JOSÉ WILSON ASSUNÇÃO

CONCRETO
LEVE
AUTOADENSÁVEL

**Avaliação da influência da
argila expandida no processo
de dosagem e nas
propriedades do concreto**

**São Carlos - SP
2016**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

José Wilson Assunção

CONCRETO LEVE AUTOADENSÁVEL: Avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – Campus de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo (Versão Corrigida).

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientador:
Prof. Dr. João Adriano Rossignolo
Co-Orientador
Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

São Carlos – SP
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A851c Assunção, José Wilson
Concreto Leve Autoadensável: avaliação da
influência da argila expandida no processo de dosagem e
nas propriedades do concreto / José Wilson Assunção;
orientador João Adriano Rossignolo; coorientador Romel
Dias Vanderlei. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Concreto leve autoadensável. 2. Argila
expandida. 3. Concreto leve estrutural. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato (a): Engenheiro Civil **José Wilson Assunção**

Título da Tese: “**Concreto Leve Autoadensável: Avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto**”

Data da defesa: **04/03/2016**

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. João Adriano Rossignolo (Orientador)
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos /USP)

APROVADO

Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi
(Universidade Federal de Uberlândia /UFU)

APROVADO

Prof. Dr. Juliano Fiorelli
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos /USP)

APROVADO

Dra. Michelle Santos Rodrigues
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos /USP)

APROVADO

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

APROVADO

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. **Cibele Saliba Rizek**.

*Dedico este trabalho a vocês, que me geraram... minha mãe D. Nair e meu pai,
Sr José Maria,
e
a vocês que são a razão da minha existência, Léo, Guí e agora, minha nora,
Camila...*

E você,

*Minha Chãomitica.... namorada,
.... esposa,
..... parceira
.....presente de Deus*

AGRADECIMENTOS

Como agradecer a tantos que ajudaram nesta jornada?

Correndo o risco de ser injusto, começo por Aquele que é o JUSTO...

DEUS... Ele que colocou e tem colocado tantas pessoas boas no meu caminho ao longo da vida, especialmente neste, que estou trilhando...

Começo pelo orientador... Prof Dr João Adriano. Dinâmico, sábio, amigo ... são adjetivos que não refletem com exatidão o prof João Adriano. Ficam aquém das suas qualidades.... Sua orientação, segura e serena facilitaram muito o trabalho. OBRIGADO!!.... meu muito obrigado!

Ao prof Dr Romel, co-orientador, que sempre esteve à disposição. Suas observações relativas aos experimentos, a calma e a presteza de quem sabe como ajudar.

E o “seu” Antonio.... sem sua ajuda “batendo caixa” como produzir esta tese? Foi Deus que o colocou no meu caminho... trabalhamos muito...

Ao meu amigo Belincanta... esse é parceiro. Não tenho como agradecer sua ajuda. Não só neste momento. Tens nos ajudado desde que nos conhecemos. É uma graça ter você e a Vânia como amigos. Muito OBRIGADO...

Às empresas Cinexpan, Tecnosil, Forbasa, Votorantin e à Extracon, na pessoa do Eng Rafael, obrigado pela ajuda...

Tem o pessoal do DEC... os professores (as) da área de construção civil, os técnicos do Laboratório de Materiais / UEM, o Diego no Laboratório de Materiais da FZEA/USP-Pira. Aos meus colegas de doutorado...legal aquelas nossas aulas....São muitas pessoas, não vou conseguir nominar a todos sem ser injusto. Assim, vou terminar, como comecei.... OBRIGADO MEU DEUS, por ter colocado tanta gente boa no meu caminho...

.... especialmente vocês, MARLUCE e LÉO... cada um, à sua maneira, foram fundamentais neste caminho, amo vocês..... OBRIGADO!!!!

RESUMO

ASSUNÇÃO, José W. **Concreto Leve Autoadensável**: avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto. 2016. 256 f. Tese (Doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2016.

Esta tese aborda as influências do agregado leve na dosagem, características físicas e mecânicas de concreto autoadensável (CAA) quando na fração de gráudo da mistura, substitui-se parte do volume absoluto da brita de basalto ($\phi_{\text{máx}}$ 19 mm) pelo volume equivalente de argila expandida brasileira ($\phi_{\text{máx}}$ 12,7 mm). O fato de conhecer as implicações na reologia do CAA, provocadas pelo uso conjunto de agregados com características físicas distintas e, apresentar este tipo de concreto como uma alternativa promissora para uso na indústria da pré-fabricação em concreto, justificam esta pesquisa. A substituição da brita de basalto pela argila expandida (AE-1506), em teores de volume absoluto, foi de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Como resultados, produziram-se concretos autoadensáveis com consumo de aglomerantes (cimento Portland CP V-ARI e sílica ativa) da ordem de 510 kg/m³, que atenderam aos limites de autoadensabilidade propostos pela norma NBR 15823-1 (2010). Na condição endurecida, apresentaram massa específica seca de 2.358,3 a 1.720,7 kg/m³, resistência à compressão (f_{c28}) de 60 a 43 MPa, módulo de elasticidade (E_{sc}) de 23 a 34 GPa e eficiência estrutural (F_{EE}) de 22 a 29 MPa.dm³.kg⁻¹, sem sinais visíveis de frente de carbonatação. Obteve-se concreto leve autoadensável (CLAA) a partir de misturas com fração de gráudo foi composta por 60% de argila expandida e 40% de brita de basalto, que atingiram massa específica seca de 1.986 kg/m³, resistência a compressão (f_{c28}) de 51,3 MPa e condutividade térmica (λ) de 1,07 a 1,53 W/m.K. Constatou-se que a argila expandida interfere significativamente nas características dos concretos exigindo, na comparação com CAA confeccionado com 100% de brita de basalto, maior teor de argamassa e relação volume de água/volume de finos mais elevado.

Palavras-chave: Concreto leve autoadensável. Argila expandida. Concreto leve estrutural.

ABSTRACT

ASSUNÇÃO, José W. **Self-Compacting Lightweight Concretes:** evaluation of influence expanded clay in mix design process and concrete properties. 2016. 256 p. Thesis (PhD). Institute of Architecture and Urban Planning. University of São Paulo, São Carlos-SP, 2016.

This thesis discusses aspects related to the influence of lightweight aggregate in the mix design, physical and mechanical properties of the self-compacting concrete (SCC) when replacing part of the absolute volume of basalt crushed stone ($\phi_{\text{máx}} 19 \text{ mm}$) with a lightweight aggregate equivalent absolute volume Brazilian expanded clay ($\phi_{\text{máx}} 12,7 \text{ mm}$). Understanding interference on the rheology of the SCC caused by the use of aggregates with different physical properties and recommend this type of concrete as a promising alternative for the pre-fabricated concrete industry, justify this research. The replacement of basalt crushed stone for lightweight aggregate (AE-1506), in equivalent absolute volume, was 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. As a result, self-compacting concrete was produced with consumption of binders (cement Portland CP V-ARI and silica fume) of about $510 \text{ kg} / \text{m}^3$, appropriate for self- compactability limits established by the ABNT NBR 15823-1 (2010) standard. In the hardened condition, the dry density value ranged from 2.358,3 to $1.720,7 \text{ kg/m}^3$, compressive strength (f_{c28}) ranged from 60 to 43 MPa, elasticity modulus (E_{sc}) ranged from 23 to 34 GPa, and efficiency structural (F_{ES}) ranged from 22 to $29 \text{ MPa.dm}^3.\text{kg}^{-1}$, with no visible signs of carbonation. The self-compacting lightweight expanded clay concrete (SCLC) was obtained from mixtures which its absolute volume fraction of aggregate coarse was composed by 60% of expanded clay and 40% of basalt crushed stone, with dry density of 1986 kg/m^3 , compressive strength (f_{c28}) of 51.3 MPa and thermal conductivity (λ) varied from 1,07 to 1,53 W/m.K. It was found that the expanded clay significantly interferes in the properties of concretes demanding in comparison with SCC made with 100% basalt crushed stone, mortar content and ratio higher volume of water/volume of higher fines.

KEYWORDS: Self-compacting lightweight concrete. Expanded clay. Lightweight structural concrete.

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Algumas características e efeitos da utilização de adições minerais no concreto autoadensável.....	16
TABELA 2.2	Identificação dos ensaios, propriedades avaliadas e parâmetros medidos nos ensaios do concreto autoadensável.....	18
TABELA 2.3	Classificação do CAA em função das suas propriedades no estado fresco segundo a norma ABNT NBR 15823-1.....	24
TABELA 2.4	Composição típica do concreto autoadensável.....	32
TABELA 2.5	Concreto autoadensável: exemplos de composições e características físicas e mecânicas das misturas.....	33
TABELA 2.6	Composição do concreto autoadensável (CAA) produzido com os mesmos materiais utilizados no concreto convencional.....	34
TABELA 2.7	Caracterização física de alguns agregados leves utilizados na fabricação do concreto leve estrutural.....	35
TABELA 2.8	Valores de referência da massa específica aparente para o concreto leve estrutural, preconizados por órgãos normativos internacionais.....	40
TABELA 2.9	Valores de referência da massa específica seca para o concreto leve estrutural, preconizados pela norma ABNT NBR NM 35.....	41
TABELA 2.10	Valores de condutividade térmica de concreto leve estrutural produzido com argila expandida.....	45
TABELA 2.11	Valores de condutividade térmica para concretos com diferentes valores de massa específica.....	46
TABELA 2.12	Características físicas dos agregados naturais e leves oriundos da Coreia, utilizados em concretos leves autoadensáveis de alto desempenho.....	51
TABELA 2.13	Caracterização físicas dos agregados naturais (areia silicosa) e leve (argila expandida Iberiana).....	55
TABELA 2.14	Caracterização física dos agregados utilizados no CLAA.....	57
TABELA 2.15	Caracterização física dos agregados utilizados no CLAA.....	60

TABELA 3.1	Teores de substituição do cimento Portland pela adição mineral de sílica ativa.....	71
TABELA 3.2	Dosagem das argamassas utilizadas na definição do teor de aditivo superplastificante na composição do CAA.....	76
TABELA 3.3	Dosagem das argamassas para determinação da relação entre o volume de água e o volume de finos na composição do CAA....	78
TABELA 3.4	Concreto autoadensável de referência CAA _{REF} -N4 a ser validado.....	85
TABELA 3.5	FASE 1: Composição de concretos autoadensáveis com volume de aparente do agregado graúdo igual a 0,570.....	89
TABELA 3.6	FASE 2: Composição de concretos autoadensáveis com volume aparente do agregado graúdo de 0,500 e 0,650.....	90
TABELA 3.7	FASE 3: Parâmetros de dosagem modificados para a obtenção de CAA _{AE} com características de autoadensabilidade.....	91
TABELA 3.8	Ensaio para a caracterização das propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida AE-1506.....	92
TABELA 4.1	Parâmetros de dosagem do concreto autoadensável de referência determinados pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000).....	113
TABELA 4.2	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência.....	114
TABELA 4.3	Concretos autoadensáveis com argila expandida dosados com diferentes valores de volume aparente de graúdo produzidos na Fase 1 e Fase 2.....	117
TABELA 4.4	Características de autoadensabilidade, físicas e mecânicas de concretos autoadensáveis produzidos na Fase 1 e Fase 2, dosados com brita de basalto e argila expandida e volume aparente do agregado graúdo variável.....	118
TABELA 4.5	Características dos concretos autoadensáveis feitos com diferentes volumes de graúdo e teores de argila expandida de 20% e 40%.....	120
TABELA 4.6	Parâmetros de dosagem alterados em relação aos definidos no concreto autoadensável de referência.....	127

TABELA 4.7	Parâmetros de dosagem e características dos concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida.....	128
TABELA 4.8	Características físicas e de autoadensabilidade dos concretos autoadensáveis feitos com brita de basalto e argila expandida.....	129
TABELA 4.9	Viscosidade plástica aparente aplicáveis aos concretos autoadensáveis produzidos com agregados normais.....	134
TABELA 4.10	Volume efetivo de agregado graúdo no topo e na base da coluna de segregação.....	144
TABELA 4.11	Parâmetros de dosagem dos concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida AE-1506.....	147
TABELA 4.12	Características físicas e mecânicas dos concretos produzidos com argila expandida em substituição ao agregado normal.....	149
TABELA 4.13	Desempenho dos concretos autoadensáveis sob o aspecto da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.....	152
TABELA 4.14	Relação entre as resistências à compressão e tração por compressão diametral dos concretos autoadensável e leve autoadensável.....	158
TABELA 4.15	Relações entre a resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida.....	159
TABELA 4.16	Módulo de elasticidade calculados em função da resistência à compressão para diferentes tipos de concretos.....	163
TABELA 4.17	Características físicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de carbonatação dos concretos autoadensáveis.....	169
TABELA 4.18	Condutividade térmica obtida nos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506.....	170
TABELA 4.19	Valores de referência da condutividade.....	172
TABELA 4.20	Expressões utilizadas para estimativa da condutividade térmica em concretos leve estrutural, autoadensável e leve autoadensável.....	174

TABELA AN 1.1	Caracterização química, física e mecânica do cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos (CP V ARI-RS) (Adaptada de Votorantim Cimentos S.A., 2013) ..	192
TABELA AN 1.2	Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada na produção dos concretos autoadensáveis.....	194
TABELA AN 1.3	Ensaio de caracterização dos agregados miúdos utilizados na confecção dos concretos autoadensáveis.....	195
TABELA AN 1.4	Ensaio de caracterização dos agregados graúdos coletados para seleção na confecção dos concretos autoadensáveis...	197
TABELA AN 1.5	Ensaio de caracterização física e química da argila expandida do tipo AE - 1506 utilizada na confecção dos concretos autoadensáveis.....	200
TABELA AN 1.6	Parâmetros físicos do aditivo superplastificante Glenium 51	201
TABELA AN 2.1	Características das pastas (cimento Portland + sílica ativa + água) dosadas com diferentes teores de substituições.....	203
TABELA AN 2.2	Características das argamassas (cimento Portland + sílica ativa + agregado miúdo + água) dosadas com diferentes teores de substituições.....	206
TABELA AN 2.3	Características das argamassas (cimento Portland + sílica ativa + água) dosadas com diferentes teores de substituições.....	208
TABELA AN 2.4	Traços utilizados no ajuste do concreto autoadensável de referência.....	210
TABELA AN 2.5	Replicação do traço do concreto autoadensável de referência (CAA _{REF} -N4) para verificação da repetibilidade da mistura.....	214
TABELA AN 3. 1	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 1: Definição do traço CAA _{REF}	216
TABELA AN 3.2	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 2: Validação do traço CAA _{REF} -N4.....	217
TABELA AN 3.3	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 3: Caracterização do CAA _{REF}	218

TABELA AN 3.4	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 20% de argila expandida: FASE 1 e FASE 2.....	219
TABELA AN 3.5	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 20% de argila expandida: FASE 3.....	220
TABELA AN 3.6	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 40% de argila expandida: FASE 1 e FASE 2.....	221
TABELA AN 3.7	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 40% de argila expandida: FASE 3.....	222
TABELA AN 3.8	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 60%, 80% e 100 % de argila expandida: FASE 1 e FASE 2.....	223
TABELA AN 3.9	Características físicas e mecânicas dos CAA _{AE} produzidos com 60% de argila expandida: FASE 3.....	224
TABELA AN 3.10	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável CAA _{AE} -80: FASE 3.....	225
TABELA AN 3.11	Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável CAA _{AE} -100: FASE 3.....	226

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Fluxograma mostrando as principais atividades desenvolvidas na pesquisa.....	8
FIGURA 2.1	Influência da finura do cimento na resistência à compressão do concreto (a) e na geração de calor de hidratação em pasta de cimento (b)	13
FIGURA 2.2	Cone de Abrams: Dimensões nominais (a) Dispositivo em chapa metálica (b)	19
FIGURA 2.3	Anel-J: Dimensões nominais (a) Dispositivo feito em aço galvanizado (b)	20
FIGURA 2.4	Caixa-L: Dimensões do dispositivo (a) Planta (b) Equipamento fabricado em chapa metálica (c)	21
FIGURA 2.5	Funil V: Dimensões nominais - Vista em planta (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) e dispositivo fabricado em chapa metálica galvanizada (d)	22
FIGURA 2.6	Coluna de segregação: Dimensões nominais (a) e equipamento em PVC (b)	23
FIGURA 2.7	Procedimentos para obtenção de autoadensabilidade no concreto autoadensável.....	27
FIGURA 2.8	Molde tronco-cônico para argamassa: (a) Dimensões nominais (b) Fotografia do dispositivo construído em Technyl®	29
FIGURA 2.9	Funil-V utilizado nos ensaios de argamassa.....	29
FIGURA 2.10	Curva de comportamento de pasta	30
FIGURA 2.11	Influência da dimensão do agregado leve na resistência do concreto leve	38
FIGURA 2.12	Relação entre a massa específica e a resistência à compressão do concreto leve estrutural com argila expandida brasileira.....	40
FIGURA 2.13	Relação entre a massa específica aparente seca e a condutividade térmica (λ) de concretos produzidos com e sem argila expandida brasileira.....	46

FIGURA 2.14	Relação entre os tempos de espalhamento T_{500} e escoamento pelo funil-V para concretos autoadensáveis feitos com e sem agregados leves Coreanos	49
FIGURA 2.15	Fluxograma para a determinação do Valor PF, utilizado na metodologia de dosagem de Choi et al	51
FIGURA 2.16	Principais etapas do método de Nan-Su modificado e melhorado para dosagem do CLAA	52
FIGURA 2.17	Fator de eficiência estrutural do CLAA produzidos com agregados leves da Coréia	53
FIGURA 2.18	Resultados do ensaio de espalhamento para misturas com valores da relação V_p/V_s , de 0,50 a 0,75, produzidos com leca de Portugal	55
FIGURA 2.19	Resultados do ensaio de espalhamento (Slump Flow) para misturas com valores da relação V_w/V_p de 0,70 a 1,00, produzidos com leca de Portugal	55
FIGURA 2.20	Resultados do ensaio de espalhamento para misturas com diferentes valores de volume de graúdo (V_g), produzidos com leca de Portugal	56
FIGURA 2.21	Relação entre os tempos de espalhamento (T_{500}) e de escoamento da mistura no funil-V no instante t_0	58
FIGURA 2.22	Habilidade passante do CLAA produzido com diatomita, pedra-pome e turfa vulcânica pela caixa-L	59
FIGURA 2.23	Caracterização mecânica: Fator de eficiência estrutural do concreto estrutural leve autoadensável produzido com argila expandida brasileira	61
FIGURA 3.1	Fluxograma de ilustração das principais atividades para a definição dos concretos leves autoadensáveis a partir do traço de referência	64
FIGURA 3.2	Cimento Portland CP V-ARI (Votoran) - Sílica ativa (Ferbasa) e Aditivo superplastificante - Gleniun©51 (BASF)	65
FIGURA 3.3	Areia lavada natural / Areia 1 e Areia 2 - Rio Paraná / Porto São José-PR	66
FIGURA 3.4	Pedra britada de basalto – Pedreira 1 – BRITA 5/8" (a) BRITA 1 (b)	67

FIGURA 3.5	Pedra britada de basalto – Pedreira 2 – BRITA 1/2” (a) BRITA 1 (b)	67
FIGURA 3.6	Agregados graúdos: pedra britada do basalto (brita 16mm) e argila expandida AE-1506 (Cinexpan)	68
FIGURA 3.7	Preparação da argila expandida AE-1506: in natura (a) após secagem ao ar (b) Peneiramento na peneira de malha 5mm (c)	69
FIGURA 3.8	Ensaio de pasta: dispositivo tronco-cônico (a) Configuração típica do espalhamento da pasta (b)	70
FIGURA 3.9	Misturador mecânico (argamassadeira), capacidade 5 litros, com 2 velocidades de mistura	73
FIGURA 3.10	Dispositivos de avaliação do espalhamento e viscosidade da argamassa: Forma tronco-cônica (a) e Funil para argamassa (b)	77
FIGURA 3.11	Ilustração do espalhamento das argamassas utilizadas na definição do teor de aditivo superplastificante.....	79
FIGURA 3.12	Mistura de agregados e água de absorção: CAA _{REF} (a) e CAA _{AE} (b)	94
FIGURA 3.13	Corpos de provas moldados para a caracterização física e mecânica dos concretos autoadensáveis	97
FIGURA 3.14	Topos de corpos de prova (100 mm x 200 mm) de CAA _{AE} antes dos cortes	98
FIGURA 3.15	Preparação dos topos dos corpos de prova (100 mm x 200 mm): (a) corte com disco diamantado (b) acabamento após corte	98
FIGURA 3.16	Armazenamento dos corpos de prova em câmara úmida (a) capeamento dos topos (b) Temperatura e umidade no interior da câmara úmida (c)	99
FIGURA 3.17	Prensa hidráulica marca EMIC: (a) modelo PCE-100 (b) modelo MUE-100	100
FIGURA 3.18	Tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico de concreto (100 x 200)mm: - Gabarito de fixação (a) Corpo de prova no gabarito (b)	101
FIGURA 3.19	Massa específica do concreto endurecido: pesagem imersa (a) fervura dos corpos de prova (b)	102

FIGURA 3.21	Ensaio de carbonatação: pintura impermeabilizante (a) faces da pastilha sem e com selagem (b)	106
FIGURA 3.22	Ensaio de carbonatação: Pastilhas de concreto (a) Pastilhas no interior da câmara (b) a câmara de carbonatação (c)	107
FIGURA 3.23	Medidor de condutividade térmica mod. DTC-300 utilizado nos ensaios de condutividade térmica dos concretos com e sem argila expandida	107
FIGURA 3.24	Esquema de ensaio para determinar a condutividade térmica em corpos cilíndricos ($\phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$) de concreto	109
FIGURA 3.25	Pastilhas de concreto autoadensável ($\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$) regularizadas com pasta térmica para o ensaio de condutividade térmica	110
FIGURA 4.1	Concreto autoadensável de referência (CAA _{REF} -N4): Espalhamento pelo cone de Abrams (a) Espalhamento pelo anel-J (b)	115
FIGURA 4.2	Concreto autoadensável de referência CAA _{REF} -N4: Espalhamento da mistura na etapa de validação - repetição nº 1	115
FIGURA 4.3	Ensaio de espalhamento (Slump Flow) em concretos com diferentes volumes de agregado graúdo e teores de substituição	119
FIGURA 4.4	Concreto autoadensável com 20% de argila expandida AE-1506 e volume de graúdo de $0,332\text{ m}^3/\text{m}^3$: Ensaios de espalhamento (a) e anel-J (b)	121
FIGURA 4.5	Concreto autoadensável com 40% de argila expandida AE-1506 e volume de graúdo de $0,292\text{ m}^3/\text{m}^3$: Ensaios de espalhamento (a) e anel-J (b)	121
FIGURA 4.6	Espalhamento de concretos autoadensáveis com diferentes teores de argila expandida AE-1506 e volume de graúdo de $0,332\text{ m}^3/\text{m}^3$	122
FIGURA 4.7	Influência do teor de argila expandida no consumo de cimento nos concretos feitos com diferentes teores de agregado graúdo	123

FIGURA 4.8	Influência do teor de argila expandida na resistência à compressão do produzido com diferentes teores de agregado graúdo	124
FIGURA 4.9	Influência do teor de argila expandida na massa específica do concreto fresco produzido com diferentes teores de agregado graúdo	125
FIGURA 4.10	Espalhamento pelo tronco de cone (Slump Flow) dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506	131
FIGURA 4.11	Tempo de escoamento (T_{500}) dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506	131
FIGURA 4.12	Relação entre o tempo de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V (T_{V-30}) dos concretos autoadensáveis com argila expandida AE-1506.....	134
FIGURA 4.13	Relação entre o tempo de escoamento pelo funil-V (T_{V-30} e T_{V-300}) dos concretos autoadensáveis dosados com argila expandida AE-1506	135
FIGURA 4.14	Relação entre o tempo de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V (T_{V-30}) e a massa específica do CAA _{AE} no estado fresco	135
FIGURA 4.15	Espalhamento (Slump Flow) de concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506	136
FIGURA 4.16	Esquema para medidas do bloqueio do concreto autoadensável no anel-J	137
FIGURA 4.17	Habilidade passante pelo anel-J (PJ) dos concretos produzidos com AE-1506	138
FIGURA 4.18	Habilidade passante pelo anel-J: bloqueio à passagem do concreto com argila expandida AE-1506 pelas barras do dispositivo	138
FIGURA 4.19	Habilidade passante pela caixa-L (PL) dos concretos produzidos com argila expandida do tipo AE-1506	138
FIGURA 4.20	Relação entre a massa específica fresca (γ_{cf}) e a Habilidade passante dos concretos produzidos com argila expandida do tipo AE-1506	140

FIGURA 4.21	Espalhamento dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506 no ensaio com o anel-J	141
FIGURA 4.22	Espalhamento dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506 no ensaio com o anel-J	142
FIGURA 4.23	Fração de agregado gráúdo encontrado na base e no topo da coluna de segregação	144
FIGURA 4.24	Volume de argila expandida AE-1506 efetivo na coluna de segregação	145
FIGURA 4.25	Acabamento superficial do concreto autoadensável após alisamento com colher de pedreiro: CAA _{REF} (a) e CAA _{AE} (b) e (c)	146
FIGURA 4.26	Distribuição da pedra britada de basalto ($\phi 19$ mm) e argila expandida AE-1506 em corpos de prova cilíndricos de concreto (100 x 200)mm	146
FIGURA 4.27	Resistência à compressão (f_{c28}) em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506...	150
FIGURA 4.28	Resistência à compressão ($f_{c3} - f_{c7} - f_{c28}$) em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506...	151
FIGURA 4.29	Massa específica seca (γ_s) dos em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506...	153
FIGURA 4.30	Relação entre o consumo de cimento e massa específica seca (γ_s) dos em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506	154
FIGURA 4.31	Relação entre a massa específica seca (γ_s) e o teor de ar (T_{ar}) incorporado nos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506	155
FIGURA 4.32	Relação entre a massa específica seca (γ_s) e a resistência à compressão (f_{c28}) dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506...	156
FIGURA 4.33	Fator de eficiência estrutural dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506...	156
FIGURA 4.34	Resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506	157

FIGURA 4.35	Relação entre as resistências à compressão e tração por compressão diametral para CAAs feitos com agregados normal e leve	158
FIGURA 4.36	Módulo de elasticidade para concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida AE-1506	160
FIGURA 4.37	Relação entre o módulo de elasticidade (E_{sc}) e a massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis confeccionados com agregados naturais e leve	161
FIGURA 4.38	Relação entre o módulo de elasticidade (E_{sc}) e a resistência à compressão (f_{c28}) dos CAA _{AEs} dosados com agregado normal e argila expandida	162
FIGURA 4.39	Coeficiente de Poisson dos concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida	164
FIGURA 4.40	Absorção de água e índice de vazios dos concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida	165
FIGURA 4.41	Relação entre a massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos autoadensáveis com agregados naturais e argila expandida	166
FIGURA 4.42	Aspecto dos corpos de prova de concretos autoadensáveis com e sem argila expandida expostos ao CO ₂ por 28 dias após aspersão de fenolftaleína.....	167
FIGURA 4.43	Relação entre a condutividade térmica e massa específica seca CCAs em função do teor de substituição da pedra britada pela argila expandida	170
FIGURA 4.44	Relação entre a condutividade térmica (λ) e massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506	171
FIGURA 4.45	A condutividade térmica e a relação água/finos dos CAAs em função do teor de substituição da pedra britada pela argila expandida	173

FIGURA AN 1.1	Curva granulométrica do cimento Portland CP V-ARI (Votoran) usado nos concretos autoadensáveis.....	193
FIGURA AN 1.2	Curva granulométrica da sílica ativa usada na composição dos concretos autoadensáveis	194
FIGURA AN 1.3	Curvas granulométrica das areias AF ₁ , AF ₂ e da composição 50%AF ₁ + 50%AF ₂	196
FIGURA AN 1.4	Curvas granulométrica dos agregados graúdos - pedra britada do basalto -, Maringá-PR e região	197
FIGURA AN 1.5	Aspecto superficial e forma da argila expandida AE-1506 (Cinexpan)	198
FIGURA AN 1.6	Flutuação do agregado leve – argila expandida AE-1506 (Cinexpan)	199
FIGURA AN 1.7	Agregado leve imerso em água para o ensaio de absorção de água	200
FIGURA AN 1.8	Curva granulométrica da argila expandida AE-1506 (CINEXPAN)	201
FIGURA AN 2.1	Retas de ajustes para pastas com diferentes teores de substituição do cimento Portland por sílica ativa....	204
FIGURA AN 2.2	Influência do teor de substituição (F) no teor de ar incorporado nas pastas de cimento e sílica ativa.....	204
FIGURA AN 2.3	Fôrma tronco-cônica e funil-V usados nos ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas	206
FIGURA AN 2.4	Curva de comportamento utilizada na estimativa do teor de aditivo superplastificante (Sp/p)	207
FIGURA AN 2.5	Curva de ajuste para estimativa adequada da relação V_w/V_p a ser adotada na dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA _{REF})	208
FIGURA AN 2.6	Espalhamentos do traço CAA _{REF} -N1: Cone de Abrams (a) Anel-J (b)	211
FIGURA AN 2.7	Espalhamentos do traço CAA _{REF} -N2: cone de Abrams (a) Anel-J (b)	212
FIGURA AN 2.8	Espalhamentos do traço CAA _{REF} -N3: ocorrência de segregação da pasta	212
FIGURA AN 2.9	Espalhamentos do traço CAA _{REF} -N4: Slump Flow (a) Anel J (b)	213

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AE-1506	Argila Expandida com partículas com dimensão nominal de 15 mm e 6 mm
ASTM	American Society for Testing and Materials
AF ₁	Areia Lavada Fina 1
AF ₂	Areia Lavada Fina 2
CC	Concreto Convencional
CLE	Concreto Leve Estrutural
CAA	Concreto Autoadensável
CAAs	Concretos Autoadensáveis
CAAREF	Concreto Autoadensável de Referência
CAAREF-N4	Concreto Autoadensável de Referência, dosado pelo Método de Okamura et al. (2000) modificado, validado por quatro repetições
CAA _{AE}	Concreto Autoadensável produzido com Argila Expandida
CLAA	Concreto Leve Autoadensável
CLAAs	Concretos Leves Autoadensáveis
CLAA _{AE}	Concreto Leve Autoadensável com Argila Expandida
CLAA _{AE-1506}	Concreto Leve Autoadensável com Argila Expandida do tipo AE-1506 (Cinexpan)
CAA _{AE-20}	Concreto Autoadensável dosado com 80% de brita de basalto e 20% de Argila Expandida do tipo AE-1506, em volumes absolutos
CELA	Concreto Estrutural Leve Autoadensável
CP V - ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CEB-FIP	Comité Euro-International du Béton e Fédération Internationale de La Précontrainte
DEC	Departamento de Engenharia Civil
EFNARC	European Guidelines and Specifications for Self-Compacting Concrete
EN	European Standart
EUROCODE 2	Norma Inglesa elaborada pelo Comitê Europeu de Normas (CEN) para Obras e Projeto de Estruturas em Concreto
FERBASA	Companhia de Ferro Ligas da Bahia
FZEA-USP	Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo
JSCE	Japanese Society of Civil Engineering, Guide to Construction of High Flowing Concrete
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NS	Norwegian Council for Building Standartization
UEM	Universidade Estadual de Maringá

LISTA DE SIMBOLOS

$\phi_{\text{máx}}$	Dimensão máxima característica
f_{cj}	Resistência à compressão a “ j “ dias de idade
ft_{cj}	Resistência à tração por compressão diametral a “ j “ dias de idade
GPa	Giga Pascal
MPa	Mega Pascal
γ_s	Massa específica seca
E_{sc}	Módulo de Elasticidade - Módulo de Deformação Secante
F_{EE}	Fator de Eficiência Estrutural
λ	Condutividade Térmica
ν	Coeficiente de Poisson
$Ab_{,24h}$	Absorção de água após 24 horas de imersão
I_v	Índice de vazios
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
SF	Classe de espalhamento do Concreto Autoadensável (Slump Flow)
PJ	Habilidade Passante da mistura em fluxo livre pelo anel-J
BJ	Capacidade de bloqueio à passagem pelas barras do anel-J
T_{500}	Tempo, em segundos, para concreto autoadensável atingir espalhamento (Slump Flow) de 500 mm
T_{v-30}	Tempo de escoamento do concreto autoadensável pelo Funil-V decorridos 30 segundos do seu preenchimento
T_{v-300}	Tempo de escoamento do concreto autoadensável pelo Funil-V decorridos 300 segundos do seu preenchimento
V_a	Teor de ar incorporado
V_g	Volume absoluto do agregado graúdo
V_s	Volume absoluto de agregado miúdo
V_m	Volume ou teor de argamassa do concreto
V_w/V_p	Relação entre o Volume de água e o Volume de finos (cimento Portland + sílica ativa)

