Observou-se, como na tentativa 04, uma pequena melhora nos resultados. Quando comparadas as duas opções – 04 e 05 – verifica-se que os resultados para o *slump flow* e o funil em V não apresentam diferença significativa, porém, o tempo para que a argamassa atinja os 250mm é maior na tentativa 04.

Optou-se, então, por manter a relação água/cimento de 0,47, considerando-se adequados os resultados obtidos na tentativa 05. Entretanto, durante a realização do ensaio

de ponto de saturação do aditivo superplastificante, foi verificado que este ponto de saturação encontra-se entre 0,3 e 0,4%, de modo que uma última tentativa foi realizada – tentativa 06 – onde se aumentou a porcentagem do aditivo utilizado, de 0,3 para 0,4%. Obteve-se uma pequena melhora nos resultados obtidos no ensaio de *slump flow*, quando comparados à tentativa 05. O ensaio de funil em V apresentou constância, não sendo considerado significativo o aumento observado.

Estando definidos os volumes de materiais e os parâmetros a serem adotados para a obtenção de uma argamassa auto-adensável, utilizando a areia natural A1, passou-se à substituição total desta areia pela areia de britagem. Primeiramente, fez-se a substituição considerando os volumes e parâmetros estabelecidos na tentativa 05, e em seguida, na tentativa 06. Em nenhuma das situações, porém, foram obtidas argamassas com espalhamento e fluidez adequadas, não sendo possível a realização dos ensaios. Esse fato deve-se, provavelmente, às falhas observadas na granulometria da areia de britagem, estando algumas frações – 2,4, 1,2 e 0,6mm – fora da zona considerada utilizável pela norma NBR 7211/2005, assim como da faixa proposta pelo método Repette-Melo (MELO, 2005). Além disso, as partículas dessas areias são, em geral, angulosas, recém-criadas pela britagem, diferentes dos grãos da areia natural, já expostos aos processos de intemperismo há um longo tempo.

Passou-se, então, à substituição de parte da areia de britagem pela areia natural A2, buscando-se compensar a deficiência granulométrica existente na areia de britagem. Foram adotados teores de 10-90%, 20-80%, 30-70%, 40-60% e 50-50% de areia natural A2 e areia de britagem, respectivamente.

Os volumes de materiais e parâmetros considerados, assim como os resultados obtidos, para as argamassas produzidas com a areia de britagem e com ambos os tipos de areia são apresentados na tabela 40.

Tabela 40 – Resultados de *slump flow* e funil em V para as argamassas com areia de britagem e composições de areia natural A2 e de britagem, considerando os parâmetros de concreto.

Tentativa	Componentes conc., em volume					Parâmetros			Slump Flow		Funil em V
	% Pasta	% Areia	% Brita	% Ar	Σ	a/c	% SP	% CV	T25 (s)	Dfinal (mm)	T (s)
100% Brit - 01	31	32	34	3	100	0,47	0,3	25	-	-	-
100% Brit - 02	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	-	-	-
10%Nat 90%Brit	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	9,18	230 250	12,15
20%Nat 80%Brit	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	6,44	265 265	9,21
30%Nat 70%Brit	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	5,91	270 275	8,06
40%Nat 60%Brit	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	6,23	285 290	7,70
50%Nat 50%Brit	31	32	34	3	100	0,47	0,4	25	6,34	300 300	7,26

Conforme já comentado, observa-se pela tabela 40 que as argamassas produzidas somente com a areia de britagem não apresentaram resultados satisfatórios, pois ficaram com consistência seca, impossibilitando os ensaios. Verifica-se, também, que ao se adicionar areia natural A2 à argamassa, esta passa a ser mais fluída, sendo a fluidez melhorada conforme se adiciona maior quantidade de areia natural à mistura. Assim, a argamassa composta por 50% de areia natural é a que apresenta resultados que indicam maior fluidez, e a argamassa composta por apenas 10% de areia natural é a que apresenta indicações de menor fluidez.

Analisando os resultados obtidos de acordo com os limites propostos no método Repette-Melo, verifica-se que a argamassa com 10% de areia natural apresentou resultado fora desses limites no ensaio de funil em V – limite superior de 10 segundos. Da mesma forma, as argamassas com 40 e 50% de areia natural apresentaram resultados fora dos limites no ensaio de *slump flow* – limite superior de 280mm. Dessa forma, a tabela 40 nos mostra que as argamassas com 20 e 30% de areia natural A2 em substituição à areia de britagem são mais indicadas à produção de CAA.

Ressalta-se, porém, que ao se comparar os resultados obtidos para as composições de agregado miúdo, uns com os outros, e com os limites, observa-se uma diferença muito pequena entre estes, o que torna necessário o questionamento a respeito da não auto-adensabilidade das argamassas cujos resultados ficaram fora dos limites estabelecidos. Além disso, deve-se lembrar que estes resultados estão sujeitos à percepção humana, podendo apresentar pequenas falhas. Dessa forma, optou-se pela produção de concretos com todas as composições consideradas, iniciando-se com as composições de 20-80 e 30-70% de areia natural A2 e areia de britagem. Caso os resultados obtidos para o concreto fossem satisfatórios, dar-se-ia seqüência com as demais composições.

4.2.2 Verificação da Auto-Adensabilidade das Argamassas, Após a Realização do Concreto, com Cinza Volante

A realização dos ensaios com o concreto permitiu verificar que as argamassas previamente estudadas não produziram concretos auto-adensáveis – item 4.3.1 – de modo que foram necessários vários ajustes à mistura para a obtenção do CAA. Dessa forma, após definidos estes novos parâmetros, e após a produção do concreto, repetiu-se os ensaios em argamassa, para verificação da auto-adensabilidade destas e para se relacionar os resultados entre argamassas e concretos.

As tabelas 41 e 42 apresentam os novos parâmetros utilizados para a produção das argamassas, e os resultados obtidos nos ensaios de *slump flow* e funil em V, respectivamente.

Tabela 41 – Parâmetros utilizados para a produção de argamassas – ajustados através de ensaios em concreto.

Parâmetros	Anteriores	Após ajustes no concreto
Pasta (%)	31	31
Areia (%)	32	33
Brita (%)	34	33
Ar (%)	3	3
Cinza volante (%)	25 m.c.	15 m.c.
a/c	0,47	0,47
Ad. Superplastificante (%)	0,4 m.c.	0,3 m.c.

Tabela 42 – Resultados de *slump flow* e funil em V para as argamassas produzidas, com parâmetros corrigidos pelo concreto.

Argamassas	Slump Flow		Funil em V
	T25 (s)	Dfinal (mm)	T (s)
100% AN*	9,74	250	3,33
		260	
70% AN 30% AB*	3,03	270	2,89
		280	

*AN: areia natural

AB: areia de britagem

As justificativas para as mudanças nos parâmetros utilizados estão apresentadas no item 4.3.1, onde são analisados os resultados obtidos para o concreto. A análise da tabela 42 nos permite verificar que ambas as argamassas apresentam resultados dentro dos limites estabelecidos por Domone (2006). Ao se considerar o método Repette-Melo, no entanto, os resultados para o ensaio de funil em V encontram-se abaixo do limite especificado, porém, muito próximos deste.

É importante a observação de que estas argamassas – produzidas após ajustes realizados para o concreto – se apresentam mais fluidas do que as produzidas inicialmente. Visualmente, as argamassas se apresentam coesas, não havendo exsudação ou segregação.

A figura 37 mostra a realização dos ensaios, nestas argamassas.



Figura 37 – Ensaios de *slump flow* e funil em V – argamassas com parâmetros ajustados.

4.2.3 Verificação da Auto-Adensabilidade das Argamassas, Após a Realização do Concreto, com Escória Granulada de Alto Forno

Uma vez realizado o estudo com cinza volante, tomou-se como hipótese de que as argamassas e concretos produzidos com a escória de alto forno se comportariam de modo semelhante. Dessa forma, mantiveram-se os parâmetros – conforme apresentado na tabela 38 – porém, optou-se por utilizar 25% de escória de alto forno, em relação à massa de cimento. Tomou-se como base para esta decisão o fato de a escória de alto forno ser uma adição mineral cimentante, de modo que não prejudicaria as propriedades do concreto, tanto no estado fresco, como endurecido.

A tabela 43 apresenta os resultados obtidos para as argamassas produzidas com escória de alto forno.

Tabela 43 – Resultados de *slump flow* e funil em V para as argamassas produzidas com escória de alto forno.

Argamassas	Slump Flow		Funil em V
	T25 (s)	Dfinal (mm)	T (s)
100% AN	3,25	275	4,36
		265	
70% AN 30% AB	1,19	285	4,50
		290	

*AN: areia natural

AB: areia de britagem

Através da análise dos resultados obtidos, observa-se que estes se encontram dentro dos limites estabelecidos por Domone (2006). Quanto aos limites propostos no método Repette-Melo, verifica-se que apenas a argamassa com composição 70-30% de areia natural e areia de britagem apresentou diâmetro final, do *slump flow*, superior ao estabelecido para a auto-adensabilidade. A proximidade deste resultado com o limite, entretanto, não permite a exclusão da hipótese desta argamassa ser auto-adensável.

A análise dos resultados obtidos para todas as argamassas, torna possível a verificação de que as argamassas mais fluidas, mesmo as que ultrapassaram os limites estabelecidos pelos autores aqui considerados, produziram concretos auto-adensáveis quando da incorporação do agregado graúdo. Porém, as argamassas que apresentaram resultados próximos aos limites inferiores, para o *slump flow*, e superiores para o funil em V, produziram concretos de consistência mais seca.

4.3 ENSAIOS EM CONCRETO

4.3.1 Estado Fresco

A partir dos ensaios em argamassas verificou-se que as combinações 20-80% e 30-70% de areia natural A2 e areia de britagem, respectivamente, foram as que

produziram argamassas auto-adensáveis, de modo que se iniciou a produção dos concretos correspondentes a estas argamassas. A obtenção de resultados satisfatórios levaria à produção dos concretos com as demais combinações de agregado miúdo, pois apesar dos resultados em argamassa estarem fora dos limites estabelecidos, estes resultados se apresentaram próximos uns dos outros, assim como dos limites.

A tabela 44 apresenta os consumos de materiais, por metro cúbico, para os concretos com 20-80% e 30-70% de areia natural A2 e areia de britagem, assim como para o concreto produzido com 100% de areia natural A1.

A tabela 45 apresenta os resultados dos ensaios para estes concretos e os limites estabelecidos por Gettu et al. (2004) e Efnarc (2002). Ressalta-se que durante a realização da pesquisa, os ajustes foram feitos considerando-se Gettu et al. (2004). Os valores de Efnarc (2002) foram colocados aqui apenas para comparação.

Tabela 44 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 25% de cinza volante.

Materiais	Concretos		
	100% Areia Nat	30% Areia Nat 70% Areia Brit	20% Areia Nat 80% Areia Brit
Cimento (kg)	357,69	363,45	363,24
CV (kg)	97,55	99,12	99,06
Água (l)	168,36	174,49	174,92
Ad. Superplastificante (ml)	4488,85	4561,04	4558,41
Areia Natural (kg)	925,90	266,48	177,55
Areia de Britagem (kg)	-	702,59	802,50
Brita 1/2 (kg)	479,18	486,88	486,60
Brita 0 (kg)	500,49	508,54	508,25

Tabela 45 – Resultados dos ensaios para os concretos, com 25% de cinza volante.