V_s/V_m	Relação entre o Volume de miúdo e o Volume de ou teor de argamassa
Sp/p	Teor líquido do aditivo superplastificante em relação à massa de finos ou aglomerantes (cimento Portland + sílica ativa)
G_m	Área relativa de espalhamento da argamassa
R_m	Tempo de escoamento relativo da argamassa
G_p	Área relativa de espalhamento da pasta de aglomerante (cimento + sílica ativa)
β_p	Razão de água retida pelos finos da pasta
E_p	Fator de deformação da pasta de finos
$W/m.K$	Watt por metro vezes Kelvin
CP II-E	Cimento Portland Composto, com adição de Escória de Alto Forno
w/p	Relação entre a massa de água e a massa de finos (cimento Portland + sílica ativa)
ΔT	Gradiente de Temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivos geral e específicos	5
1.2.1	Objetivo Geral	5
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	Hipótese da pesquisa	5
1.4	Delineamento geral da pesquisa	6
1.4.1	Organização do trabalho	7
2	REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1	Concreto autoadensável (CAA)	10
2.1.1	Materiais constituintes	11
2.1.2	Avaliação da trabalhabilidade do concreto autoadensável	18
2.1.3	A dosagem do concreto autoadensável	25
2.2	Concreto leve estrutural	34
2.2.1	O agregado leve	35
2.2.2	A mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto leve	36
2.3	Concreto leve autoadensável	47
2.3.1	A caracterização do concreto leve autoadensável no estado fresco	48
2.3.2	Os materiais e dosagem do concreto leve autoadensável	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1	Materiais utilizados	65
3.1.1	O cimento Portland, a sílica ativa e o aditivo superplastificante	65
3.1.2	O agregado Miúdo	66
3.1.3	O agregado Graúdo	66
3.2	A dosagem do concreto autoadensável de referência	69
3.2.1	Determinação do teor de substituição do cimento pela adição mineral	70
3.2.2	Determinação do teor de aditivo superplastificante no CAA	74

3.2.3	Determinação da relação volume de água/ volume de finos.....	78
3.2.4	O proporcionamento do CAA de referência.....	80
3.3	A dosagem do concreto com argila expandida.....	87
3.3.1	FASE 1: Concretos com argila expandida AE-1506 dosados com volume aparente de gráudo de 0,570.....	88
3.3.2	FASE 2: Concretos com argila expandida dosados com volume aparente de gráudo de 0,500 e 0,650	89
3.3.3	FASE 3: Ajuste dos concretos com argila expandida AE-1506.....	90
3.4	Procedimentos de mistura do concreto autoadensável com argila expandida	93
3.5	Ensaio de caracterização física e mecânica dos concretos autoadensáveis	94
3.5.1	Caracterização física dos concretos no estado fresco	94
3.5.2	Caracterização do concreto no estado endurecido	95
3.5.3	Resistência à compressão e tração por compressão diametral do concreto	99
3.5.4	Massa específica e índice de vazios do concreto endurecido.....	101
3.5.5	Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.....	103
3.5.6	Ensaio de carbonatação e condutividade térmica do concreto...	105
4	RESULTADOS: Apresentação e discussões.....	111
4.1	O concreto autoadensável de referência.....	112
4.2	Concretos com argila expandida AE-1506.....	116
4.2.1	FASE 1 e FASE 2: Dosagem de concretos com volume de agregado gráudo variável.....	116
4.2.2	FASE 3: Concretos autoadensáveis obtidos com brita de basalto e argila expandida.....	127
4.2.3	FASE 3: Caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco.....	130
4.3	Concretos autoadensáveis com e sem argila expandida: considerações finais	174
4.3.1	O concreto autoadensável de referência.....	174
4.3.2	A dosagem do concreto autoadensável com argila expandida....	175

4.3.3	O desempenho do concreto leve autoadensável com argila expandida.....	176
4.3.4	O uso dos dispositivos da norma NBR 15823 na avaliação de desempenho CLAA _{AE}	178
5	CONCLUSÕES	179
5.1	O concreto autoadensável de referência	180
5.2	A influência da argila expandida nas características dos concretos autoadensáveis	180
5.3	O uso dos dispositivos da norma NBR 15823 na avaliação do desempenho do CLAA_{AE}	183
5.4	Indicações para pesquisas futuras	183
	REFERÊNCIAS	184
	ANEXO 1 - Caracterização física dos materiais	191
	AN 1.1 Cimento Portland	192
	AN 1.2 Adição mineral	193
	AN 1.3 Agregado miúdo	195
	AN 1.4 Agregados graúdo	196
	AN 1.4.1 Agregado graúdo natural	196
	AN 1.4.2 Agregado leve	198
	AN 1.5 Aditivo superplastificante	201
	ANEXO 2 - Dosagem do Concreto Autoadensável: Método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) Modificado	202
	AN 2.1 Teor de substituição do cimento pela adição mineral.....	203
	AN 2.2 Dosagem do aditivo superplastificante.....	205
	AN 2.3 Dosagem do concreto autoadensável.....	209
	ANEXO 3 - Características Físicas e Mecânicas dos CAAs no estado endurecido	215

1 INTRODUÇÃO

Segundo Okamura e Ouchi (2003) o concreto autoadensável (CAA) surgiu no final dos anos 80 no Japão como uma solução para diminuir deficiências construtivas decorrentes da qualidade de mão de obra que comprometeriam a durabilidade das estruturas de concreto da indústria da construção japonesa. Em 1988 o prof. Okamura (Universidade de Tóquio) apresenta um protótipo do que foi identificado como concreto de alto desempenho que foi produzido com os materiais disponíveis no mercado japonês. Deste então, esta tecnologia vem sendo estudada, avaliada e difundida pelo planeta.

O fato de utilizar basicamente os mesmos tipos de materiais do concreto convencional (cimento Portland, areia, pedra britada, adições e aditivos) faz deste tipo de concreto um material de grande interesse nos dias atuais, especialmente para o caso das indústrias de concreto pré-fabricado. Neste setor da construção civil o CAA desperta atenção dado que as formas geométricas, tipo de acabamento, taxas de armadura, protensões, desforma, movimentações e especificações de resistência mecânica favorecem o uso deste tipo de concreto.

Na fabricação do componente pré-fabricado as etapas de armazenamento (estocagem, empilhamento e carregamento) e montagem são aspectos que devem ser observados de forma criteriosa à medida que estes itens influenciam diretamente nos custos dos produtos.

Sob esta ótica o concreto leve autoadensável (CLAA) surge como uma alternativa interessante. Este é um tipo de concreto que, em linhas gerais, agrega as conhecidas qualidades do concreto leve estrutural (CLE), dentre as quais destacam-se a redução do peso próprio das estruturas, a elevada capacidade de isolamento térmico, a resistência à ação do fogo com as reconhecidas qualidades do concreto autoadensável (CAA) como a facilidade no manuseio, a desoneração dos custos e agilidade nos processos de produção, a qualidade de acabamento superficial, a eliminação da etapa de vibração (PAPANICOLAOU; KAFFETZAKIS, 2011; REPETTE, 2011).

Existem poucas pesquisas disponíveis na literatura sobre o concreto leve autoadensável (CLAA), muito embora estudos estejam em desenvolvimento, especialmente no continente asiático (SHI; WU, 2005; WU et al. 2009; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010; BORJA, 2011; KARAHAN et al., 2012).

No Brasil o tema tem sido pouco estudado, especialmente com o uso da argila expandida brasileira. Nos poucos trabalhos disponíveis o assunto é tratado academicamente e, com isso, as aplicações do CLAA na indústria da construção civil são pouco divulgadas ou não existem. Na literatura internacional o CLAA é apresentado como um tipo de concreto ideal para uso na indústria de pré-fabricados em concreto, reforços estruturais com fibras e lajes (GÜNEYISI; GESOGLU; BOOYA, 2012; PAPANICOLAOU; KAFFETZAKIS, 2011).

O agregado leve utilizado na confecção do CLAA é aquele disponível na respectiva região. Como exemplo pode-se citar o uso do xisto expandido, pedra pome, turfas vulcânicas, diatomita, argila expandida entre outras. O uso de adições minerais (sílica ativa, cinzas volante, metacaolin dentre outros) e aditivo superplastificante são exigências decorrentes das características do produto. Os aditivos modificadores de viscosidade é uma alternativa técnica muito utilizada no combate ao efeito de “flutuação” do agregado leve da mistura (CHOI et al., 2006; GRABOIS, 2012).

A dosagem do CLAA pode ser feita por meio dos métodos utilizados para o concreto autoadensável (CAA), promovendo adaptações em função das características do agregado leve utilizado. Na condição fresca o CLAA pode ser avaliado pelos dispositivos propostos pelo conjunto de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), utilizados na caracterização do CAA, cujos procedimentos são os preconizados nas normas da Associação Brasileira de Normas

Técnicas (ABNT) NBR 15823-2 (2010), ABNT NBR 15823-3 (2010), ABNT NBR 15823-4 (2010), ABNT NBR 15823-5 (2010) e ABNT NBR 15823-6 (2010). O tipo do agregado leve altera as propriedades físicas e mecânicas do concreto leve autoadensável (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; BORJA, 2011; CHOI et al., 2006; GRABOIS, 2012; KARAHAN et al. 2012; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2009).

A tecnologia do concreto autoadensável (CAA), pelo menos nas áreas relacionadas à indústria de pré-fabricado em concreto, acredita-se, em breve será de uso rotineiro. Assim, especificamente para esse ramo de atividade na construção civil, a possibilidade de produzir concretos autoadensáveis que apresente massa específica seca menor ou igual a 2.000 kg/m³ é uma inovação tecnológica atrativa.

1.1 Justificativa

A indústria da pré-fabricação, segundo Doniak e Gutstein (2011), vem se destacando no cenário da construção brasileira como uma legítima representante da industrialização na construção civil.

[...] face aos dados macroeconômicos apresentados recentemente, temos vivenciado um tempo ímpar para o setor, no qual a industrialização ocupa um espaço central, especialmente quando as palavras de ordem, tanto na iniciativa privada quanto na esfera do governo, remetem à necessidade de aumento da produtividade [...] (DONIAK, 2013, p. 2).

A rapidez e a produtividade são alguns dos predicados que justificam a utilização de componentes pré-fabricados em concretos em obras industriais e comerciais, estádios e praças esportivas, edificações habitacionais e em obras de infraestrutura. Neste aspecto, a aplicação e uso de inovações tecnológicas, como é o caso dos concretos autoadensáveis, na indústria da construção civil, especialmente na construção pré-fabricada na execução das obras, podem contribuir significativamente para superar o déficit habitacional existente, incrementando o potencial da pré-fabricação no Brasil.

O uso do concreto autoadensável (CAA) na indústria da construção civil é crescente (REPETTE, 2011, p. 1669) apresentando-se como uma alternativa na produção do elemento pré-fabricado, considerando as características desta indústria e as vantagens largamente difundidas deste tipo de concreto. No entanto, restam

ainda as questões relacionadas ao manuseio e transporte que têm estreita relação com o peso destes componentes estruturais.

Neste sentido, o concreto leve autoadensável (CLAA) surge como um tipo especial de concreto que agrega as qualidades do concreto autoadensável (CAA) aos benefícios advindos da baixa massa específica do concreto leve estrutural (CLE). Desta forma, efeitos como a redução nos esforços nos componentes estruturais das edificações, redução de custos em fôrmas, cimbramento e transporte, agilidade na montagem das estruturas pré-fabricadas, redução no aporte tecnológico de canteiro, dentre outros, podem ser traduzidos como incremento tecnológico significativo na indústria de pré-fabricação brasileira.

Entretanto, Rossignolo e Agnesini (2011) alertam que a substituição dos agregados naturais por agregados leves em concretos estruturais pode provocar alterações significativas nas propriedades mecânicas e térmicas e nas características das misturas, destacando-se: a trabalhabilidade, a resistência mecânica, o módulo de deformação, a retração, o isolamento térmico, a resistência a altas temperaturas e na espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia.

Desta forma, esta pesquisa pretende contribuir com o entendimento das características reológicas de concretos autoadensáveis produzidos com a substituição parcial ou total do agregado natural por argila expandida brasileira, além de apresentar este tipo concreto especial, como uma alternativa promissora para o uso e aplicação na indústria da pré-fabricação de concreto no mercado nacional.

Para tanto, se pretende avaliar a influência do teor de argila expandida nos parâmetros de dosagem (consumo de cimento/m³, teor de argamassa, dentre outros), nas características físicas (fluidez, coesão e resistência à segregação) e mecânicas (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) neste tipo de concreto. Uma vez, conhecidas as características do produto, sua aplicação na indústria da pré-fabricados em concreto é uma questão de interesses e oportunidades de mercado.

1.2 Objetivos geral e específicos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do teor de agregado leve (argila expandida brasileira) nos parâmetros de dosagem e nas características físicas e mecânicas dos concretos autoadensáveis (CAA), quando da substituição parcial ou total do volume absoluto¹ do agregado graúdo, natural (pedra britada do basalto) pelo equivalente em volume de argila expandida brasileira.

1.2.2 Objetivos Específicos

Neste trabalho de pesquisa tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar a aplicabilidade de um método de dosagem de concreto autoadensável convencional (CAA) quando da dosagem do concreto leve autoadensável produzido pela substituição parcial ou total do volume absoluto agregado graúdo normal pelo volume equivalente de agregado leve (argila expandida brasileira);
- Definir limites de substituição do agregado graúdo normal pelo agregado leve para a geração de concretos autoadensável e autoadensável leve;
- Estabelecer parâmetros que dosagem para concretos autoadensáveis que atendam aos requisitos de autoadensabilidade preconizados pela norma ABNT NBR 15823-1, 2010.

1.3 Hipótese da pesquisa

O teor de argila expandida na composição de concretos autoadensáveis interfere significativamente nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, exigindo teor de água e teor argamassa superiores às aquelas determinadas para os concretos autoadensáveis produzidos com agregados graúdos originários de rocha basáltica.

---

¹ O volume absoluto (volume de sólidos + volume dos poros permeáveis e impermeáveis), é expresso pela relação entre a massa do agregado graúdo seco e a massa específica seca (γ_s) do agregado, determinada segundo os procedimentos da norma ABNT NBR NM 53 (2002)

1.4 Delineamento geral da pesquisa

Os estudos foram desenvolvidos no sentido de produzir concretos leves autoadensáveis (CLAAs), substituindo-se o volume absoluto do agregado graúdo natural, pelo equivalente em volume de agregado graúdo leve (argila expandida brasileira), utilizando como estratégia a pesquisa experimental.

Desta forma, foram produzidos concretos autoadensáveis convencionais (CAA_{REF}) confeccionados com areia lavada natural, quartzosa, pedra britada de basalto e adição mineral (sílica ativa – Ferbasa) e aditivo superplastificante à base de policarboxilato (Gleniun 51) produzido pela empresa Basf SA.

As características do CAA_{REF} no estado fresco e endurecido foram utilizadas na comparação com concretos autoadensáveis dosados a partir da substituição 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do volume absoluto do agregado graúdo pelo equivalente do agregado leve (argila expandida) tipo AE-1506 produzida pela Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda, Várzea Paulista - SP.

Os concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506 foram avaliados, na condição fresca e endurecida utilizando-se os ensaios propostos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

No estado fresco foram realizados os ensaios para avaliar o espalhamento, a viscosidade aparente, a habilidade passante e a resistência à segregação. Na condição endurecida, foram feitos os ensaios de absorção de água, massa específica seca, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade (E_{sc}), carbonatação e condutividade térmica.

Os resultados destes experimentos forneceram subsídios para avaliar os efeitos provocados pela substituição da pedra britada do basalto pelo agregado leve (argila expandida) nas misturas quando comparadas as características físicas (fluidez, coesão e resistência à segregação) e mecânicas dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem o uso do agregado leve. A Figura 1.1 mostra o esquema identificando as principais etapas que foram desenvolvidas na pesquisa.

1.4.1 Organização do trabalho

Este documento está organizado em 7 capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se o tema concreto leve autoadensável, expondo sucintamente as possibilidades do material, a justificativa, os objetivos e o delineamento da pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentados os concretos autoadensável (CAA), leve estrutural (CLE) e leve autoadensável (CLAA), identificando os materiais constituintes, ensaios de controle e principais características destes concretos.

No Capítulo 3 são descritas as principais etapas experimentais da pesquisa, englobando a seleção e caracterização dos materiais, método de dosagem e caracterização física e mecânica dos concretos autoadensáveis normal e leve.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões dos valores obtidos nos experimentos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e sugestões de alguns pontos que podem ser objeto de pesquisas futuras.

Capítulo 6 são relacionadas as principais fontes bibliográficas que fundamentaram o trabalho, por fim

O Capítulo 7 (Anexos): Anexo 1: caracterização dos materiais, Anexo 2: Método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) e Anexo 3: Resultados de ensaios.

FIGURA 1.1 Fluxograma mostrando as principais atividades desenvolvidas na pesquisa

2 REVISÃO DE LITERATURA

O concreto autoadensável surgiu para o mundo no Japão, na década de 80 como uma solução para questões de qualidade nas construções decorrentes das deficiências de mão de obra. Deste então, o material vem sendo aprimorado e utilizado nos diversos setores da construção civil. No setor de pré-fabricados em concreto o CAA vem se destacando, muito por conta das vantagens que o produto oferece tais como, facilidade na concretagem de peças com altas taxas de armadura, rapidez na execução e qualidade de acabamento superficial.

O concreto leve estrutural (CLE) é apresentado por Rossignolo e Agnesini (2011) como um material de uso consagrado no mundo todo com aplicações nas mais diversas áreas da construção civil. Redução do peso próprio da estrutura, economia nas etapas de transporte e montagem quando utilizado na indústria de pré-fabricados, além de características como isolamento térmico, resistência a altas temperaturas são algumas das qualidades ressaltadas pelos pesquisadores.

A combinação em um único produto das qualidades do concreto autoadensável (CAA) com as reconhecidas qualidades do concreto leve estrutural (CLE) resulta em um tipo novo de concreto: o concreto leve autoadensável (CLAA), cujas características não são bem conhecidas. Assim, conhecer os efeitos causados pelo uso de agregado graúdo normal e agregado graúdo leve na composição e características da mistura é um passo importante no conhecimento deste tipo especial de concreto autoadensável.

2.1 Concreto autoadensável (CAA)

O concreto convencional confeccionado com cimento Portland, agregados naturais e com ou sem aditivos químicos ou minerais tem uso difundido e disseminado nas diversas áreas da engenharia civil. A estrutura básica do concreto, que na visão de Van Vlack (1984), é resultante da mistura do agregado com uma pasta de cimento e água (40% a 70% em relação à massa do cimento), de consistência pastosa que endurece lentamente por hidratação do cimento.

A heterogeneidade dos componentes e a complexidade do comportamento da mistura na condição fresca e na endurecida representam um desafio na obtenção de concretos adequados técnica e financeiramente. Os avanços na técnica e na fabricação do cimento, o surgimento dos aditivos químicos e adições minerais contribuíram significativamente na busca de produtos inovadores em termos de tecnologia do concreto.

Desta forma, o concreto autoadensável (CAA) surge como um representante importante desta nova tecnologia. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto autoadensável (CAA) pode ser definido como um concreto fluído² que apresenta abatimento superior a 200 mm e espalhamento pelo tronco de cone maior que 600 mm, de elevada coesão que ao ser manuseado não apresente segregação ou exsudação, que pode ser compactado sem a necessidade de adensamento por meio de equipamentos mecânicos.

As diretrizes da EFNARC (2005) estabelecidas para a especificação, produção e uso do concreto autoadensável (CAA), identificam este tipo de mistura como aquela capaz de fluir e consolidar-se sob o seu próprio peso, preencher completamente fôrmas mesmo em presença de armadura densa, mantendo a homogeneidade e sem a necessidade de qualquer compactação adicional.

Para Tutikian e Dal Molin (2015) um concreto somente será considerado autoadensável (CAA) se a mistura apresentar fluidez, coesão e resistência à segregação de forma simultânea. Mantidas estas qualidades, o concreto autoadensável pode apresentar vantagens como por exemplo:

---

² Concreto fluído são misturas dosadas com aditivos superplastificante que atingem valores de abatimento da ordem de 200 mm a 250 mm, sem o uso excessivo de água (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

- a. Acelera as etapas de concretagem em função rapidez no lançamento e a dispensa do adensamento, por consequência, acelera a construção;
- b. Reduz a mão de obra nas concretagens;
- c. Permite a concretagem de peças de seções reduzidas e regiões com altas taxas de armadura;
- d. Diminui a incidência de falhas de concretagens causadas por deficiências no adensamento da mistura;
- e. Contribui com a segurança e conforto do trabalhador à medida que diminui o número de operários envolvidos na concretagem e elimina o ruído decorrente da etapa de vibração do concreto.

Repette (2011) comparando o concreto convencional (CC) com o concreto autoadensável (CAA), apregoa que este último apresenta elevada fluidez e estabilidade, representadas na mistura pela habilidade de preenchimento dos espaços, habilidade de passagem por restrições e capacidade de resistir à segregação (afundamento dos agregados ou ascensão da água (exsudação)). Além disso, características comuns ao concreto convencional como tempo de aberto, facilidade para o bombeamento, acabamento superficial, resistência mecânica e durabilidade também são exigidas do concreto autoadensável.

2.1.1 Materiais constituintes

De forma geral, os materiais utilizados na produção dos concretos autoadensáveis são os mesmos utilizados nos concretos convencionais (EFNARC, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Para Tutikian e Dal Molin (2015, p. 29) “A seleção dos materiais para a produção do CAA não é simples”. A exigência de maior quantidade de finos (adições minerais quimicamente ativos ou inertes), aliada aos diversos tipos de cimento e aditivos químicos (plastificantes, superplastificante e os modificadores de viscosidade) e características dos agregados afetam as propriedades reológicas e características mecânicas do concreto.

O uso de adições minerais é consenso no meio técnico para aumentar a coesão das misturas e evitar a segregação do agregado graúdo. O uso de

modificadores de viscosidade também auxilia na garantia destas propriedades (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; REPETE, 2011; DOMONE, 2006).

Em termos de aditivos químicos, as diretrizes europeias EFNARC (2005) sugerem o uso dos aditivos plastificantes e superplastificantes como elementos essenciais na produção dos concretos autoadensáveis. Piovezan (2008) comparando adições de filler calcário e filler basáltico em pastas autoadensáveis, demonstra que a superfície específica, a forma e a textura do grão destes tipos de adições interferem significativamente no uso dos aditivos superplastificantes.

Sucintamente, apresentam-se algumas características desejáveis dos materiais cimento Portland, agregados, adições minerais e aditivos químicos que são usualmente utilizados na produção do concreto autoadensável.

2.1.1.1 O cimento Portland

Os concretos autoadensáveis podem ser produzidos com os mesmos cimentos utilizados nos concretos convencionais, tomando-se cuidados com relação às prescrições relativas à durabilidade e exigências específicas para cada aplicação. (GOMES; BARROS, 2009; REPETTE, 2011; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015;).

A viscosidade e a tensão de escoamento do CAA dependem das características reológicas da pasta. Desta forma, segundo estes pesquisadores, embora não existam critérios científicos que balizem o uso de um determinado tipo de cimento para o CAA, recomendam os cimentos que apresentem na sua composição teores de C_3A menores que 10% e com maior superfície específica.

Mehta e Monteiro (2008) salientam que os cimentos com teores de C_3A superiores a 5% estão associados à expansão e a um quadro de fissuração por retração em função das reações dos sulfatos com o monossulfato hidratado (etringita). Os cimentos mais finos (finura Blaine > 3000 cm^2/g) são os mais indicados para a produção do CAA.

Os cimentos Portland com estas características possuem maior quantidade de partículas em contato com a água e mais próximas umas das outras, minimizando choque e com isso, reduzem a tensão de escoamento, aumentam a viscosidade e melhoram a coesão das misturas. Estas características do aglomerante exigem

procedimentos que minimizem os efeitos relativos ao calor de hidratação, retração do concreto e a perda de fluidez da mistura.

Além disso, cimentos com elevados teores de álcalis e C_3A e elevada finura exigem maiores quantidade de aditivo superplastificante e podem apresentar queda na manutenção da fluidez da mistura (REPETE, 2011).

A Figura 2.1 mostra a influência da finura do cimento na resistência à compressão do concreto **(a)** e na geração de calor em pastas de cimento **(b)**

FIGURA 2.1 Influência da finura do cimento na resistência à compressão do concreto **(a)** e na geração de calor de hidratação em pasta de cimento **(b)**

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

2.1.1.2 Os agregados

Os estudos relacionados aos concretos autoadensáveis nos últimos anos, de forma geral, mostraram que os agregados têm papel relevante nos aspectos da resistência mecânica, na durabilidade e na estabilidade dimensional dos concretos.

Da mesma maneira que no concreto convencional, características dos agregados como a porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial dos grãos dentre outras, também afetam propriedades físicas e mecânicas dos concretos autoadensáveis. Desta forma, os agregados devem atender

aos mesmos requisitos e especificações prescritos nas normas destinadas ao concreto convencional (GOMES; BARROS, 2009).

As características do agregado miúdo interferem na coesão e fluidez do concreto e em razão disso, agregados naturais miúdos e graúdos são os mais recomendados na produção do concreto autoadensável. Normalmente, os agregados finos originados dos resíduos da britagem de rochas (finos de pedreira) são pouco utilizados por, geralmente, apresentarem elevada angulosidade e textura superficial rugosa dificultam a mobilidade da mistura, além de exigirem quantidades maiores de água, volume de pasta e aditivos químicos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; REPETTE, 2011; SBRIGHI NETO, 2011).

Repetto (2011) recomenda areias naturais de granulometria contínua, médias a finas (módulo de finura de 2,4 a 1,0) por melhorarem a resistência à segregação da mistura. Gomes e Barros (2009) sugerem que partículas de agregados com dimensões menores que 0,125 mm sejam considerados como parte da fração de adição mineral (inertes), que compõem a pasta à medida que interferem na reologia do concreto autoadensável, seja por atuarem com filler ou por aumentarem a coesão e viscosidade das misturas.

Quanto aos agregados graúdos, Gomes e Barros (2009), Repetto (2011) e Tutikian e Dal Molin (2015), recomendam o uso de agregados com diâmetros de até 19 mm, por facilitar a mobilidade da mistura e minimizar os efeitos de bloqueio por parte dos agregados.

Repetto (2011) alerta que quanto maior o diâmetro do agregado graúdo mais elevada deverá ser a viscosidade da argamassa para evitar a segregação e aumentam as possibilidades de bloqueio do concreto. O uso de agregados de 9,5 mm é uma alternativa para gerar concretos autoadensáveis com bom desempenho.

Domone (2006), analisando 68 estudos de caso envolvendo concretos autoadensáveis, publicados no período de 1993 a 2003 em diversos países, verificou que em 70% dos casos analisados foram utilizados agregados graúdos com dimensões de 16 mm a 20 mm, 12,5% com tamanhos entre 22mm e 40 mm e 14,7% com tamanhos de partículas com dimensões de 10 mm a 15 mm.

2.1.1.3 As adições minerais

Mehta e Monteiro (2008) definem as adições minerais como materiais finamente moídos, que são adicionados ao concreto em quantidades que variam de 20% a 70% da massa do cimento, para atender a características específicas na dosagem dos concretos.

As diretrizes da EFNARC (2005) classificam as adições minerais para uso em CAA de acordo com a capacidade de reação com a água, em dois tipos: as adições inertes ou semi-inertes e as adições pozolânicas e hidráulicas.

Por essas diretrizes a granulometria, a forma e a absorção de água da adição mineral podem interferir na demanda de água da mistura e indicam adições à base de carbonato de cálcio, com partículas menores que 0,125mm e, preferencialmente, com uma porcentagem passante superior a 70% na peneira 0,063mm.

O uso de adições minerais na fabricação do CAA é recomendado à medida que aumenta a quantidade de finos e contribui com o aumento da coesão e viscosidade que, por sua vez, aumenta a resistência à segregação da mistura. No geral, considera-se como adição mineral os materiais com dimensões menores que 150 μm , dos quais pelo menos 75% sejam menores que 75 μm (REPETTE, 2011).

Dentre as adições minerais a sílica ativa ocupa lugar de destaque, quer pela finura (13.000 a 30.000 m^2/kg) ou por seus efeitos no concreto. Concretos com adição de sílica ativa apresentam pastas com maior plasticidade e maior coesão, com menos exsudação e segregação, embora exijam demanda maior de água e aditivo superplastificante. O efeito químico causado por reações pozolânicas e o efeito microfíler na matriz cimentícia na zona de transição pelo refinamento da estrutura dos poros são as duas principais formas de ação desta adição (DAL MOLIN, 2011; REPETTE, 2011; RONCERO, 2000).

Tutikian e Dal Molin (2015) recomendam que as adições minerais devem ser escolhidas com base em critérios técnicos e econômicos desde que apresentem área específica maior que os elementos que estão substituindo, quando for o caso.

A Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos de adições minerais quimicamente ativas mais utilizadas na produção do concreto autoadensável e alguns dos seus efeitos na mistura.

TABELA 2.1 Algumas características e efeitos da utilização de adições minerais no concreto autoadensável

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS					
	<i>Filer Calcário (REPETTE,2011)</i>	<i>Cinza volante</i>	<i>Cinza de casca de arroz</i>	<i>Escória de alto forno</i>	<i>Sílica ativa</i>	<i>Metacaulim</i>
Origem	Natureza calcítica	Calcinação do carvão pulverizado em usinas termoeletricas	Calcinação da casca de arroz	Subproduto não-metálico resultante do processo de fabricação do ferro gusa	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através do tratamento do resíduo do papel
Forma e textura	Prismática com faces retangulares	Esférica e lisa	Alveolar e áspera	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera
Massa Específica (kg/dm ³)	2,20 a 2,60	2,35	2,20 a 2,60	2,79 ⁽¹⁾ - 2,93 ⁽²⁾	2,20	2,40
Superfície específica (m ² /kg)	800 a 856	300 a 700	50.000 a 100.000	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função do grau de moagem
Tamanho médio das partículas	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	0,1 a 0,2µm	Variável em função do grau de moagem
Efeito no CAA na condição fresca quando utilizado em substituição ao cimento	A maior capacidade e adsorver água, comparada às partículas de outras adições, provoca aumento na viscosidade e maior resistência à exsudação.	Aumento da coesão; Redução da exsudação e da segregação; Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas; Normalmente reduz o consumo de superplastificante.	Elevado aumento da coesão; Redução acentuada da exsudação e segregação; Piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas; Elevado aumento no consumo de superplastificantes.	Aumento da coesão; Redução da exsudação e segregação; Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas; Pouco altera o consumo de superplastificante.	Elevadíssimo aumento da coesão; Redução acentuada da exsudação e da segregação; Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas; Aumento do consumo de superplastificante para teores superiores a 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão; Redução acentuada da exsudação e da segregação; Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas; Aumento no consumo de superplastificante
Efeito no CAA na condição endurecida quando utilizado em substituição ao cimento	Por não ser totalmente inerte, pode provocar afetar a manutenção da fluidez e retardar a pega do concreto quando se usa altos teores de aditivo superplastificante	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.

Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2015) e Repette (2011)

(1) Gesoglu et al. (2012)

(2) Sethy; Pasla; Sahoo, (2016)

2.1.1.4 Os aditivos químicos

- **Aditivo superplastificante**

Para Gomes e Barros (2009) no concreto autoadensável o aditivo superplastificante é imprescindível à medida que é um dos principais componentes que promovem a fluidez da mistura.

Hartmann et al. (2011) classifica os aditivos superplastificantes em quatro classes segundo a sua composição química, a saber:

- a. Lignossulfonados ou lignossulfonados modificados (LS);
- b. Sais sulfonados de policondensado de naftaleno e formaldeído (NS): São os superplastificante de 2ª geração, à base de naftaleno sulfonado;
- c. Sais sulfonados de policondensado de melamina e formaldeído (MS): São os superplastificantes à base de melanina sulfonado;
- d. Os policarboxilados (PCE): São os aditivos superplastificantes tipo II, à base de policarboxilato-poliésteres

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilato são os mais utilizados na produção dos CAAs, principalmente pela ação dispersante (efeito estérico)³ deste tipo de aditivo sem provocar diminuição significativa da viscosidade da pasta (REPETTE, 2011; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

O tipo e finura do cimento e o teor de aditivo interferem na adsorção do aditivo nas fases de hidratação do cimento. A incorporação do aditivo superplastificante tem efeito na formação dos compostos hidratados e está intimamente ligado à sua ação dispersante. Teores de aditivo acima do ponto de saturação não melhoram o desempenho do aditivo superplastificante, podem retardar a pega, provocar a exsudação e diminuir a resistência à segregação e aumentar os custos (RONCERO, 2000; HARTMANN et al., 2011)

---

³ Os efeitos estéricos são as principais forças de repulsão na dispersão das partículas de cimento. A repulsão estérica resulta da adsorção da cadeia do polímero na superfície do cimento e da extensão das cadeias laterais do polímero a partir da superfície do cimento (HARTMANN, et al., 2011 – p. 356).

2.1.2 Avaliação da trabalhabilidade do concreto autoadensável

As diretrizes da EFNARC (2005) apresentam uma série de dispositivos e métodos de ensaios desenvolvidos especialmente para caracterizar o concreto autoadensável no estado fresco, conforme mostra a Tabela 2.2.

TABELA 2.2 Identificação dos ensaios, propriedades avaliadas e parâmetros medidos nos ensaios do concreto autoadensável

CARACTERÍSTICAS	ENSAIOS	PARÂMETRO MEDIDO
1- Fluidez e capacidade de preenchimento	- Slump-flow - Kajima box	- Espalhamento total - Preenchimento (visual)
2- Viscosidade / Fluidez	- T ₅₀₀ - V-funnel - O-funnel - Orimet	- Tempo de fluxo
3- Capacidade de passagem	- L-box - U-box - J-ring - Kajima box	- Taxa de passagem - Diferença de altura - Fluxo total - Capacidade de passagem (visual)
4- Resistência à segregação (Coesão)	- Penetration - Sieve segregation - Settlement column	- Profundidade - Porcentagem de pasta - Taxa de segregação

Fonte: Adaptada de EFNARC (2005)

A norma ABNT NBR 15823-1(2010) classifica e estabelece os requisitos mínimos, enquanto que, as normas ABNT NBR 15823-1(2010), ABNT NBR 15823-2 (2010), ABNT NBR 15823-3 (2010), ABNT NBR 15823-4 (2010), ABNT NBR 15823-5 (2010) e ABNT NBR 15823-6 (2010), estabelecem os métodos de ensaios para avaliar as características do concreto autoadensável na condição fresca.

A seguir, são apresentadas as principais características dos ensaios propostos pelas normas ABNT NBR 15823 (2010).

- **DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E DO TEMPO DE ESCOAMENTO – Método do Cone de Abrams (Slump Flow Test)**

Este ensaio, cujos procedimentos são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-2 (2010), avalia a fluidez do CAA em fluxo livre, empregando-se o cone de Abrams. A medida da fluidez da mistura é feita com base na média aritmética de pelo menos duas medidas do espalhamento (SF) do concreto na placa base do cone, em milímetros. O ensaio permite avaliar se a mistura apresenta segregação - separação argamassa ou pasta do agregado graúdo.

O ensaio identificado por Slump flow T_{500} Test avalia o intervalo de tempo, em segundos, que a mistura fresca espalha ou escoam até atingir a marca de 500 mm marcados na placa de base. Para tempos muito baixos há indicação de que a mistura está muito fluida enquanto que para tempos muito altos a mistura apresenta baixa fluidez, ou seja, apresenta-se muito coesa. Em ambas as situações deve se fazer correções na dosagem. A Figura 2.2 mostra uma situação esquemática do dispositivo e uma imagem ilustrativa do dispositivo tronco de cone (cone de Abrams).

FIGURA 2.2 Cone de Abrams: Dimensões nominais (a) Dispositivo em chapa metálica (b)

Fonte: (a) ABNT NBR 15823-2 (2010) (b) o autor

• DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE – Método do anel J

Este ensaio, cujos procedimentos são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-3 (2010), avalia a habilidade passante do concreto autoadensável sob fluxo livre, pelo anel J. Para Tutikian e Dal Molin (2015), o ensaio do anel J é uma complementação do Slump Flow Test, do Orimet Test e do V-Funnel Test, uma vez que estes ensaios não representam, como é o caso do ensaio Anel J, na condição de laboratório e/ou canteiro, a presença das armaduras na condição real do elemento estrutural. O ensaio possibilita avaliar visualmente a fluidez e a ocorrência de segregação na mistura. A Figura 2.3 mostra uma situação esquemática do dispositivo do Anel-J e o equipamento utilizado nos ensaios deste estudo.

FIGURA 2.3 Anel-J: Dimensões nominais (a) Dispositivo feito em aço galvanizado (b)

Fonte: (a) ABNT NBR 15823-3 (2010) (b) o autor

- **DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE – Método da Caixa L**

Este ensaio, cujos procedimentos são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-4 (2010), avalia simultaneamente a fluidez, a capacidade passante e a coesão da mistura sob fluxo confinado, quando exposta a obstáculos, simulados pela armadura colocada no dispositivo identificado por caixa-L.

A avaliação visual da fluidez é feita pela percepção da velocidade que mistura atinge as marcas de referência e o seu nivelamento no canal de escoamento do dispositivo de ensaio.

A ocorrência da segregação pode ser observada pela separação do agregado graúdo da argamassa ao passar pelos obstáculos colocados na saída da mistura. A Figura 2.4 mostra uma situação esquemática e uma imagem ilustrativa da caixa-L confeccionada em chapa metálica, com destaque para os obstáculos à passagem (hastes metálicas com diâmetros de 12,7 mm).

FIGURA 2.4 Caixa-L: Dimensões do dispositivo (a) Planta (b) Equipamento fabricado em chapa metálica (c)

Fonte: (a) - (b) ABNT NBR 15823-4 (2010) (c) o autor

- **DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE – Método do Funil V**

Este ensaio, cujos procedimentos são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-5 (2010), avalia a viscosidade aparente da CAA, por meio da medida do tempo de escoamento (T_{v-30}) da mistura pelo Funil-V.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015) o tempo de escoamento T_{v-300} serve para avaliar, qualitativamente, a resistência à segregação do concreto no funil. Para tanto, avalia-se o tempo de escoamento após a mistura ficar em repouso no funil-V por 300 segundos. Tempos de escoamento muito elevados indicam segregação da mistura no bocal de saída do equipamento. Para estes pesquisadores, não existe a certeza da influência do ângulo interno das paredes do dispositivo nos resultados dos ensaios.

A Figura 2.5 mostra o funil-V na forma esquemática, conforme a proposta da norma ABNT NBR 15823-5 e, uma imagem ilustrativa do dispositivo construído em chapa metálica.

FIGURA 2.5 Funil V: Dimensões nominais - Vista em planta (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) e dispositivo fabricado em chapa metálica galvanizada (d)

Fonte: (a), (b), (c) ABNT NBR 15823-5 (2010) (d) o autor

- **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO – Método da Coluna de Segregação**

Este ensaio, cujos procedimentos são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-6 (2010), com dispositivo identificado por coluna de segregação, ilustrado esquematicamente na Figura 2.6 **(a)**, avalia a resistência à segregação do CAA por meio da comparação da quantidade, em massa, do agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação, que após a lavagem, fica retido na peneira de 4,75 mm.

Decorrido 20 minutos do preenchimento da coluna de segregação, com o concreto com pouca consistência é feita a separação das frações de agregado do topo e da base. A separação do agregado da argamassa da mistura é feita por meio da lavagem do material na peneira de 4,75 mm. A Figura 2.6 **(b)** mostra uma ilustração do equipamento confeccionado em PVC e as presilhas de fixação entre as secções da peça.

FIGURA 2.6 Coluna de segregação: Dimensões nominais **(a)** e equipamento em PVC **(b)**

Fonte: **(a)** ABNT NBR 15823-6 (2010) **(b)** o autor

A Tabela 2.3 mostra os valores estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-1 que servem como parâmetros para classificar o concreto autoadensável (CAA) na condição fresca, em função dos diversos tipos de ensaios.

TABELA 2.3 Classificação do CAA em função das suas propriedades no estado fresco segundo a norma ABNT NBR 15823-1

Classes de Espalhamento (Slump Flow Test) <i>Método: ABNT NBR 15823-2</i>	Classe	Espalhamento (mm)
	SF ₁	550 a 650
	SF ₂	660 a 750
	SF ₃	760 a 850
Classes de viscosidade plástica aparente T500, em fluxo livre <i>Método: ABNT NBR 15823-2</i>	Classe	T₅₀₀ (s)
	VS 1	≤ 2
	VS 2	> 2
Classes de Habilidade Passante pelo anel J, sob fluxo livre <i>Método: ABNT NBR 15823-3</i>	Classe	Anel J (mm)
	PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço
	PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço
Classes de Habilidade Passante caixa L, sob fluxo confinado <i>Método: ABNT NBR 15823-4</i>	Classe	Caixa L (H ₂ /H ₁)
	PL 1	≥ 0,80, com duas barras de aço
	PL 2	≥ 0,80, com três barras de aço
Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil V, sob fluxo confinado <i>Método: ABNT NBR 15823-5</i>	Classe	Funil V (s)
	VF 1	< 9
	VF 2	9 a 25
Classes de resistência à segregação pela Coluna de Segregação <i>Método: ABNT NBR 15823-6</i>	Classe	Coluna de Segregação (%)
	SR 1	≤ 20
	SR 2	≤ 15

Fonte: Adaptada da norma ABNT NBR 15823-1 (2010)

2.1.3 A dosagem do concreto autoadensável

A dosagem do concreto autoadensável tem sido objeto de diversos trabalhos no Brasil. Destacam-se as metodologias para a dosagem do concreto autoadensável propostas por Gomes (2002) Tutikian (2004), Repette e Melo (2005) e Tutikian e Dal Molin (2008) e Tutikian e Dal Molin (2015).

O tema é tratado amplamente na publicação “Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável” de autoria de Gomes e Barros (2009). Naquele trabalho são apresentados sucintamente os principais métodos de dosagem do concreto autoadensável disponíveis na literatura.

Portanto, os métodos de dosagem do CAA não foram abordados nesta pesquisa, por esse autor. Entretanto, são colocadas a seguir algumas questões gerais, relativas à dosagem e, com maior profundidade, o método de dosagem de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), considerado na literatura como sendo uma das primeiras e mais conhecida metodologia de dosagem do concreto autoadensável.

As principais etapas do método serão descritas segundo Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), Okamura e Ouchi (2003) e Nunes (2001, 2008). Este foi o método de dosagem utilizado na definição do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}).

A dosagem do concreto autoadensável (CAA) é considerada por Tutikian; Dal Molin (2015) como um dos pontos críticos na difusão e uso deste tipo de material. Compatibilizar elevada fluidez, capacidade de fluir por regiões confinadas, adensar-se sob a ação do próprio peso sem ocorrência de segregação do agregado graúdo e, além disso, ter desempenho mecânico adequado ao que é proposto, faz da dosagem do concreto autoadensável uma tarefa complexa (REPETTE, 2011).

Variações na uniformidade dos constituintes da mistura, nos procedimentos de mistura ou até mesmo no armazenamento dos materiais pode afetar este equilíbrio, resultando na deficiência de capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e segregação da mistura. A robustez⁴ da mistura aceita estas variações sem alterações significativas na qualidade do CAA.

---

⁴ A robustez (*robustness*) do CAA é definida como sendo a tolerância aceitável para as flutuações diárias que podem ocorrer nas características dos materiais, procedimentos de mistura dentre outros, que alterem o desempenho da mistura no estado fresco. Considera-se robusta aquela mistura que variações de 5 a 10 litros/m³ de água não provocam mudanças significativas nas suas características no estado fresco (EFNARC, 2005).

A fluidez da mistura é obtida por meio da lubrificação dos agregados pela pasta de finos. Isso faz com que o CAA apresente elevada a relação volume de finos/volume de agregados na comparação com o concreto convencional. Em consequência, o CAA pode apresentar retração por secagem e retração térmica elevada, especialmente se na composição estiverem presentes grandes teores de cimento e adições minerais reativas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Repette (2011) reitera que para obtenção de fluidez e viscosidade adequadas na mistura, além de alta relação finos/agregados é fundamental o uso de aditivo superplastificante. Para o pesquisador, o volume de pasta do CAA deve ser tal que possibilite o espaçamento entre os grãos do agregado em torno de 0,05 mm.

O aumento da retenção de água e da viscosidade, segundo Aïtcin (2000), melhora a resistência à segregação no concreto autoadensável. Generalizando, o Autor apregoa que aumentar a viscosidade implica em melhorar a estabilidade do concreto e, com isso, diminuir a segregação.

Isso pode ser feito por meio de reduções da água, do aditivo superplastificante ou, ainda, pela adição ou incremento adições minerais como, por exemplo, a sílica ativa. Além disso, o uso de aditivos modificadores de viscosidade é uma maneira eficiente de promover o aumento a viscosidade dos concretos autoadensáveis (AÏTCIN, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2008; REPETTE, 2011; HARTMANN et al. 2011).

- **Método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)**

O método de dosagem do concreto autoadensável, proposto pelo grupo de pesquisa do prof. Hajime Okamura, foi apresentado pela primeira vez em 1988 na Universidade de Tóquio. Esta metodologia é reconhecida na literatura como o primeiro método de dosagem do CAA (GOMES; BARROS, 2009).

O método, eminentemente experimental, utiliza como estratégia a incorporação de agregado em pasta (REPETTE, 2011). A princípio, a metodologia utiliza-se das premissas de que o concreto é composto de duas fases (argamassa – agregado graúdo) e de que os componentes da pasta, a relação água/materiais finos e o aditivo superplastificante, são fundamentais na obtenção da autoadensabilidade da mistura (GOMES; BARROS, 2009).

A Figura 2.7 ilustra esquematicamente os procedimentos fundamentais para a obtenção da autoadensabilidade do CAA, segundo os idealizadores da metodologia de dosagem.

FIGURA 2.7 Procedimentos para obtenção de autoadensabilidade no concreto autoadensável

Fonte: Traduzida e adaptada de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)

O proporcionamento dos materiais em volume absoluto no traço do concreto autoadensável é estabelecido segundo a seguinte sequência (NUNES, 2001; 2008):

1. O teor de ar incorporado (V_a) é fixado em 2%, a menos que outras quantidades sejam necessárias para atender aos requisitos de resistência para o caso de ações de gelo-degelo;
2. O volume de agregado graúdo (V_g) é limitado a 50% do volume aparente compactado ($V_{g,lim}$), excluído o volume de ar (V_a);
3. O volume de agregado miúdo (V_s) é fixado em 40% do volume da argamassa (V_m);
4. A razão entre o volume de água/volume de finos (V_w/V_p) é determinado com base nos ensaios de pasta e argamassas;

5. A dosagem do aditivo superplastificante (Sp/p), feita com relação à massa de finos (cimento Portland + adições minerais), em porcentagem, é feita com base nos experimentos realizados nas fases de estudos da pasta, da argamassa e no concreto fresco, para garantir as características de autoadensabilidade;
6. Por fim, são realizados ensaios no concreto nos estados fresco e endurecido para avaliar a performance da mistura mediante os teores e parâmetros estimados no dimensionamento dos materiais. Se necessário são feitos ajustes. No caso desta pesquisa, foram adotados os requisitos indicados pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010).

Os principais parâmetros de dosagem pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), são determinados por meio de ensaios realizados em pastas e argamassas. A seguir, são apresentadas as principais etapas que envolvem as determinações das características das pastas e argamassas que no conjunto definem os teores de água e aditivo superplastificante.

• ENSAIOS DE PASTA E DE ARGAMASSAS

As características reológicas e físicas das pastas e das argamassas são estimadas com base em uma série de ensaios de espalhamento e escoamento, realizados com dispositivos específicos para os ensaios de argamassa.

O molde tronco cônico, mostrado esquematicamente na Figura 2.8 **(a)**, é utilizado para avaliar o espalhamento da argamassa e auxilia na determinação da área relativa de espalhamento da argamassa (G_m) e da pasta (G_p).

A Figura 2.8 **(b)** mostra a fotografia do dispositivo tronco-cônico, confeccionado em Technyl,⁵ utilizado nos experimentos desenvolvidos para caracterizar as pastas e argamassas a serem utilizadas como parâmetros de dosagem do concreto autoadensável.

---

⁵ Nome comercial de um polímero com estrutura química baseada na poliamida estruturada com fibras vegetais e/ou sintéticas. Marca registrada da Rhodia (Rhodia Solvay Group, 2015)

FIGURA 2.8 Molde tronco-cônico para argamassa: **(a)** Dimensões nominais **(b)** Fotografia do dispositivo construído em Technyl®

Fonte: Molde tronco-cônico para pastas e argamassas: **(a)** Dimensões nominais (Gomes e Barros, 2009) **(b)** Dispositivo confeccionado em Tecnyl® (O autor, 2015)

A fluidez da argamassa é avaliada pelo dispositivo identificado por funil-V para argamassa, cujas dimensões são mostradas na Figura 2.9 **(a)**. Por esse dispositivo determina o tempo relativo de escoamento pelo funil-V para argamassas (R_m). A Figura 2.9 **(b)** mostra a fotografia do dispositivo confeccionado em chapa metálica utilizado nos experimentos realizados nesta pesquisa.

FIGURA 2.9 Funil-V utilizado nos ensaios de argamassa

Fonte: Funi-V: **(a)** Dimensões nominais (Gomes e Barros, 2009) **(b)** Equipamento confeccionado em chapa galvanizada (O autor, 2015)

Os ensaios realizados em pastas auxiliam na determinação da composição ideal de finos (cimento + adição mineral). Para cada composição de pasta (cimento + adição mineral + água), elaborada com diferentes relações volume de água/ volume de finos (V_w/V_p), determina-se a área de espalhamento relativo (G_p), calculado por meio da equação 2.1.

$$G_p = \left(\frac{d_1 \cdot d_2 - d_0^2}{d_0^2} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

G_p = área relativa de espalhamento da pasta

d_1 e d_2 = medidas do diâmetro de espalhamento da pasta

d_0 = Medida da base da forma tronco-cônica ($d_0 = 100$ mm)

Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) verificaram que um conjunto de pares (V_w/V_p ; G_p) pode ser ajustado a uma reta, cuja configuração é ilustrada na Figura 2.10. Por meio de uma regressão linear dos dados determina-se a razão de água retida pelos finos (β_p) e o fator de deformação (E_p). β_p representa a razão V_w/V_p na qual a deformação da pasta é zero, e a superfície dos finos e os espaços vazios estão preenchidos de água. E_p é uma medida da sensibilidade da fluidez da pasta para incrementos no teor de água representado na Figura 2.10, pela inclinação da reta. A composição que apresente maior valor de β_p exige maior demanda de água para uma mesma fluidez, medido no ensaio de espalhado da pasta (NUNES 2001, 2008).

FIGURA 2.10 Curva de comportamento de pasta

Fonte: Adaptado de Nunes (2001)

Uma vez definida a composição de finos (cimento + adição mineral) por meio dos ensaios de pasta, o próximo passo é determinar a relação V_w/V_p e Sp/p para que o CAA atinja valores adequados de deformabilidade e viscosidade. Para tanto, são realizados ensaios com argamassa utilizando o molde tronco-cônico e o funil – V para argamassas. Segundo Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), estes ensaios auxiliam na avaliação da interação entre os materiais finos, agregado miúdo e o aditivo superplastificante. Por meio destes ensaios são avaliados a deformabilidade e a viscosidade da argamassa por meio dos índices G_m e R_m , calculados pelas equações 2.2 e 2.3, respectivamente:

$$G_m = \left(\frac{d_1 \cdot d_2 - d_0^2}{d_0^2} \right) \quad (2.2)$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (2.3)$$

Onde:

G_m = área relativa de espalhamento da argamassa

R_m = tempo de escoamento relativo da argamassa

t = tempo para um volume V de argamassa fluir pelo dispositivo do funil–V para argamassa, em segundos

d_1 e d_2 = medidas do diâmetro de espalhamento da argamassa

d_0 = Medida da base da forma tronco-cônica ($d_0 = 100$ mm)

Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) verificaram que valores da relação V_w/V_p adequados somente podem ser alcançados quando G_m é igual a 5,0 e R_m é igual a 1,0, simultaneamente. Desta forma, por meio de um processo iterativo, elaboram-se argamassas com porcentagem de areia fixado em 40%, variando-se a dosagem do superplastificante (Sp/p) e a relação V_w/V_p .

Conhecidos os valores dos pares (Sp/p ; G_m/R_m), determina-se, por meio de uma reta (ajuste linear), o teor de superplastificante (Sp/p) que atenda a condição G_m/R_m igual a 5,0 (NUNES, 2001).

A determinação da relação V_w/V_p é feita com base em novos ensaios com argamassas confeccionadas com o teor de aditivo superplastificante estimado

anteriormente, mantido constante, variando-se a relação V_w/V_p . Tendo os pares de resultados (V_w/V_p ; $R_m/G_m^{0,4}$), ajusta-se os pontos a uma reta e estima-se o valor procurado de V_w/V_p correspondente à equação 2.4 (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

$$\frac{V_w}{V_p} = \frac{R_m}{G_m^{0,4}} = 0,525 \quad (2.4)$$

Finalmente, a última etapa da metodologia. Neste ponto, são produzidos concretos considerando os parâmetros determinados nos ensaios de pasta e argamassa. Pequenos ajustes no teor aditivo Sp/p e ensaios no concreto no estado fresco tais como o Slump flow, tubo-U e funil-V são sugeridos por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) para avaliar as propriedades de autoadensabilidade da mistura. No Brasil são utilizados os ensaios previstos na norma ABNT NBR 15823 (2010). O memorial de cálculo da aplicação da metodologia de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) para a definição do CAA_{REF} pode ser visto no ANEXO 2 deste trabalho.

2.1.3.2 Dosagens típicas do concreto autoadensável

Os concretos autoadensáveis podem ser dosados com agregados normais com dimensão máxima característica de até 25 mm, aditivos superplastificante e modificadores de viscosidade e adições minerais. A Tabela 2.4 apresenta alguns valores sugeridos pelas Diretrizes Europeias para o concreto autoadensável que podem ser utilizados como parâmetros iniciais na dosagem CAA.

TABELA 2.4 Composição típica do concreto autoadensável

MATERIAIS CONSTITUÍNTES	VALORES TÍPICOS, EM MASSA (kg/m ³)	VALORES TÍPICOS, EM VOLUME (kg/m ³)
Finos	380 - 600	-
Pasta	-	300 - 380
Agregado miúdo	O teor de agregado miúdo complementa o volume unitário dos outros componentes. Tipicamente corresponde a 48% - 55% da massa total dos agregados da mistura.	
Agregado graúdo	750 - 1000	270 - 360
Água	150 - 210	150 - 210
Relação água / Materiais finos	-	0,85 - 1,10

Fonte: Traduzida e adaptada de EFNARC (2005)

Em geral, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que os concretos autoadensáveis são dosados com grandes quantidades de finos (cimento + adições minerais superiores a 400 kg/m³) e aditivos modificadores de viscosidade a fim de combater os efeitos da exsudação ou a segregação, respectivamente. A Tabela 2.5 relaciona algumas dosagens que segundo Mehta e Monteiro (2008) apresentam uma configuração típica de composição.

TABELA 2.5 Concreto autoadensável: exemplos de composições e características físicas e mecânicas das misturas

CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS	MISTURA N°					
	1	2	3	4	5	6
Consumo de materiais/m³ de concreto						
Cimento Portland	400	465	120	207	330	360
Cinza volante	-	-	127	207	-	-
Escória de alto forno	-	-	184	-	-	-
Areia padrão	1.170	710	964	845	960	960
Agregado graúdo	630	915	822	843	900	900
Água	190	175	176	188	180	180
Aditivo superplastificante	7,0	4,6	5,0	0,5	3,0	3,5
Aditivos modificadores de viscosidade						
Goma	-	-	-	-	0,13	0,25
Sílica ativa	-	65	-	-	30	-
Sílica coloidal ultrafina	-	-	8	-	-	-
Propriedades físicas e mecânica						
Abatimento (mm)	260	-	-	240	220	220
Espalhamento (mm)	-	730	800	-	-	-
Relação água/cimento (a/c)	0,47	0,33	0,40	0,45	0,50	0,50
Resistência à compressão (f _{c28}) (MPa)	-	95	40	33	46	43

OBSERVAÇÕES

- 1- A mistura n° 1 contém 990 kg/m³ de areia padrão e 180 kg/m³ de areia muito fina;
- 2- A mistura 2 é considerada CAA de alta resistência, enquanto que as misturas n° 3 e n° 4 são concretos autoadensáveis de baixo calor de hidratação;

Fonte: Adaptada de Mehta e Monteiro (2008)

Para Repette (2011) as proporções dos constituintes do CAA variam em função das características dos materiais, dos equipamentos de mistura e da aplicação do concreto. Entretanto, sugere as quantidades de materiais constantes na Tabela 2.6 para o caso de concretos autoadensáveis produzidos com os mesmos materiais utilizados no concreto convencional.

TABELA 2.6 Composição do concreto autoadensável (CAA) produzido com os mesmos materiais utilizados no concreto convencional

COMPOSIÇÃO	
Cimento Portland	350 kg/m ³ a 450 kg/m ³
Adição mineral	150 kg/m ³ a 250 kg/m ³
Relação água / finos (partículas menores que 75µm) (volume)	0,80 a 1,10
Volume de agregado miúdo na fração da argamassa	35% a 50%
Volume de agregado graúdo no concreto	25% a 35%

Fonte: Adaptada de Repette (2011)

2.2 Concreto leve estrutural

Concreto leve estrutural (CLE) são aqueles concretos produzidos com agregados leves em substituição aos agregados convencionais de peso normal que apresentam massa específica seca de no máximo 2.000 kg/m³ (NEVILE, 1997; ROSSIGNOLO, 2009). A norma ACI 213R-03 define o concreto leve estrutural como aquelas misturas produzidas com agregado leve estrutural ou pela combinação com o agregado normal, que apresenta resistência à compressão mínima de 17 MPa e massa específica seca entre 1.120 kg/m³ a 1.920 kg/m³.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) é comum a utilização de areia de densidade normal como agregado miúdo e limitam a dimensão máxima nominal do agregado graúdo leve a 19 mm. A proposição da norma ASTM C 330 – 03 é que a massa de agregados miúdos e graúdos na condição seca seja inferior a 1.120 kg/m³ e 880 kg/m³, respectivamente. A trabalhabilidade aliada à baixa massa específica do concreto leve no estado fresco, contribuem para que os processos de lançamento, adensamento e

compactação exigem menos esforços dos trabalhadores no seu manuseio (MEHTA; MONTEIRO, 2008; ROSSIGNOLO, 2009).

2.2.1 O agregado leve

Para Mehta e Monteiro (2008) diversas são as características físicas e mecânicas que devem ser analisadas quando da utilização de agregados para o estudo e confecção do concreto leve. Parâmetros como a forma e textura superficial, composição granulométrica, massa específica, substâncias nocivas e as propriedades mecânicas são algumas destas características.

Todas são importantes, mas neste ponto, é oportuno tecer algumas considerações à respeito da absorção de água dos agregados. A Tabela 2.7 relaciona alguns índices físicos de agregados leves produzidos em diversas regiões do planeta.

TABELA 2.7 Caracterização física de alguns agregados leves utilizados na fabricação do concreto leve estrutural

Identificação Comercial	País	Matéria-Prima	Fabricação	Massa Específica Seca (kg/dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)	Dimensão Nominal (mm)	Absorção de Água (%)
Lytag	Inglaterra e Holanda	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 a 2,1	0,6 a 1,1	0,5 a 19,0	15 a 20
Solite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	1,4	0,8	4 a 16	15
Norlite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	0,8 a 1,9	0,4 a 1,2	5 a 19	10 a 25
Liapor	Alemanha	Argila	Forno rotativo	0,6 a 1,8	0,3 a 0,9	2 a 19	11 a 17
Leca	Dinamarca e Noruega	Argila	Forno rotativo	0,6 a 1,8	0,3 a 0,9	0,5 a 16	11 a 30
Arlita	Espanha	Argila	Forno rotativo	1,4	0,8	1 a 10	13
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,5	0,9	0 a 4,8	6,0
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,1	0,6	6,3 a 12,5	7,0
Cinexpan 2215	Brasil	Argila	Forno rotativo	0,6	0,5	12,5 a 19,0	10,0

Fonte: Adaptado de Rossignolo (2003 e 2009)

Martins (1985) apregoa que, para agregados leves como a argila expandida e outros agregados de superfície porosa, fechada, a água total absorvida no concreto confeccionado com este tipo de agregado depende da água contida no agregado, da

consistência inicial da pasta de cimento e do intervalo de tempo entre a produção e lançamento do concreto.

Martins (1985) e Rossignolo (2009) afirmam que a absorção de água pode afetar algumas propriedades do concreto endurecido. Segundo estes pesquisadores, o uso de agregados de elevada absorção, pode conduzir a fissuras de retração por secagem, aumenta a massa específica do concreto seco e diminui a sua capacidade térmica. Como forma para minimizar estes efeitos recomendam a pré-saturação para aqueles agregados que apresentem valores de absorção de água superior a 10%.

Segundo Rossignolo (2009), a pré-saturação do agregado leve minimiza perdas na trabalhabilidade do concreto durante o processo de mistura e evita a formação de bolhas de ar em torno do agregado, diminuindo a absorção de água do concreto após a mistura.

Como efeito positivo da absorção de água por parte do agregado leve, Rossignolo (2009) relaciona a melhoria das propriedades na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento com a redução do efeito parede e auxilia na cura interna do concreto. Como aspecto negativo o pesquisador relaciona os efeitos no concreto endurecido, dentre os quais destaca os aumentos na retração por secagem e na massa específica e redução na resistência ao fogo.

A pré-saturação do agregado leve, segundo Mehta e Monteiro (2008) dificulta a determinação da relação água/cimento da mistura na dosagem do concreto leve, pois estabelecer um vínculo entre a resistência e a relação água/cimento não pode ser efetivamente aplicada por não se saber a quantidade real da água de amassamento que poderá ser absorvida pelo agregado. Esta questão se torna importante se considerado que alguns tipos de agregados podem absorver até 25% de sua massa seca. Além do que, segundo Mehta e Monteiro (2008) existem agregados na qual a absorção de água pode ocorrer durante semanas.

2.2.2 A mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto leve

A avaliação e controle do teor de umidade do agregado leve são importantes na produção do concreto leve pois, pode interferir significativamente na trabalhabilidade da mistura em função da variação da quantidade de água de

amassamento. Positivamente, a água retida nos poros do agregado leve auxilia na hidratação do cimento à medida que pode promover a cura interna⁶ da mistura.

Rossignolo (2009) recomenda que a ordem de colocação no equipamento de mistura seja a adição dos materiais sólidos e água e, em seguida, agregados leves. Este procedimento é válido para agregados que apresentem absorção de água inferior a 10% após 24 horas de imersão e com alta absorção aos primeiros minutos. Para o caso de agregados que apresentem valores de absorção de água superiores a 10% após 24 de imersão é recomendado a pré-saturação.

Rossignolo (2009) apregoa que para agregados leves com teores de absorção de água inferiores a 10% após 24 horas de imersão, os procedimentos de colocação dos materiais sejam os mesmos adotados para os concretos convencionais, sem a pré-saturação das partículas leves.

Com relação ao transporte, lançamento e adensamento do concreto leve Rossignolo (2009) alerta para as questões relacionadas à segregação das partículas de agregado leve, especialmente para a tendência de flutuação do agregado em função da diferença de massa específica dos componentes da mistura. Segundo o pesquisador, isto pode ser reduzido ou até mesmo evitado com a adição de finos, controle na relação água/cimento e no teor de agregados miúdos.

Para o adensamento das misturas Rossignolo (2009) recomenda o uso de vibradores de baixa frequência e alerta que, embora o concreto celular exija menos esforços das fôrmas que os concretos convencionais em função da menor massa específica, o tempo de vibração é maior, exigindo cuidados maiores com relação ao cimbramento das fôrmas.

2.2.3 Resistência à compressão e massa específica seca

A resistência à compressão do concreto leve está relacionada a qualidade da argamassa e da zona de transição pasta-agregado. A ruptura do concreto leve estrutural normalmente ocorre, diferentemente do concreto convencional, pelo colapso do agregado leve ou da argamassa que o envolve. Desta forma, o aumento na resistência por incremento no consumo de cimento/m³ da argamassa não implica

---

⁶ Cura interna refere-se ao processo pela qual a hidratação do cimento prossegue por causa da disponibilidade de água interna que não faz parte da água de amassamento. A água interna é disponibilizada pelo sistema de poros no agregado leve estrutural que absorve e libera esta água na mistura (ACI 213R-03 (2003)).

em melhora na resistência da mistura, pois é o agregado leve o material determinante na resistência à compressão do concreto leve (AÏTCIN, 2000; ROSSIGNOLO, 2009)

O consumo de cimento no concreto leve, segundo Aïtcin (2000), varia de 400 kg/m³ a 600 kg/m³. Mesmo que exista um limite a partir do qual a resistência é comandada pelas características do agregado leve, o enriquecimento da pasta cimentícia com aditivos e adições minerais melhora o desempenho da mistura sob o aspecto da resistência à compressão (ROSSIGNOLO, 2009)

A resistência à compressão e a massa específica seca são influenciadas pelo tipo, as dimensões e a granulometria do agregado leve (MEHTA; MONTEIRO, 2008; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011). Esse efeito é maior no concreto leve estrutural que no concreto convencional. Isso se justifica porque estes parâmetros nos agregados leves são inversamente proporcionais às suas dimensões. O fator de eficiência (F_{EE}) no concreto leve estrutural, comparado ao obtido no concreto convencional, geralmente é maior (ROSSIGNOLO, 2009). A Figura 2.11 ilustra a relação entre a resistência à compressão e o tipo e granulometria do agregado leve de misturas produzidas com argila expandida brasileira.