Ensaio		Concretos: 25% CV		Limites (GETTU et. al., 2004)	Limites (EFNARC, 2002)
		100% AN	30% AN 70% AB		
Slump Flow	T50 (s)	2,43	Ensaio não realizado	$1 < T50 < 15s$	$2 < T50 < 5s$
	df (cm)	64		60 < df < 80cm	65 < df < 80cm
		64			
	df _{médio} (cm)	64			
Anel Japonês	T50 (s)	9,54	Ensaio não realizado	-	-
	If (cm)	62		If ≥ df – 50mm	-
		62			
	If _{médio} (cm)	62		h1 – h2 ≤ 10mm	h1 – h2 ≤ 10mm
	h1 (mm)	44			
	h2 (mm)	6			
	h1 – h2	38			
Funil em V	t (s)	6,58	21,00	$5 < t < 25s$	$8 < t < 12s$
Caixa em L	T20 (s)	1,18	7,74	$T20 < 1,5s$	-
	T40 (s)	5,38	32,03	$T40 < 2,5s$	-
	h1 (cm)	6,2	-	h2/h1 > 0,80	0,80 < h2/h1 < 1,00
	h2 (cm)	10	-		
	h2/h1	1,61	-		
Massa específica (kg/m ³)		2257	2442	-	-

*AN: areia natural

AB: areia de britagem

Observando-se a tabela 45, verifica-se que o concreto composto por 100% de areia natural A1 apresentou resultados fora dos limites estabelecidos por Gettu et al. (2004), para o ensaio com o anel japonês, onde há uma diferença de 38mm nas alturas do concreto, interna e externamente ao anel, e para o ensaio de caixa em L, apresentando um tempo de 5,38s para percorrer 40cm. O concreto apresentou-se homogêneo em todos os ensaios, de modo que acredita-se que a alta compacidade apresentada pela combinação da brita ½ e da brita 0, assim como o excesso de material de dimensão 4,8mm presente nesta composição de agregados, tenha ocasionado o travamento dos agregados grãos frente às barras de armaduras, em especial no ensaio com o anel japonês. Juntamente com esse fato, verifica-se que um baixo volume de argamassa, possa ter sido responsável pela baixa fluidez apresentada pelo concreto.

Com relação aos limites estabelecidos por Efnarc (2002), observa-se que apenas o parâmetro T_{50} do *slump flow* foi aprovado, porém, os resultados ficaram próximos aos limites estabelecidos.

Apesar da obtenção de alguns resultados fora dos limites estabelecidos, deu-se continuidade à confecção do concreto com 30% de areia natural A2 e 70% de areia de britagem. Para este concreto, não foi possível realizar os ensaios de *slump flow* e anel japonês, pois o concreto apresentou-se com excesso de brita e falta de argamassa, o que fez com que houvesse desmoronamento do material na realização destes ensaios. O ensaio de caixa em L gerou, também, resultados fora dos limites estabelecidos por ambos os autores, e permitiu a verificação de exsudação e segregação do agregado graúdo, conforme apresentado na figura 38. Observa-se a presença elevada de pasta na superfície do concreto, sendo a falta de argamassa consequência da falta de areia no concreto.



Figura 38 – Ensaio de caixa em L, verificação de exsudação e segregação do agregado graúdo, para concreto com 25% de cinza volante, combinação 30-70% de areia natural A2 e areia de britagem.

Acredita-se, também, que o volume de areia de britagem, em relação a areia natural A2, está muito elevado, pois a exsudação e segregação apresentadas podem ser consequências da textura áspera e forma menos arredonda dos grãos desta areia, em relação aos grãos da areia natural, assim como da falta de agregados de dimensões 0,6, 0,3 e 0,15mm na composição granulométrica em questão, quando comparada à granulometria da areia

natural A1. Acredita-se que estes fatores não influenciaram tão severamente os resultados obtidos para argamassas, pois não havia presença do agregado graúdo – mais pesado – de modo que a viscosidade requerida para argamassas auto-adensáveis é menor que a requerida para os CAA.

Diante dos resultados obtidos, não foi produzido o concreto com a combinação 20-80% de areia natural e areia de britagem – assim como os concretos para as demais combinações de agregados miúdos – pois a verificação da necessidade em se aumentar o volume de areia presente no concreto, para conseqüente aumento do volume de argamassa, exigiu a modificação dos parâmetros considerados. Optou-se pelo aumento de 1% no volume de areia, sendo este valor diminuído no volume de brita, para o concreto. Dessa forma, a tabela 46 apresenta as novas porcentagens dos componentes do concreto, em volume.

Tabela 46 – Porcentagens ajustadas dos componentes do concreto, em volume.

% Pasta	% Areia	% Brita	% Ar	Σ
31	33	33	3	100

Foram feitas modificações, também, nas composições de areia natural e areia de britagem utilizadas, de modo que optou-se pela composição 50-50 e 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem, respectivamente. As curvas granulométricas para essas duas composições, juntamente com a da areia natural, são apresentadas nas figuras 39 e 40. Acredita-se que o aumento na quantidade de grãos nas frações de 0,6, 0,3 e 0,15mm venha a contribuir para aumento na viscosidade da argamassa, no concreto.

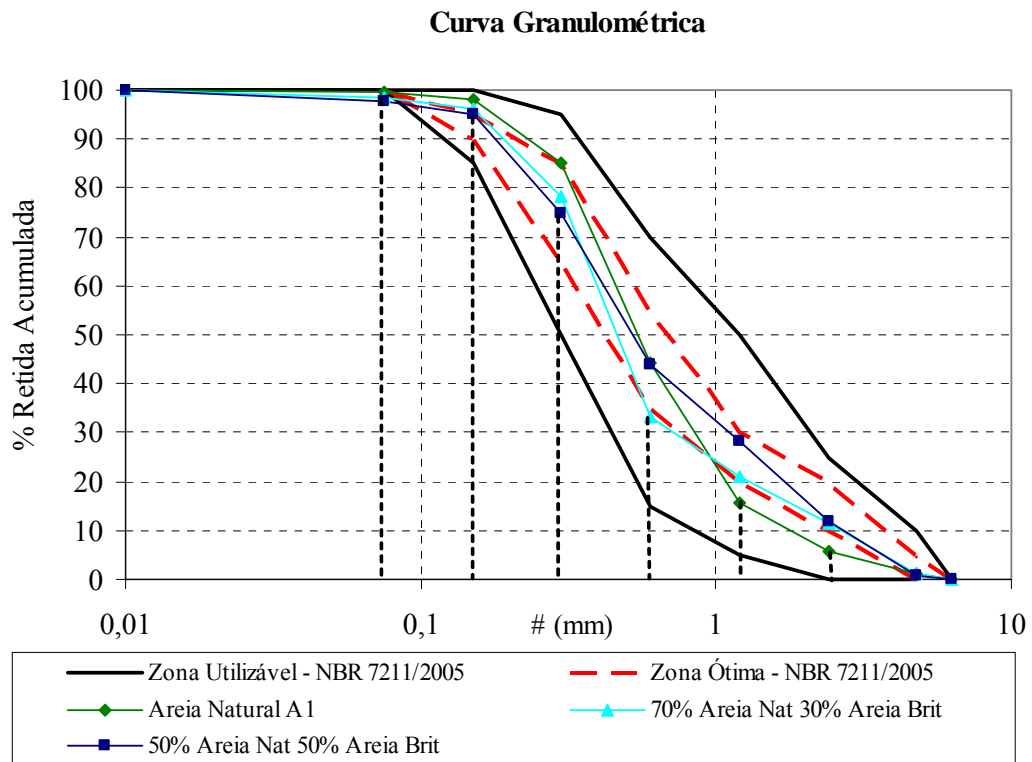


Figura 39 – Curvas granulométricas da areia natural e das composições 50-50 e 70-30% de areia natural e areia de britagem – enquadramento nas faixas propostas pela NBR 7211/2005.

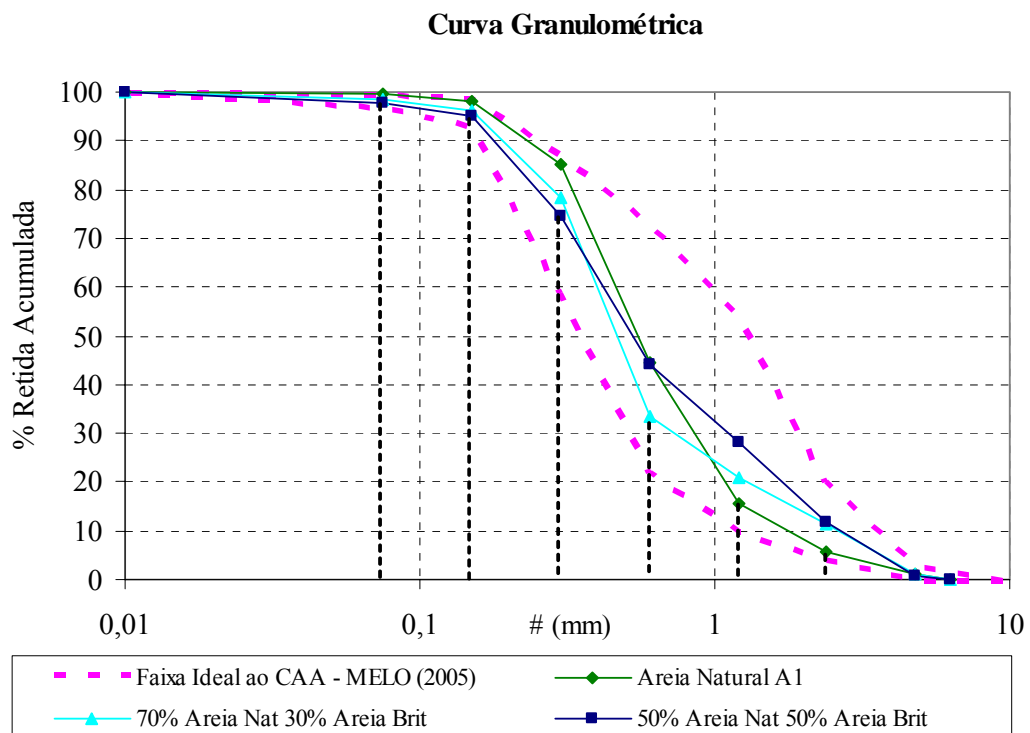


Figura 40 – Curvas granulométricas da areia natural e das composições 50-50 e 70-30% de areia natural e areia de britagem – enquadramento na faixa ideal ao CAA, proposta pelo método Repette-Melo.

O excedente de pasta no concreto, e a verificação da fluidez desta pasta, permitiram um ajuste na porcentagem do aditivo superplastificante no concreto, havendo uma redução deste, e passando a se utilizar 0,3% de aditivo, em relação à massa de cimento, conforme ensaio de ponto de saturação realizado.

Foi verificada, também, em ambos os concretos produzidos, uma quantidade elevada de ar incorporado – análise visual por indisponibilidade do equipamento na data dos ensaios. Acredita-se que a presença elevada de ar no concreto se deva ao elevado teor de cinza volante presente, conforme ocorrido em trabalhos anteriores (LEITE, 2007). Optou-se, então pela redução do volume de cinza volante incorporada, de 25 para 15%, em relação à massa de cimento.

Após a realização dos ajustes necessários, passou-se, então, à produção dos concretos considerando os novos parâmetros estabelecidos, apresentados na tabela 47. As tabelas 48 e 49 apresentam os consumos, por metro cúbico, para os concretos produzidos, e os resultados obtidos para estes concretos, respectivamente.

Tabela 47 – Parâmetros ajustados, para a produção de concretos.