FIGURA 2.11 Influência da dimensão do agregado leve na resistência do concreto leve

Fonte: Adaptado de Rossignolo e Agnesini (2011)

Mehta e Monteiro (2008) apregoam que resistência a compressão da ordem de 20 MPa a 35 MPa são obtidos correntemente em concretos leves dosados com consumo de cimento entre 260 a 450 kg/m³ e agregado leve com dimensões entre 9 mm e 13 mm. Segundo esses pesquisadores, o uso de agregados com dimensões maiores que 19 mm e muito porosos, pode levar a concretos com massa específica aparente seca menor que 1440 kg/m³, entretanto, aumenta a possibilidade da mistura não atingir a resistência mínima de 17 MPa.

Para Mehta e Monteiro (2008) a utilização de agregados normais em consonância com agregados leves, tende a aumentar a massa específica e diminuir a incorporação de ar. A consequência imediata pode ser a diminuição da trabalhabilidade da mistura.

A resistência à compressão, a massa específica seca (γ_s) e a relação entre estas duas propriedades, identificada por Spitzner (1994) como fator de eficiência (F_{EE}), calculada pela equação 2.5 são, segundo Rossignolo (2009), os parâmetros mais utilizados para a caracterização do concreto leve estrutural.

$$F_{EE} = \frac{f_c}{\gamma_s} \quad (\text{MPa.dm}^3/\text{kg}) \quad (2.5)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão a j dias de idade, em MPa;

γ_s = Massa específica do concreto seco, em kg/dm³.

A Figura 2.12 ilustra o trabalho de três pesquisadores brasileiros com concretos leves estruturais produzidos com argila expandida brasileira (dimensão máxima característica de 4,8 mm a 12,5 mm), consumos de cimento de 440 kg/m³ a 1300 kg/m³, em diferentes épocas.

Para Rossignolo (2009) a argila expandida brasileira apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente viável na produção de concretos leves estruturais com valores de resistências de até 50 MPa e massa específica seca de 1.400 kg/m³ a 1.800 kg/m³.

FIGURA 2.12 Relação entre a massa específica e a resistência à compressão do concreto leve estrutural com argila expandida brasileira

Fonte: Adaptado de Rossignolo e Agnesini (2011)

A Tabela 2.8 apresenta alguns valores de referência da massa específica do concreto leve estrutural segundo normativas internacionais. A norma da ABNT NBR NM 35 (1995) especifica para o concreto leve valores mínimos de resistência à compressão vinculados à valores máximos de massa específica aparente seca. Além disso, pelos critérios desta norma os agregados miúdos e graúdos devem apresentar massa na condição seca e solta inferior a 1.120 kg/m³ e 880 kg/m³, respectivamente. A Tabela 2.9 apresenta os requisitos de resistência e massa específica seca do concreto leve estrutural, segundo a norma brasileira ABNT NBR NM 35 (1995).

TABELA 2.8 Valores de referência da massa específica aparente para o concreto leve estrutural, preconizados por órgãos normativos internacionais

REFERÊNCIAS NORMATIVAS	MASSA ESPECÍFICA SECA (γ_s) (kg/m³)
- ACI 213R-03 (2003)	$1120 < \gamma_s < 1920$
- EUROCODE 2 (2007)	$900 < \gamma_s \leq 2000$
- NS 3473 E (1998)	$1200 < \gamma_s < 2200$
- CEB-FIP (1977)	$< \gamma_s < 2000$
- RILEM (1975)	$\gamma_s < 2000$

Fonte: Adaptada de Rossignolo (2009)

TABELA 2.9 Valores de referência da massa específica seca para o concreto leve estrutural, preconizados pela norma ABNT NBR NM 35

MASSA ESPECÍFICA SECA (γ_s) (kg/m ³) (Valores máximos)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{c28}) (MPa) (Valores mínimos)
1840	28,0
1760	21,0
1680	17,0

Fonte: Norma ABNT (NBR NM 35, 1995)

2.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

A estimativa da resistência à tração do concreto leve por meio da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT NBR 7222, 2011) é recomendada pela norma ACI 213R (2003). Os valores da resistência à tração dos concretos leves são menores, comparados aos obtidos nos concretos convencionais, chegando a ser de 70% a 100% para concretos de mesma resistência a compressão (ACI 213R, 2013).

Nos concretos produzidos com argila expandida brasileira, segundo Rossignolo (2009), a resistência à tração por compressão diametral atinge valores que podem variar de 6% a 9% da resistência à compressão axial do concreto. A estimativa da resistência à tração por compressão diametral (f_{tc}) em função da resistência à compressão (f_c) para os concretos produzidos com argila expandida brasileira, pode ser feita pela equação 2.6,⁷ proposta pela norma ACI 318 (2011).

$$f_{tc} = 0,48 \cdot f_c^{0,5} \quad (2.6)$$

2.2.5 Módulo de elasticidade e curva tensão-deformação

As deformações do concreto ocorrem em função de ações mecânicas ou do ambiente resultando em fissuras como as decorrentes da retração, por exemplo. Mehta e Monteiro (2008) colocam que as relações tensão (σ) x deformação (ϵ) são complexas por considerar que o concreto não é um material de comportamento

⁷ Equação válida para resistências à compressão (f_c) de 21 MPa a 62 MPa

elástico e as deformações e as restrições não são uniformes e, portanto, as distribuições de tensões são variáveis no elemento estrutural.

O módulo de elasticidade estático de um material sob tensão é determinado em função da declividade da curva Tensão (σ) *versus* deformação (ε) para o material sob carga uniaxial e, no caso do concreto, está diretamente ligado ao tipo e as quantidades utilizadas. Helene e Andrade (2007) identificam vários fatores que podem interferir no resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto, a saber:

- A resistência à compressão;
- A consistência do concreto fresco;
- O volume de pasta por metro cúbico de concreto;
- As condições da realização do ensaio (temperatura, dimensões e umidade do corpo de prova no instante do ensaio);
- Características do agregado graúdo (natureza da rocha e dimensão máxima característica);

O concreto leve produzido com argila expandida brasileira apresenta módulo de elasticidade relativamente baixo, quando comparado ao do concreto convencional, podendo variar de 50% a 80% em misturas com resistências à compressão na faixa de 20 MPa a 50 MPa (ROSSIGNOLO, 2009).

Nos concretos leves produzidos com argila expandida brasileira, estudados por Rossignolo (2005) obteve-se curvas tensão *versus* deformação com configurações de comportamento elástico para carregamentos de 50% a 80% do carregamento último. Nos concretos convencionais, a região elástica se estende por até 60% do carregamento último. Este desempenho indica a maior compatibilidade entre os valores do módulo de elasticidade da matriz cimentícia e do agregado leve. O concreto leve por esse aspecto apresenta maior tenacidade que o concreto convencional (ROSSIGNOLO, 2005, 2009; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

No impedimento da realização do ensaio de módulo de elasticidade, a norma ACI 318 recomenda a estimação do módulo de elasticidade por meio da equação 2.7, válida para concretos leves de massa específica entre 1500 kg/m³ e 2500 kg/m³.

$$E_c = 0,043.\gamma^{1,5}.f_c^{1/2} \quad (2.7)$$

Rossignolo (2005) propõe, para os concretos leves produzidos com argila expandida brasileira, a equação 2.8, válida para misturas que apresentem resistências à compressão menores que 50 MPa.

$$E_c = 0,049.\gamma^{1,5}.f_c^{1/2} \quad (2.8)$$

Onde:

E_c = Módulo de elasticidade estático (MPa)

γ_c = Massa específica aparente seca (kg/m³)

f_c = Resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa)

2.2.6 Durabilidade

A durabilidade do concreto é um tema abrangente e pode ser analisada sob a ótica da resistência do concreto, quando submetido ao ataque de agentes físicos e químicos inseridos no meio e que podem comprometer o desempenho do elemento de concreto enquanto parte da estrutura de concreto. Quando versa sobre este assunto, Aïtcin (2000) é incisivo:

Quando o concreto é submetido a ataque químico externo, existe apenas um modo de reduzir a intensidade dessa agressão: reduzir a porosidade e permeabilidade do concreto para reduzir ou diminuir a velocidade, tanto quanto possível, da penetração dos agentes agressivos. (Aïtcin, 2000, p. 500)

Rossignolo e Agnesini (2011) afirmam que os agregados leves podem interferir significativamente na permeabilidade do concreto leve caso possuam estrutura porosa comunicante. Embora a maioria dos agregados leves artificiais, como por exemplo, a argila expandida, apresente porosidade elevada, a maioria dos seus poros não são interligados. Portanto, nesses casos, são agregados com porosidade fechada e, conseqüentemente, têm baixa permeabilidade.

Este fato, segundo Rossignolo (2009), faz com que, comparativamente, o concreto leve apresente permeabilidade menor ou igual ao concreto convencional, para mesmos níveis de resistência. Contribui para isso, os seguintes fatores:

- a. A relação água/aglomerante no concreto leve é menor que a do concreto convencional, para os mesmos níveis de resistência;
- b. Diminuição das fissuras internas do concreto em função da redução da diferença entre os valores do módulo de elasticidade do agregado leve e da pasta cimentícia;
- c. Melhoria na qualidade da zona de transição pasta-agregado, pela diminuição da relação água/materiais cimentícios nesta interface.

Mehta e Monteiro (2008) atribuem à zona de transição, a fase limitante da resistência do concreto, sendo que melhorias na permeabilidade da pasta por meio da redução das dimensões e do volume dos poros capilares da pasta. No caso do concreto leve, os pesquisadores justificam a baixa permeabilidade deste tipo de concreto e o excelente desempenho frente à durabilidade pela ausência de microfissuração na zona de transição e na interface pasta de cimento–agregado.

Por outro lado, a presença de microfissuras nas interfaces com o aço e o agregado graúdo é um ponto vulnerável à penetração de água e ar, principais vetores para o início da corrosão de armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Kulakowski (2002) a carbonatação é regida pela porosidade da pasta em decorrência da pela relação água/aglomerante do concreto. A sílica ativa, quando dosada em teores de até 20%, provoca modificações na estrutura dos poros à medida que aumenta o volume dos poros de menor diâmetro e diminui a comunicação entre os poros.

Estes efeitos contribuem para a diminuição da absorção de água e aumentam a resistência capilar, melhorando a impermeabilidade da mistura. Para a carbonatação os efeitos da sílica ativa somente são negativos para relações água/aglomerantes superiores a 0,50 (KULAKOWSKI, 2002).

2.2.7 A condutividade térmica

A condutividade térmica ⁸ é a propriedade que caracteriza capacidade de transmissão de calor por condução de um dado material. Portanto, é um parâmetro importante na avaliação, por exemplo, dos elementos verticais (paredes de vedação) e lajes das edificações habitacionais.

Segundo Frota e Schiffer (2001) a condutividade térmica depende da densidade do material (a matéria é mais condutora que o ar contido nos vazios intersticiais), da natureza química do material (os materiais amorfos geralmente são menos condutores que os cristalinos) e da umidade do material (a água é mais condutora que o ar).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a condutividade térmica do concreto leve estrutural é cerca de 50% menor que a observada no concreto convencional. Isso faz do concreto leve um material com melhor desempenho quando exposto ao fogo que o concreto convencional. A Tabela 2.10 mostra alguns valores da condutividade térmica de concretos leve produzidos com argila expandida (AE), enquanto que a Tabela 2.11 mostra os valores indicados pela norma ABNT NBR 15220 (2005).

TABELA 2.10 Valores de condutividade térmica de concreto leve estrutural produzido com argila expandida

AGREGADOS		CONDUTIVIDADE TÉRMICA	Fonte
MIÚDO	GRAÚDO		
Argila Expandida	Argila Expandida	$0,91 \times 10^{-3} \text{ s.cm}^2.\text{°C/cm}$	Mehta e Monteiro (2008)
Areia natural	Argila Expandida	$1,36 \times 10^{-3} \text{ s.cm}^2.\text{°C/cm}$	Mehta e Monteiro (2008)
—	—	(0,58 – 0,86) W/m.K	Holm e Bremner (2000)

Fonte: Adaptado pelo autor

⁸ A condutividade térmica (λ) é definida como sendo o fluxo de calor que passa, na unidade de tempo, através da unidade de área de uma parede com espessura unitária e dimensões suficientemente grandes para que fique eliminada a influência de contorno, quando se estabelece, entre os parâmetros dessa parede, uma diferença de temperatura unitária. (FROTA; SCHIFFER, 2001).

TABELA 2.11 Valores de condutividade térmica para concretos com diferentes valores de massa específica

Massa Específica Seca (kg/m ³)		Condutividade Térmica (λ) (W/mK)
Concreto convencional	2200 - 2400	1,75
Concreto com argila expandida	1600 - 1800	1,05
	1400 - 1600	0,85
	1200 - 1400	0,70
	1000 - 1200	0,46

Concretos com consumo de cimento > 300 kg/m³ e massa específica aparente seca dos inertes > 350 kg/m³

Fonte: Adaptada da norma ABNT NBR 15220 (2005)

A Figura 2.13 ilustra os resultados de condutividade térmica obtidos por Sacht (2008) em concretos produzidos com e sem agregado leve. Utilizou-se a areia natural como agregado miúdo e 2 tipos de argila expandida brasileira (dimensão máxima característica de 5 mm e 12,5 mm), cimento Portland (CP II-E-32), adição mineral (metacaulin) e aditivo superplastificante. O consumo de cimento/m³ de concreto entre 308 kg/m³ e 314 kg/m³.

FIGURA 2.13 Relação entre a massa específica aparente seca e a condutividade térmica (λ) de concretos produzidos com e sem argila expandida brasileira

Fonte: Sacht (2008)

2.3 Concreto leve autoadensável

O concreto leve autoadensável (CLAA) é um tipo de concreto que combina as vantagens do concreto leve estrutural tais como a redução no peso próprio da estrutura, a elevada capacidade de isolamento térmico, o bom desempenho sob a ação do fogo e ataques químicos com as características do concreto autoadensável. Isso faz do CLAA um produto indicado para o uso em pontes e edifícios em que o peso da estrutura pode ser um limitante de projeto (PAPANICOLAOU; KAFFETZAKIS, 2011; CHOI et al., 2006).

Este material pode ser considerado como uma evolução com relação ao concreto autoadensável (CAA), muito por conta das possibilidades geradas pela gama de aplicações deste tipo de concreto. Destacam-se aplicações na indústria do concreto pré-moldados, a redução no peso próprio das estruturas, com consequentes redução no custo das fundações, melhoria das condições de conforto termo-acústico, redução dos custos de armazenagem e transporte no caso da indústria de concreto pré-fabricados (HELA; HUBERTO VÁ, 2005).

São poucas as pesquisas disponíveis na literatura relacionadas ao autoadensável, isso limita o conhecimento das características deste material (BORJA, 2011; GRABOIS; TOLEDO FILHO; CORDEIRO, 2012; KARAHAN et al., 2012; SHI; WU, 2005; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010; WU et al., 2008).

O desenvolvimento de um novo tipo de concreto muitas vezes esbarra na falta de normas, em metodologias de dosagem e experiência com produto. Os principais centros de desenvolvimento do concreto autoadensável na Europa têm elaborado diferentes diretrizes para este tipo de concreto. As diretrizes da *EFNARC - Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete*, são as mais utilizadas no sentido de unificar os procedimentos, projetos e ensaios para a aplicação do concreto leve autoadensável (HELA; HUBERTO VÁ, 2005).

Questões relacionadas aos tipos de agregados leves, composições entre agregados leves e normais, aditivos eficientes para garantir as características do concreto no estado fresco, medidas eficientes para impedir a segregação (flutuação) das partículas leves, desempenho mecânico das misturas enfim, diversas podem ser as perguntas em um universo de poucas respostas.

Grabois (2012), em sua pesquisa com CLAA, utilizando como agregado leve a argila expandida e fibras de sisal e aço, alerta que prevenir a segregação da argamassa com relação ao agregado leve, é uma das grandes questões relacionadas à produção e uso deste tipo de concreto.

2.3.1 A caracterização do concreto leve autoadensável no estado fresco

A caracterização do concreto leve autoadensável (CLAA), pelo que se mostra na literatura, tem sido feita utilizando-se os dispositivos, ensaios e especificações propostos para o concreto autoadensável (CAA).

Segundo Hela; Hubertová (2005) os procedimentos prescritos pelas diretrizes da *EFNARC - Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, são os mais utilizados para avaliar o concreto leve autoadensável no estado fresco.

Além das normas da EFNARC, Bogas, Gomes e Pereira (2012) recomendam as normas European Standart EN 206-1 e Japanese Society of Civil Engineering, Guide to Construction of High Flowing Concrete (JSCE). No Brasil, são utilizadas as especificações e procedimentos de ensaio preconizados pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15823-1 (2010).

Os ensaios de espalhamento (Slump Flow), funil-V, caixa-U, caixa-L e anel-J são usuais para avaliar o concreto leve autoadensável na condição fresca (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; CHOI et al., 2006; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010).

Para Bogas, Gomes e Pereira (2012), os ensaios feitos com os dispositivos da caixa-U e caixa-L não são determinantes na caracterização do CLAA, entretanto, fornecem subsídios consistentes para avaliar a segregação dinâmica.

As normas japonesas (JSCE) relacionam o tempo de escoamento da mistura pelo funil-V e o tempo para a mistura atingir o espalhamento de 500 mm (T_{500}) para estabelecer limites de resistência à segregação do concreto de alta fluidez.

Choi et al. (2006) utiliza estes parâmetros para avaliar misturas de concretos autoadensáveis produzidos com agregados naturais e agregados leves Coreanos. Figura 2.14 ilustra alguns resultados obtidos por estes pesquisadores na caracterização dos concretos no estado fresco.

Destaca-se nessa ilustração, que todas as misturas atendem a pelo menos um dos limites (espalhamento T_{500}) propostos pelas normas japonesas (JSCE) para CAA. Há indicação de que as misturas têm bom desempenho no aspecto da resistência à segregação, muito embora quatro delas apresentem valores que não atendem aos limites de escoamento pelo funil-V. Os limites que relacionam estes parâmetros pela norma JSCE são os delimitados em destaque.

FIGURA 2.14 Relação entre os tempos de espalhamento T_{500} e escoamento pelo funil-V para concretos autoadensáveis feitos com e sem agregados leves Coreanos

Fonte: Adaptada e traduzida de Choi et al. (2006)

Karahan et al. (2012) avaliando o efeito da adição de metacaulin em concretos leve autoadensáveis produzidos com xisto expandido e a incorporação de 0%, 20%, 40% e 60% de adição mineral em substituição à cinza volante, mantidos constantes o teor de finos das misturas, utiliza-se dos resultados de espalhamento pelo tronco de cone, funil-V e caixa-L para avaliar as adições de metacaulin na capacidade de preenchimento e a habilidade passante do CLAA.

Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011) utilizam os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento (Slump Flow), T_{50} , funil-V e caixa-L para concluir que concretos leve autoadensáveis podem ser produzidos com a substituição de até 30% do volume dos agregados naturais por poliestireno expandido (EPS) gerando misturas com densidades maiores que 1900 kg/m^3 que atenderam, na maioria, as condições de autoadensabilidade exigidas para este tipo de mistura pela EFNARC (2005). Os

resultados dos experimentos mostraram que o espalhamento pode diminuir em até 6%. Dependendo do teor de substituição do agregado natural pelo EPS o tempo T_{50} e a fluidez pelo funil-V aumentaram de 23% a 29% e 18% a 48%, respectivamente.

2.3.2 Os materiais e dosagem do concreto leve autoadensável

Na dosagem do concreto leve autoadensável (CLAA) pode se utilizar um método de dosagem do concreto autoadensável (CAA). No entanto, é preciso analisar a conveniência do uso destes métodos, especialmente com relação aos procedimentos de mistura, avaliação das propriedades reológicas do CLAA e as características do agregado leve utilizado na mistura. Conciliar todas estas questões no CLAA é objeto de pesquisas. (CHOI et al., 2006; GRABOIS, 2012; HELA, 2005)

Desta forma, a partir deste ponto serão apresentados, de forma sucinta, alguns exemplos de pesquisas nas quais o CLAA foi produzido com diferentes agregados leves, utilizando procedimentos que culminaram com a dosagem do concreto leve autoadensável, sem que sejam necessariamente identificados como método de dosagem deste tipo de concreto.

- **CHOI et al. (2006)**

Uma metodologia de dosagem para concreto leve autoadensável (CLAA) foi proposta por Choi et al. (2006). Seu método é uma adaptação modificada e aprimorada do método de Nan-Su (SU; HSU; CHAI, 2001). A principal mudança está na estimativa do que o Choi et al. (2006) identifica como PF Value (valor PF).

Choi et al. (2006) realizou pesquisa experimental analisando o desempenho na condição fresca e endurecida de misturas caracterizadas como concreto leve autoadensável de alto desempenho (HLSCC). Os concretos foram produzidos com agregados naturais e leves disponíveis na Coreia. As características físicas destes materiais são relacionadas na Tabela 2.12. O cimento e adição mineral (pó de rhyolite) compõem a fração fina das misturas.

TABELA 2.12 Características físicas dos agregados naturais e leves oriundos da Coreia, utilizados em concretos leves autoadensáveis de alto desempenho

Características Físicas	AGREGADOS NATURAIS		AGREGADOS LEVES	
	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
Massa específica seca (g/cm³)	2,55	2,72	1,86	1,58
Massa unitária (seca – solta) (kg/m³)	1677	1695	1127	793
Absorção (%)	2,43	0,80	13,71	28,09
Porcentagem de sólidos (%)	62,6	62,3	60,3	50,2
Módulo de finura	2,81	6,72	2,64	6,40
Esmagamento (%)	-	15	-	24

Fonte: Adaptado e traduzido de Choi et al. (2006)

A Figura 2.15 mostra os principais passos para a determinação do parâmetro “valor PF” cujo valor é calculado utilizando-se a equação 2.9. A Figura 2.16 ilustra, esquematicamente, as principais etapas do método de dosagem de Nan Su modificado por Choi et al. (2006),

FIGURA 2.15 Fluxograma para a determinação do Valor PF, utilizado na metodologia de dosagem de Choi et al.

Fonte: Adaptado e traduzido de Choi et al. (2006)

$$PF = \frac{\rho_{CG}}{\rho_G} x \left(1 - \frac{S}{a} \right) + \frac{\rho_{CM}}{\rho} x \frac{S}{a} \quad (2.9)$$

Onde:

S/a = Proporção entre o volume de agregados miúdos com relação ao agregado total

ρ_{CG} = Massa unitária na condição seca e compactada do agregado graúdo

ρ_G = Massa unitária na condição seca e solta do agregado graúdo

ρ_{CM} = Massa unitária na condição seca e compactada do agregado miúdo

ρ = Massa unitária na condição seca e solta do agregado miúdo

FIGURA 2.16 Principais etapas do método de Nan-Su modificado e melhorado para a dosagem do CLAA

Fonte: Adaptado e traduzido de Choi et al. (2006)

As misturas foram avaliadas sob os critérios da norma japonesa JSCE. No estado fresco foram feitos ensaios de espalhamento pelo tronco de cone (Slump Flow), T_{500} e caixa U. As misturas atingiram espalhamentos de 600 mm a 700 mm e tempos T_{500} de 3 s a 15 s. Segundo o pesquisador, adequados aos limites estabelecidos pela norma japonesa (JSCE).

Na condição endurecida foram realizados de resistência à compressão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e massa específica seca.

A Figura 2.17 ilustra os valores do fator de eficiência obtidos para os concretos analisados. Em termos gerais, os pesquisadores concluíram que a eficiência estrutural daqueles concretos, tendem a aumentar em 7,5% para misturas produzidas com 75% (mistura 4) de agregado graúdo leve e agregado miúdo normal em relação à concreto de referência (mistura 1 - agregados normais) e diminui em 20% para o caso dos concretos produzidos 100% de graúdo leve e 100% de miúdo normal (mistura 5).

Nos concretos produzidos com agregado miúdo leve e graúdo normal (misturas 6 a 9) a eficiência estrutural aumentou à medida que aumentaram os teores de substituição do agregado miúdo, chegando a 17% e 33% para substituições de 75% e 100% do agregado miúdo natural pelo leve.

FIGURA 2.17 Fator de eficiência estrutural do CLAA produzidos com agregados leves da Coreia

Fonte: Adaptado e traduzido de Choi et al. (2006)

- **Bogas, Gomes e Pereira (2012)**

Bogas, Gomes e Pereira (2012) produziram concretos leve autoadensáveis utilizando argila expandida da península Ibérica (Leca de Portugal e Arlita da Espanha - Dimensão máxima característica de 12,5 mm.) e agregados naturais (areia natural, silicosa) com objetivo de caracteriza-los na condição fresca e na condição endurecida.

As misturas foram dosadas por meio do método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado. Para tanto, as argamassas foram dosadas para obter área de espalhamento relativa (G_m) de 5,3 a 5,9 enquanto que o tempo de escoamento relativo (R_m) foi estabelecido em 1,14 a 1,30.

O cimento foi substituído em 40% do seu volume absoluto por cinza volante. No traço a fração de agregado miúdo foi composta por 60% da areia grossa e 40% da areia fina. A fração de agregado graúdo natural foi resultante da composição que melhor se aproximou da curva granulométrica da Leca.

O estudo foi feito com base em avaliar as alterações nas características de autoadensabilidade das misturas no estado fresco provocadas por variações nos valores das relações Volume de finos/Volume de agregado miúdo (V_p/V_s), Volume de água/Volume de finos (V_w/V_p) e Volume de agregado graúdo (V_g)

As características físicas dos agregados normal e leve utilizados por Bogas, Gomes e Pereira (2012) são mostrados na Tabela 2.13. Os outros componentes foram o cimento tipo I-42.5 R, cinzas volantes e aditivo superplastificante à base de carboxilatos.

Os ensaios para avaliar a autoadensabilidade das misturas foram os usuais (tronco de cone - Slump Flow, funil-V e caixa-U), enquanto que no estado endurecido os pesquisadores lançaram mão dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os limites de referência foram aqueles estabelecidos pelas normas europeias EN 206-9 e normas japonesas JSCE.

Os resultados dos ensaios realizados em misturas produzidas com diferentes valores das relações V_p/V_s , V_w/V_p e V_g e tipos de agregados, são a base que fundamentam as conclusões da pesquisa. Os valores obtidos nos diversos ensaios são representados graficamente, conforme ilustrado na Figura 2.18, na Figura 2.19 e na Figura 2.20, exemplificando o ensaio de espalhamento (Slump flow). em função das relações V_p/V_s e V_w/V_p e volume do agregado graúdo (V_g).

Dentre os diversos ensaios cita-se os de espalhamento (Slump Flow), tempo para atingir o espalhamento de 500 mm (T_{500}), tempo de escoamento pelo Funil-V, habilidade passante pela caixa-L, resistência à segregação dentre outros, propostos na norma Europeia EN 206-9 e na norma Japonesa JSCE.

TABELA 2.13 Caracterização físicas dos agregados naturais (areia silicosa) e leve (argila expandida Iberiana)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	AGREGADOS NATURAIS		AGREGADOS LEVES	
	Areia fina	Areia grossa	Leca 4 - 12	Arlita AF 7
Massa específica seca (kg/m³)	2.620	2.610	1.068	1.290
Massa unitária (seca – solta) (kg/m³)	1.416	1.530	613	738
Absorção (24 h) (%)	0,2	0,5	12,3	12,1
Porosidade total (%)	-	-	60	52
Fração granulométrica (d/D) (mm)	0 / 2	0 / 4	4 / 11,2	3 / 10

Fonte: Adaptado e traduzido de Bogas, Gomes e Pereira (2012)

FIGURA 2.18 Resultados do ensaio de espalhamento para misturas com valores da relação V_p/V_s , de 0,50 a 0,75, produzidos com leca de Portugal

Fonte: Adaptado e traduzido de Bogas, Gomes e Pereira (2012)

FIGURA 2.19 Resultados do ensaio de espalhamento (Slump Flow) para misturas com valores da relação V_w/V_p de 0,70 a 1,00, produzidos com leca de Portugal

Fonte: Adaptado e traduzido de Bogas, Gomes e Pereira (2012)

FIGURA 2.20 Resultados do ensaio de espalhamento para misturas com diferentes valores de volume de gráudo (V_g), produzidos com leca de Portugal

Fonte: Adaptado e traduzido de Bogas, Gomes e Pereira (2012)

Bogas, Gomes e Pereira (2012) situam este trabalho como o primeiro a pesquisar concreto leve autoadensável sob a ótica de sua caracterização na península Ibérica. Dentre as várias respostas obtidas pelos pesquisadores muitas delas merecem destaque, como por exemplo, a obtenção de concretos leves autoadensáveis com adequada estabilidade, com resistências à compressão que variaram de 38,1 MPa a 46,9 MPa, utilizando a Leca e 60,8 MPa utilizando arlita.

As misturas se enquadram na classe de densidade D1,8 - D2,0 com teor de finos de 490 kg/m³ a 599 kg/m³ com 33% de cinzas volantes, em massa. Além disso conclui-se que CLAA pode ser produzido com volumes de até 325 l/m³ de agregado gráudo (V_g) sem segregação. Este limite pode ser ajustado para outros valores de V_p/V_s e agregados de diferentes tipos e tamanhos. Com 300 l/m³ de agregado gráudo e proporções de V_p/V_s entre 0,55 e 0,75, correspondendo a V_s/V_m entre 0,41 e 0,49 é possível produzir concretos leve autoadensáveis com boas características de autoadensabilidade e adequada resistência à segregação.

A conclusão é a mesma quando o valor constante de 0,75 é mantido constante para V_p/V_s e V_w/V_p variando entre 0,8 e 1,0. Para V_w/V_s menor que 0,8 a velocidade de deformação do CLAA é muito baixa, o que torna sua aplicação menos apropriada. Além do mais, misturas com V_w/V_p em torno de 1,0, estão ligadas a argamassa de baixa viscosidade, por conseguinte, menores robustez e estabilidade.

Para Bogas, Gomes e Pereira (2012) os ensaios que avaliam a habilidade passante pela caixa-U e caixa-L não são fatores determinantes para a caracterização do CLAA, desde que o volume de agregados não seja muito alto. O tempo de escoamento dos concretos autoadensáveis normais foi 30% maior do que nos concretos leves autoadensáveis com trabalhabilidade similar.

- **Uygunoglu e Topçu (2011)**

Uygunoglu e Topçu (2011) desenvolveram concretos leves autoadensáveis (CLAAs) utilizando como agregados leves pedra-pomes, turfas vulcânicas e diatomita com objetivo de avaliar a influência do tipo de agregado leve na trabalhabilidade do concreto leve autoadensável.

As misturas foram dimensionadas de tal forma que seus constituintes atingissem o máximo da compactação e, conseqüentemente, o mínimo de vazios. Ajustes na quantidade de água e aditivo permitiram a obtenção de misturas com diferentes características no estado fresco. Os concretos (15 misturas) foram produzidos com cimento Portland (CEM I 42.5R), adições de filer calcário e cinza volante ($\leq 125 \mu\text{m}$) e aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. Utilizou-se areia natural como agregado miúdo, em todas as misturas. As características físicas dos agregados são mostradas na Tabela 2.14.

TABELA 2.14 Caracterização física dos agregados utilizados no CLAA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Areia lavada, natural	Agregado Graúdo (4mm / 16mm)				
		Pedra Pome	Turfas Vulcânicas	Diatomita	Peneiras (mm)	% de material passante
Massa específica (kg/m ³)	2590	1840	2040	2230		
Massa Unitária seca e solta (kg/m ³)	-	739	762	435	16	100
Absorção de água (%)	3,73	28,75	23,82	94,24	8	59
Abrasão Los Angeles					4	46
Classe (Norma TS EN 1097-2)	-	AB ₅₃	AB ₅₀	AB ₆₅	2	39
Desgaste abrasivo (%)	-	52,62	48,66	64,1	1	27
Módulo de Finura	2,07				0,5	17
					0,25	9

Fonte: Adaptada e traduzida de e Uygunoglu e Topçu (2011)

Os concretos foram dosados com cimento e cinzas volantes, com diferentes relações água/materiais ligantes (0,28 – 0,31 – 0,34 -0,36). A dosagem do aditivo superplastificante, em termos de massa de finos, foi de 1,7% a 2,6%. Para auxiliar na coesão da mistura utilizou-se adição mineral de filer calcário e cinza volante. O teor de finos (cimento = 450 kg/m³, cinza volante = 50 kg/m³ e filer calcário = 100 kg/m³) e a granulometria dos agregados foram mantidos constantes em todas as misturas. Obteve-se CLAAAs com massas específicas secas que variaram de 1.640 kg/m³ (diatomita) a 1.814 kg/m³ (turfa vulcânica)

Os agregados foram utilizados na condição saturada superfície seca e ensaiados para atingir o máximo de compactação das partículas. Os aditivos químicos superplastificantes e incorporadores de ar, dosados em função da massa de cimento, foram utilizados os para auxiliar na fluidez e prevenção contra a segregação das partículas. Os ensaios e os parâmetros para avaliação da trabalhabilidade (capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação) das misturas foram os estabelecidos pelas normas da EFNARC (2005).