Parâmetros	Iniciais	Ajustados
Pasta (%)	31	31
Areia (%)	32	33
Brita (%)	34	33
Ar (%)	3	3
Cinza volante (%)	25 m.c.	15 m.c.
a/c	0,47	0,47
Ad. Superplastificante (%)	0,4 m.c.	0,3 m.c.

Tabela 48 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 15% de cinza volante.

Materiais	Concretos		
	100% Areia Nat	70% Areia Nat 30% Areia Brit	50% Areia Nat 50% Areia Brit
Cimento (kg)	382,80	390,14	389,67
CV (kg)	62,64	63,84	63,76
Água (l)	177,39	182,15	183,03
Ad. Superplastificante (ml)	3602,98	3672,04	3667,62
Areia Natural (kg)	962,00	647,99	462,29
Areia de Britagem (kg)	-	313,80	522,37
Brita 1/2 (kg)	937,15	955,11	953,96

Observa-se na tabela 48 que os consumos dos concretos ultrapassam o limite de 380 kg/m³, inicialmente estabelecido como limite do estudo. Porém, considerando a incorporação de 5% de calcário presente no cimento CP V ARI RS, esses consumos são reduzidos ficando dentro do limite estabelecido nos objetivos específicos deste trabalho.

Tabela 49 – Resultados dos ensaios para os concretos com 15% de cinza volante.

Ensaio		Concretos: 15% CV			Limites (GETTU et. al., 2004)	Limites (EFNARC, 2002)
		100% AN	70% AN 30% AB	50% AN 50% AB		
Slump Flow	T50 (s)	2,17	4,26	2,00	1 < T50 < 15s	2 < T50 < 5s
	df (cm)	69	72	66	60 < df < 80cm	65 < df < 80cm
		69	73	67		
df _{médio} (cm)	69	73	67			
Anel Japonês	T50 (s)	2,31	3,18	Ensaio não realizado	-	-
	If (cm)	64	69		If ≥ df – 50mm	-
		68	68			
	If _{médio} (cm)	66	69			
	h1 (mm)	26	25		h1 – h2 ≤ 10mm	h1 – h2 ≤ 10mm
	h2 (mm)	6	5			
h1 – h2	20	20				
Funil em V	t (s)	3,82	6,75	23,46	5 < t < 25s	8 < t < 12s
Caixa em L	T20 (s)	0,65	0,93	1,36	T20 < 1,5s	-
	T40 (s)	1,43	2,44	4,94	T40 < 2,5s	-
	h1 (cm)	8	8,9	-	h2/h1 > 0,80	0,80 < h2/h1 < 1,00
	h2 (cm)	7,5	7,5	-		
	h2/h1	0,94	0,84	-		
Massa específica (kg/m ³)	2244	2341	Ensaio não realizados		-	-
Ar incorporado (%)	2,4	1,6	Ensaio não realizados		-	-

*AN: areia natural

AB: areia de britagem

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que os concretos produzidos com 100% de areia natural A1, e com a combinação 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem apresentaram resultados dentro dos limites estabelecidos por Gettu et al. (2004), salvo para a diferença de alturas interna e externamente ao anel japonês, que é de 20mm para ambos os concretos. Ressalta-se que a medida externa da altura do concreto foi realizada

próxima à borda do espalhamento, de modo que esta diferença de alturas poderia encontrar-se dentro dos limites se a leitura fosse realizada próxima ao anel, externamente.

Quanto aos limites estabelecidos por Efnarc (2002), observa-se que apenas para o ensaio de funil em V, os resultados encontram-se abaixo do limite estabelecido, por uma pequena diferença, de modo a não ser considerado um problema. Procedeu-se, então, a moldagem dos corpos-de-prova para realização dos ensaios no estado endurecido, para estes concretos.

O concreto produzido com a composição 50-50% de areia natural e areia de britagem apresentou exsudação e segregação do agregado graúdo. Esta constatação foi possível, principalmente, por meio do ensaio de caixa em L, onde o tempo para o concreto percorrer 40cm excedeu o limite estabelecido por Gettu et al. (2004), e o agregado graúdo ficou retido nas barras de armaduras, conforme figura 41. Os ensaios de *slump flow* e funil em V apresentaram resultados dentro dos limites estabelecidos, porém, estes não devem ser considerados, pois, no primeiro ensaio, o agregado concentrou-se no centro do espalhamento, de modo que apenas a pasta fluíu até o limite de 50cm. Da mesma forma, no ensaio de funil em V houve escoamento inicial da pasta, para posterior passagem do agregado graúdo pela restrição do funil.



Figura 41 – Ensaio de caixa em L, verificação da retenção do agregado graúdo nas barras de armaduras, para concreto com 15% de cinza volante, composição 50-50% de areia natural e areia de britagem.

Uma vez verificada a existência de exsudação e segregação, não foram realizados os ensaios com o anel japonês, de massa específica e ar incorporado. A análise dos

resultados segundo Efnarc (2002) permite observar que o tempo de escoamento do concreto pelo de funil em V encontra-se acima do limite estabelecido.

Passou-se, então, para a produção dos concretos com a escória granulada de alto forno. Como a escória é um material cimentante, optou-se pelo uso de 25% desta, em relação à massa de cimento. A tabela 50 apresenta os consumos de materiais para a produção dos concretos com a escória de alto forno e figura 42 apresenta a realização dos ensaios com a composição 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem. A tabela 51 apresenta os resultados obtidos para estes concretos.

Tabela 50 – Consumo de materiais, por metro cúbico, para produção dos concretos, com 25% de escória de alto forno.

Materiais	Concretos		
	100% Areia Nat	70% Areia Nat 30% Areia Brit	50% Areia Nat 50% Areia Brit
Cimento (kg)	364,07	371,12	370,67
Escória de alto forno (kg)	88,74	90,46	90,35
Água (l)	169,66	174,32	175,22
Ad. Superplastificante (ml)	3426,66	3492,99	3488,75
Areia Natural (kg)	971,29	654,37	466,84
Areia de Britagem (kg)	0,00	316,89	527,51
Brita 1/2 (kg)	946,20	964,52	963,35



Figura 42 – Ensaio realizados em concreto, para a composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.

Tabela 51 – Resultados dos ensaios para os concretos, com 25% escória de alto forno.

Ensaios		Concretos: 25% Escória			Limites (GETTU et. al., 2004)	Limites (EFNARC, 2002)
		100% AN	70% AN 30% AB	50% AN 50% AB		
Slump Flow	T50 (s)	1,87	1,52	2,74	1 < T50 < 10s	2 < T50 < 5s
	df (cm)	66	72	66	60 < df < 80cm	65 < df < 80cm
		67	75	64		
df _{médio} (cm)	67	74	65			
Anel Japonês	T50 (s)	0,93	1,54	Ensaio não realizado	-	-
	If (cm)	66	70		If ≥ df – 50mm	-
		68	70			
	If _{médio} (cm)	67	70		h1 – h2 ≤ 10mm	h1 – h2 ≤ 10mm
	h1 (mm)	38	24			
	h2 (mm)	16	14			
h1 – h2	22	10				
Funil em V	t (s)	4,32	5,86	26,25	5 < t < 25s	8 < t < 12s
Caixa em L	T20 (s)	0,58	0,66	2,57	T20 < 1,5s	-
	T40 (s)	1,36	1,77	9,60	T40 < 2,5s	-
	h1 (cm)	9,5	9,5	-	h2/h1 > 0,80	0,80 < h2/h1 < 1,00
	h2 (cm)	7,4	7,7	-		
	h2/h1	0,78	0,81	-		
Massa específica (kg/m ³)		2217	2402	2445	-	-
Ar incorporado (%)		2,9	2,4	-	-	-

*AN: areia natural

AB: areia de britagem

Observa-se que o concreto produzido com 100% de areia natural A1 apresentou bons resultados na maioria dos ensaios, porém, escoou pelo funil em V em um tempo inferior ao limite estabelecido. É possível notar, também, que o concreto com a composição 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem, que apresentou resultados satisfatórios em todos os ensaios, também apresenta resultado para o funil em V próximo do limite inferior estabelecido. Esse fato leva à consideração de que uma diferença pequena pode ser resultado da percepção humana – mais rápida ou mais lenta – sendo estes tempos, na realidade, maiores dos que os aqui apresentados.

Um outro aspecto que pode ser notado para o concreto com 100% de areia natural é a inadequação dos resultados que consideram as alturas do concreto, tanto para o anel japonês quanto para a caixa em L. Para o concreto que apresenta a composição 70-30%

de areia natural e areia de britagem não houve problemas com as alturas do concreto. A figura 43 apresenta o ensaio de caixa em L, permitindo a observação do nível adequado apresentado por este concreto.



Figura 43 – Ensaio de caixa em L, verificação do nivelamento adequado, para concreto com 25% de escória de alto forno, composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.

A moldagem dos corpos-de-prova para realização dos ensaios no estado endurecido foi realizada para os concretos com 100% de areia natural e a composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.

Para o concreto com a composição 50-50% de areia natural e areia de britagem é possível observar que os resultados para os ensaios de funil em V e caixa em L encontram-se fora dos limites estabelecidos. Nos dois ensaios foi possível a observação de exsudação e segregação. O ensaio de *slump flow* apresentou resultados adequados, provavelmente, porque este não exige que o concreto passe através de barras de armaduras ou restrições. Os resultados insatisfatórios levaram a não realização do ensaio com o anel japonês.

Com relação à massa específica, pode-se verificar que, para todos os concretos produzidos na pesquisa, o aumento na quantidade de areia de britagem induz o aumento da massa específica. Esse fato ocorre, pois a areia de britagem é mais pesada que a areia natural. Observa-se, no entanto, que as massas específicas apresentadas são semelhantes

às apresentadas por concretos convencionais. A figura 44 mostra a realização do ensaio de massa específica.



Figura 44 – Ensaio de massa específica, para o concreto com 25% de escória de alto forno, composição 70-30% de areia natural e areia de britagem.

Para a medição da porcentagem de ar incorporado ao concreto foi utilizado o equipamento mostrado na figura 45. É possível observar que, para todos os concretos em que foi realizado o ensaio, os resultados obtidos encontram-se próximos do previsto – em torno de 3% – salvo para o concreto com 25% de escória de alto forno e a composição 50-50% de areia natural e areia de britagem, que apresentou, também, problemas de auto-adensabilidade.



Figura 45 – Equipamento utilizado na medição do ar incorporado ao concreto.

4.3.2 Estado Endurecido

O comportamento dos concretos produzidos, no estado endurecido, foi avaliado em corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões (150x300)mm, por meio de ensaios para verificação da homogeneidade, através de ondas ultra-sônicas, massa específica, resistência mecânica – compressão e tração, e módulo de deformação estático e dinâmico. Foi realizada uma análise estatística básica dos resultados obtidos, sendo eliminados os corpos-de-prova cujos valores estavam 10% abaixo e acima da média, sendo realizada nova análise com os corpos-de-prova restantes.

4.3.2.1 Homogeneidade dos Corpos-de-Prova

Para verificar a homogeneidade do CAA, foram lidos os tempos que ondas ultra-sônicas levaram para percorrer o comprimento dos corpos-de-prova de concreto, de (150x300)mm, secos ao ar, sendo retirados da câmara úmida 7 dias antes da data do ensaio.

Foi utilizado o equipamento PUNDIT, apresentado na figura 46, estando as velocidades de percurso das ondas apresentadas na tabela 52.



Figura 46 – Equipamento PUNDIT, utilizado na verificação da homogeneidade do CAA.

Tabela 52 – Velocidade de ondas ultra-sônicas, através do comprimento de CPs.