A Figura 2.21 ilustra o desempenho dos concretos com relação à capacidade de preenchimento, avaliados por meio dos ensaios realizados com o cone de Abrams (tempo para atingir o espalhamento de 500 mm – T₅₀₀) e o tempo de escoamento no Funil-V no instante t₀.

FIGURA 2.21 Relação entre os tempos de espalhamento (T₅₀₀) e de escoamento da mistura no funil-V no instante t₀

Fonte: Adaptada e traduzida de Uygunoglu e Topçu (2011)

A Figura 2.22 ilustra o desempenho das misturas de concreto leve autoadensável produzidas com pedra-pome, turfa vulcânica e diatomita na avaliação da habilidade passante pela caixa-L em função da relação água/materiais finos.

FIGURA 2.22 Habilidade passante do CLAA produzido com diatomita, pedra-pome e turfa vulcânica pela caixa – L

Fonte: Adaptada e traduzida de Uygunoglu e Topçu (2011)

Em termos gerais, Uygunoglu e Topçu (2011) afirmam que as propriedades do CLAA são influenciadas pelas características do agregado leve tais como a massa unitária (solta – seca) e a forma e rugosidade da superfície da partícula. Segundo os pesquisadores, os experimentos indicaram que o aumento da relação água/finos (w/p) tem maior influência que as características do agregado leve.

Os concretos produzidos com pedra-pome tiveram elevada capacidade de preenchimento e habilidade passante com baixas relações w/p, muito em função das características (forma e baixa massa unitária seca) do agregado, enquanto que para relações w/p elevadas, a segregação das partículas pode ser prevenida com o uso de aditivos incorporadores de ar.

Uygunoglu e Topçu (2011) reconhecem que relações w/p superiores a 0,38 melhoram a capacidade de preenchimento e habilidade passante das misturas à medida que é aumentada a lubrificação entre as partículas dos agregados e, com isso diminui a viscosidade da mistura. No entanto, relações w/p elevadas diminuem a resistência a segregação. Uygunoglu e Topçu (2011) recomendam para concretos

leves autoadensáveis, confeccionados com pedra pome, turfas vulcânicas e diatomita, com trabalhabilidade adequada, relações água/finos (w/p) de 0,28 a 0,34.

• BORJA (2011)

Borja (2011) desenvolveu concretos leve autoadensáveis (CELA) a partir de traços de concreto leve estrutural (CLE) produzidos com areia natural e a argila expandida brasileira do tipo AE-0500 e AE-1506 como agregado leve.

Os concretos leves foram dosados e ajustados pelo método ACI 211.2-98 e foram utilizados para obter os CELAs, produzidos com adições minerais, aditivos plastificantes e superplastificantes, agregados naturais e argila expandida brasileira.

Definidas as composições do concreto leve estrutural (CLE) de referência foram feitas as substituições do cimento Portland por metacaulin e cinza de biomassa de cana-de-açúcar e, por tentativas (erros e acertos), fez-se incrementos nos teores de aditivo superplastificante até atingir o espalhamento (Slump Flow Test) mínimo de 500mm, fixado pelo pesquisador.

As adições minerais (metacaulin e cinza de biomassa de cana de açúcar) foram utilizadas em substituição à massa de cimento Portland (CP II Z 32 - RS) em teores que variaram de 0% a 20%. Tabela 2.15 mostra os valores obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados utilizados nos experimentos.

TABELA 2.15 Caracterização física dos agregados utilizados no CLAA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Areia lavada, natural	AGREGADO LEVE (Argila expandida)	
		AE-0500	AE-1506
Massa específica (kg/m ³)	2640	1320	970
Massa Unitária seca e solta (kg/m ³)	1570	815	544
Absorção de água (AB _{24h}) (%)	-	15,3	13,5
Dimensão máxima característica (mm)	0,600	4,76	19,0
Módulo de Finura	1,68	3,82	6,64

Fonte: Adaptada de Borja (2011)

O traço de concreto leve identificado por CEL 80-20 (80% de AE-0500 e 20% de AE-1506) foi o escolhido entre três traços para ser o traço base para a definição do concreto estrutural leve autoadensável (CELA) por apresentar melhor desempenho com relação à resistência a compressão, massa específica seca e durabilidade.

A Figura 2.23 ilustra os valores obtidos para o fator de eficiência estrutural para os concretos estrutural leve autoadensáveis pesquisados por Borja (2011).

FIGURA 2.23 Caracterização mecânica: Fator de eficiência estrutural do concreto estrutural leve autoadensável produzido com argila expandida brasileira

Fonte: Adaptado de Borja (2011)

Na avaliação de Borja (2011), os concretos identificados por concreto estrutural leve autoadensável (CELA) atenderam aos requisitos de autoadensabilidade mínimos preconizados pela norma ABNT 15823 (2010) para classifica-los como concretos autoadensáveis, podendo se acrescentar o adjetivo leve, considerando-se que os valores da massa específica seca das misturas são inferiores a 2.000 kg/m³.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as principais etapas experimentais envolvidas na caracterização dos materiais, dosagem e caracterização dos concretos autoadensáveis com vistas a atingir os objetivos propostos na pesquisa.

A partir da seleção dos materiais (areia lavada e pedra britada de basalto) disponíveis em Maringá - PR. e região, foi dosado o concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) utilizando-se o método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado. Conhecida as características físicas e mecânicas do CAA_{REF} , foram dosados os concretos autoadensáveis com argila expandida do tipo AE-1506(CAA_{AE}).

A dosagem dos concretos autoadensáveis com argila expandida (CAA_{AE}) foi feita por meio da substituição do volume de agregado gráúdo natural (pedra britada do basalto) do CAA_{REF} pelo volume equivalente de agregado gráúdo leve (argila expandida brasileira). As substituições, nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, foram feitas em termos de volume absoluto, dadas as diferenças entre as massas específicas dos agregados gráúdos envolvidos no estudo.

Os outros materiais foram fornecidos pelos fabricantes e empresas da região. O cimento do tipo CP V-ARI pela Votorantin Cimentos S.A, a sílica ativa pela Companhia de Ferro Ligas da Bahia – Ferbasa (Pojuca – BA), a argila expandida AE-1506 pela Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda (Várzea Paulista – SP) e o aditivo superplastificante pelo Grupo Extracon (Maringá-PR.)

As misturas foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Concretos Especiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) utilizando betoneira estacionária. As avaliações físicas e mecânicas dos concretos autoadensáveis (CAA) foram realizadas de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Na condição fresca os concretos autoadensáveis foram avaliados por meio dos ensaios de espalhamento (Slump Flow), funil-V, anel-J, caixa-L e coluna de segregação) propostos pelo conjunto de normas ABNT NBR 15823-2 (2010), ABNT NBR 15823-3 (2010), ABNT NBR 15823-4 (2010), ABNT NBR 15823-5 (2010) e ABNT NBR 15823-6 (2010).

Na condição endurecida foram moldados exemplares, constituídos de pelo menos 12 corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm), utilizados para determinar a resistência à compressão (f_{cj}) nas idades de 3, 7 e 28 dias, resistência à tração por compressão diametral (f_{tcj}) nas idades de 7 e 28 dias, módulo de elasticidade estático (E_{sc}) e coeficiente de Poisson (ν) (28 dias), massa específica (γ_s), absorção de água (Ab_{24h}), e índice de vazios (I_v) aos 28 dias de idade, respectivamente.

Para avaliar as misturas sob os aspectos da durabilidade e característica térmica, foram realizados os ensaios de carbonatação, utilizando câmara de carbonatação acelerada e os ensaios de condutividade térmica, respectivamente. Estes experimentos foram feitos no Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), Pirassununga – SP.

Os resultados dos experimentos permitiram avaliar os efeitos que as substituições no volume absoluto da pedra britada de basalto pelo volume absoluto equivalente de agregado leve (argila expandida) puderam provocar quando comparados os parâmetros de dosagem, as características físicas e mecânicas das misturas com e sem a argila expandida. A Figura 3.1 ilustra esquematicamente as principais etapas da pesquisa.

FIGURA 3.1 Fluxograma de ilustração das principais atividades para a definição dos concretos leves autoadensáveis a partir do traço de referência

Fonte: O autor (2015)

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 O cimento Portland, a sílica ativa e o aditivo superplastificante

A maioria dos materiais (os agregados, o cimento Portland e o aditivo superplastificante) utilizados na produção dos concretos desenvolvidos nesta pesquisa, foram os disponíveis em Maringá – PR e região. As exceções ficam por conta da adição mineral (sílica ativa) e a argila expandida do tipo AE-1506. As principais características físicas destes materiais são apresentadas no ANEXO 1.

O cimento usado na produção dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) produzido pela empresa Votorantim Cimentos S.A. Este tipo de cimento, utilizado correntemente na indústria de concreto pré-moldados, não é encontrado facilmente no comércio varejista. A despeito desta dificuldade, o uso do CP V-ARI na pesquisa fundamenta-se no fato de ser o cimento Portland com maior finura e menores quantidades de adições na comparação, por exemplo, com os cimentos Portland Compostos (CP II).

A sílica ativa, fornecida pela Tecnosil Sílica Ativa (Itupeva-SP.) e fabricada pela Companhia de Ferro Ligas da Bahia – Ferbasa (Pojuca – BA) foi dosada nos concretos em substituição ao cimento Portland, com a finalidade de melhorar a coesão das misturas. Utilizou-se o aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico, Gleniun®51, fabricado pela empresa Basf do Brasil S.A e fornecido pela empresa Extracon Concretos Ltda (Maringá-PR.). A Figura 3.2 identifica e ilustra o cimento Portland, a sílica ativa e o aditivo superplastificante.

FIGURA 3.2 Cimento Portland CP V-ARI (Votoran) - Sílica ativa (Ferbasa) e Aditivo superplastificante - Gleniun®51 (BASF)

Fonte: O autor (2015)

3.1.2 O agregado Miúdo

Na confecção dos concretos foi utilizado como agregado miúdo uma composição de duas areias natural, quartzosa originária do Rio Paraná, no município de Porto São José – PR., encontradas e identificadas no mercado de Maringá-PR, como areia fina e areia média. Neste trabalho estes agregados miúdos foram identificados como areia 1 (AF₁) e areia 2 (AF₂). Foram dosados em massa, secos ao ar, com proporcionamento fixado em 50% de cada um deles na composição da fração de agregado miúdo das misturas. A Figura 3.3 ilustra as duas areias utilizadas na produção dos concretos autoadensáveis desta pesquisa. A caracterização física destes agregados pode ser vista no ANEXO 1 deste trabalho.

FIGURA 3.3 Areia lavada natural / Areia 1 e Areia 2 - Rio Paraná / Porto São José–PR

Fonte: O autor (2015)

3.1.3 O agregado Graúdo

Considerando que os concretos produzidos nesta pesquisa são resultados da iteração de agregados graúdos (pedra britada de basalto e argila expandida) com características físicas diferenciadas, especialmente sob o aspecto da forma geométrica e massa específica, julgou-se importante avaliar os agregados disponíveis em duas pedreiras de Maringá e região.

Desta forma, foi realizada uma seleção de agregado graúdo disponíveis comercialmente na região. No primeiro momento, por meio de análise visual e experiência do pesquisador, foram escolhidos agregados que mais se aproximassem da forma arredondada da argila expandida AE-1506 – CINEXPAN. Foram selecionadas amostras identificadas comercialmente pelas pedreiras como sendo brita 1, brita 1/2' e brita 5/8" (16mm).

A Figura 3.4 ilustra duas opções fornecidas pela Pedreira 1 enquanto que a Figura 3.5 ilustra as opções possíveis na Pedreira 2.

FIGURA 3.4 Pedra britada de basalto – Pedreira 1 – BRITA 5/8” (a) BRITA 1 (b)

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 3.5 Pedra britada de basalto – Pedreira 2 – BRITA 1/2” (a) BRITA 1 (b)

Fonte: O autor (2015)

Dentre os agregados graúdos avaliados, utilizou-se a pedra britada produzida pela Pedreira 1 (Figura 3.4 (a)), identificada comercialmente por brita 5/8” ou 16mm. A escolha deste material foi feita com base na forma do agregado. Os resultados dos ensaios de índice de forma (ANEXO 1 - Tabela AN 1-4), confirmam a forma arredondada deste agregado, beneficiado em britadores do tipo VSI.⁹

⁹Os impactadores de eixo vertical VSI fazem o beneficiamento da rocha por meio de um rotor central que lança as partículas de material contra uma câmara de britagem (cominuição rocha-contra-rocha) produzindo agregados mais uniforme em termos de granulometria e com formato cúbico (METSO MINERALS)

A Figura 3.6 ilustra o agregado graúdo selecionado – Brita 16 mm / Catedral (a) e a comparação das dimensões e forma dos agregados graúdos (brita 16 mm – Catedral / Brita 1/2” – Extracon) e a argila expandida AE-1506 (b).

FIGURA 3.6 Agregados graúdos: pedra britada do basalto (brita 16mm) e argila expandida AE-1506 (Cinexpan)

Fonte: O autor (2015)

A argila expandida AE-1506 foi utilizada como agregado graúdo nas composições dos concretos produzidos na pesquisa. O agregado leve, fabricado pela empresa Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda (Várzea Paulista – SP), identificada por AE-1506, que se caracteriza por apresentar grãos de tamanhos de 6 mm a 15 mm. Segundo o fabricante, esse agregado leve é produzido em forno rotativo, pelo processo de nodulação em temperaturas médias de 1.100°C, que apresenta forma arredondada com uma camada externa de baixa porosidade.

A argila expandida AE-1506 foi fornecida em embalagens de 50 litros. Antes da sua utilização o material foi espalhado, homogeneizado e seco à sombra em área coberta. Após a secagem o material foi peneirado (peneira de malha quadrada, 5 mm) e armazenado à sombra.

A Figura 3.7 ilustra algumas etapas destes procedimentos de preparação do agregado leve. Os ensaios de caracterização física da argila expandida AE-1506 são apresentados no ANEXO 1 deste trabalho.

FIGURA 3.7 Preparação da argila expandida AE-1506: in natura (a) após secagem ao ar (b) Peneiramento na peneira de malha 5mm (c)

Fonte: O autor (2015)

3.2 A dosagem do concreto autoadensável de referência

O concreto autoadensável de referência (CAA_{ref}) foi dosado pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado. Originalmente o método é aplicado considerando os seguintes preceitos:

1. O teor de ar incorporado é fixado em 2%;
2. O teor do volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) é limitado a 50% do volume de sólidos do agregado graúdo, ou seja, $V_{ap} = 0,500 \text{ m}^3/\text{m}^3$;
3. O conteúdo de agregado miúdo é fixado em 40% do volume de argamassa, ou seja, a relação entre o Volume de miúdos e o Volume de argamassa (V_s/V_m) = 0,40;
4. A relação entre o Volume de água e o Volume de finos (V_w/V_p) é assumida entre 0,9 a 1,0 em volume, dependendo das propriedades dos materiais finos (cimento Portland e adições minerais) utilizados;
5. O teor de aditivo superplastificante (Sp/p) e a relação V_w/V_p são determinados experimentalmente de modo a garantir a autoadensabilidade da mistura;

As modificações que foram feitas na metodologia proposta por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) são relacionados parâmetros que definem o volume de

agregado graúdo da mistura (V_g) e a fração de agregados miúdos no volume de argamassa da mistura. Foram feitas as seguintes alterações:

- Volume aparente de agregado graúdo (V_{ap}) de 0,50 para 0,57 m^3/m^3 ;
- Relação entre o volume de miúdo e o volume de argamassa (V_s/V_m) de 0,40 para 0,47.

A seguir, utilizando o roteiro experimental proposto por Nunes (2001), serão apresentadas as principais etapas envolvidas no estudo de dosagem do concreto de referência (CAA_{REF}) desenvolvido nesta pesquisa. O memorial de cálculo do desenvolvimento da dosagem do CAA_{REF}, utilizando o método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado, pode ser observado no ANEXO 2 deste trabalho.

3.2.1 Determinação do teor de substituição do cimento pela adição mineral

O teor de substituição do cimento Portland pela adição mineral (sílica ativa) foi determinado por meio de ensaios experimentais realizados nas pastas produzidas com estes materiais para os diferentes teores de substituição analisados. O principal ensaio foi o de espalhamento da pasta, feito com uso do dispositivo tronco-cônico mostrado na Figura 3.8.

FIGURA 3.8 Ensaios de pasta: dispositivo tronco-cônico (a) Configuração típica do espalhamento da pasta (b)

Fonte: O autor (2015)

3.2.1.1 Dosagem da pasta

As quantidades de materiais das pastas compostas por cimento Portland, adição mineral (sílica ativa) e água, cujas taxas de substituição são mostradas na Tabela 3.1 foram determinadas a partir das equações 3.1 e 3.2. Foi produzido cerca de 1,5 litros de pasta para cada um dos traços.

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p} \right) \cdot V_p = 1,0 \quad \text{ou seja,} \quad V_p = \frac{1,0}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (3.1)$$

$$(1-F) V_p + F V_p = V_p \quad \text{onde} \quad (3.2)$$

V_p = Volume absoluto de finos

V_w = Volume de água

F = Porcentagem de substituição do cimento Portland pela adição mineral desconsiderando-se o volume de ar;

$(1-F) \cdot V_p$ = Volume absoluto do cimento Portland

$F \cdot V_p$ = Volume absoluto da adição mineral

TABELA 3.1 Teores de substituição do cimento Portland pela adição mineral de sílica ativa

PORCENTAGEM DE MASSA DE ADIÇÃO MINERAL NA MASSA DE FINOS	F (%)	COMPOSIÇÃO DA PASTA DE FINOS EM PORCENTAGEM DO VOLUME ABSOLUTO
0	0	100% cimento Portland
5	6,7	93,3% cimento Portland + 6,7% sílica ativa
10	12,5	87,5% Cimento Portland + 12,5% sílica ativa
15	17,7	82,3% Cimento Portland + 17,7% sílica ativa
20	22,3	77,7% Cimento Portland + 22,3% sílica ativa

Fonte: O autor (2015)

3.2.1.2 O ensaio de espalhamento da pasta

Para cada um dos teores de substituição relacionados na Tabela 3.1 foram elaboradas quatro dosagens de pastas com diferentes relações volumétricas água/finos (V_w/V_p) e realizados ensaios de espalhamento da pasta, utilizando-se o dispositivo tronco-cônico mostrado na Figura 3.8. Duas medidas ortogonais do

espalhamento, permite a determinação da área de espalhamento relativa da pasta (G_p), calculado pela equação 3.3.

$$G_p = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1,0 \quad (3.3)$$

d = Média de duas medidas ortogonais do diâmetro de espalhamento da pasta

d_0 = Diâmetro da base do molde tronco-cônico ($d_0 = 100$ mm)

Os ensaios de espalhamento forneceram pelo menos três pares de valores (G_p ; V_w/V_p) que ajustados matematicamente por meio de regressão linear, auxiliam na determinação dos parâmetros β_p e E_p definidos no item 2.1.3 deste trabalho.

Adotou-se o ajuste por meio de uma equação de reta. Uma vez conhecida a curva de comportamento de deformabilidade da pasta, o parâmetro β_p , é numericamente representado pela ordenada na origem da reta de ajuste, enquanto que o fator de deformação (E_p), é indicado pela inclinação da reta.

Nunes (2001) argumenta que a composição de finos que apresentar maior valor de β_p exige quantidade maior de água para apresentar uma dada deformação no ensaio de espalhamento. A pesquisadora recomenda valores de G_p compreendidos entre 1,0 e 4,0 o que corresponde a espalhamentos da pasta com valores entre 141 mm e 224 mm.

3.2.1.3 Procedimentos de mistura da pasta

As diversas pastas foram misturadas em um misturador mecânico com cuba de capacidade para 5 litros, pá misturadora de movimento planetário, com duas velocidades de mistura (baixa – 62 ± 5 rpm e alta – 125 ± 10 rpm). A Figura 3.9 ilustra o equipamento utilizado na mistura das pastas.

FIGURA 3.9 Misturador mecânico (argamassadeira), capacidade 5 litros, com 2 velocidades de mistura

Fonte: O autor (2015)

Adotou-se a seguinte sequência para a colocação e mistura dos componentes da pasta (NUNES, 2001):

- 1º. Fez-se a mistura do cimento e a adição mineral manualmente por 30 segundos;
- 2º. Com o material na cuba da argamassadeira, adicionou-se 80% da massa de água prevista e misturou-se os componentes na velocidade lenta por 60 segundos;
- 3º. Limpou-se o material aderido às paredes da cuba e da pá, utilizando no máximo 30 segundos na operação;
- 4º. Reiniciou-se a mistura na velocidade baixa por mais 60 segundos;
- 5º. Em seguida, adicionou-se o restante da água prevista (20%) e misturou-se os componentes por mais 60 segundos na velocidade baixa. Ao final desta etapa fez-se a limpeza da cuba e da pá de mistura utilizando no máximo 30 segundos;
- 6º. Deixou-se a mistura em repouso por 60 segundos;
- 7º. Por fim, misturou-se os componentes em velocidade alta por 30 segundos. Neste ponto a pasta estava pronta para o ensaio de espalhamento.

3.2.2 Determinação do teor de aditivo superplastificante no CAA

Nesta fase foram elaboradas argamassas cujo volume absoluto de material fino (cimento Portland + sílica ativa) (V_p) e a porcentagem de substituição do cimento Portland (CP V-ARI) pela adição mineral (sílica ativa) (F), foram determinados por meio dos ensaios de pastas.

Para tanto, foram produzidas argamassas mantendo-se constante o teor de agregado miúdo (V_s) enquanto que o teor de aditivo superplastificante (Sp/p) e a relação água/finos (V_w/V_p) são modificados até a obtenção de área relativa de espalhamento relativo (G_m) igual a 5 e tempo de escoamento relativo (R_m) igual a 1. Nesta fase foram determinados a dosagem do superplastificante (Sp/p) e a relação água/finos (V_w/V_p) que produzam argamassas com fluidez e coesão adequadas.

3.2.2.1 Dosagem das argamassas

A composição das argamassas em termos de volume absoluto de finos (V_p), para uma dada relação V_w/V_p , foi obtido por meio da equação 3.4.

$$V_s + V_p + \left(\frac{V_w}{V_p} \right) V_p = 1,0 \quad \text{onde:} \quad (3.4)$$

V_w/V_p = relação volume de água/Volume de finos

V_s = Volume absoluto de agregado miúdo ⁽¹⁰⁾

V_p = Volume absoluto de finos

Nesta pesquisa, considerando o uso do agregado leve, o valor de V_s adotado foi de 0,47 considerando que o aumento no teor de miúdos proporcionará misturas com maiores teores de argamassa. Desta forma, considerando a equação 3.4 foram estimados os volumes absolutos de cimento e adição mineral para cada traço.

¹⁰ O método de dosagem proposto por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) estabelece que o volume de agregado miúdo (V_s) deve corresponder a 40% do volume da argamassa (V_m) ou seja, $V_s = 0,40.V_m$.

Nunes (2001) sugere que para situações em que a fração de agregado miúdo é feita pela composição de dois agregados, o volume absoluto de cada um destes agregados na composição da argamassa pode ser determinado por meio das equações 3.5 e 3.6.

$$V_{s1} = p_1 \cdot \frac{V_s}{1 - ksf_1} \quad (3.5)$$

$$V_{s2} = p_2 \cdot \frac{V_s}{1 - ksf_2} \quad (3.6)$$

Onde:

p_1 e p_2 = representa as frações, em porcentagem, de cada agregado miúdo na composição da argamassa;

ksf_1 – ksf_2 = são as porcentagens das partículas dos agregados 1 e 2 consideradas como material fino, segundo a granulometria dos agregados.

A fração de agregado miúdo das argamassas produzidas nesta etapa da metodologia de dosagem do CAA foi uma composição entre as duas areias natural, identificadas como areia 1 (AF₁) e areia 2 (AF₂).

A proporção de cada uma das areias no traço, em massa, foi de 50% o que equivale a 50,1% e 49,9% em volume, respectivamente. A fração fina da areia 1 (ksf_{AF1}) é de 8,2% enquanto que a da areia 2 (ksf_{AF2}) é de 2,8%.

Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) consideram como material fino partículas < 0,09mm, enquanto que Nunes (2001) as partículas menores que 0,074mm. Neste trabalho são consideradas como partículas finas do agregado miúdo a fração de grãos com diâmetro nominal menor que 0,149 mm.

Outras informações, relativas à caracterização física destes agregados, podem ser obtidas no Anexo 1. A Tabela 3.2 relaciona alguns parâmetros das argamassas produzidas nesta etapa.

TABELA 3.2 Dosagem das argamassas utilizadas na definição do teor de aditivo superplastificante na composição do CAA

Volume de argamassa por amassada		1,3 litros	
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)		12,5 %	
Volume de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (Vs)		0,47	
Massa da areia em relação à massa de agregado miúdo (m ₁ /M _s)		0,50	
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA	Teor de aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p) (%)	Volume de Finos (V _p) (m ³ /m ³)	Volume de água em relação ao volume de finos (V _w /V _p) (m ³ /m ³)
ARG - 1	0,60	0,259	1,050
		0,252	1,100
		0,247	1,150
ARG - 2	0,80	0,259	1,050
		0,252	1,100
		0,247	1,150
ARG - 3	1,00	0,270	0,960
		0,268	0,980
		0,265	1,000
ARG - 4	1,20	0,269	0,970
		0,266	0,990
		0,252	1,100

OBSERVAÇÃO:

Os valores de apresentados se referem ao volume absoluto dos materiais finos (cimento Portland, sílica ativa) e agregados miúdos (areia lavada, natural, quartzosa).

Fonte: O autor (2015)

3.2.2.2 Dosagem do aditivo superplastificante

A estimativa do teor ideal de aditivo superplastificante (Sp/p), dosado em termos de porcentagem da massa líquida em relação à massa de finos (cimento Portland + sílica ativa) do CAA, foi feita utilizando-se os índices de deformabilidade (G_m) e de viscosidade (R_m), obtidos nos ensaios de espalhamento e fluidez da argamassa, respectivamente, determinados por meio das equações 3.7 e 3.8.

$$G_m = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1,0 \quad (3.7)$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (3.8)$$

Onde:

d = Média de duas medidas ortogonais do diâmetro de espalhamento

d_0 = Diâmetro da base do molde tronco-cônico

t = Tempo de escoamento da argamassa pelo funil

Os valores do índice G_m foram calculados para espalhamentos que variaram de 200 mm a 280 mm, enquanto que o índice R_m foram determinados para tempos de escoamento no funil-V para argamassas de 5 s a 20 s (NUNES, 2001).

Conhecidos os pares de resultados (S_p/p ; G_m/R_m) das diversas argamassas dosadas segundo os parâmetros mostrados na Tabela 3.2, fez-se o ajuste deste conjunto de valores por meio de regressão linear.

Nunes (2001), seguindo a metodologia de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) define o teor de aditivo superplastificante (S_p/p) a ser adotado na dosagem do CAA, por meio de uma série de experimentos em argamassas, cujos resultados ajustados a uma equação de reta, estabeleça a relação G_m/R_m igual a 5,0.

A Figura 3.10 mostra os dispositivos utilizados para avaliar o espalhamento e a fluidez das argamassas por meio da determinação dos índices de deformabilidade G_m (área relativa de espalhamento) e de viscosidade R_m (tempo de escoamento relativo) das diversas argamassas avaliadas nesta etapa.

FIGURA 3.10 Dispositivos de avaliação do espalhamento e viscosidade da argamassa: Forma tronco-cônica (a) e Funil para argamassa (b)

Fonte: O autor (2015)

3.2.3 Determinação da relação volume de água/ volume de finos

Uma vez conhecido o valor do teor de aditivo superplastificante (Sp/p) é possível a estimativa do valor entre a relação volume de água e o volume de finos (V_w/V_p) a ser utilizada na dosagem do concreto autoadensável. Para tanto, foram elaborados outros traços de argamassa fixando-se o teor de aditivo superplastificante e variando-se a relação V_w/V_p de tal maneira que a relação $R_m/G_m^{0,4}$ aproxime-se do valor 0,525, conforme sugerido por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000).

A Tabela 3.3 relaciona alguns parâmetros das argamassas utilizadas para a validação do teor de aditivo superplastificante (Sp/p) e definição da relação V_w/V_p a ser adotada na dosagem do CAA de referência neste estudo. A Figura 3.11 ilustra o espalhamento de uma destas argamassas no ensaio com o dispositivo tronco-cônico.

TABELA 3.3 Dosagem das argamassas para determinação da relação entre o volume de água e o volume de finos na composição do CAA

Volume de argamassa por amassada		1,3 litros	
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)		12,5 %	
Volume de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)		0,47	
Massa da areia em relação à massa de agregado miúdo (m_1/M_s)		0,50	
ARGAMASSAS UTILIZADAS NO AJUSTE DA RELAÇÃO V_w/V_p	Teor de aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p) (%)	Volume de Finos (V_p) (m^3/m^3)	Volume de água em relação ao volume de finos (V_w/V_p) (m^3/m^3)
ARG _{ajuste} - 1	1,00	0,270	0,960
ARG _{ajuste} -2		0,268	0,980
ARG _{ajuste} -3		0,265	1,000
ARG _{ajuste} -4		0,262	1,020
ARG _{ajuste} - 5		0,259	1,050

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 3.11 Ilustração do espalhamento das argamassas utilizadas na definição do teor de aditivo superplastificante

Fonte: O autor (2015)

3.2.3.1 Procedimentos de mistura das argamassas

As argamassas utilizadas para as definições do teor de aditivo superplastificante e da relação V_w/V_p a serem adotados na dosagem do concreto autoadensável de referência foram misturadas utilizando-se o misturador de argamassas mostrado na Figura 3.9.

Os procedimentos para a colocação e mistura dos componentes das argamassas foi feito de acordo com o recomendado por Nunes (2001), que segue a seguinte sequência:

- 1º. Pesagem dos materiais (cimento Portland, sílica ativa, areia lavada fina 1 (AF₁), areia lavada fina 2 (AF₂), água e aditivo superplastificante) em balança eletrônica;
- 2º. Colocar os materiais finos e os agregados miúdos na cuba do misturador e misturá-los de forma manual por 30 segundos;
- 3º. Fixar a cuba ao equipamento, adicionar 80% do volume da água juntamente com 80% do volume de aditivo superplastificante previstos e fazer a mistura por 60 segundos na velocidade baixa. Desligar o equipamento e limpar a pá e o material aderido à cuba em um tempo máximo de 30 segundos;
- 4º. Misturar os componentes por 60 segundos em velocidade lenta;
- 5º. Proceder a limpeza da pá e do material aderido à cuba do misturador no tempo máximo de 30 segundos;

- 6º. Acrescentar à mistura os 20% dos volumes restantes da água e do aditivo superplastificante e proceder a mistura dos componentes por 60 segundos em velocidade baixa;
- 7º. Deixar a mistura em repouso por 60 segundos e, por fim;
- 8º. Misturar a argamassa por 30 segundos em baixa velocidade e, imediatamente, alterar para a velocidade alta e misturar por mais 30 segundos. Neste ponto a argamassa está pronta para ser avaliada nos ensaios de espalhamento e fluidez, cujos limites foram estabelecidos em $(180 \text{ mm} \leq G_m \leq 300 \text{ mm})$ e $(5 \text{ s} \leq R_m \leq 20 \text{ s})$, respectivamente.

3.2.4 O proporcionamento do CAA de referência

O concreto autoadensável de referência (CAA_{ref}) constituído de cimento Portland (CPV-ARI), sílica ativa, areia lavada natural, quartzosa, pedra britada de basalto, água potável e aditivo superplastificante foi dosado considerando os parâmetros obtidos experimentalmente nos ensaios realizados nas pastas e argamassas mencionados anteriormente.

3.2.4.1 Ajustes do traço de referência

A avaliação das características de adensabilidade do traço de referência foi feita tomando como base experimentos realizados em quatro dosagens de concreto confeccionados com diferentes valores de S_p/p e V_w/V_p , simulando um processo iterativo visando a convergência destes parâmetros para aqueles obtidos nos ensaios de pasta e argamassa.

As misturas foram avaliadas sob os aspectos da fluidez, coesão e habilidade passante pelo anel-J. Para tanto, foram realizados os ensaios de espalhamento utilizando o cone de Abrams e o ensaio com o anel-J com 16 barras de aço.