Ensaio: Ultra-Som, aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
Quantidade de CPs	13	12	12	12
Média Velocidade (m/s)	4554,82	4595,84	4526,70	4425,51
Desvio Padrão (m/s)	33,97	47,76	42,20	59,06
CV (%)	0,75	1,04	0,93	1,33

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

É possível observar que a velocidade média das ondas ultra-sônicas, ao percorrerem os corpos-de-prova, é muito semelhante, para os quatro concretos estudados. Se considerados os desvios padrão obtidos, verifica-se que as diferenças observadas não são significativas. A pequena dispersão dos resultados mostra que a homogeneidade dos concretos foi verificada. As figuras 47 e 48 apresentam os corpos-de-prova, rompidos à tração por compressão diametral, onde é possível visualizar a distribuição homogênea dos materiais no interior do concreto.

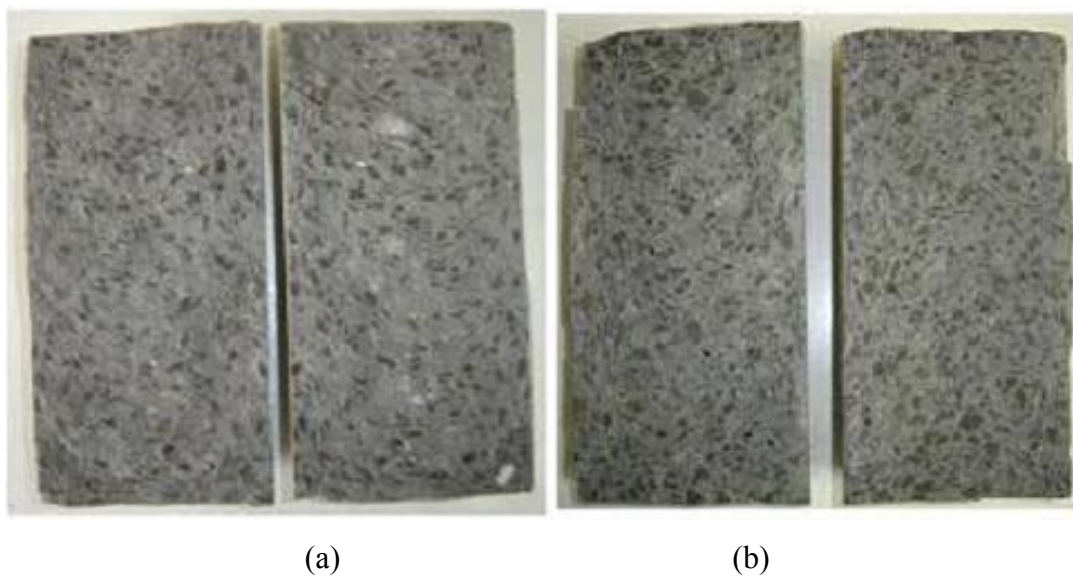


Figura 47 – Corpos-de-prova rompidos à tração, por compressão diametral, com 15% de cinza volante, (a) 100% areia natural; (b) 30% areia de britagem.

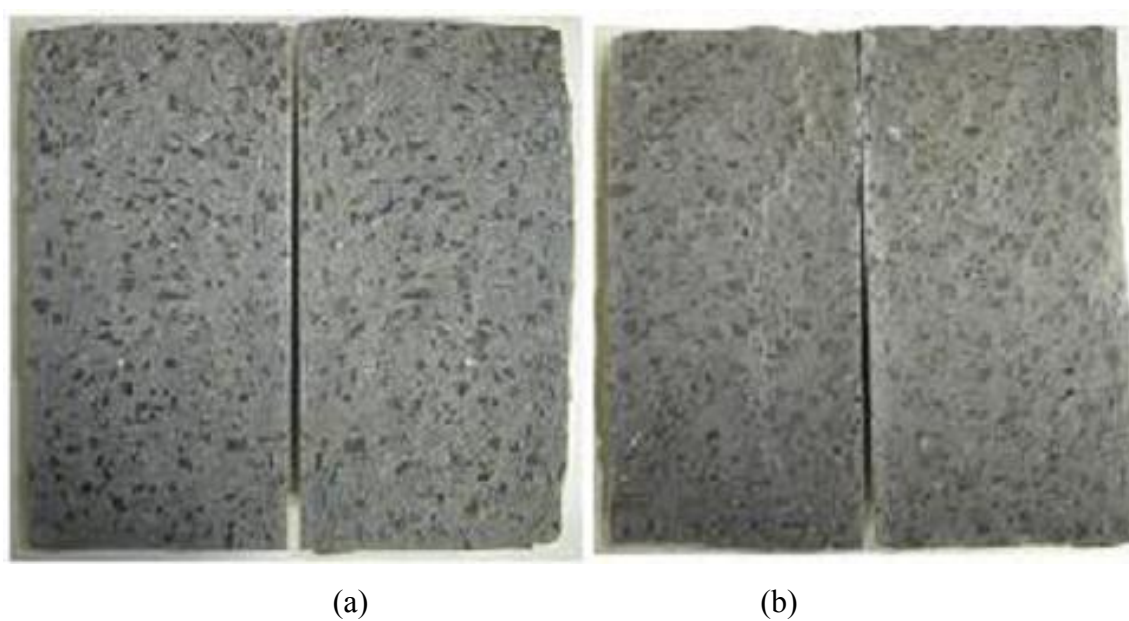


Figura 48 – Corpos-de-prova rompidos à tração, por compressão diametral, com 25% de escória de alto forno, (a) 100% areia natural; (b) 30% areia de britagem.

4.3.2.2 Massa Específica

A massa específica dos concretos foi definida através da determinação da massa e do volume dos corpos-de-prova ensaiados, aos 28 dias. A tabela 53 apresenta os resultados médios obtidos.

Tabela 53 – Massa específica do CAA, aos 28 dias.

Ensaio: Massa específica, aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
Quantidade de CPs	13	12	12	12
Média Massa específica (kg/m ³)	2243,06	2369,49	2234,84	2241,30
Desvio padrão (kg/m ³)	26,95	29,01	18,78	22,67
CV (%)	1,20	1,22	0,84	1,01

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

Verifica-se que a massa específica dos corpos-de-prova de concreto com areia de britagem é um pouco maior que a apresentada pelos corpos-de-prova de concreto com 100% de areia natural, sendo esta diferença pequena. Essa observação é decorrente do fato de a areia de britagem ser mais pesada que a areia natural. Observa-se, no entanto, que as massas específicas obtidas são semelhantes às apresentadas por concretos convencionais.

4.3.2.3 Resistência à Compressão

São apresentados, nas tabelas 54 e 55, os resultados médios obtidos para os ensaios de resistência à compressão, realizados para os concretos, com 15% de cinza volante, cujas propriedades no estado fresco se mostraram satisfatórias à auto-adensabilidade. Fez-se, também, uma análise estatística básica dos resultados obtidos, para avaliar a dispersão destes. A figura 49 apresenta a evolução da resistência com o tempo, para os concretos com 15% de cinza volante.

Tabela 54 – Resistência à compressão para o concreto com 15% de cinza volante e 100% de areia natural A1.

Ensaio: Resistência à compressão	Idade		
	1 dia	7 dias	28 dias
Quantidade de CPs	4	2	6
Média f_c (MPa)	16,52	30,53	43,11
Desvio padrão (MPa)	0,96	1,80	2,08
CV (%)	5,84	5,88	4,83

Tabela 55 – Resistência à compressão para o concreto com 15% de cinza volante e combinação 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem.

Ensaio: Resistência à compressão	Idade		
	1 dia	7 dias	28 dias
Quantidade de CPs	4	4	5
Média f_c (MPa)	25,60	40,39	53,82
Desvio padrão (MPa)	0,90	2,77	2,73
CV (%)	3,51	6,86	5,07

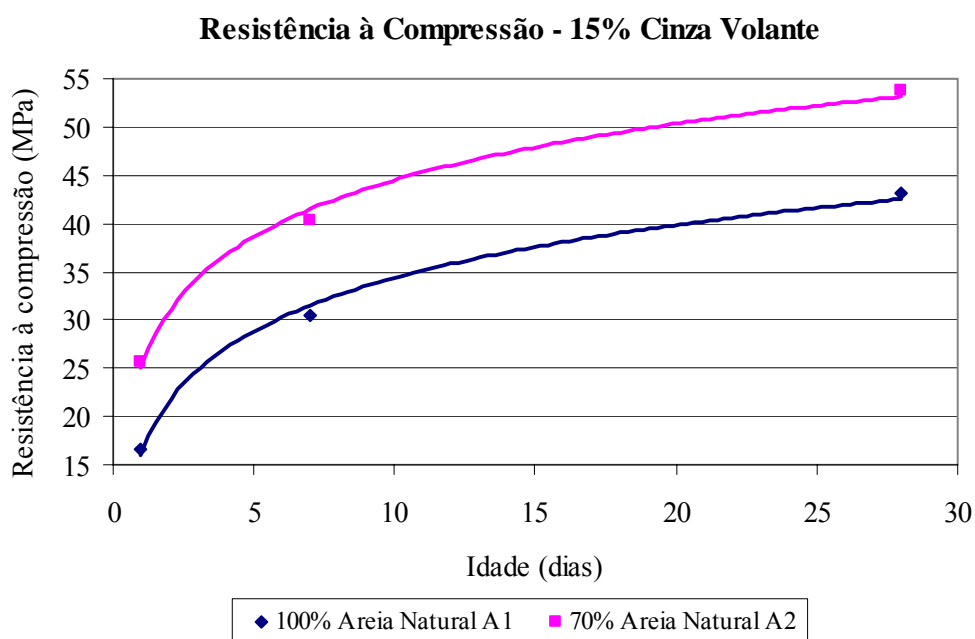


Figura 49 – Evolução da resistência à compressão com o tempo, para os concretos com 15% de cinza volante.

Verifica-se que em ambos os concretos a resistência à compressão aumentou com o tempo. É possível observar, também, que a incorporação de areia de britagem no concreto promoveu um aumento na resistência à compressão em mais de 20%, em todas as idades. Acredita-se que esta verificação é devida à maior compacidade conferida à pasta, pelo material fino presente na areia de britagem, podendo esse fato ser comprovado, também, pelo aumento da massa específica no concreto com esta areia, em mais de 100 kg/m³, em relação ao concreto com areia natural – conforme apresentado na tabela 53. A figura 49 mostra que a distância entre as curvas obtidas para os dois concretos é mantida constante, de modo que o aumento da resistência promovido pela areia de britagem foi uniforme, com o passar do tempo.

São apresentados, nas tabelas 56 e 57, os resultados médios obtidos para os ensaios de resistência à compressão, realizados para os concretos, com 25% de escória granulada de alto forno, cujas propriedades no estado fresco se mostraram satisfatórias à auto-adensabilidade. Da mesma forma, fez-se para estes concretos, uma análise estatística básica dos resultados obtidos, para avaliar a dispersão destes resultados. A figura 50 apresenta a evolução da resistência com o tempo, para os concretos com 25% de escória.

Tabela 56 – Resistência à compressão para o concreto com 25% de escória e 100% de areia natural A1.

Ensaio: Resistência à compressão	Idade		
	1 dia	7 dias	28 dias
Quantidade de CPs	4	4	4
Média f_c (MPa)	19,04	30,70	42,93
Desvio padrão (MPa)	0,21	1,72	0,52
CV (%)	1,10	5,59	1,20

Tabela 57 – Resistência à compressão para o concreto com 25% de escória e combinação 70-30% de areia natural A2 e areia de britagem.

Ensaio: Resistência à compressão	Idade		
	1 dia	7 dias	28 dias
Quantidade de CPs	4	2	2
Média f_c (MPa)	19,14	28,06	43,10
Desvio padrão (MPa)	0,29	0,85	3,03
CV (%)	1,50	3,02	7,02

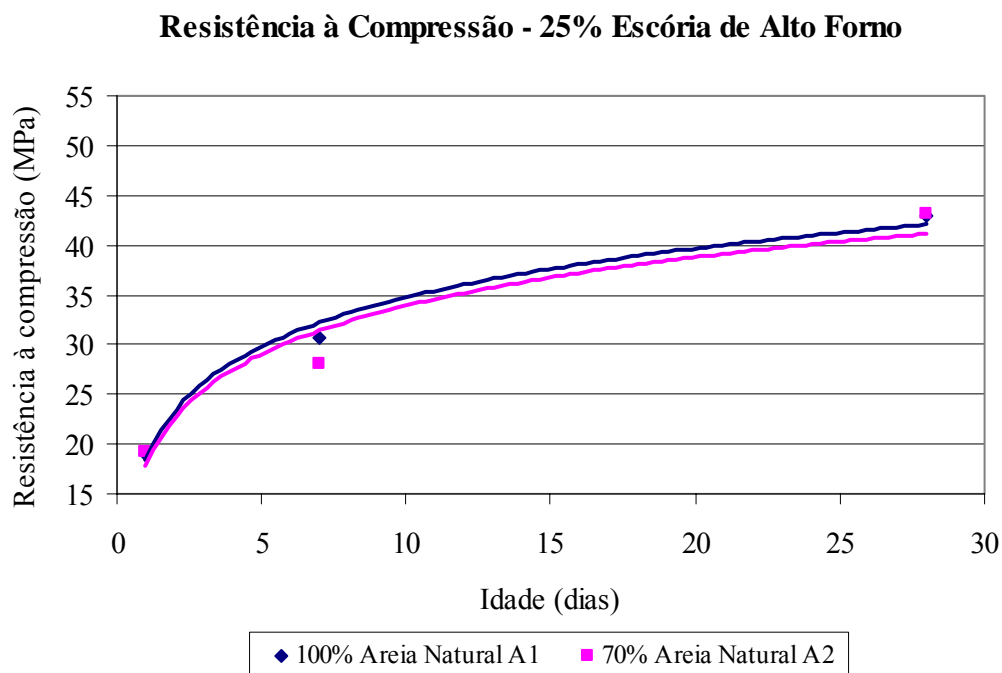


Figura 50 – Evolução da resistência à compressão com o tempo, para os concretos com 25% de escória de alto forno.

É possível observar que ambos os concretos tiveram sua resistência à compressão aumentada, com o tempo. Porém, a incorporação da areia de britagem não promoveu aumento da resistência, de modo que esta permaneceu constante para os dois concretos. Acredita-se que, como a escória de alto forno desenvolve a resistência mais lentamente, a idades mais avançadas, a água presente na mistura não foi suficiente às reações, uma vez que a relação água/finos dos concretos com escória de alto forno é menor, quando comparada aos concretos com cinza volante. Dessa forma, o ganho de resistência que seria promovido por esta areia foi prejudicado, pois a escória não pode desenvolver a resistência adequadamente. Além disso, quando se compara os resultados obtidos para 25% de escória com os obtidos para 15% de cinza volante, observa-se que a área específica da escória é maior, quando comparada a da cinza volante, o que exige uma quantidade maior de água pela adição.

A figura 51 mostra a realização do ensaio de resistência à compressão.



Figura 51 – Ensaio de resistência à compressão do CAA.

4.3.2.4 Resistência à Tração

São apresentados, na tabela 58, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, para todos os concretos estudados, em que houve moldagem de corpos-de-prova – com 15% de cinza volante e 25% de escória de alto forno. Foi realizada uma análise estatística básica destes resultados, para avaliação de sua dispersão.

Tabela 58 – Resistência à tração, para os concretos estudados.

Ensaio: Resistência à Tração, aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
Quantidade de CPs	3	3	3	2
Média f_{t28} (MPa)	3,49	4,72	3,73	3,90
Desvio Padrão (MPa)	0,14	0,14	0,18	0,23
CV (%)	4,06	3,00	4,91	5,99

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

Observa-se que a resistência à tração dos concretos se comportou da mesma forma que a resistência à compressão. Para adição de 15% de cinza volante, houve um

aumento na resistência à tração, provavelmente devido à maior compacidade da pasta conferida pelo material fino presente na areia de britagem. Porém, para a adição de 25% de escória de alto forno, não foram observados aumentos significativos nas resistências.

A tabela 59 apresenta o cálculo da relação entre resistência à tração e resistência à compressão (ft/fc).

Tabela 59 – Relação (ft/fc), para os concretos.

Relação (ft/fc), aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
(ft/fc)	0,08	0,09	0,09	0,09

* AN: areia natural
AB: areia de britagem

Como os concretos produzidos apresentam aproximadamente a mesma resistência à compressão, não é possível observar o efeito de mudanças nesta resistência na relação ft/fc. Observa-se, porém, que a resistência à tração apresenta-se próxima de 10% da resistência à compressão.

As figuras 52 e 53 mostram a realização do ensaio de resistência à tração.



Figura 52 – Ensaio de resistência à tração do CAA.



Figura 53 – Ensaio de resistência à tração do CAA, após ruptura.

4.2.3.5 Módulo de Deformação

Realizou-se o ensaio de módulo de deformação estático tangente inicial (E_{ci}), com o objetivo de caracterizar a deformabilidade do concreto, segundo os procedimentos descritos no respectivo plano de cargas da norma NBR 8522/2003. Os resultados médios obtidos, na idade de 28 dias, são apresentados na tabela 60. Para avaliação da dispersão dos resultados, realizou-se análise estatística básica.

Tabela 60 – Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), para os concretos estudados.

Ensaio: Módulo de deformação estático, aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
Quantidade de CPs	6	6	4	6
Média E_{ci} (GPa)	33,53	34,57	33,28	33,47
Desvio Padrão (GPa)	2,23	2,08	1,62	1,98
CV (%)	6,65	6,00	4,85	5,90

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

Não foram observadas diferenças significativas nos resultados obtidos para o ensaio de módulo de deformação, ao se considerar os concretos estudados. Para o concreto com 15% de cinza volante, verifica-se um pequeno aumento no módulo de deformação ao se adicionar a areia de britagem no concreto, provavelmente reflexo do aumento na resistência à compressão e pela maior porcentagem de material fino presente. Possivelmente, essa diferença nos resultados seria mais evidente se a porcentagem de areia de britagem incorporada aos concretos fosse maior que a utilizada, de 30%. Observando-se os valores obtidos para o módulo de deformação, justifica-se a uniformidade obtida no ensaio de ultrassom, para verificação da homogeneidade do concreto.

Após a execução do ensaio para a determinação do módulo de deformação E_{ci} , os mesmos corpos-de-prova ensaiados foram rompidos à compressão. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 61.

Tabela 61 – Resistência à compressão, para os CPs ensaiados na obtenção de E_{ci} .

Ensaio: Resistência à compressão, após E_{ci} , aos 28 dias	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
Quantidade de CPs	5	3	3	1
Média f_c (MPa)	42,60	49,53	44,44	45,47
Desvio Padrão (MPa)	3,33	3,53	3,77	-
CV (%)	7,81	7,14	8,48	-

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

Verifica-se, pela tabela 61, que a resistência à compressão dos corpos-de-prova, após a realização do módulo de deformação se comportou de modo semelhante aos concretos cujos corpos-de-prova não foram realizados o ensaio para determinação do E_{ci} . Para adição de cinza volante, verificou-se aumento da resistência, porém, para adição de escória de alto forno, a incorporação de areia de britagem não teve influência no aumento desta resistência.

Para a comparação dos valores obtidos experimentalmente com a literatura, foram considerados os seguintes modelos para a previsão do módulo de deformação, onde f_c é a resistência à compressão, em MPa, e w é a massa específica, em kg/m^3 :

- NBR 6118 (2003), para $f_c < 50$ MPa:

$$E_{ci} = 5600 (f_c)^{1/2} \quad (4.1)$$

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (4.2)$$

- CEB-FIB Model Code (1990), para $f_c < 80$ MPa:

$$E_c = 2,15 \times 10^4 (f_c/10)^{1/3} \quad (4.3)$$

- ACI Committee 290 (1992):

$$E_c = 0,043 (w^3 f_{cm})^{1/2} \quad (4.4)$$

- RILEM Committee 107 (1996), para $17,2 < f_c < 69,0$ MPa:

$$E_c = 57000 (f_c)^{1/2} \quad (4.5)$$

Os resultados comparativos são apresentados na tabela 62. Ressalta-se que as equações propostas pelos modelos apresentados são válidas para os intervalos de resistência à compressão indicados nas normas correspondentes. Observa-se que os resultados obtidos para os concretos estudados encontram-se dentro destes limites, sendo utilizado para o cálculo, os resultados de resistência à compressão apresentados na tabela 61. A figura 54 apresenta um gráfico comparativo dos módulos de deformação, obtidos pela determinação da tangente, para os modelos apresentados.

Tabela 62 – Comparações entre os valores de módulo de deformação obtidos experimentalmente, e modelos dados na literatura, aos 28 dias.

Normalização: Módulo de deformação estático, valores em (GPa)		Concretos			
		15% Cinza Volante		25% Escória	
		100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
E _{ci} (obtido no experimento)		33,53	34,57	33,28	33,47
NBR 6118 (2003)	tangente	36,55	39,41	37,33	37,76
	secante	31,07	33,50	31,73	32,10
CEB-FIP (1990), tangente		34,85	36,65	35,35	35,62
ACI 209 (1992), secante		29,81	34,90	30,29	30,77
RILEM 107 (1995)		37,20	40,11	38,00	38,44

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

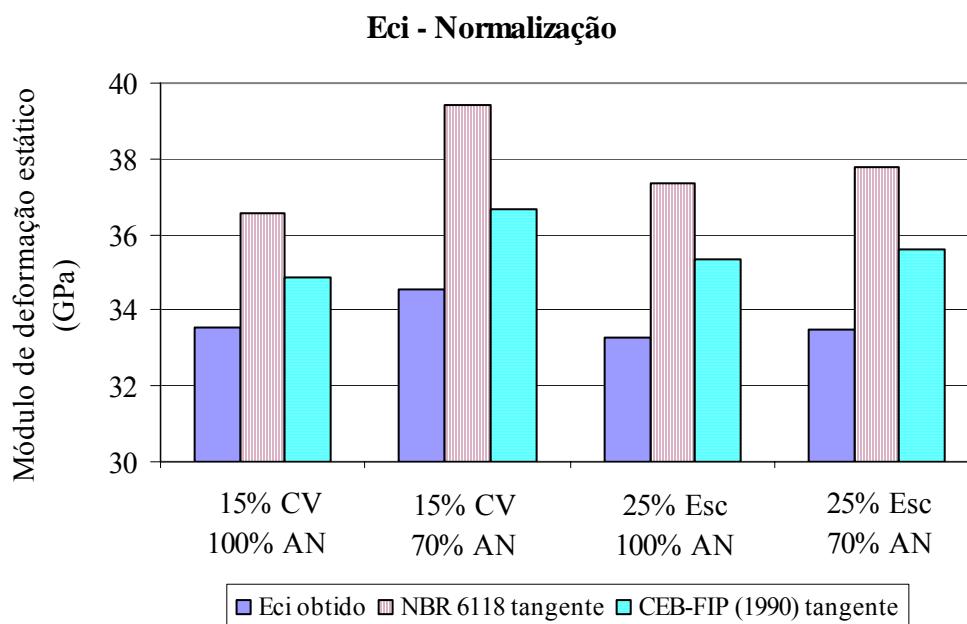


Figura 54 – Comparação entre os módulos de deformação, obtidos pela determinação da tangente, para os modelos apresentados.