Foi considerado como ajustado o traço de CAA cuja mistura tenha atendido aos limites da classe de espalhamento (650 mm a 750 mm) e classe de habilidade passante pelo anel-J (sob fluxo livre) PJ 2 (25 a 50 com 16 barras de aço) propostos pelas normas ABNT NBR 15823-2 (2010) e ABNT NBR 15823-3 (2010).

Os componentes das misturas foram dosados em massa com os agregados naturais (areia lavada, natural e pedra britada do basalto) e o agregado leve (argila

expandida AE-1506) utilizados na condição seca ao ar. As quantidades dos materiais dos traços, foram determinadas por meio das equações 3.9 a 3.25 sugeridas por Nunes (2001; 2008).

- **Composição volumétrica do concreto (volume absoluto)**

$$V_s + V_g + V_p + V_w + V_a = 1,0 \text{ m}^3 \quad (3.9)$$

Onde:

V_s = Volume de agregado miúdo

V_g = Volume de agregado graúdo

V_p = Volume de finos (cimento + adição mineral)

V_w = Volume de água

V_a = Volume de ar

- **Volume de agregado graúdo (V_g)**

Segundo Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) o volume do graúdo (V_g) é o equivalente a um volume aparente do agregado seco compactado (V_{ap}) ¹¹ igual a 0,50, excluído o volume de ar incorporado da mistura.

Para Nunes (2001) no máximo da condição compactada ou seja no limite, o volume máximo do agregado graúdo ($V_{g,lim}$) equivalente ao volume aparente de 1,0 m³ na condição solta, é igual à razão entre a massa unitária compacta (ρ_c) e a massa específica (γ_s) do agregado. Desta forma, para um dado valor do volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) e teor de ar incorporado (V_a), tem-se:

$$V_g = \frac{V_g}{V_{g,lim}} \times V_{g,lim} (1 - V_a) \quad (3.10)$$

$$V_{ap} = \frac{V_g}{V_{g,lim}} \quad (3.11)$$

$$V_g = (0,50 \text{ a } 0,60) \cdot \frac{\rho_c}{\gamma} \cdot (1 - V_a) \quad (3.12)$$

¹¹ A European Guidelines and Specifications for Self Compacting Concrete (EFENARC, 2005) recomenda valores de V_{ap} de 0,50 m³ a 0,60 m³ do volume seco compactado.

- **Volume de agregado miúdo (V_s)**

Para um dado valor da relação volume de agregado miúdo/volume de argamassa (V_s/V_m), os volumes da argamassa e do agregado miúdo por m³ de concreto pode ser estimado pelas equações 3.13 e 3.14.

$$V_m = 1,0 - V_a - V_g \quad (3.13)$$

$$V_s = \frac{V_s}{V_m} \times V_m \quad (3.14)$$

- **Volume de finos (cimento Portland + adição mineral) (V_p)**

Para uma dada relação (volume de água / volume de finos) (V_w/V_p), pode-se determinar o volume de finos da mistura por meio da equação 3.15.

$$V_p = \frac{V_m - V_s}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (3.15)$$

Conhecidas as relações V_w/V_p e água/cimento (a/c) e as massas específicas do cimento (γ_c) e da adição mineral (γ_f), pode-se determinar a relação (massa de adição / massa de cimento Portland) (w_f/w_c) pela equação 3.16.

$$\frac{w_f}{w_c} = \left(\left[\frac{a/c}{\gamma_w \cdot \frac{V_w}{V_p}} \right] - \frac{1}{\gamma_c} \right) \cdot \gamma_f \quad (3.16)$$

Conhecidas as relações volumétricas, os volumes absolutos e as massas específicas dos componentes da mistura, pode-se obter as massas de cada um destes constituintes do concreto. Desta forma, as massas do cimento Portland (w_c), da adição mineral (w_f) e da água (w_w) são determinadas pelas equações 3.17 a 3.19, respectivamente.

$$w_c = \frac{V_p}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{w_f / w_c}{\gamma_f}} \quad (3.17)$$

$$w_f = \left(\frac{w_f}{w_c} \right) \cdot w_c \quad (3.18)$$

$$w_w = \left(\frac{V_w}{V_p} \right) \cdot V_p \cdot \gamma_w \quad (3.19)$$

Para uma dada dosagem de aditivo superplastificante (Sp/p) e massa de cimento Portland e adição mineral, a massa líquida do aditivo superplastificante pode ser determinada pela equação 3.20.

$$w_{sp} = \left(\frac{Sp}{p} \right) \cdot (w_c + w_f) \quad (3.20)$$

Para situações onde a composição do esqueleto granular de mistura é resultante da composição de dois agregados miúdos e um agregado graúdo, para uma dada relação entre as massas do agregado miúdo 1 em relação ao agregado miúdo total (s_1/s), a massa dos agregados na condição seca pode ser calculada pelas equações 3.21 a 3.24.

$$w_{gd} = V_g \cdot \gamma_g \quad (3.21)$$

$$w_{sd} = \frac{V_s}{\frac{s_1 / s}{\gamma_{sd1}} + \frac{(1 - s_1 / s)}{\gamma_{sd2}}} \quad (3.22)$$

$$w_{sd1} = (s_1 / s) \cdot w_s \quad (3.23)$$

$$w_{sd2} = (1 - s_1 / s) \cdot w_s \quad (3.24)$$

A água prevista na mistura foi corrigida em função da água presente no aditivo superplastificante, da absorção e da umidade dos agregados. A correção da água total da mistura foi feita subtraindo-se da água prevista aquela contida no aditivo e adicionando-se a fração estimada para a absorção dos agregados. Não foi considerada a fração da umidade, uma vez que os materiais foram utilizados na condição seca.

A água de mistura (w_{wm}) foi calculada por meio da equação 3.25.

$$w_{wm} = w_w - w_{sp} \cdot (1 - Ts_{sp}) + \sum_i (w_{sdi} \cdot (A_{si} - H_{si})) + w_{gd} \cdot (A_g - H_g) \quad (3.25)$$

Onde:

Ts_{sp} = Teor de sólidos do aditivo superplastificante (%)

A = Absorção de água dos agregados (%)

H = Teor de umidade dos agregados (%)

A Tabela 3.4 apresenta a composição típica dos concretos autoadensáveis produzidos nesta etapa. O traço CAA_{REF}-N4 é o proporcionamento resultante da aplicação da metodologia de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificada, cujos procedimentos são mostrados no ANEXO 2 deste trabalho.

Os ensaios foram feitos segundo os procedimentos das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

TABELA 3.4 Concreto autoadensável de referência CAA_{REF}-N4 a ser validado

1 – PARÂMETROS DE DOSAGEM		
Volume aparente do agregado graúdo (V_{ap})		0,57 m ³
Volume absoluto do agregado graúdo (V_g)		0,332 m ³
Fração de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)		47 %
Massa da areia em relação à massa de agregado miúdo (m_1/M_s)		50 %
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)		12,5 %
Teor de argamassa (V_m)		64,8%
2 – COMPOSIÇÃO DO TRAÇO ^(*)	Concreto autoadensável de referência (CAA _{REF} -N4)	
	Traço unitário (kg)	Consumo de materiais/m ³ ^(**2) (kg/m ³)
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	460,00
Sílica ativa	0,100	46,00
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,885	407,10
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,885	407,10
Pedra britada, basalto – Brita 16 mm (5/8")	2,036	936,56
Água total ^{***(3)}	0,437	201,02
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,06
Teor de aditivo superplastificante (líquido) (Sp/p) (%)		1,000
Relação volume de água/volume de finos (V_w/V_p)		1,050
Relação volume de finos/volume de agregado miúdo (V_p/V_s)		55,0
Relação água/cimento (a/c)		0,377
Relação água/aglomerantes (água/(cimento + sílica) (a/p)		0,343
Consumo de cimento teórico		457,29
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)		2.416,6
Teor de ar incorporado (%)		1,30
OBSERVAÇÕES		
*(1) Os materiais foram dosados e utilizados na condição seca ao ar;		
**(2) A estimativa de consumo de materiais por m ³ de concreto foi calculada com base no consumo de cimento/m ³ determinado experimentalmente (NBR 9833);		
*** (3) Na fração de água total da mistura estão inclusos a quantidade necessária para a hidratação do cimento mais a fração correspondente à taxa de absorção de água dos agregados, descontada a parcela de água de diluição do aditivo superplastificante		

Fonte: O autor (2015)

Para ser utilizado como referência, o traço do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}-N4) foi validado. Para tanto, o traço foi repetido por quatro vezes e avaliado por meio dos ensaios de espalhamento de tronco de cone (Slump Flow Test), tempo decorrido pela mistura para atingir o espalhamento de 500 mm no instante t_0 (viscosidade plástica aparente - T_{500}) e habilidade passante pelo anel-J.

Uma vez validado, o traço CAA_{REF}-N4 foi identificado nesta pesquisa por concreto autoadensável de referência CAA_{REF} e repetido outras três vezes para a realização dos ensaios de autoadensabilidade relacionados na Tabela 2.3.

No estado endurecido o traço CAA_{REF} foi caracterizado meio dos ensaios de massa específica seca, absorção de água por imersão, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade (secante) e determinação do coeficiente de Poisson.

3.2.4.2 Procedimentos de mistura dos componentes do concreto autoadensável de referência

Os concretos foram produzidos em betoneira estacionária com cuba de 150 litros e capacidade efetiva de mistura de até 70 litros e velocidade de 30 rpm. As misturas foram confeccionadas obedecendo as seguintes etapas de preparação, colocação e mistura dos materiais:

- 1º. Lubrificação da betoneira com água;
- 2º. Colocação dos agregados miúdos e graúdos e a fração de água correspondente à porcentagem de absorção de água determinada nos ensaios de caracterização dos agregados;
- 3º. Mistura-se os materiais por 2 minutos e, em seguida deixa a mistura em repouso por 3 minutos;
- 4º. Adiciona-se o cimento Portland, a sílica ativa e 80% dos volumes da água e do aditivo superplastificante. A fração de água e aditivo misturadas antecipadamente, é adicionada à mistura com a betoneira em movimento. Mistura-se os materiais por 5 minutos;
- 5º. Finalmente, adiciona-se o restante da água e o aditivo superplastificante (20%) e mistura-se os componentes por mais 5 minutos, totalizando 10 minutos de mistura.

3.3 A dosagem do concreto com argila expandida

Os concretos produzidos com argila expandida AE-1506 (CAA_{AE}) foram dosados a partir do CAA_{REF}. Adotou-se o procedimento de substituir uma parte ou o todo da fração volumétrica do agregado gráudo natural (brita de basalto) pelo equivalente em volume absoluto do agregado leve. Os teores de substituição, fixados em 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, originaram concretos autoadensáveis confeccionados com e sem argila expandida (CAA_{AE}). As misturas assim obtidas, foram avaliadas no estado fresco por meio dos ensaios de autoadensabilidade relacionados na Tabela 2.3.

Foi estabelecido como limites de espalhamento os valores 650 mm a 750 mm, enquanto que a habilidade passante da mistura pelo anel J (PJ), em fluxo livre, a faixa de 25 mm a 50 mm. Os limites de viscosidade e resistência à segregação foram os estabelecidos na norma ABNT NBR 15823-1 (2010).

Conforme mostra a Figura 3.1, as experimentações desta etapa foram desenvolvidas em três fases distintas.

Na Fase 1 foram produzidos concretos com argila expandida (CAA_{AE}) dosados com os mesmos parâmetros de dosagem do CAA_{REF} ($V_{ap} = 0,570$). Nesta etapa, foram feitas simples substituições do agregado gráudo natural pela argila expandida AE-1506, nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

Na Fase 2 foram confeccionados concretos com argila expandida (CAA_{AE}), dosados com volume aparente do agregado gráudo com valores de $V_{ap}=0,500$ e $V_{ap}=0,650 \text{ m}^3/\text{m}^3$, diferentes daquele adotado para o CAA_{REF} ($V_{ap} = 0,570$). Os demais parâmetros de dosagem dos concretos com argila expandida foram mantidos constantes, na comparação com os do CAA_{REF}.

Por fim, na Fase 3 foram produzidos concretos com argila expandida (CAA_{AE}), cujos parâmetros de dosagem foram diferentes daqueles adotados para o CAA_{REF}. Desta forma, foram alterados os parâmetros volume aparente do agregado gráudo (V_{ap}) e a relação V_w/V_p . Os demais parâmetros de dosagem destes concretos foram mantidos constantes em relação aos do CAA_{REF}. Considerou-se adequado o CAA_{AE} com características de autoadensabilidade similares às obtidas no concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}).

Os concretos produzidos nesta fase foram avaliados, no estado fresco por meio dos ensaios propostos no conjunto de normas da ABNT NBR 15823 (2010). Na condição endurecida os concretos foram avaliados por meio dos ensaios de resistência à compressão (NBR 5739:2007), à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011), avaliação da massa específica (NBR 9778:2005), módulo de elasticidade estática (NBR 8522:2008), carbonatação (câmara de carbonatação acelerada) e condutividade térmica (ASTM E-1530:2011). Os resultados destes ensaios auxiliaram no entendimento das características físicas e mecânicas destes concretos autoadensáveis.

3.3.1 FASE 1: Concretos com argila expandida AE-1506 dosados com volume aparente de gráudo de 0,570

Nesta fase foram produzidos concretos com argila expandida (CAA_{AE}) tendo como base as características do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) previamente ajustado. Assim, os CAA_{AE} foram dosados com V_{ap} igual a 0,570 m³/m³ e V_w/V_p igual a 1,050. O valor do volume absoluto da fração de agregado gráudo (V_g) da mistura foi determinado utilizando-se a equação 3.12, considerando-se os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados gráudos normal e leve, mostrados no ANEXO 1.

Desta forma, na mistura em que o teor de substituição foi de 20% (CAA_{AE-20}), a composição volumétrica do agregado gráudo, em termos de volume absoluto, foi de 80% de brita de basalto e 20% de AE-1506. Os demais parâmetros de dosagem dos CAA_{AE}, na comparação com o CAA_{REF}, foram mantidos constantes. A Tabela 3.5 relaciona os parâmetros da dosagem e a composição volumétrica dos concretos produzidos na Fase 1 da pesquisa.

TABELA 3.5 FASE 1: Composição de concretos autoadensáveis com volume de aparente do agregado graúdo igual a 0,570

1 – PARÂMETROS DE DOSAGEM						
Volume aparente do agregado graúdo (V_{ap})	0,570 m ³ /m ³					
Volume absoluto de agregado graúdo (V_g)	0,332 m ³ /m ³					
Volume do agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)	47 %					
Volume de água em relação ao volume de finos (V_w/V_p)	1,050					
Teor de aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p)	1,000 %					
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)	12,5 %					
Volume de argamassa (V_m)	64,7 %					
2 - COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA (m ³ /m ³)	CAA_{REF}	Concretos com argila expandida AE-1506 (CAA_{AE-1506})				
		AE-20	AE-40	AE-60	AE-80	AE-100
Volume de finos (cimento + sílica) (V_p)	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Volume de agregado miúdo (V_s)	0,304	0,304	0,304	0,304	0,304	0,304
Volume de agregado normal - BRITA 1 (V_{g-BR})	0,332	0,266	0,199	0,133	0,066	0,000
Volume de agregado leve - AE 1506 (V_{g-AE})	0,000	0,066	0,0133	0,199	0,266	0,332

Fonte: O autor (2015)

3.3.2 FASE 2: Concretos com argila expandida dosados com volume aparente de graúdo de 0,500 e 0,650

Nesta fase foram produzidos concretos com argila expandida AE-1506 (CAA_{AE}) com volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) iguais a 0,500 m³/m³ e 0,650 m³/m³. Os outros parâmetros de dosagem foram mantidos constantes em relação ao concreto autoadensável de referência (CCA_{REF}).

A princípio, incrementos ou diminuições no volume de graúdo (V_g) para uma dada trabalhabilidade do concreto, naturalmente modificam o volume do agregado miúdo (V_s), que por sua vez, provoca mudanças no volume de argamassa (V_m) da mistura. Desta forma, tomando como referência as características do CAA_{REF}, foi possível avaliar quais os efeitos observados nos resultados dos ensaios de espalhamento nos CAA_{AE} provocados pelas alterações nos valores do volume aparente do agregado graúdo na composição mistura. A Tabela 3.6 relaciona os parâmetros utilizados na dosagem e a composição volumétrica dos concretos produzidos nesta fase da pesquisa.

TABELA 3.6 FASE 2: Composição de concretos autoadensáveis com volume aparente do agregado graúdo de 0,500 e 0,650

PARÂMETROS DE DOSAGEM								
Volume do agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)							47 %	
Volume de água em relação ao volume de finos (V_w/V_p)							1,050	
Teor de aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p)							1,000 %	
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)							12,5 %	
VOLUME APARENTE DO AGREGADO GRAÚDO (V_{ap}) (m^3/m^3)	CAAs	COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA (m^3/m^3)						
		V_p (Finos)	V_s (Miúdos)	V_g (Graúdos)	V_{g-B1} (Brita 1)	V_{g-AE} (AE-1506)	V_w (Água)	V_m (%) (Argamassa)
0,570	CAA _{REF}	0,167	0,304	0,332	0,332	0,0	0,176	64,7
0,500	CAA _{AE-20}	0,178	0,324	0,292	0,234	0,058	0,187	68,8
	CAA _{AE-40}				0,175	0,117		
	CAA _{AE-60}				0,133	0,199		
0,650	CAA _{AE-20}	0,155	0,282	0,379	0,303	0,076	0,163	60,0
	CAA _{AE-40}				0,276	0,152		

Fonte: O autor (2015)

3.3.3 FASE 3: Ajuste dos concretos com argila expandida AE-1506

Neste ponto, considerando os experimentos desenvolvidos na Fase 1 e Fase 2 foram feitos ajustes nos parâmetros de dosagem dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida para que atendessem aos requisitos de autoadensabilidade fixados na pesquisa.

Desta forma, as misturas produzidas com os diversos teores de substituição (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) tiveram os parâmetros de dosagem V_{ap} e V_w/V_p modificados de tal forma, que por meio de um processo iterativo, as misturas foram ajustadas aos limites de espalhamentos estabelecidos na pesquisa. A Tabela 3.7 mostra os valores dos parâmetros de dosagens adotados originalmente e modificados na Fase 3 da pesquisa.

Os concretos confeccionados nesta fase, identificados por concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}), foram os principais instrumentos para avaliar os efeitos provocados pela substituição do agregado graúdo normal (brita de basalto) pelo agregado leve (argila expandida AE-1506).

TABELA 3.7 FASE 3: Parâmetros de dosagem modificados para a obtenção de CAA_{AE} com características de autoadensabilidade

PARÂMETROS DE DOSAGEM		TEOR DE SUBSTITUIÇÃO					
		0% (REF)	20%	40%	60%	80%	100%
Volume aparente de graúdo (V_{ap}) (m^3/m^3)	ORIG.	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570
	MODIF.		S/ MODIF.	S/ MODIF.	0,510	0,505	0,505
Relação volume de água/volume de finos (V_w/V_p)	ORIG.	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050
	MODIF.		S/ MODIF.	1,100	1,120	1,120	1,120
Teor líquido de aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p) (%) (1)	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
OBSERVAÇÃO							
(1) Considera-se como massa de finos a soma das massas do cimento Portland (CP V-ARI) e sílica ativa							

A caracterização física e mecânica dos CAA_{AE} nos estados fresco e endurecido, foi feita tendo como referência os procedimentos propostos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT).

Os principais ensaios são relacionados na Tabela 3.8. Aqueles procedimentos não normatizados ou adaptados foram descritos quando da apresentação dos resultados obtidos no experimento.

TABELA 3.8 Ensaios para a caracterização das propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida AE-1506

1- ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA		
1-1 CONCRETO FRESCO		
Massa específica e teor de ar do concreto fresco	NBR 9833 (2009) – Concreto fresco: Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico	
Espalhamento e viscosidade plástica aparente (T ₅₀₀) – fluxo livre	NBR 15823-2 (2010) - Concreto auto-adensável: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams	
Habilidade passante – fluxo livre	NBR 15823-3 (2010) - Concreto auto-adensável: Determinação da habilidade passante – Método do anel J	
Habilidade passante – fluxo confinado	NBR 15823-4 (2010)- Concreto auto-adensável: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L	
Viscosidade plástica aparente – fluxo confinado	NBR 15823-5 (2010) - Concreto auto-adensável: Determinação da viscosidade – Método do funil V	
Resistência à segregação	NBR 15823-6 (2010) - Concreto auto-adensável: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação	
1-2 CONCRETO ENDURECIDO		
Resistência à compressão	NBR 5739 (2007) – Concreto: Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos	
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (2011) - Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	
Massa específica seca e absorção de água	NBR 9778 (2005) – Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	
Massa específica e teor de ar incorporado/aprisionado	NBR 9833 (2009) – Concreto fresco: Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico	
Módulo de elasticidade – secante	NBR 8522 (2008) – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão - deformação	
2 ENSAIOS DE DURABILIDADE		
2-1 CONCRETO ENDURECIDO		
Carbonatação	(Não normatizado)	
Condutividade Térmica	(Não normatizado)	

Fonte: O autor (2015)

3.4 Procedimentos de mistura do concreto autoadensável com argila expandida

Os concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida (CAA_{AE}) foram amassados no mesmo equipamento de mistura (betoneira estacionária – capacidade efetiva de mistura de 120 litros) utilizando procedimentos similares aos usados na produção do concreto de referência (CAA_{REF}). A diferenciação nos procedimentos de mistura entre os dois tipos de concreto ocorre no tempo estimado para a absorção de água por parte dos agregados. (Figura 3.12).

No caso dos CAA_{AE}, o tempo destinado à absorção de água por parte dos agregados na etapa de mistura foi estimado em 10 minutos, considerando os resultados dos ensaios de absorção de água feitos nas amostras da argila expandida apresentado no ANEXO 1, Tabela AN-1.5.

Aqueles ensaios indicam que a argila expandida é a responsável pelas maiores taxas de absorção de água entre os agregados que compõem o traço do concreto, nos instantes iniciais da etapa da mistura. Por conta disso, adotou-se os seguintes procedimentos para a mistura dos concretos produzidos com argila expandida:

- 1º. Lubrificar a cuba da betoneira com água;
- 2º. Fazer a pesagem dos materiais que compõem o traço de concreto (materiais secos e na condição solta);
- 3º. Colocar na cuba a porção dos agregados miúdos, a composição de agregados graúdos (brita de basalto + argila expandida AE-1506) e a fração de água correspondente à porcentagem de absorção de água determinada nos ensaios de caracterização dos agregados;
- 4º. Misturar os componentes por 3 minutos para em seguida, deixar os materiais em repouso por 7 minutos, totalizando 10 minutos. A Figura 3.13 ilustra esta etapa da mistura para o CAA_{AE} e o CAA_{REF} (tempo de mistura e repouso igual a 5 minutos);
- 5º. Adicionar a fração de finos do traço (cimento Portland + a sílica ativa). Com a cuba da betoneira em movimento, adicionar à mistura o equivalente a 80% dos volumes da água e do aditivo superplastificante,

misturados previamente. Proceder a mistura dos componentes do traço por 5 minutos;

- 6º. Finalmente, adicionar o restante da água e o aditivo superplastificante (20%) e misturar os materiais por mais 5 minutos, totalizando 10 minutos de mistura dos componentes do concreto.

FIGURA 3.12 Mistura de agregados e água de absorção: CAA_{REF} (a) e CAA_{AE} (b)

(a) CAA_{REF} – Tempo de repouso = 3 minutos

(b) CAA_{AE} – Tempo de repouso = 7 minutos

Fonte: O autor (2015)

3.5 Ensaios de caracterização física e mecânica dos concretos autoadensáveis

Os ensaios utilizados para avaliar as características físicas e mecânicas dos concretos autoadensáveis gerados nesta pesquisa foram aqueles identificados na Tabela 3.7, cujos procedimentos são os preconizados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.5.1 Caracterização física dos concretos no estado fresco

Na condição fresca os concretos foram avaliados por meio do ensaio de massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) e os ensaios que determinam as características de autoadensabilidade dos concretos autoadensáveis propostos pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010), relacionados na Tabela 3.7.

A determinação da massa específica do concreto fresco possibilitou a estimativa do consumo de materiais/m³ e o teor de ar incorporado pelo concreto no instante da homogeneização dos componentes no equipamento de mistura (betoneira estacionária - capacidade 120 litros).

As características de autoadensabilidade das misturas foram determinadas utilizando-se os ensaios de espalhamento pelo tronco de cone (Slump Flow), escoamento pelo funil-V, escoamento pela caixa-L e resistência à segregação pelo método da coluna de segregação.

3.5.2 Caracterização do concreto no estado endurecido

Na condição endurecida as misturas foram avaliadas por meio dos ensaios convencionais utilizados na caracterização física, mecânica e durabilidade do concreto. Sob o aspecto físico foram realizados ensaios para determinar a massa específica seca (γ_s), absorção de água por imersão (Ab_{24h}) e índice de vazios (I_v).

A caracterização mecânica foi realizada por meio dos ensaios de resistência à compressão axial (f_{cj}), resistência à tração por compressão diametral (ft_{cj}), módulo de elasticidade estático (E_{cs}) e determinação do coeficiente de Poisson (ν). Além desses ensaios foram feitos ensaios de carbonatação em câmara de carbonatação acelerada, e avaliação da condutividade térmica.

Os parâmetros da resistência à compressão e massa específica seca foram utilizados para a determinação do fator de eficiência estrutural (F_{EE}) dos concretos.

Os procedimentos de ensaios foram aqueles preconizados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relacionados na Tabela 3.7 à exceção dos ensaios de carbonatação e condutividade térmica. A seguir serão detalhados alguns dos principais procedimentos feitos nestas etapas da pesquisa.

3.5.2.1 Moldagem, preparação e cura dos corpos de prova cilíndricos

Os ensaios de caracterização do concreto endurecido, identificados na Tabela 3.7, foram realizados em corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200mm) coletados e moldados de uma única betonada, constituindo naquilo que a norma ABNT NBR 12655 (2015) identifica como exemplar¹².

Os corpos de prova que compõem os exemplares foram moldados à sombra, com as formas assentadas e nivelados em uma camada de areia. O preenchimento das fôrmas foi feito em duas etapas, como se segue:

- Colocação do concreto, em uma única porção, até o terço médio do corpo de prova;
- Preenchimento total e acabamento dos topos dos corpos de prova com colher de pedreiro.

Durante as etapas de preenchimento o concreto não sofreu qualquer espécie de adensamento. Após o preenchimento foram dados 3 golpes suaves, com a colher de pedreiro na face externa nas formas, a fim de prevenir o surgimento de vazios (bolhas de ar aprisionado) nas superfícies externas dos corpos de prova.

A quantidade de corpos de prova que constituem os exemplares variou ao longo da pesquisa. Nas fases de definições dos traços (FASE 1 e FASE 2), foram moldados corpos de prova somente para os ensaios de resistência à compressão. Nestas etapas os exemplares foram compostos por, pelo menos, 9 corpos de prova, cujo plano de ruptura adotado foi 3/3; 3/7 e 3/28 (quantidade de corpo de prova / idade de rompimento, em dia).

Na FASE 3 os exemplares foram compostos por até 16 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) e 6 corpos de prova (50 mm x 100 mm). Os corpos de prova (50mm x 100mm) foram utilizados nos ensaios para avaliar a condutividade térmica do concreto. A Figura 3.13 ilustra os corpos de provas moldados e identificados. A desforma dos corpos de prova ocorreu 24 horas após a moldagem.

---

¹² A norma ABNT NBR 12655 (2015) define exemplar como “elemento da amostra ou da população (lote) constituído por dois corpos de prova da mesma betonada, moldados no mesmo ato, para cada idade de ensaio”.

FIGURA 3.13 Corpos de provas moldados para a caracterização física e mecânica dos concretos autoadensáveis

Fonte: O autor (2015)

3.5.2.2 – Preparação dos topos e cura dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova para os ensaios de caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas foi feita em duas etapas: o corte com disco diamantado e a regularização com pasta de enxofre.

- **O corte do topo de superfície irregular**

A maioria dos corpos de provas moldados dos concretos produzidos com a argila expandida (CAA_{AE}) apresentaram topos com superfícies irregulares, resultante da ascendência da argila expandida durante o alisamento da superfície dos topos com a colher de pedreiro. Essas irregularidades no plano dos topos interferem nos resultados dos ensaios realizados com estes corpos de prova.

Assim, imediatamente após a desforma foram feitos cortes de aproximadamente 3 mm nos topos dos corpos de prova, com a finalidade de uniformizar a superfície para posterior regularização com pasta de enxofre. Os cortes foram feitos com disco de corte com dispositivo de vídea diamantada, específico para o corte refrigerado de concreto.

As Figuras 3.14 e 3.15 ilustram o acabamento dos topos de alguns corpos de prova antes e após o corte refrigerado, com disco diamantado.

FIGURA 3.14 Topos de corpos de prova (100 mm x 200 mm) de CAA_{AE} antes dos cortes

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 3.15 Preparação dos topos dos corpos de prova (100 mm x 200 mm): (a) corte com disco diamantado (b) acabamento após corte

(a) Corte do topo

(b) Acabamento do topo após o corte

Fonte: O autor (2015)

• Regularização dos topos com pasta de enxofre

Após o corte dos topos, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, à temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 85% até as idades definidas para a execução dos ensaios de caracterização física e mecânica (3, 7 e 28 dias).

Para os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do concreto, os corpos de prova tiveram suas bases e topos regularizados com pasta de enxofre.

A Figura 3.16 ilustra o interior da câmara úmida, o capeamento dos corpos de prova com pasta de enxofre e a temperatura e umidade¹³ registrada no relógio termo higrômetro modelo MT 241, Minipa.

FIGURA 3.16 Armazenamento dos corpos de prova em câmara úmida (a) capeamento dos topos (b) Temperatura e umidade no interior da câmara úmida (c)

Fonte: O autor (2015)

3.5.3 Resistência à compressão e tração por compressão diametral do concreto

Os ensaios mecânicos (resistências à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) foram realizados utilizando-se os equipamentos disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Concretos Especiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá. São prensas hidráulica-elétricas da marca Emic, modelo PCE-100 e modelo MUE-100, ambas com capacidade de 1000 kN.

3.5.3.1 Determinação da resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo o preconizado pelas normas ABNT NBR 5739 (2007) com os corpos de prova sendo moldados, preparados e curados conforme citado no item 3.5.1 desta seção.

¹³ O termo “HI” mostrado no display do relógio termo-higrômetro indica que a umidade relativa do ambiente, captada pelo sensor de leitura é superior ao limite do indicador, cujo valor indicado no manual do equipamento é de 91%.

Os exemplares, constituídos de pelo menos 9 corpos de prova foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias de idade (3 corpos de prova por idade), utilizando-se as prensas ilustradas na Figura 3.17.

As tensões de ruptura (f_{cj}) foram calculadas com base nas cargas corrigidas pelas curvas de calibração do equipamento, fornecidas pelos laboratórios de Materiais de Construção e Concretos Especiais / DEC-UEM.

FIGURA 3.17 Prensa hidráulica marca EMIC: (a) modelo PCE-100 (b) modelo MUE-100

Fonte: O autor (2015)

3.5.3.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

As determinações da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto foram realizadas seguindo os procedimentos preconizados pela norma ABNT NBR 7222 (2011). Os corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, tiveram seus topos regularizados por meio de corte e curados em câmara úmida conforme mostrado no item 3.5.2.2.

Os exemplares constituídos de 4 corpos de prova, foram ensaiados dois aos 7 dias (2/7) e 28 dias (2/28) de idade. As rupturas foram feitas na máquina de ensaio PCE-100 ilustrada na Figura 3.17, utilizando-se de gabarito metálico para o posicionamento do corpo de prova na base da prensa. A Figura 3.18 ilustra o corpo

de prova preparado para o ensaio no gabarito metálico. As tensões de tração foram calculadas utilizando-se a equação 3.26.

$$f_{tc_j} = \frac{2.P}{\pi.D.L} \quad (3.26)$$

Onde:

f_{tc_j} = Resistência à tração por compressão diametral a j dias de idade (MPa)

P = Carga de ruptura (N)

D = Diâmetro do corpo de prova (mm)

L = Comprimento do corpo de prova (mm)

FIGURA 3.18 Tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico de concreto (100 x 200)mm: - Gabarito de fixação (a) Corpo de prova no gabarito (b)

Fonte: O autor (2015)

3.5.4 Massa específica e índice de vazios do concreto endurecido

Os índices físicos do concreto endurecido identificados por massa específica nas condições seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r), absorção de água (A_B) e índice de vazios (I_v) foram determinados segundo os procedimentos de secagem, saturação por imersão e fervura são descritos na norma ABNT NBR 9778 (2005).

Daqueles exemplares moldados para cada um dos teores de substituição adotados nesta pesquisa (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) foram utilizados 3 corpos de

prova (100 mm x 200 mm). Como preparação, tiveram os topos cortados e, em seguida, armazenados em câmara úmida à temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 85% por 28 dias, idade em que foram ensaiados.