A análise dos resultados comparativos mostra que os resultados obtidos experimentalmente são válidos, pois estão próximos aos valores estimados para os diversos modelos. Observa-se que, salvo para os modelos que prevêem o módulo de deformação secante, da NBR 6118 (2003) e ACI 290 (1992), os resultados obtidos experimentalmente foram menores que os previstos pela literatura. O modelo proposto pelo CEB-FIP (1990) é o que apresenta valores mais próximos aos obtidos experimentalmente.

A figura 55 apresenta o ensaio de módulo de deformação.



Figura 55 – Ensaio de módulo de deformação do CAA.

A previsão do módulo de deformação dinâmico foi feita, utilizando a equação recomendada por BS 1881 (1996). Adotou-se coeficiente de Poisson dinâmico igual a 0,20, conforme Torrales-Carbonari et al. (2005). Para o cálculo, foram utilizados os valores de velocidade ultra-sônica e massa específica apresentados nas tabelas 52 e 53. A tabela 63 apresenta os valores obtidos para o módulo de deformação dinâmico, assim como a relação entre os módulos de deformação estático (obtido por ensaio) e dinâmico.

Tabela 63 – Módulo de deformação dinâmico e relação E_{ci}/E_{cd} .

Relação E_{ci}/E_{cd}	Concretos			
	15% Cinza Volante		25% Escória	
	100% AN*	70% AN* 30% AB	100% AN*	70% AN* 30% AB
E_{ci} (GPa)	33,53	34,57	33,28	33,47
E_{cd} (GPa)	41,88	45,04	41,21	39,51
E_{ci}/E_{cd}	0,80	0,77	0,81	0,85

* AN: areia natural

AB: areia de britagem

Através da tabela 63, é possível verificar que os resultados mostram-se coerentes com a literatura, sendo os valores de E_{cd} maiores que os de E_{ci} , para todos os concretos. As relações E_{ci}/E_{cd} ficaram próximas a 0,80, conforme descreve Neville (1997).

4.3.3 Análise de Custo dos Concretos

São apresentados, nas tabelas 64 e 65, os custos dos concretos estudados, considerando os materiais utilizados, e os preços de mercado vigentes no período de realização do estudo. Os consumos de materiais considerados para os cálculos de custos são os apresentados anteriormente, nas tabelas 48 e 50.

Tabela 64 – Custo do m³ dos concretos com 15% de cinza volante.

Materiais: Custo para produção de 1m ³ de concreto	Custo Unitário do Material	15% Cinza volante	
		100% Areia Nat	70% Areia Nat 30% Areia Brit
Cimento (kg)	R\$ 0,30	R\$ 114,84	R\$ 117,04
Cinza Volante (kg)	R\$ 0,18	R\$ 11,28	R\$ 11,49
Escória de alto forno (kg)	R\$ 0,10	-	-
Ad. Superplastificante (l)	R\$ 20,00	R\$ 72,06	R\$ 73,44
Areia Natural (m ³)	R\$ 49,00	R\$ 29,46	R\$ 19,84
Areia de Britagem (m ³)	R\$ 23,00	-	R\$ 4,23
Brita 1/2 (m ³)	R\$ 27,00	R\$ 16,23	R\$ 16,54
Concreto (m ³)		R\$ 243,87	R\$ 242,59

Tabela 65 – Custo do m³ dos concretos com 25% de escória de alto forno.

Materiais: Custo para produção de 1m ³ de concreto	Custo Unitário do Material	25% Escória de alto forno	
		100% Areia Nat	70% Areia Nat 30% Areia Brit
Cimento (kg)	R\$ 0,30	R\$ 109,22	R\$ 111,34
Cinza Volante (kg)	R\$ 0,18	-	-
Escória de alto forno (kg)	R\$ 0,10	R\$ 8,87	R\$ 9,05
Ad. Superplastificante (l)	R\$ 20,00	R\$ 68,53	R\$ 69,86
Areia Natural (m ³)	R\$ 49,00	R\$ 29,75	R\$ 20,04
Areia de Britagem (m ³)	R\$ 23,00	-	R\$ 4,27
Brita 1/2 (m ³)	R\$ 27,00	R\$ 16,39	R\$ 16,71
Concreto (m ³)		R\$ 232,77	R\$ 231,26

Observa-se que, ao se considerar o mesmo tipo de adição mineral, não há grandes variações no custo do metro cúbico do concreto. Considerando-se apenas o agregado miúdo, no entanto, verifica-se que se tem um custo próximo a R\$ 30,00, para o concreto com 100% de areia natural. Quando se substitui 30% da areia natural pela areia de britagem, o custo dos dois agregados miúdos, somados – areia natural e de britagem – diminui para aproximadamente R\$ 24,00. A diminuição de custo obtida com esses agregados, porém, foi compensada pelo aumento no custo do cimento e do aditivo superplastificante, não sendo observadas mudanças no custo do concreto.

Obteve-se uma economia pequena com a substituição da areia natural pela areia de britagem, pois a porcentagem de substituição foi muito pequena, de apenas 30%. Porcentagens maiores de substituição da areia natural, no entanto, iriam impactar no custo do concreto, uma vez que o custo do metro cúbico da areia natural está em torno de R\$ 49,00, sendo o custo da areia de britagem próximo da metade deste valor, em torno de R\$ 23,00, conforme já observados nas tabelas 64 e 65.

É importante ressaltar o fato de que, os custos apresentados referem-se apenas aos materiais utilizados. Ao se comparar esses concretos, com concretos convencionais, devem ser considerados, também, aspectos referentes a produção e aplicação do concreto, em especial no que se refere à eliminação da etapa de vibração do concreto, e diminuição da mão-de-obra no canteiro de obras, para o lançamento do material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos e das análises realizadas, verifica-se o cumprimento do objetivo geral inicialmente proposto, de estudar a viabilidade técnica da substituição da areia natural pela areia de britagem, em concreto auto-adensável (CAA).

A análise das propriedades e características dos concretos produzidos, por meio dos ensaios considerados no programa experimental, nos estados fresco e endurecido, permite concluir que é viável, tecnicamente, a substituição da areia natural pela areia de britagem, em concreto auto-adensável (CAA), na proporção de 30%, em relação ao agregado miúdo total. Esta consideração é válida para a areia de britagem selecionada neste estudo.

Verifica-se, também, que os objetivos específicos definidos no início do estudo, de realizar uma análise comparativa da auto-adensabilidade apresentada por argamassas e concretos, e produzir CAA, com areia de britagem, e com consumos de cimento entre 300 e 380 kg/m³, foram atingidos.

Dessa forma, são apresentados, a seguir, considerações acerca da areia de britagem, da relação entre a auto-adensabilidade de argamassas e concretos e da influência da areia de britagem no CAA, nos estados fresco e endurecido.

5.1 CONSIDERAÇÕES QUANTO A AREIA DE BRITAGEM

Nenhuma das areias de britagem estudadas, para seleção da mais adequada, apresentou curva granulométrica localizada inteiramente dentro da zona considerada ótima pela NBR 7211/2005, ou da faixa ideal ao CAA, proposta por Melo (2005). Porém, a areia de britagem selecionada apresenta curva granulométrica muito próxima ao limite superior da zona utilizável da norma em questão, assim como do limite superior definido por Melo (2005).

Ao se considerar a areia de britagem selecionada, verifica-se existência de descontinuidade granulométrica, havendo nesta areia quantidade elevada de grãos de dimensões 2,4 e 1,2mm. Ao se comparar esta areia com a areia natural A1 – com módulo de

finura de 2,50 – observa-se falta de grãos de dimensões 0,6, 0,3 e 0,15mm, na areia de britagem.

A porcentagem de material pulverulento presente nas areias de britagem estudadas é maior que a porcentagem presente nas areias naturais, ultrapassando os limites estabelecidos pela NBR 7211/2005. Duas das areias, porém, poderiam ter seus valores enquadrados nos limites alterados da norma em questão, desde que realizado o ensaio de análise petrográfica.

Verifica-se que, entre as areias de britagem, a porcentagem de material pulverulento presente sofre variações em até 10%. O tipo de britador utilizado pelas pedreiras, assim como a dimensão e o tipo de rocha matriz do agregado utilizado para alimentar o britador podem ser considerados fatores de influência na porcentagem de material pulverulento presente na areia de britagem.

Através do ensaio de *slump flow*, verificou-se que as areias de britagem conferem às argamassas um desempenho inferior, em termos de fluidez, quando comparado ao desempenho de argamassas produzidas com areia natural. Provavelmente, esse fato é resultado da textura mais lisa e forma mais arredondada da areia natural, quando em comparação com a areia de britagem. Entre as areias de britagem, fatores como porcentagem de material pulverulento presente e forma das partículas pode ter influenciado o desempenho, no estado fresco, das argamassas produzidas.

Com relação às combinações de agregados miúdos realizadas, observa-se que a correção granulométrica da areia de britagem foi ocorrendo conforme se substituiu parte desta pela areia natural A2 – com módulo de finura de 1,91. Verificou-se que, quanto maior a porcentagem de areia natural, maior a proximidade entre as curvas granulométricas da combinação e da areia natural A1 – com módulo de finura de 2,50.

Observa-se que a massa específica da areia de britagem é maior que a da areia natural, devido à rocha matriz que gera o agregado. Da mesma forma, a absorção de água apresentada pela areia de britagem é maior que a apresentada pela areia natural, pois, além de serem provenientes de rochas diferentes, a areia de britagem apresenta maior porcentagem de material pulverulento.

5.2 CONSIDERAÇÕES QUANTO A RELAÇÃO ENTRE A AUTO-ADENSABILIDADE DE ARGAMASSAS E CONCRETOS

A análise dos resultados obtidos, para os ensaios realizados nesta pesquisa, de verificação da auto-adensabilidade de argamassas – segundo Domone (2006b) e Melo (2005) – e concretos – segundo Gettu et al. (2004) – permite verificar que o enquadramento dos resultados das argamassas nos limites estabelecidos não necessariamente resultará em concretos cujos limites sejam, também, adequados.

O estudo de argamassas auto-adensáveis permite que sejam definidos parâmetros iniciais para a produção do concreto, porém, são necessários ajustes nesses parâmetros para a obtenção do CAA.

Observa-se que, em geral, as argamassas que se apresentam mais fluidas, mesmo as que ultrapassaram os limites estabelecidos pelos autores aqui considerados, produziram CAA quando da incorporação do agregado graúdo. Porém, as argamassas que apresentaram resultados próximos aos limites inferiores, para o *slump flow*, ou superiores para o funil em V, produziram concretos de consistência mais seca, não sendo considerados auto-adensáveis.

Verifica-se que não é possível observar a influência da viscosidade das argamassas no concreto, através dos ensaios de *slump flow* e funil em V, realizados para argamassas. No concreto, porém, a presença do agregado graúdo torna os aspectos referentes à viscosidade mais aparentes, sendo ressaltadas, no caso deste estudo, as conseqüências negativas advindas da areia de britagem – falha granulométrica, textura e forma das partículas. A necessidade de transporte do agregado graúdo, no concreto, induz a conclusão de que a viscosidade requerida para CAA é maior que a requerida para argamassas auto-adensáveis.

5.3 CONSIDERAÇÕES QUANTO A INFLUÊNCIA DA AREIA DE BRITAGEM NO CAA, NO ESTADO FRESCO

Observa-se que os concretos produzidos com proporções de areia de britagem superior, ou igual, a 50% apresentaram exsudação e segregação do agregado graúdo.

Este fato foi verificado, provavelmente, pois a falta de grãos de dimensão 0,6, 0,3 e 0,15mm na areia de britagem, ou combinações de agregados miúdo, fez com que a viscosidade da argamassa presente no concreto fosse diminuída.

A comparação dos resultados obtidos, para os concretos com 30% de areia de britagem com os concretos de referência – produzidos com 100% de areia natural – permite constatar que a presença da areia de britagem aumenta a viscosidade do concreto, independentemente do tipo de adição mineral utilizada. Esse fato é observado no aumento dos tempos de movimento do concreto em todos os ensaios realizados – espalhamento no *slump flow*, com e sem a presença do anel japonês, escoamento pelo funil em V e fluidez pela caixa em L. Verifica-se, porém, que os diâmetros finais para o *slump flow*, com e sem a presença do anel japonês, são maiores para os concretos com a areia de britagem.

Com relação à massa específica, verifica-se que, para todos os concretos produzidos na pesquisa, o aumento na quantidade de areia de britagem induziu o aumento da massa específica, em fresco.

Observa-se, em todas as situações pesquisadas, que os consumos de cimento no concreto foram aumentados quando da incorporação da areia de britagem na mistura. Esse fato pode ter sido resultado da falha granulométrica apresentada por esta areia.

5.4 CONSIDERAÇÕES QUANTO A INFLUÊNCIA DA AREIA DE BRITAGEM NO CAA, NO ESTADO ENDURECIDO

Verifica-se que os corpos-de-prova moldados, para todos os concretos produzidos, apresentam distribuição homogênea de materiais em seu interior. A massa específica dos concretos com 30% de areia de britagem mostrou-se maior que a dos concretos com 100% de areia natural.

Quanto à resistência mecânica, observou-se que a incorporação de areia de britagem no concreto provoca um aumento na resistência à compressão e tração. Porém, a presença de 25% de escória granulada de alto forno prejudicou o aumento desta resistência, pois acredita-se que, como a relação água/finos é menor para adição de escória, em comparação à adição de cinza volante, não houve, em idades mais avançadas, água suficiente para desenvolvimento da resistência dada pela escória.

Por fim, o módulo de deformação dos concretos com areia de britagem se superior ao encontrado para o concreto produzido somente com areia natural, porém a diferença observada foi muito pequena. Acredita-se que os resultados obtidos, em todos os ensaios no estado endurecido, seriam mais evidentes se a porcentagem de areia de britagem nos concretos fosse maior.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização do trabalho mostrou ser importante dar continuidade aos estudos já realizados, através de:

- Estudo granulométrico das areias de britagem, juntamente às pedreiras, para correção das curvas apresentadas por estas areias, levando à substituição total da areia natural pela areia de britagem;
- Estudo de substituição do cimento por adições minerais, em percentuais maiores que os aqui estudados, visando minimizar o impacto ambiental causado pelo cimento;
- Estudo para correlação entre reologia de argamassas e concretos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 290R-92. **Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures.** Detroit: American Concrete Institute, 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 232. **Proposed report: use of natural pozzolans in concrete.** ACI Materials Journal, V. 91, N° 4. Jul/Ago, 1994. pp. 410-426.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee E-701. **Cimentitious materials for concrete.** ACI Education Bulletin E3-01. 2001.

AÏTCIN, P. C., JOLICOEUR, C., MACGREGOR, J. G. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't.** Concrete International, Maio, 1994. pp. 45-52.

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

ALMEIDA, I. R. **Concretos dosados em central, com areia 100% artificial.** In: Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem. São Paulo, 2005.

ALMEIDA, S. L. M. SILVA, V. S. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados.** In: Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem. São Paulo, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 595 - 94: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.** USA, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 618 - 03: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.** USA, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial – Comum – Especificação.** Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7220: Agregados – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 5735: Cimento Portland de alto forno.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos: especificações.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NM 101: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico.** 1996.

_____. **NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água.** 2000.

_____. **NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios.** 2002.

_____. **NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** 2003.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação, e da curva tensão-deformação.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9935: Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2005.

BANFILL, P. F. G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials. V.8. Nº 1. pp.43-49. 1994.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh cement and concrete – a review.** *In:* 11th International Cement Chemistry Congress. Durban, 2003.

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais.** *In:* Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem. São Paulo, 2005.

BAUER, E. SOUZA, J. G. G. GUIMARÃES, E. A. SILVA, F. G. S. **Study of the laboratory Vane test on mortars.** *Building and Environment*, V. 42. Janeiro, 2007. pp. 86-92.

BENTZ, D. P. GARBOCZI, E. J. **Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone.** *ACI Materials Journal*, V. 88, Nº 5. Set/Out, 1991. pp. 518-529.

BILODEAU, A. MALHOTRA, V. M. **High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development.** *ACI Materials Journal*, V. 97, Nº 1. Jan/Fev, 2000. Pág. 41-48.

BRITISH STANDARDS. **BS 1881 Part 203, Ultrasonic pulse velocity.** 1986.

CHAVES, A. P. **Estado da arte da produção de areia de britagem.** *In:* Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem. São Paulo, 2005.

COLLEPARDI, M. **Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete.** *Cement and Concrete Composites*, V. 20. 1998. pp. 103-112.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990.** Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 203).

DACZKO, J. A. **Stability of self-consolidating concrete, assumed or ensured?** Conference Proceedings: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. Master Builders, Inc., Cleveland, Ohio: 2002.

DACZKO, J. A. CONSTANTINER, D. **Rheodynamic concrete.** *Ibracon: 43º Congresso Brasileiro do Concreto.* 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização.* Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2005. V1, pp. 345-379.

DE LARRARD, F. FERRARIS, C. F. SEDRAN, T. **Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material.** Materials and Structures, V. 31. Ago/Set, 1998. pp. 494-498.

DOMONE, P. L. J. YONGMO, X. BANFILL, P. F. G. **Developments of the two-point workability test for high-performance concrete.** Magazine of Concrete Research, V. 51, Nº 3. Junho, 1999. pp. 171-179.

DOMONE, P. L. **A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete.** Cement and Concrete Composites, 29. 2006. pp. 1-12.

DOMONE, P. **Mortar tests for self-consolidating concrete.** Concrete International. Abril, 2006b. pp. 39-45.

EFNARC – THE EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** Fevereiro, 2002.

EFNARC – THE EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use.** Maio, 2005.

FERRARIS, C. F. **Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report.** Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, V. 104, Nº 5. Set/Out, 1999. pp. 461-478.

FERRARIS, C. DE LARRARD, F. MARTYS, N. **Fresh concrete rheology: recent developments.** Material Science of Concrete VI. 2001. pp. 215-241.

FERRERA, R. M. S. JALALI, S. **Betão autocompactável – Influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes.** Instituto Superior de Engenharia de Coimbra – Departamento de Engenharia Civil (Coimbra) e Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil (Guimarães). Portugal, 2002.

FERREIRA, O. P. SILVA, L. F. **O uso de superplastificantes na obtenção do concreto fluido.** In: Seminário sobre Aditivos para Concreto e Argamassa. Rio de Janeiro, 1988.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (*slump flow test*) – método de ensaio.** Manual de Qualidade. 2004a.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método do funil em V – método de ensaio.** Manual de Qualidade. 2004b.

FURNAS. **Concreto – Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa em L (L-Box test) – método de ensaio.** Manual de Qualidade. 2004c.

GETTU, R. AGULLÓ, L. **Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización.** Informe C4745/1. Departamento de engenharia de construção E.T.S. de engenheiros de caminhos, canais e portos. Universidade Politècnica da Catalunya. Barcelona, 2003.

GETTU, R. ZERBINO, R. L. BARRAGÁN, B. E. AGULLÓ, L. **Propuesta de procedimientos experimentales para la evaluación de la autocompactabilidad del hormigón fresco.** Informe C4745/2. Departamento de engenharia de construção E.T.S. de engenheiros de caminhos, canais e portos. Universidade Politècnica da Catalunya. Barcelona, 2004.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete.** Tese de doutorado: Universidade Politecnica da Catalunya, Espanha. 2002.

HELENE, P. TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Pini editora. São Paulo, 1992.

HOLSCHEMACHER, K. KLUG, Y. **A database for the evaluation of hardened properties of SCC.** LACER, Nº 7. 2002. pp. 123-134.

HU, C. DE LARRARD, F. **The rheology of fresh high-performance concrete.** Cement and Concrete Research, V. 26, Nº 2. 1996. pp. 283-294.

JIANG, L. LIN, B. CAI, Y. **Studies on hydration in high-volume fly ash concrete binders.** ACI Materials Journal, V. 96, Nº 6. Nov/Dez, 1999. pp. 703-706.

JOHNSTON, C. D. GAMBLE, V. M. MALHOTRA, V. M. COLLEPARDI, M. CORRADI, M. **Effects of superplasticizers on properties of fresh and hardened concrete.** Superplasticizers in Concrete. Washington DC, 1979.

KECK, R. H. **Improving concrete durability with cementitious materials.** Concrete International. Setembro, 2001.

KIHARA, Y. CENTURIONE, S. L. **O cimento Portland**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. pp. 295-322.

LEI 4.771/65. **Código florestal**. Brasília, 15 de setembro de 1965. Disponível em: http://www.farsul.org.br/sindical/LEI_4771_65CodFlorestal_LA.htm.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Londrina. 2007.

MALHOTRA, V. M. **Innovative applications of superplasticizers in concrete – A review**. *In: Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology*. 1981.

MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos: estudo de caso**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

MASOOD, I. AGARWAL, S. K. **Effect of various superplasticizers on the rheological properties of cement paste and mortar**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, N° 2. 1994. pp. 291-302.

MEHTA, P. K. AÏTCIN, P. C. **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete**. *In: High-Strength Concrete – Second International Symposium*. ACI, 1990. pp. 265-279.

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

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler calcário**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini. 1997.

NEVILLE, A. M. BROOKS, J. J. **Concrete technology**. Longman Scientific e Technical. 1990.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198 páginas. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. Porto.

OKAMURA, H. OZAWA, K. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Structural Concrete, Nº 1. Março, 2000. pp. 3-17.

OKAMURA, H. **Self-compacting high-performance concrete**. Concrete International. Julho, 1997. pp. 50-54.

OKAMURA, H. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, Nº 1. Abril, 2003. pp. 5-15.

PAILLÈRE, A. M. BASSAT, M. B. AKMAN, S. **Guide for use of admixtures in concrete**. Materials and Structures, 25. 1992. pp. 49-56.

PROSKE, T. GRAUBNER, C.-A. **Influence of the coarse aggregates on the concrete properties of SCC**. In: Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, V. 20. Darmstadt, 2005.

RAMACHANDRAN, V. S., BEAUDOIN, J. J., SHIHUA, Z. **Control of slump loss is superplasticized concrete**. Materials and Structures. Nº 22, 1989. pp. 107-111.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixture handbook: properties, science and technology**. Noyes Publications. 2º ed. 1995.

REPETTE, W. L. **Concreto de última geração: presente e futuro**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2005. V2, pp. 1509-1550.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 107. **Guidelines for the formulation of creep and shrinkage prediction models**. Materials and Structures. Dez, 1996.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. **Final report of RILEM TC 188-CSC 'casting of self-compacting concrete'**. Materials and Structures. Maio, 2006.

RONCERO, J. GETTU, R. **Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones**. In: IV Simposio ANFAH – Especialidades Químicas para la Construcción. Madrid. 1998.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. pp. 323-343.