As pesagens dos corpos de prova ao ar e imersos em água foram feitas em balança eletrônica com capacidade de 4,0 kg, resolução de 0,02 gramas. A Figura 3.19 ilustra as etapas de pesagem imersa e fervura dos corpos de prova de concreto.

FIGURA 3.19 Massa específica do concreto endurecido: pesagem imersa (a) fervura dos corpos de prova (b)

Fonte: O autor (2015)

Os valores destes índices físicos foram calculados tendo como referência as equações 3.27 a 3.31, indicadas pela norma ABNT NBR 9778 (2005) e relacionadas a seguir:

Absorção de água (A_B)

$$A_B = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (3.27)$$

Índice de Vazios (I_v)

$$I_v = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (3.28)$$

Massa específica da amostra seca (ρ_s)

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.29)$$

Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat})

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{kg/dm}^3) \quad (3.30)$$

Massa específica real (ρ_r)

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{kg/dm}^3) \quad (3.31)$$

Onde:

m_s = Massa do agregado seco (g)

m_{sat} = Massa do agregado na condição saturada superfície seca (g)

m_i = Massa do agregado imerso em água (g)

3.5.5 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Os ensaios de módulo de elasticidade do concreto foram feitos seguindo os procedimentos preconizados pela norma ABNT NBR 8522 (2008) para a determinação do módulo de deformação secante (E_{cs})¹⁴ – metodologia A – Tensão σ_a fixada em 0,5 MPa e σ_b igual a 30% da tensão de ruptura ou seja $\sigma_b = 0,30.f_c$.

Para os ensaios foram utilizados 5 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) preparados conforme relatado no item 3.5.1, sendo 3 corpos de prova usados na determinação do módulo de elasticidade e 2 corpos de prova na determinação da tensão limite de ruptura (f_c). Os módulos de elasticidade (E_{sc}), foram determinados aos 28 dias de idade.

Os parâmetros para determinação do módulo de elasticidade dos concretos foram obtidos por meio de dispositivo mecânico identificado por compressômetro-expansômetro, produzido pela empresa brasileira Solotest Equipamentos para

¹⁴ Módulo de deformação secante é a propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão (σ) – deformação específica (ε) passando pelos pontos A e B de coordenadas (ε_a ; σ_a) e (ε_b ; σ_b) onde a tensão σ_a é igual a 0,5 MPa e σ_b corresponde a 30% da tensão limite de ruptura (f_c)

Mecânica dos Solos Ltda – São Paulo, com capacidade para realizar ensaios de módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

Para tanto, foram feitos 4 ciclos de carga com carregamento e descarregamento registrando-se os deslocamentos em cada uma destas etapas. As medições dos deslocamentos longitudinais e transversais verificados nos pontos de medida do corpo de prova, foram feitas com o uso de relógios comparadores com resolução de 0,001mm.

Para o cálculo das deformações específicas longitudinais e transversais utilizou como valores da base de medida $L = 135 \text{ mm}$ e $L = 100 \text{ mm}$, respectivamente. Conhecidos os deslocamentos longitudinais e transversais, especialmente aqueles registrados no último ciclo de carregamento, determinou-se os valores do módulo de elasticidade (E_{cs}) e o coeficiente de Poisson (ν) pelas equações 3.32 e 3.33, respectivamente.

$$E_{cs} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \left(\frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \times 10^{-3} \quad (3.32)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (3.33)$$

Onde

σ_b = Tensão equivalente a 30% da tensão limite de ruptura, em MPa

$\sigma_a = 0,5$ = Tensão básica de acomodação em MPa

ε_a = Deformação específica média dos corpos de prova sob tensão básica σ_a ;

ε_b = Deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão σ_b

ε_T = Deformação específica da direção transversal

ε_L = Deformação específica na direção longitudinal

A Figura 3.20 ilustra o corpo de prova cilíndrico posicionado no dispositivo de ensaio (compressômetro–expansômetro) e as marcações feitas no topo do corpo de prova que auxiliam no cálculo dos deslocamentos.

FIGURA 3.20 Módulo de elasticidade do concreto: Corpo de prova posicionado no compressômetro-expansômetro (a) Marcações no topo do corpo de prova (b)

Fonte: O autor (2015)

3.5.6 Ensaios de carbonatação e condutividade térmica do concreto

Os concretos produzidos nesta pesquisa foram avaliados sob os aspectos da carbonatação e da condutividade térmica. Estes ensaios foram realizados utilizando-se os equipamentos disponíveis no Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), Pirassununga – SP.

3.5.6.1 Carbonatação do concreto

Para a execução dos ensaios de carbonatação foram utilizados 2 corpos de provas cilíndricos 100mm x 200 mm, coletados de uma mesma betonada, conforme citado anteriormente (item 3.5.2.1).

Inicialmente os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 85% por um período de 60 dias. Após a cura os corpos de prova foram colocados em estufa à 50°C por 72 horas. Decorrido este tempo de secagem, os dois corpos de prova cilíndricos foram cortados em pastilhas com 100 mm de diâmetro e altura de (66 ± 5) mm.

Após o corte as superfícies foram regularizadas por meio de lixamento mecânico com disco abrasivo. Desta forma, obteve-se pelo menos 3 pastilhas para cada um dos concretos elaborados com teores de AE-1506 de 20%, 40%, 60%, 80%

e 100%. Após o corte e lixamento, as pastilhas de concreto foram colocadas em estufa seca, submetidos à temperatura de 50°C por um tempo de 48 horas.

Uma vez cortadas, lixadas e secas, as pastilhas tiveram as superfícies de um dos topos e laterais selados pela aplicação de três demãos de resina acrílica, à base de solventes, específica para impermeabilização de concreto. Após a selagem, as pastilhas foram envolvidas por várias camadas de filme plástico, aplicados para preservar a umidade das peças até a colocação na câmara de carbonatação.

Na câmara de carbonatação, as pastilhas dos diversos concretos foram avaliadas após a exposição de 4 dias, 14 dias e 28 dias ao gás CO₂. A câmara de carbonatação acelerada foi calibrada para teor de CO₂ igual a 10%, umidade relativa de 70% e temperatura de 23°C

A Figura 3.21 mostra as pastilhas resultantes dos cortes dos corpos de prova cilíndricos antes e após a selagem com resina acrílica enquanto que a Figura 3.22 ilustra as pastilhas colocadas no interior da câmara de carbonatação.

FIGURA 3.21 Ensaio de carbonatação: pintura impermeabilizante (a) faces da pastilha sem e com selagem (b)

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 3.22 Ensaio de carbonatação: Pastilhas de concreto (a) Pastilhas no interior da câmara (b) a câmara de carbonatação (c)

Fonte: O autor (2015)

3.5.6.2 Condutividade térmica do concreto

A determinação da condutividade térmica (λ) dos concretos produzidos com e sem a argila expandida AE-1506 foi feita com base nos procedimentos propostos pela norma ASTM E1530-11 (2011) utilizando o medidor de condutividade térmica modelo DTC-300 (TA instruments), disponibilizado pelo Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA-USP, Pirassununga-SP.

FIGURA 3.23 Medidor de condutividade térmica mod. DTC-300 utilizado nos ensaios de condutividade térmica dos concretos com e sem argila expandida

Fonte: Laboratório de Construções e Ambiente - FZEA/USP (2015)

A transmissão do calor por condução é governada pela Lei de Fourier¹⁵, estabelecida em 1822, que segundo Lienhard IV e Lienhard V (2005) pode ser representada pela equação 3.34.

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (3.34)$$

Onde

φ = Fluxo de calor, em W/m²

λ = Condutividade térmica do material, em W/m.K

dT/dx = Gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor

O medidor de condutividade térmica DTC-300 faz a medição do fluxo de calor (φ) que passa por uma amostra de área de topo (A), colocada entre duas placas que exerce uma determinada carga no corpo de prova.

A placa inferior é aquecida por um transdutor de fluxo de calor (HFT). Desta forma, o calor é transmitido à placa superior atravessando o corpo de prova e, pela diferença de temperatura entre as placas, estabelece-se o gradiente de temperatura (ΔT) entre as placas.

A medida entre as temperaturas na saída do transdutor de fluxo de calor (placa inferior) e a temperatura na placa superior, é possível determinar a condutividade térmica (λ) do material avaliado utilizando a equação 3.35. A Figura 3.24 ilustra esquematicamente o princípio do funcionamento do medidor de condutividade térmica e um corpo de prova posicionado na câmara em situação de ensaio no medidor DTC-300.

$$\lambda = \frac{\varphi/A}{\Delta/L} \quad (3.35)$$

---

¹⁵ Lei de Fourier..."o fluxo de calor, φ (W/m²), resultante da condução térmica é proporcional à magnitude do gradiente de temperatura e oposto a este em sinal"...(LIENHARD IV /E LIENHARD V (2005)

Onde:

φ = Fluxo de calor, em W/m²

λ = Condutividade térmica do material, em W/m.K

A = Área de contato do corpo de prova com transdutor de fluxo de calor, em m²

L = Altura do corpo de prova, em metros.

FIGURA 3.24 Esquema de ensaio para determinar a condutividade térmica em corpos cilíndricos ($\phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$) de concreto

Fonte: (a) Esquema de ensaio: Adaptado de <http://thermophysical.tainstruments.com> (b) Laboratório de Construções e Ambiente Agrárias da FZEA-USP (2015)

Para o ensaio de condutividade térmica foram moldados 6 (seis) corpos de prova cilíndricos (50mm x 100mm), moldados sem qualquer espécie de adensamento e curados câmara úmida à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 85% por um período de 60 dias. Os corpos de prova foram coletados de uma mesma betonada, conforme mencionado no item 3.5.2.1.

Após este tempo de cura, os corpos de prova foram colocados à sombra, na temperatura ambiente, por um período de 10 (dez) dias com a finalidade de homogeneizar a umidade dos corpos de prova, após a retirada câmara úmida.

Completadas estas etapas, foram cortadas pastilhas com altura máxima de 25 mm, retiradas do terço médio do corpo de prova. Os topos das pastilhas foram regularizados com pasta térmica específica para o ensaio de condutividade térmica.

Para cada um dos concretos autoadensáveis confeccionados com e sem argila expandida foram ensaiadas 2 (duas) pastilhas, na idade de 80 (oitenta) dias contados a partir da data de moldagem dos concretos.

A Figura 3.25 ilustra duas das pastilhas retiradas do terço médio dos corpos de prova cilíndricos ($\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$) de concreto autoadensável, com os topos regularizados com pasta térmica e preparados para o ensaio com vistas a determinar a condutividade térmica dos concretos.

FIGURA 3.25 Pastilhas de concreto autoadensável ($\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$) regularizadas com pasta térmica para o ensaio de condutividade térmica

Fonte: O autor (2015)

4 RESULTADOS: Apresentação e discussões

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados experimentais dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem a argila expandida, resultante das seguintes etapas:

FASE 1: Definição do traço de concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) dosado pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado e produção dos CAA_{AEs} dosados com $V_{ap} = 0,570 \text{ m}^3/\text{m}^3$. As características do CAA_{REF} foram utilizadas como referência na comparação das características dos concretos autoadensáveis (CAA_{AE}) dosados com argila expandida.

FASE 2: Produção dos concretos com argila expandida AE- 1506, dosados a partir do CAA_{REF}, por meio da substituição de parte ou o todo do volume absoluto do agregado gráúdo natural pela argila expandida.

Nesta etapa, as misturas de CAA_{AE} foram dosadas com valores de volume aparente de agregado gráúdo (V_{ap}) iguais a $0,500 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,650 \text{ m}^3/\text{m}^3$ que equivalem, em termos de volume absoluto de agregado gráúdo (V_g), a $0,292$ e $0,379 \text{ m}^3/\text{m}^3$, respectivamente. Os demais parâmetros de dosagem, na comparação com o CAA_{REF}, foram mantidos constantes.

As características dos concretos produzidos nesta fase, tanto na condição fresca quanto endurecida, forneceram subsídios para definição dos parâmetros de dosagem dos concretos que foram produzidos na Fase 3.

FASE 3: Concretos produzidos com argila expandida, cujas propriedades e características de autoadensabilidade são similares às do CAA_{REF}. Nesta etapa foram confeccionados CAA_{AE} cujos parâmetros de dosagem foram ajustados, comparados aos definidos no CAA_{REF}, de tal forma que as misturas atendessem aos critérios mínimos de autoadensabilidade recomendados pela norma ABNT NBR 15823-1(2010).

4.1 O concreto autoadensável de referência

O estudo comparativo das características de concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}) teve como ponto de partida o traço de concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}). Foram as substituições do volume absoluto do agregado graúdo natural do CAA_{REF} pelo equivalente em argila expandida que originaram, dependendo do teor de substituição (TS) e da massa específica seca (γ_s), os concretos leves autoadensáveis (CLAA) avaliados nesta pesquisa.

O concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}-N4), cujos parâmetros de dosagens são mostrados na Tabela 4.1, dosado pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado, atende os limites de autoadensabilidade preconizados pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010).

As principais etapas da metodologia, o memorial de cálculo e os procedimentos de dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}-N4) são apresentados no ANEXO 2 deste trabalho.

TABELA 4.1 Parâmetros de dosagem do concreto autoadensável de referência determinados pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)

1 – PARÂMETROS DE DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA CAA_{REF}-N4	
Volume aparente do agregado graúdo (V_{ap})	0,57 m ³
Volume absoluto do agregado graúdo (V_g)	0,332 m ³
Fração de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)	47 %
Massa da areia em relação à massa de agregado miúdo (m_1/M_s)	50 %
Teor de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)	12,5 %
Teor de argamassa (V_m)	64,8%
2 – PARÂMETROS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	
Consumo de cimento teórico (kg/m ³)	427,29
Teor de aditivo superplastificante (líquido) (Sp/p) (%)	1,000
Relação volume de água/volume de finos (V_w/V_p)	1,050
Relação volume de finos/volume de agregado miúdo (V_p/V_s)	55,0
Relação água/cimento (a/c)	0,377
Relação água/aglomerantes (água/(cimento + sílica) (a/p)	0,343

Fonte: O autor (2015)

A validação do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) foi feita por meio da repetição do traço por quatro vezes (CAA_{REF}-N4). As características das misturas no estado fresco foram avaliadas por meio dos ensaios de espalhamento (Slump Flow), T₅₀₀, o anel-J e resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Após a validação o traço CAA_{REF}-N4 foi identificado por CAA_{REF}. Desta forma, foram feitas mais três misturas do concreto de referência CAA_{REF} e então, realizados os ensaios físicos e mecânicos para avaliar o desempenho dos concretos na condição fresca e endurecida.

Estes parâmetros foram utilizados na Fase 3, para a comparação com os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida do tipo AE-1506 (CAA_{AE}). A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para o traço de concreto autoadensável de referência CAA_{REF}-N4 nas etapas de validação e ajustes finais

TABELA 4.2 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência

COMPOSIÇÃO DO TRAÇO DE REFERÊNCIA ^(*)	CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE REFERÊNCIA							
	Traço unitário (kg)	CONSUMO DE MATERIAIS/M ³ ^(**2)						
		(kg/m ³)						
		TESTES DE VALIDAÇÃO DO CAA _{REF} -N4				CAA _{REF}		
		Repetições do traço				Traço CAA _{REF} -N4 validado		
		1	2	3	4	1	2	3
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	465,60	460,00	461,00	463,30	463,30	464,30	460,50
Sílica ativa	0,100	46,56	46,00	46,10	46,33	46,33	46,43	46,05
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,885	412,06	407,10	407,99	410,02	410,02	410,91	407,55
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,885	412,06	407,10	407,99	410,02	410,02	410,91	407,55
Pedra britada, basalto – Brita 1	2,036	947,96	936,56	938,60	943,28	943,42	945,46	937,72
Água total ^{***(3)}	0,437	203,47	201,02	201,46	202,46	202,24	202,68	201,02
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,12	5,06	5,07	5,10	5,10	5,11	5,07
3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS								
3.1 – CONDIÇÃO FRESCA								
Espalhamento (Slump Flow) (mm)		680	740	740	680	680	720	700
Viscosidade aparente – T ₅₀₀ (Fluxo livre) (s)		1,74	1,14	1,25	2,81	2,03	1,08	2,05
Habilidade passante – Anel-J (mm) (Fluxo livre)		30	30	50	40	40	30	30
Viscosidade plástica aparente pelo Anel-J - T _{500-J} (s)		-	-	-	-	2,81	2,68	3,46
Habilidade passante – caixa-L (Fluxo confinado)		-	-	-	-	0,82	0,82	0,98
Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V – T ₀ (s)		-	-	-	-	5,03	3,22	3,06
Resistência à segregação (SR) (%)		-	-	-	-	14,5	12,8	5,9
Massa específica do concreto fresco (γ_s) (kg/m ³)		2445,7	2416,6	2421,9	2431,1	2433,8	2439,1	2419,2
Teor de ar incorporado (%)		0,11	1,30	1,08	0,70	0,59	0,37	1,18
3.2 – CONDIÇÃO ENDURECIDA								
Absorção de água (Ab) (%)		-	-	-	-	2,11	3,21	3,39
Índice de vazios (Iv) (%)		-	-	-	-	5,03	7,56	7,90
Massa específica aparente seca (kg/m ³)		-	-	-	-	2386,0	2359,2	2329,7
Resistência à compressão (f _{ci}) (MPa) ^{****(4)}								
Idade = 3 dias (f _{c3})		49,6	51,0	50,3	41,8	51,0	50,1	49,5
Idade = 7 dias (f _{c7})		59,2	54,0	58,3	55,6	54,0	58,87	56,3
Idade = 28 dias (f _{c28})		77,0	74,1	73,8	71,9	74,1	80,0	79,4
Resistência à tração - compressão diametral (MPa)								
Idade = 7 dias (f _{c7})		-	-	-	-	3,9	-	4,7
Idade = 28 dias (f _{c28})		-	-	-	-	5,4	-	5,9
Módulo de Elasticidade (secante) (E _{sc}) (GPa)		-	-	-	-	-	36,8	36,9
Coefficiente de Poisson (μ)		-	-	-	-	-	0,175	0,166
3.3 – EFICIÊNCIA ESTRUTURAL								
Fator de eficiência estrutural (F _{ef,28d}) (MPa.dm ³ .kg ⁻¹)		-	-	-	-	31,1	34,4	34,8
OBSERVAÇÕES								
^(*) Os materiais foram dosados e utilizados na condição seca ao ar;								
^(**2) A estimativa de CONSUMO DE MATERIAIS por metro cúbico de concreto foi calculada com base no consumo de cimento determinado experimentalmente conforme procedimentos da norma ABNT NBR 9833 (2009);								
^{***(3)} Na fração de ÁGUA TOTAL DA MISTURA estão inclusos a quantidade necessária para a hidratação do cimento mais a fração correspondente à taxa de absorção de água dos agregados, descontada a parcela de água de diluição do aditivo superplastificante;								
^{****(4)} Os valores da RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO correspondem à média dos resultados obtidos em corpos de prova cilíndricos (100 x 200) mm, apresentados no ANEXO 3, Tabelas AN 3.1, AN 3.2 e AN 3.3.								

Fonte: O autor (2015)

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 ilustram dois instantes na etapa de definição do concreto autoadensável de referência. A Figura 4.1 ilustra o espalhamento pelo tronco de cone **(a)** e habilidade passante pelo anel-J **(b)** do traço CAA_{REF}-N4 ⁽¹⁶⁾ definido pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificado, enquanto que a Figura 4.2 ilustra o espalhamento de uma das repetições (n = 1) na etapa de validação, relacionadas na Tabela 4.2. Os procedimentos e memorial de cálculo destas etapas são mostrados no ANEXO 2 desta pesquisa.

FIGURA 4.1 Concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}-N4): Espalhamento pelo cone de Abrams **(a)** Espalhamento pelo anel - J **(b)**

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.2 Concreto autoadensável de referência CAA_{REF}-N4: Espalhamento da mistura na etapa de validação - repetição n° 1

Fonte: O autor (2015)

¹⁶ A partir deste ponto o traço CAA_{REF}-N4, após as repetições feitas nas etapas de validação e ajustes (Tabela 4.2), foi identificado nesta pesquisa como concreto autoadensável de referência (CAA_{REF})

4.2 Concretos com argila expandida AE-1506

Os concretos com argila expandida foram dosados a partir do traço de concreto autoadensável de referência ajustado (CAA_{REF}), substituindo-se o volume do agregado gráúdo natural (V_g) pelo volume equivalente do agregado leve.

Os parâmetros de dosagem, traço unitário e as proporções dos materiais do CAA_{REF}, calculados em função do volume aparente do agregado gráúdo (V_{ap}) foram apresentados na Tabela 4.2. Os valores do volume do agregado gráúdo (V_g) dos concretos com argila expandida foram calculados com base na equação 3.12, fixando-se o teor de ar incorporado (V_a) em 2% e volume aparente do agregado gráúdo (V_{ap}) fixados em 0,500 m³/m³, 0,570 m³/m³ e 0,650 m³/m³.

A composição do agregado gráúdo (pedra britada do basalto + argila expandida AE-1506) foi feita considerando os teores de substituições adotados na pesquisa (20%, 40%, 60%, 80% e 100%). Os efeitos que tais substituições provocaram nas misturas foram avaliados por meio dos ensaios de espalhamento (Slump flow, T_{500}) e anel – J e resistência à compressão do concreto.

4.2.1 FASE 1 e FASE 2: Dosagem de concretos com volume de agregado gráúdo variável

No concreto autoadensável a reologia da argamassa tem efeito decisivo no desempenho da mistura. Argamassas com viscosidades adequadas evitam a segregação do agregado gráúdo. Alterações na composição, nas características, no tipo ou natureza dos agregados provocam alterações nas características reológicas do concreto autoadensável (REPETTE, 2011). Tais modificações podem por exemplo, exigir maior ou menor quantidades de argamassa, alterações no volume de água que por sua vez, interferem na fluidez e coesão da mistura.

Desta forma, tendo como base os parâmetros de dosagem do CAA_{REF}, foram confeccionados concretos cuja fração de gráúdos (V_g) foi fixada em 0,292 m³/m³, 0,332 m³/m³ e 0,379 m³/m³. As variações nos teores de argila expandida na composição do agregado gráúdo, mantidos os teores de água e aditivo superplastificante constantes, podem indicar os efeitos provocados por tais mudanças.

A Tabela 4.3 relaciona os parâmetros de dosagem e identifica os concretos produzidos na Fase 1 e Fase 2, dosados com diferentes volumes de agregado graúdo (V_g), enquanto que a Tabela 4.4 mostra os resultados dos ensaios de espalhamento (Slump Flow e T_{500}), habilidade passante pelo anel-J das misturas e resistência à compressão das misturas.

TABELA 4.3 Concretos autoadensáveis com argila expandida dosados com diferentes valores de volume aparente de graúdo produzidos na Fase 1 e Fase 2

PARÂMETROS DE DOSAGEM													
- Teor de substituição do volume do cimento Portland pelo volume de sílica ativa (F)												12,5%	
- Relação massa de sílica ativa / massa de cimento Portland (w _{sa} /w _c)												0,10	
- Relação da massa da areia 1 / massa do agregado miúdo (s ₁ /S)												0,50	
- Teor líquido do aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p) ⁽⁴⁾												1,000%	
- Fração volumétrica do agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V _s /V _m)												47%	
- Volume de água em ao volume de finos (cimento Portland + sílica ativa) (V _w /V _p)												1,050	
- Volume de finos em relação ao volume de agregado miúdo (V _p /V _s)												0,549	
Volume aparente do agregado graúdo (V _{ap})	Teor de substituição (%)	VOLUME DO GRAÚDO (m³/m³)		CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)								RELAÇÃO	
				Cimento Portland (1)	Sílica ativa	Miúdo		Graúdo		Água (2)	SP		
		Natural	Leve			Areia 1	Areia 2	Brita 1	AE-1506			a/c	a/p
V_{ap} 0,500 V _g = 0,292 V _m = 68,8%	20	0,234	0,058	492,4	49,2	418,5	418,5	661,8	60,6	209,3	5,4	0,377	0,343
	40	0,175	0,117	485,4	48,5	429,6	429,6	489,3	119,4	205,3	5,3	0,377	0,343
	60	0,133	0,187	481,5	48,2	426,1	426,1	392,4	215,2	206,1	5,3	0,377	0,343
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V_{ap} 0,570 V _g = 0,332 V _m = 64,8%	20	0,266	0,066	451,6	45,2	399,7	399,7	735,7	67,3	196,0	5,0	0,377	0,343
	40	0,199	0,133	451,3	45,1	399,4	399,4	551,4	134,5	194,5	5,0	0,377	0,343
	60	0,133	0,199	453,8	45,4	401,6	401,6	369,8	202,8	194,2	5,0	0,377	0,343
	80	0,066	0,266	454,4	45,4	404,1	404,1	184,9	270,38	193,6	5,0	0,377	0,343
	100	0,000	0,332	451,7	45,2	399,8	399,8	0,000	336,1	191,1	5,0	0,377	0,343
V_{ap} 0,650 V _g = 0,379 V _m = 60,0%	20	0,303	0,076	406,3	40,6	359,6	359,6	813,4	74,4	180,8	4,5	0,377	0,343
	40	0,227	0,152	416,7	41,7	368,8	368,8	625,5	152,5	183,8	4,6	0,377	0,343
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA: V _{ap} = Volume aparente do agregado SP = Aditivo superplastificante													
V _g = Volume absoluto do agregado graúdo a/c = Relação água/cimento													
V _m = Volume da argamassa a/p = relação água/finos													

LEGENDA:

V_{ap} = Volume aparente do agregado

V_g = Volume absoluto do agregado graúdo

V_m = Volume da argamassa

SP = Aditivo superplastificante

a/c = Relação água/cimento

a/p = relação água/finos

OBSERVAÇÕES:

1 – O valor consumo de Portland por m^3 de concreto é representado pela média dos valores determinados experimentalmente e relacionados na Tabela 4.4;

2 – O valor correspondente à massa de água “efetiva”, ou seja, quantidade acrescida da necessária à absorção dos agregados e descontada a presente no aditivo superplastificante;

3 – Massa líquida do aditivo superplastificante (Gleniun 51©) dosado em relação à massa de finos.

4 – Massa de finos corresponde a massa de cimento + massa de sílica ativa

Fonte: O autor (2015)

TABELA 4.4 Características de autoadensabilidade, físicas e mecânicas de concretos autoadensáveis produzidos na Fase 1 e Fase 2, dosados com brita de basalto e argila expandida e volume aparente do agregado gráudo variável

Volume aparente do agregado graúdo (m³/m³) (1)	V_{ap} = 0,570 (V _g = 0,332)									V_{ap} = 0,500 (V _g = 0,292)				V_{ap} = 0,650 (V _g = 0,379)	
Teor de substituição do volume de agregado normal pelo leve	REF (0) (2)	CAA _{AE} 20%			CAA _{AE} 40%		CAA _{AE} 60%	CAA _{AE} 80%	CAA _{AE} 100%	CAA _{AE} 20%	CAA _{AE} 40%	CAA _{AE} 60%		CAA _{AE} 20%	CAA _{AE} 40%
1 - Número de repetições	3	3			2		1	1	1	1	1	2		1	1
2 – Características físicas															
Massa específica do concreto fresco (γ _{cf}) (kg/m³)	2.430,0	2.256,3	2.253,6	2.260,3	2.128,5	2.149,7	2.034,9	1.921,1	1.794,0	2.306,6	2.170,9	2.061,6	2.041,7	2.196,7	2.121,9
Teor de ar incorporado (T _{ar}) (%)	0,77	3,12	3,23	2,94	3,66	2,70	2,63	2,51	3,09	0,59	2,02	2,34	3,28	6,06	3,65
Consumo de cimento (kg/m³)	462,5	451,0	451,0	452,3	449,0	453,5	453,8	454,4	451,7	492,4	485,4	483,8	479,2	406,3	416,7
3 – Autoadensabilidade ⁽³⁾															
Espalhamento (SF) (mm)	670 a 740	680	670	690	640	660	600	590	430	710	690	640	580	570	660
Viscosidade aparente - T ₅₀₀ (s)	1,74	1,60	2,24	2,95	2,35	2,67	3,58	2,93	>>30	1,97	1,63	2,52	4,93	3,41	2,56
Habilidade passante – anel - J	30 a 50	30	60	20	30	50	50	60	0	60	60	20	10	70	100
4 – Característica mecânica ⁽⁴⁾															
Resistência à compressão (MPa)															
Idade = 3 dias (fc ₃)	48,2	44,1	44,6	38,2	41,8	40,5	38,1	34,1	37,3	49,2	45,2	41,3	40,5	38,2	36,6
Idade = 7 dias (fc ₇)	56,8	52,7	48,0	59,0	44,5	45,5	39,3	37,8	41,6	51,2	48,4	45,8	45,2	45,7	43,5
Idade = 28 dias (fc ₂₈)	74,2	61,2	59,0	58,9	51,8	58,7	47,4	46,5	47,1	64,5	55,3	48,5	49,4	58,9	47,8

OBSERVAÇÕES

- 1 - Equivalem aos valores do volume absoluto de agregado gráudo (V_g) iguais a $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0,292 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,379 \text{ m}^3/\text{m}^3$, respectivamente;
- 2 - Representam a faixa ou a média dos valores das misturas produzidas na etapa de validação do CAA_{REF}, apresentados na Tabela 4.2.
- 3 - Representam a faixa ou a média dos valores medidos nos ensaios de espalhamento, viscosidade aparente e habilidade passante das misturas;
- 4 - Representam a média dos valores relacionados no ANEXO 3, Tabelas A3-1, A3-2, A3-4, A3-6 e Tabela A3-8,

Fonte: O autor (2015)

4.2.1.1 Avaliação da autoadensabilidade das misturas

A capacidade de preenchimento das misturas foi avaliada por meio do ensaio de espalhamento e viscosidade plástica - T_{500} utilizando o cone de Abrams. A Figura 4.3 ilustra os resultados de espalhamento (Slump Flow) constante na Tabela 4.4.

FIGURA 4.3 Ensaio de espalhamento (Slump Flow) em concretos com diferentes volumes de agregado graúdo e teores de substituição

Fonte: O autor (2015)

Observando-se a Figura 4.3 percebe-se que o desempenho dos concretos, sob o aspecto do espalhamento (fluidez), apresenta tendência de queda à medida que aumentam os teores de substituição do agregado natural pelo agregado leve. A maioria dos concretos relacionados na Tabela 4.4 apresentaram valores de espalhamentos superiores ao valor mínimo preconizado pela norma ABNT NBR 15823-2 (Classe SF 1 - espalhamento 550 mm a 650 mm). A exceção fica por conta do CAA_{AE}-100 cujo espalhamento foi de 430 mm.

No entanto, conforme ilustra a Figura 4.3, somente os concretos produzidos com volume de agregado graúdo (V_g) iguais a $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,292 \text{ m}^3/\text{m}^3$, com teores de substituição de 20% (CAA_{AE}-20) e 40% (CAA_{AE}-40) de argila expandida enquadram-se na faixa de espalhamento de 650 mm a 750 mm (linhas tracejadas)

estabelecida pelo autor. Na comparação com o CAA_{REF} a diminuição do espalhamento 4,3% e 7,1% para os concretos CAA_{AE}-20 e CAA_{AE}-40, respectivamente.

As informações contidas na Tabela 4.5 podem auxiliar no entendimento das diferenças obtidas entre os espalhamentos das misturas produzidas com 20% e 40% de substituição. Observe que os concretos produzidos com V_g iguais a 0,292 m³/m³ apresentaram espalhamentos idênticos ao CAA_{REF}, enquanto os produzidos com V_g iguais a 0,332 m³/m³ atingiram o limite inferior da faixa de espalhamento do CAA_{REF}.

As diferenças nos valores de espalhamento das misturas podem ser justificadas pelo incremento de até 6,5% no teor de finos, considerando-se que as quantidades de água e de aditivo superplastificante foram mantidos constantes em relação aos do CAA_{REF}. O incremento no volume de argamassa facilitou a mobilidade entre as partículas de agregado graúdo melhorando a fluidez da mistura.

TABELA 4.5 Características dos concretos autoadensáveis feitos com diferentes volumes de graúdo e teores de argila expandida de 20% e 40%

VOLUME DE AGREGADO GRAÚDO (V_g) (m ³ /m ³)	VOLUME DE ARGAMASSA (V_m) (%)	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO (TS) (%)	IDENTIFICAÇÃO DO CONCRETO	ESPALHAMENTO (Slump Flow) (mm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)
0,292	68,8	0	CAA _{REF}	700 ± 20	462,5
		20	CAA _{AE} -20	700	492,4
		40	CAA _{AE} -40	690	485,4
0,332	64,8	0	CAA _{REF}	700 ± 20	462,5
		20	CAA _{AE} -20	670 ± 20	451,4
		40	CAA _{AE} -40	650 ± 20	451,3

Fonte: O autor (2015)

Os concretos produzidos com volume de graúdo iguais a 0,332 m³/m³, idênticos ao CAA_{REF}, foram produzidos com 2,4% a menos de cimento Portland e atenderam aos limites de espalhamento fixados na pesquisa. No entanto, experimentalmente, detectou-se que os concretos com 40% de substituição podem melhorar suas características de autoadensabilidade aumentando-se a quantidade de água das misturas.