SCHWARTZENTRUBER, L. D. A. ROY, R. CORDIN, J. **Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC)**. Cement and Concrete Research, 36. 2006. pp. 1203-1213.

SILVA, N. G. BUEST, G. CAMPITELI, V. C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Argamassas, I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 2005.

STREETER, V. L. **Mecânica dos fluídos**. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1974.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares – propriedades, gênese, importância econômica**. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1980.

TORALLES-CARBONARI, B. M. **Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación de hormigón de altas prestaciones**. Tese de doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya. 1996.

TORALLES-CARBONARI, B. M. MOREIRA, E. CARBONARI, G. BETIOLI, A. M. **Consumo de pasta em diferentes esqueletos granulares para concreto de alto desempenho**. In: IV Encontro tecnológico de engenharia civil e arquitetura. Maringá: UEM, 2003. V1, pp. 325-333.

TORALLES-CARBONARI, B. M. CAVALARO, S. H. P. MOREIRA, E. IRAMINA, R. HIOSHIDA, H. CARBONARI, G. **Utilización del método ultrasónico para la evaluación de la performance del hormigón de altas prestaciones**. In: Simpósio “El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo”. La Plata, 2005.

TORALLES-CARBONARI, B. M. WEILLER, G. C. B. UWAI, M. S. KLEIN, N. S. **Efeito combinado de aditivos plastificantes e superplastificantes na busca pela redução da perda de fluidez com o tempo em pastas de cimento**. In: 16ª Reunión Técnica – Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Prof. Agrim. Antonino Bonforte. Mendoza – Argentina, 2006. pp. 477-484.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

TUTIKIAN, B. F. DAL MOLIN, D. CREMONINI, R. **Viabilização econômica do concreto auto-adensável**. 12º Concurso Falcão Bauer. 2005.

WATANABE, L. T. **Qualidade plástica**. Revista Técnica. Junho, 2006. p. 36-39.

WÜSTHOLZ, T. **A model approach to describe the fresh properties of self-compacting concrete (CAA).** Otto-Graf Journal, Vol. 16. 2005.

YAMAMOTO, Y. KOBAYASHI, M. **Use of mineral fines in high strength concrete – water requirement and strength.** Concrete International. Julho, 1982.

ANEXO**Laudo de análise petrográfica da areia de britagem**

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-Obras

1/2

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 960 169-203

CLIENTE: L. A. FALCÃO BAUER
Rua Aquinos, 111
05036-070 – São Paulo - SP

MATERIAL: Amostra de areia

NATUREZA DO TRABALHO: Ensaio de caracterização.

REFERÊNCIA: Orçamento CT-OBRAS/LMCC-P 162/07, de 21.06.2007, aprovação de orçamento de 22.06.2007 e pedido de ensaio PE 137.538.

1 MATERIAL

1.1. – Tabela de identificação das amostras analisadas.

Designação	Identificação	Descrição
Areia artificial PE 137.538	LMCC-P 442/07	Areia grossa de coloração cinza escura

1.2 Procedência: Não declarada.

2 MÉTODOS UTILIZADOS

2.1 Procedimento CT-OBRAS-LMCC-P-PE-010 "Análise granulométrica de sedimentos por peneiramento", de acordo com a norma NBR NM 248/03 – "Agregados – Determinação da composição granulométrica", da ABNT.

Equipamentos:

Balança eletrônica marca Micronal (BAL-05), capacidade nominal 360 g, resolução 0,001 g (até 60 g) e 0,01 g (acima de 60 g, inclusive). Patrimônio n° 31.566. Calibrada em 15.02.2006, certificado de calibração n° 69 873-101, emitido pela Rede Brasileira de Calibração – Laboratório credenciado pelo INMETRO sob o n° 021. Calibração válida até 15.02.2008.

Jogo de peneiras marca "A Bronzinox", de malha quadrada e caixilhos metálicos.

Estufa de secagem marca Fanem, modelo 315/5. Patrimônio n° 03.131. CT-OBRAS/LMCC.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

- 2.2** Procedimento CT-OBRAS/LMCC-P-PE-028 - "Apreciação petrográfica de materiais naturais", de acordo com a norma NBR 7389/92 - "Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto", da ABNT.

Equipamento:

Lupa estereoscópica marca Wild, modelo M-8 (LUP-05). Patrimônio n° 21.588. CT-OBRAS/LMCC-P.

Estufa de secagem marca Fanem, modelo 315/5. Patrimônio n° 03.131. CT-OBRAS/LMCC-P.

Nota: Para efeito de arredondamento, nos cálculos efetuados, foi utilizada a norma ABNT NBR 5891/77 - Regras de Arredondamento na Numeração Decimal.

3 RESULTADOS

Os resultados estão assim apresentados:

3.1 Análise granulométrica: TABELA 1 e GRÁFICO 1, ANEXO.

3.2 Apreciação petrográfica: TABELAS 2 e 3 e GRÁFICO 2, ANEXO.

4 ANEXO

Tabelas 1 a 3 e Gráficos 1 e 2 4 pág.

5 EQUIPE TÉCNICA

Priscila Melo Leal Menezes – Geóloga

Marília Lopes – Bolsista

Jilson Cardoso – Técnico

São Paulo, 31 de julho de 2007.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS E
 INFRA-ESTRUTURA
 Laboratório de Materiais de Construção Civil


 Geól^a Priscila Melo Leal Menezes
 Executora dos Ensaios
 CREASP N° 5061868349 – RE N° 8477

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS E
 INFRA-ESTRUTURA
 Laboratório de Materiais de Construção Civil


 Geól^o Mestre Eduardo Brandau Quitete
 Supervisor dos Ensaios
 CREASP N° 0601.964.659 – RE 8267

PMLM/rgm.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

IPT**Instituto de Pesquisas Tecnológicas**
Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-Obras

1/4

Anexo do Relatório de Ensaio N° 960 169-203

A N E X O

Tabelas 1 a 3 e Gráficos 1 e 2

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.



Tabela 1 - Resultados da análise granulométrica (Procedimento CT-OBRAS-LMCC-P-PE-010) para a amostra "Areia artificial PE 137.538" (LMCC-P 442/07) - finalizada em 05.07.2007.

Peneira (mm)	Porcentagem retida	
	Simples	Acumulada
6,30	0,0	0,0
4,75	3,0	3,0
2,40	40,7	43,7
1,18	21,4	65,1
0,60	14,5	79,5
0,30	6,2	85,7
0,15	4,1	89,8
<0,15	10,2	100,0

Classificação (NBR 7211) : **Fora dos limites**

Módulo de finura: **3,67**

Dimensão máxima característica: **4,8 mm**

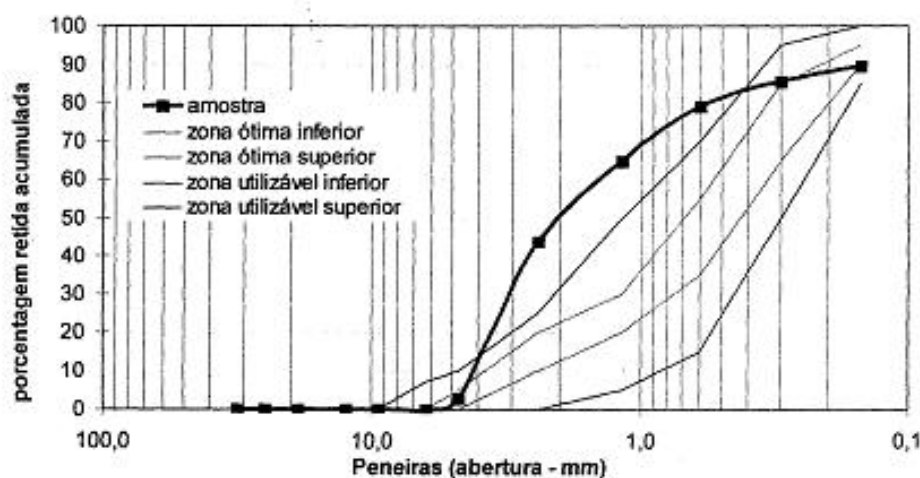


Gráfico 1 - Distribuição granulométrica da amostra Areia artificial PE 137.538" (LMCC-P 442/07), conforme TABELA 1.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Tabela 2 – Resultados da apreciação petrográfica de agregado miúdo (ABNT NBR 7389/92) para a amostra "Areia artificial PE 137.538" (LMCC-P 442/07). Porcentagem em volume das fases minerais constituintes da amostra estudada, obtida por contagem de grãos em lupa estereoscópica, finalizadas em 20.07.2007.

Peneira (abertura em mm)	Inócuos			
	Basalto cinza escuro	Basalto cinza	Basalto cinza avermelhado	Calcita
4,75	58,7	26,7	10,7	0,0
2,40	84,3	4,5	5,6	0,0
1,18	85,3	3,4	7,9	0,0
0,60	85,4	3,0	6,3	0,4
0,30	85,6	1,3	9,4	1,3
0,15	86,5	0,2	8,0	2,5
TOTAL¹	84,3	3,9	6,9	0,5

Tabela 3 – Resultados da apreciação petrográfica de agregado miúdo (ABNT NBR 7389/92) para a amostra "Areia artificial PE 137.538" (LMCC-P 442/07). Porcentagem em volume das fases minerais constituintes da amostra estudada, obtida por contagem de grãos em lupa estereoscópica, finalizadas em 20.07.2007.

Peneira (abertura em mm)	Potencialmente deletério	Friável
	Basalto cinza escuro amigdaloidal	Torrão de argila verde
4,8	4,0	0,0
2,4	5,6	0,0
1,2	3,4	0,0
0,6	4,9	0,0
0,3	2,4	0,0
0,15	0,8	1,9
TOTAL¹	4,1	0,3

¹ Total aproximado na amostra, calculado em função da porcentagem em peso relida em cada fração.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou de marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.



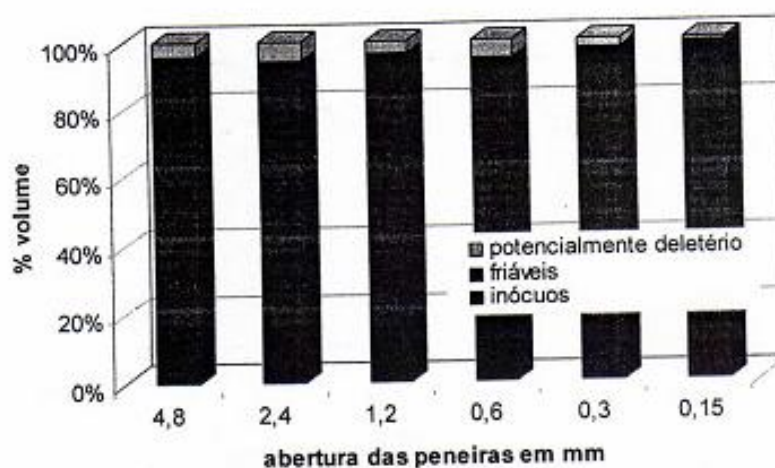


Gráfico 3 - Distribuição dos tipos de grãos, em porcentagem volume, para a amostra "Areia artificial PE 137.538" (LMCC-P 442/07), conforme TABELAS 2 e 3.

A amostra apresentou esfericidade 0,69 (²Rittenhouse, 1943), correspondendo a uma esfericidade baixa, grau de arredondamento predominantemente subanguloso e superfície de grãos rugosa.

2 RITTENHOUSE, G. 1943. A visual method of estimating two dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*. 13(2): 79-81.

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado. Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