As misturas dosadas com volume de agregado graúdo iguais $0,379 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e teores de substituições de 20% e 40% não atingiram os valores mínimos de espalhamento estabelecidos nesta pesquisa. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 ilustram os ensaios de espalhamento (Slump Flow) e anel-J dos concretos produzidos na Fase 1 e Fase 2, dosados com volume de graúdo (V_g) de 0,332 e 0,292, com 20% e 40% de argila expandida do tipo AE-1506 (Cinexpan).

FIGURA 4.4 Concreto autoadensável com 20% de argila expandida AE-1506 e volume de graúdo de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$: Ensaios de espalhamento (a) e anel-J (b)

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.5 Concreto autoadensável com 40% de argila expandida AE-1506 e volume de graúdo de $0,292 \text{ m}^3/\text{m}^3$: Ensaios de espalhamento (a) e anel-J (b)

Fonte: O autor (2015)

A Figura 4.6 ilustra os espalhamentos obtidos para os diversos concretos produzidos na Fase 1, dosados com volume de grão (V_g) de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e teores de substituição de 0% (CAA_{REF}), 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os valores dos ensaios são aqueles relacionados na Tabela 4.4.

FIGURA 4.6 Espalhamento de concretos autoadensáveis com diferentes teores de argila expandida AE-1506 e volume de grão de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Fonte: O autor (2015)

4.2.1.2 Resistência à compressão do concreto e massa específica do concreto fresco

Os concretos relacionados na Tabela 4.3 foram avaliados na condição endurecida por meio da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Os concretos confeccionados com teores de substituição superiores a 40% não atingiram os limites mínimos de autoadensabilidade fixados nesta pesquisa. Mesmo assim, os valores da resistência à compressão e da massa específica do concreto fresco (γ_{cf}), apontaram tendências que justificaram tais ensaios.

A Figura 4.7 ilustra os resultados de resistência à compressão (f_{c28}) dos diversos concretos relacionados na Tabela 4.3. Observe que, independentemente do teor agregado graúdo (V_g) das misturas, os valores das resistências diminuem à medida que aumentam os teores de argila expandida. Esta é uma tendência esperada, conforme mostra a literatura para concretos produzidos com agregado leve (MEHTA; MONTEIRO, 2008; ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011; CHOI et al., 2006; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010; BORJA, 2011).

FIGURA 4.7 Influência do teor de argila expandida no consumo de cimento nos concretos feitos com diferentes teores de agregado graúdo

Fonte: O autor (2015)

Ainda na Figura 4.7, analisando as misturas produzidas com 20%, 40% e 60% de argila, observa-se que o desempenho entre os concretos com V_g de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e os concretos produzidos com V_g de $0,292 \text{ m}^3/\text{m}^3$, é muito parecido. O pior desempenho, sob o aspecto da resistência à compressão, ocorreu para as misturas confeccionadas com V_g igual a $0,379 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Este fato pode ser um indicativo de que o incremento no volume de argamassa (V_m) beneficia a fluidez da mistura, mas não garante ganhos na resistência. A Figura 4.8 ilustra as relações de consumo de cimento aos concretos dosados com diferentes volumes de agregado graúdo (V_g) e diferentes teores de argila expandida no volume de graúdo da mistura.

FIGURA 4.8 Influência do teor de argila expandida na resistência à compressão do produzido com diferentes teores de agregado graúdo

Fonte: O autor (2015)

Comparados com os consumos de cimento entre os concretos dosados com V_g igual a $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,292 \text{ m}^3$, percebe-se pela Figura 4.8 que as misturas produzidas com V_g de $0,292$ apresentaram maior consumo de cimento. Pela Tabela 4.4 verifica-se que o aumento no consumo de cimento depende teor de substituição, mas variam de 6% a 8%, na comparação com o CAA_{REF} .

No entanto, isso não se refletiu em benefícios significativos, em termos de desempenho, na fluidez e na resistência à compressão das misturas, conforme ilustrado nas Figuras 4.3 e 4.7, respectivamente. O acréscimo no volume do agregado graúdo de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para $0,379 \text{ m}^3/\text{m}^3$ reduziu o consumo de cimento do concreto. Entretanto, as misturas produzidas com teores de substituição de 20% e 40% não atingiram os requisitos mínimos de autoadensabilidade estabelecidos na pesquisa.

A Figura 4.9 ilustra a relação entre a massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) e os concretos dosados com diferentes volumes de agregado graúdo (V_g). A variação no volume de graúdo nos concretos não interferiu significativamente na massa específica da mistura na condição fresca.

Os experimentos indicaram que o fator determinante, como esperado, é o teor de agregado leve na mistura. O teor de 60% de argila expandida AE-1506 quando observado sob a ótica da massa específica do concreto fresco, conforme indicado na Figura 4.9, é o limite entre o concreto autoadensável convencional (CAA) e o concreto leve autoadensável (CLAA).

FIGURA 4.9 Influência do teor de argila expandida na massa específica do concreto fresco produzido com diferentes teores de agregado graúdo

Fonte: O autor (2015)

As informações contidas na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4 permitem destacar alguns pontos a respeito dos concretos produzidos com argila expandida (CAA_{AE}) nesta etapa, como se segue:

- Todos os concretos foram dosados utilizando, à exceção do volume de gráudo (V_g), os mesmos parâmetros de dosagens utilizados no CAA_{REF};
- As misturas produzidas com $V_g = 0,292$ e $V_g = 0,332$ atingiram espalhamentos muito semelhantes entre si, mas com diferenças de 4,6% a 15,5% em relação aos espalhamentos obtidos com o CAA_{REF}. As misturas dosadas com V_g iguais a 0,332 foram produzidas com teores de 20% a 80% enquanto que as com V_g de 0,292 foram produzidas com teores de 20% a 60%;
- As misturas produzidas com V_g igual a 0,379, embora tenham atingido espalhamentos entre 570 mm e 660 mm, não atenderam aos limites de habilidade passante pelo anel-J (PJ de 25 mm a 50 mm).

Em resumo, com base nos experimentos e no desempenho das misturas produzidas nesta etapa, observados na Figura 4.3 à Figura 4.9, pode-se concluir:

1. O teor de substituição (TS) interfere de forma mais significativa na autoadensabilidade do CAA_{AE} do que variações no volume do agregado gráudo (Figura 4.1);
2. É possível obter CAA_{AE} com volume de agregado gráudo de 0,292 m³/m³ a 0,332 m³/m³ com teores de substituição de 20% a 60%;
3. Os concretos produzidos com $V_g = 0,292$ apresentam maior teor de argamassa ($V_m = 68,8\%$). Quanto menor o volume de gráudo (V_g), maior é o volume de argamassa (V_m).
4. Quanto maior o volume de argamassa (V_m) maiores são o espalhamento (Figura 4.3), a resistência à compressão (Figura 4.7) e o consumo de cimento (Figura 4.8), respectivamente;
5. Para que as misturas com teores de AE-1506 maiores que 40% atinjam aos critérios de autoadensabilidade fixados nesta pesquisa, é preciso diminuir o volume de gráudo (V_g) e aumentar a relação V_w/V_p .

4.2.2 FASE 3: Concretos autoadensáveis obtidos com brita de basalto e argila expandida

Os concretos produzidos na Fase 3 foram dosados a partir do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}), substituindo-se parte ou todo o volume absoluto da brita de basalto pelo volume equivalente da argila expandida AE-1506 modificando-se os parâmetros de dosagem relacionados na Tabela 4.6, em relação aos estabelecidos na dosagem do CAA_{REF}. No estado fresco foram ajustados para atender aos requisitos de autoadensabilidade previstos na norma ABNT NBR 15823-1 (2010). Os concretos produzidos na Fase 1 ($V_{ap} = 0,570$) e Fase 2 ($V_{ap} = 0,500$ e $V_{ap} = 0,650$) forneceram os subsídios iniciais para a produção das misturas.

TABELA 4.6 Parâmetros de dosagem alterados em relação aos definidos no concreto autoadensável de referência

PARÂMETROS DE DOSAGEM MODIFICADOS	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO				
	20%	40%	60%	80%	100%
Volume aparente de agregado gráudo (V_{ap}) (m^3/m^3)	0,570	0,570	0,510	0,505	0,505
Volume de agregado gráudo (V_g) (m^3/m^3) ⁽¹⁾	0,332	0,332	0,297	0,294	0,294
Relação volume de água/volume de finos (V_w/V_p)	1,050	1,100	1,120	1,120	1,120

(1) Os valores de V_g foram calculados utilizando da equação 3.12, considerando os índices físicos dos agregados gráudos apresentados no Anexo 1.

Fonte: O autor (2015)

Comparados com os valores definidos na dosagem do CAA_{REF}, mostrados na Tabela 4.3, os valores do volume aparente do agregado gráudo (V_{ap}) dos concretos autoadensáveis com argila expandida (CAA_{AE}) foram ajustados de 10,54% a 11,40% enquanto que a relação V_w/V_p foi ajustada em até 6,25%. Os concretos produzidos nesta fase foram ajustados experimentalmente, até o enquadramento nos limites de autoadensabilidade estabelecidos pelo autor na pesquisa.

Uma vez ajustados, as misturas foram repetidas pelo menos três vezes. Os concretos desenvolvidos nesta etapa da pesquisa são mostrados na Tabela 4.7. Os resultados dos ensaios dos concretos no estado fresco e endurecidos são mostrados na Tabela 4.8 e Tabela 4.12, respectivamente.

TABELA 4.7 Parâmetros de dosagem e características dos concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida

PARÂMETROS DE DOSAGEM CONSTANTES EM RELAÇÃO AO CAA _{REF}												
- Teor de substituição volume do cimento Portland volume de sílica ativa (F)						12,5%						
- Relação massa de sílica ativa / massa de cimento Portland (w _{sa} /w _c)						0,10						
- Relação da massa da areia 1 / massa do agregado miúdo (s ₁ /S)						0,50						
- Teor líquido do aditivo superplastificante em relação à massa de finos (Sp/p) ⁽⁴⁾						1,000%						
- Fração volumétrica do agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V _s /V _m)						47%						
IDENTIFICAÇÃO e TEOR DE SUBSTITUIÇÃO	REF	AE-20	AE-40	AE-60	AE-80	AE-100						
	0%	20%	40%	60%	80%	100%						
Repetições (N)	3	3	4	4	4	4						
1 - COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA												
VOL. APAR. DE GRAÚDO (V _{ap})	0,570	0,570	0,570	0,510	0,505	0,505						
VOL. DE FINOS (V _p)	0,167	0,167	0,163	0,171	0,178	0,178						
VOL. AGR. MIÚDO (V _s)	0,304	0,304	0,304	0,321	0,309	0,309						
VOL. AGRE; GRAÚDO (V _g)	0,332	0,332	0,332	0,297	0,294	0,294						
Brita 1 (basalto)	0,332	0,266	0,199	0,119	0,059	0,0						
AE-1506	0,0	0,066	0,133	0,178	0,235	0,294						
VOL. DE ÁGUA (V _w)	0,176	0,176	0,180	0,191	0,199	0,199						
V _m (%)	64,7	64,7	64,7	68,3	68,6	68,6						
Relação V _w /V _p	1,050	1,050	1,100	1,120	1,120	1,120						
Relação V _p /V _s	0,549	0,549	0,536	0,533	0,576	0,576						
2 - COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS												
MATERIAIS	Traço unitário	C (kg/m³)	Traço unitário	C (kg/m³)	Traço unitário	C (kg/m³)	Traço unitário	C (kg/m³)	Traço unitário	C (kg/m³)	Traço unitário	C (kg/m³)
Cimento Portland ⁽¹⁾	1,000	462,03	1,000	456,36	1,000	441,58	1,000	457,83	1,000	470,73	1,000	471,83
Sílica ativa	0,100	46,20	0,100	45,64	0,100	44,16	0,100	45,78	0,100	47,07	0,100	47,18
Areia 1	0,885	408,90	0,885	403,88	0,907	400,32	0,915	419,01	0,884	397,48	0,884	398,41
Areia 2	0,885	408,90	0,885	403,88	0,907	400,32	0,915	419,01	0,884	397,48	0,884	398,41
Brita 1	2,036	940,83	1,629	743,43	1,252	552,66	0,715	327,36	0,340	159,90	0,000	0,00
Argila exp. - AE-1506	0,000	0,00	0,149	67,92	0,305	134,65	0,392	179,45	0,497	233,75	0,621	292,87
Água total ⁽²⁾	-	201,69	-	197,96	-	199,01	-	205,57	-	209,09	-	208,50
SP	0,011	5,08	0,011	5,02	0,011	4,86	0,011	5,04	0,011	5,18	0,011	5,19
a/c	0,377		0,377		0,395		0,402		0,402		0,402	
a/p	0,343		0,343		0,359		0,366		0,366		0,366	
γ _{cf} (kg/m³)	2.427,2		2.309,9		2.136,4		2.020,6		1.884,8		1.788,8	
3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS ⁽³⁾												
Espalhamento (mm)	680 a 720		660 a 700		650 a 670		660 a 690		690 a 720		650 a 720	
Slump Flow – T ₅₀₀ (s)	1,08 a 2,57		1,53 a 3,09		1,40 a 2,37		2,36 a 4,93		1,81 a 2,91		2,60 a 4,33	
Hab. Passante – Anel-J	30 a 50		20 a 30		10 a 50		20 a 40		0 a 10		20 a 50	
f _{c28} (MPa)	73,5 a 81,4		58,5 a 65,4		47,0 a 50,6		50,0 a 56,9		41,8 a 49,8		41,4 a 47,4	
LEGENDA:												
N = Número de repetições				V _m = Volume de argamassa				a/c = Relação água/cimento				
γ _{cf} = Massa específica do concreto fresco				f _{c28} = Resistência à compressão aos 28 dias de idade				a/p = relação água/finos				
SP = Aditivo superplastificante				C = Consumo de materiais/m³ de concreto								

Fonte: O autor (2015)

A Tabela 4.8 apresenta os resultados dos ensaios que avaliam as características físicas e de autoadensabilidade dos concretos produzidos com e sem argila expandida, identificados na Tabela 4.7.

TABELA 4.8 Características físicas e de autoadensabilidade dos concretos autoadensáveis feitos com brita de basalto e argila expandida

TRAÇO	TS (%)	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E DE AUTOADENSABILIDADE											
		C _c (kg/m³) (1)	γ _{cf} (kg/m³) (2)	T _{ar} (%)	SLUMP FLOW		ANEL - J			FUNIL - V		CAIXA-L H ₂ /H ₁	SR (%)
					SF (mm)	T ₅₀₀ (s)	PJ (mm)	T _{500-J} (s)	BJ (mm)	T _{V-30} (s)	T _{V-300} (s)		
REF	0	463,3	2.433,8	0,59	680	2,03	40	3,81	15	4,03	5,43	0,82	14,5
	0	464,3	2.439,1	0,38	720	1,08	30	3,68	8	3,22	3,98	0,82	12,8
	0	460,5	2.419,2	1,19	700	1,57	30	3,46	14	3,06	4,04	0,98	5,9
AE-20	20	454,7	2.272,2	2,29	660	2,60	30	3,84	19	4,42	5,12	0,85	7,3
	20	454,2	2.269,5	2,4	690	2,30	20	3,91	13	4,03	4,93	0,86	5,8
	20	454,5	2.253,6	3,09	690	1,95	20	3,38	11	4,23	5,26	0,80	-
AE-40	40	442,4	2.140,4	2,47	670	2,37	50	3,62	18	5,15	6,50	0,83	-1,3 ⁽³⁾
	40	440,5	2.131,1	2,89	670	2,40	10	3,35	16	5,10	6,35	0,80	7,3
	40	441,0	2.133,8	2,77	650	2,24	20	3,52	14	5,22	6,52	0,71	-
	40	442,4	2.140,4	2,47	670	2,37	50	3,62	18	5,05	6,10	-	-
AE-60	60	457,3	2.017,9	3,32	670	2,83	30	5,21	17	5,71	7,25	0,76	9,6
	60	458,2	2.021,9	3,13	660	2,78	40	5,27	18	5,35	7,95	0,79	9,5
	60	458,2	2.023,2	3,06	690	2,38	20	5,38	13	5,15	6,78	0,82	-
	60	457,6	2.019,2	3,26	670	2,36	30	5,28	18	5,46	7,12	0,75	-
AE-80	80	471,2	1.886,8	4,23	700	2,40	0	4,11	21	6,42	6,93	0,75	3,0
	80	472,2	1.890,7	4,02	710	2,81	10	4,76	16	6,25	7,05	0,84	-9,1 ⁽²⁾
	80	469,9	1.881,5	4,49	720	2,57	10	4,12	17	6,95	7,78	0,84	-
	80	469,6	1.880,1	4,56	690	2,91	10	4,70	23	7,35	8,10	-	-
AE-100	100	468,3	1.774,8	4,64	660	3,60	50	4,55	19	7,74	8,25	0,70	10,9
	100	473,5	1.794,7	3,58	660	3,40	30	4,25	17	8,10	9,25	0,89	10,7
	100	472,7	1.791,4	3,75	650	3,83	20	4,85	21	8,35	9,83	-	-
	100	472,8	1.792,1	3,72	720	3,15	30	4,17	17	7,33	8,15	-	-

LEGENDA:

TS = Teor de substituição

C_c = Consumo de cimento Portland/m³ de concreto

γ_{cf} = Massa específica do concreto fresco

T_{ar} = Teor de ar incorporado

SF = Espalhamento (Slump Flow)

T₅₀₀ = Tempo de escoamento para atingir a marca de 500 mm (Slump Flow)

PJ = Habilidade passante pelo anel - J

T_{500-J} = Tempo de escoamento para atingir a marca de 500 mm (anel - J)

BJ = Bloqueio ou obstrução à passagem no anel - J

T_{V-30} = Tempo de escoamento pelo funil - V após 30 s

T_{V-300} = Tempo de escoamento pelo funil - V após 300 s

H₂/H₁ = Habilidade passante pela caixa - L

SR = Resistência à segregação

OBSERVAÇÕES

1- Os valores do consumo de cimento/m³ de concreto (C_c) foram estimados segundo os procedimentos da norma ABNT NBR 9833 (2009);

2- Os valores da massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) representam a média dos valores relacionados no ANEXO 3, nas tabelas identificadas por Tabela AN 3.3, Tabela AN 3.6, Tabela AN 3.7, Tabela AN 3.9, Tabela AN 3.10 e Tabela AN 3.11;

3- Os valores de espalhamento representam a média de duas medidas obtidos nos ensaios realizados com o Cone de Abrams e o Anel-J, respectivamente;

4- O valor negativo da resistência à segregação indica flutuação do agregado leve (argila expandida AE-1506)

4.2.3 FASE 3: Caracterização dos concretos autoadensáveis no estado fresco

Os concretos autoadensáveis relacionados na Tabela 4.5 foram caracterizados na condição fresca por meio da massa específica do concreto fresco (ABNT NBR 9833, 2009) e pelos ensaios propostos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas para este tipo de concreto, como se segue:

- Os ensaios de espalhamento (SF), viscosidade plástica aparente (fluxo livre) – Slump Flow -, T_{500} (VS) (NBR 15823-2);
- Habilidade passante pelo anel–J (PJ) (fluxo livre) (NBR 15823-3);
- Habilidade passante pela caixa–L (PL) (fluxo confinado) (NBR 15823-4);
- Viscosidade plástica aparente pelo funil–V (fluxo confinado) (VF) (NBR 15823-5) e;
- Resistência à segregação (SR) (coluna de segregação) (NBR 15823-6).

As análises das características autoadensabilidade dos concretos produzidos nesta fase, apresentadas a seguir, foram feitas a partir dos aspectos da capacidade de preenchimento, habilidade de passagem por obstáculos e resistência à segregação. Os resultados dos ensaios dos concretos produzidos nesta etapa são mostrados na Tabela 4.8.

a) CAPACIDADE DE PREENCHIMENTO DOS CAA_{AE}

Esta propriedade do concreto autoadensável foi avaliada por meio dos ensaios de espalhamento (Slump Flow) e T_{500} , realizados com o cone de Abrams e pelos ensaios de escoamento da mistura pelo funil-V (T_{V-30} e T_{V-300}), seguindo os procedimentos prescritos nas normas ABNT NBR 15823-2 e ABNT NBR 15823-3. A Figura 4.10, a Figura 4.11 e a Figura 4.12 ilustram, respectivamente, os resultados desses experimentos.

FIGURA 4.10 Espalhamento pelo tronco de cone (Slump Flow) dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.11 Tempo de escoamento (T_{500}) dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Nota-se na Figura 4.10 que todas misturas atingiram a faixa de espalhamento de 650 mm a 750 mm especificada pelo autor (linha tracejada).

A Tabela 4.4 relaciona as alterações nos valores da relação V_w/V_p e volume sólido do agregado graúdo (V_g), em relação aos mesmos parâmetros definidos na Fase 1 e Fase 2. Tais mudanças foram feitas para ajustar as misturas aos limites de autoadensabilidade fixados previamente na pesquisa, ou seja:

1. Nas misturas com teor de substituição de 40% foi aumentada a relação V_w/V_p que passou de 1,050 para 1,100. Isso implica em alterações na quantidade de água dos concretos;
2. Em relação ao traço de referência (CAA_{REF}) as misturas com teores de substituição de 60%, 80% e 100%, modificou-se a relação V_w/V_p que passou de 1,050 para 1,120, enquanto que o volume de agregado graúdo (V_g) foi diminuído de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para $0,286 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (CAA_{AE-60}) e de $0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para $0,284 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (CAA_{AE-80} e CAA_{AE-100}).

O acréscimo da quantidade de água em 4,54% melhorou a fluidez das misturas produzidas com 40% de substituição quando comparada com aquelas confeccionadas com $V_w/V_p = 1,050$ (Figura 4.1). O ganho na fluidez na mistura neste caso, foi decorrente da melhor qualidade na lubrificação entre as partículas de agregado, diminuindo a tensão de escoamento, melhorando a fluidez da mistura (UYGUNOGLU; TOPÇU, 2011).

Os incrementos de água foram feitos por tentativas, pois a fluidez excessiva, neste caso provocado por excesso de água, diminui a resistência à segregação da mistura. Já concretos produzidos com teores de substituição maiores que 40% tiveram além do incremento de 6,25% na quantidade de água, reduções no volume de graúdo em até 11,45% na comparação com o traço de referência (CAA_{REF}).

Essas alterações implicam em modificações na reologia das misturas à medida que mudam as composições em termos de volume de pasta (V_p) e volume de argamassa (V_m). Para argamassas com mesma viscosidade é o teor de pasta e a fração de agregados miúdos que podem garantir coesão adequada e capacidade de deformação da mistura. (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012).

O aumento no valor da relação V_w/V_p e a redução do volume de gráudo (V_g), tiveram efeito positivo na reologia das misturas. Observando a Figura 4.10 nota-se que as misturas com teores de substituição a partir de 60% apresentaram crescimento nos valores do espalhamento com as modificações nos teores de água e volume de agregado gráudo. Essas modificações causaram aumento no volume de argamassa, que de 64,7% foi a 68,6%, enquanto que o consumo de cimento aumentou em 6,4%.

Considerando que o teor de aditivo superplastificante foi mantido constante, a melhoria no espalhamento das misturas foi decorrência do aumento no teor de finos (cimento Portland + sílica ativa) e do volume de água nas misturas.

Os tempos de espalhamento pelo tronco de cone (T_{500}) e escoamento pelo funil – V (T_{V-30} e T_{V-300}) são ilustrados na Figura 4.11 e na Figura 4.12. Todas as misturas confeccionadas com argila expandida AE-1506 apresentaram tempos de espalhamento T_{500} maior ou igual a 2 segundos e tempos de escoamento T_{V-30} de 3,35 segundos a 8,35 segundos e T_{V-300} de 4,93 segundos a 9,83 segundos.

A avaliação qualitativa da viscosidade plástica aparente do concreto pode ser obtida por meio da medida do tempo de escoamento do CAA em ensaios que medem a habilidade de preenchimento da mistura. O concreto com maior viscosidade demanda maior tempo para fluir (ABNT NBR 15823-1, 2010). As diretrizes da EFNARC (2005) indicam o uso do tempo de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento no funil - V como parâmetros para avaliar qualitativamente a viscosidade aparente do concreto autoadensável.

A norma ABNT NBR 15823-1 (2010) estabelece classes de viscosidade plástica aparente¹⁷ do CAA em função da sua aplicação tendo como base os tempos de espalhamento T_{500} e escoamento pelo funil–V (T_V), cujos valores são apresentados na Tabela 4.9. A Figura 4.12 mostra a equação matemática que estabelece a relação entre os tempos para atingir o espalhamento de 500 mm (T_{500}) e os tempos de escoamento pelo funil–V decorridos 30 segundos do preenchimento do dispositivo de ensaio (T_{V-30}), obtidos nos experimentos realizados com os concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida.

---

¹⁷ Viscosidade plástica aparente do concreto: propriedade que está relacionada com a consistência da mistura (coesão) e que influencia na resistência (comportamento) do concreto ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento. (ANBT NBR 15823-1, 2010)

TABELA 4.9 Viscosidade plástica aparente aplicáveis aos concretos autoadensáveis produzidos com agregados normais

CLASSE DE VISCOSIDADE PLÁSTICA APARENTE	TEMPO DE ESPALHAMENTO T_{500} (s)	TEMPO DE ESCOAMENTO PELO FUNIL-V T_{V-30} (s)
VS 1 / VF 1	≤ 2	≤ 8
VS 2 / VF 2	> 2	9 a 25

Fonte: Adaptada da norma ABNT NBR 15823-1 (1010)

FIGURA 4.12 Relação entre o tempo de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V (T_{V-30}) dos concretos autoadensáveis com argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

A resistência ao escoamento do CAA está relacionada ao maior ou menor atrito entre as partículas de agregado, especialmente quando o concreto é forçado entre obstáculos ou aberturas estreitas. Desta forma, o tempo de escoamento do CAA pelo o funil-V é influenciado pela densidade do concreto, quantidade, forma e granulometria dos agregados, além da quantidade e viscosidade da pasta (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; UYGUNOGLU; TOPÇU, 2011).

O tempo de escoamento pelo funil-V do concreto leve autoadensável (CLAA) pode ser até 25% maior do que o obtido no concreto autoadensável convencional (CAA), para misturas com mesma faixa de espalhamento (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012).

Observa-se pela Tabela 4.8 que nos concretos produzidos com argila expandida os tempos de escoamento pelo funil - V (T_{V-30}), dependendo do teor de substituição aumentaram em 18,7% (CAA_{AE-20}), 36,6% (CAA_{AE-60}) e 56,3% (CAA_{AE-100}) em relação ao CAA_{REF} . A Figura 4.13 e a Figura 4.14 ilustram as relações entre os tempos de escoamento pelo funil-V (T_{V-30}) e teor de substituição e o tempo de espalhamento T_{500} em função da massa específica do concreto fresco (γ_{cf}), respectivamente.

FIGURA 4.13 Relação entre o tempo de escoamento pelo funil – V (T_{V-30} e T_{V-300}) dos concretos autoadensáveis dosados com argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.14 Relação entre o tempo de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V (T_{V-30}) e a massa específica do CAAAE no estado fresco

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.15 Espalhamento (Slump Flow) de concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

b) HABILIDADE PASSANTE DOS CAA_{AE}

A habilidade passante, definida pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010) como sendo a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da forma, passando por entre os embutidos, sem obstrução do fluxo ou segregação da mistura, é avaliada por meio dos dispositivos anel-J (16 barras – ϕ 12,5mm) e caixa-L (3 barras – ϕ 12,5mm). Os procedimentos de ensaio são os preconizados pelas normas ABNT NBR 15823-3 (2010) e ABNT NBR 15823-4 (2010).

A avaliação do bloqueio do agregado gráudo nas hastes do anel-J foi feita por meio de medidas da altura da superfície do concreto no centro do anel-J e externamente, junto as hastes que compõem o dispositivo, conforme ilustrado na Figura 4.16. A determinação do bloqueio ou obstrução (BJ) à passagem da mistura pelas barras do anel – J foi feita por meio da equação 4.1.

$$BJ = \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \right) - h_c \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

BJ = Bloqueio ou obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel-J;
 h_1, h_2, h_3, h_4 = alturas medidas entre a superfície do concreto e a face superior do anel-J, próximas às barras de aço do anel-J;

h_c = altura entre a superfície do concreto e a face superior do anel-J, medida no centro do dispositivo.

FIGURA 4.16 Esquema para medidas do bloqueio do concreto autoadensável no anel - J

Fonte: O autor (2015)

S/ ESCALA

Os resultados dos ensaios realizados com o anel-J e caixa-L são ilustrados na Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19.

FIGURA 4.17 Habilidade passante pelo anel-J (PJ) dos concretos produzidos com AE-1506

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.18 Habilidade passante pelo anel-J: bloqueio à passagem do concreto com argila expandida AE-1506 pelas barras do dispositivo

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.19 Habilidade passante pela caixa-L (PL) dos concretos produzidos com argila expandida do tipo AE-1506

Fonte: O autor (2015)

As adequações nos teores de água (V_w/V_p) e agregado graúdo (V_g) refletiram positivamente nos resultados dos ensaios para a verificação da habilidade passante das misturas utilizando os dispositivos identificados por anel-J e caixa-L.

Na forma geral, conforme ilustrado pela Figura 4.17 e Figura 4.18, os concretos produzidos com e sem argila expandida do tipo AE-1506, atenderam aos requisitos mínimos especificados pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010) para a habilidade passante pelo o anel – J ($PJ \leq 50$ mm). Os valores de bloqueios à passagem da mistura pelas barras que se situaram na faixa de 8 mm a 23 mm. Essa norma não estabelece valores limites para o bloqueio.

O desempenho dos CAA_{AE} também foi positivo no que se refere à habilidade passante das misturas pela caixa-L, conforme ilustrado pela Figura 4.19. Neste caso as relações H_2/H_1 variaram de 0,70 a 0,93, próximas a $H_2/H_1 > 0,8$, valor especificado pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010). A relação água/cimento (a/c), a forma e distribuição granulométrica dos agregados, especialmente o graúdo, interferem na habilidade do CAA na passagem por obstáculos (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; CUI; LO; XING, 2010; UYGUNOGLU; TOPÇU, 2011).

Os experimentos demonstraram que a melhor lubrificação entre as partículas dos agregados, aliado à forma arredondada dos agregados graúdos e volume de argamassa adequados à viscosidade da mistura, contribuíram para o bom desempenho dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida no requisito habilidade passante sobre obstáculos. Pela Figura 4.20 observa-se que existe relação entre a massa específica (γ_{cf}) do concreto fresco e a habilidade passante pelo anel-J (PJ) dos concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida brasileira.

Tendo como base os valores médios da massa específica do concreto fresco, o bloqueio à passagem pelas barras do anel-J (BJ) e a habilidade passante pela caixa-L (H_2/H_1), estabeleceu-se uma tendência. Para a representação gráfica, os valores do bloqueio à passagem (BJ) na Figura 4.18, foram divididos por 10 com relação aos valores relacionados na Tabela 4.8.

FIGURA 4.20 Relação entre a massa específica fresca (γ_{cf}) e a Habilidade passante dos concretos produzidos com argila expandida do tipo AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Observe na Figura 4.20 que a variação da relação H_2/H_1 obtido no ensaio com a caixa-L apresenta pequenas variações, tendendo à constância enquanto que, o bloqueio (BJ) à passagem pelas barras do anel-J, tende a aumentar com a redução da massa específica do concreto fresco.

Tal fenômeno pode ter sido provocado pela pressão exercida pela mistura em decorrência do confinamento na câmara vertical da caixa-L e pela forma esférica dos agregados, minimizando o bloqueio da mistura e equilibrando os efeitos no escoamento da mistura em razão dos diferentes valores de massa específica dos concretos. A Figura 4.21 ilustra os espalhamentos obtidos nos ensaios com o anel-J dos diversos concretos autoadensáveis produzidos nesta fase da pesquisa.

FIGURA 4.21 Espalhamento dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506 no ensaio com o anel-J

Fonte: O autor (2015)

c) RESISTÊNCIA A SEGREGAÇÃO DOS CAA_{AE}

A segregação do concreto leve autoadensável (CLAA) é um fenômeno físico que pode estar presente, dada as características dos materiais e a fluidez das misturas. O concreto leve autoadensável está mais sujeito à segregação do que o concreto autoadensável (CAA) por conta das diferenças de densidades entre a argamassa e o agregado leve (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; WU et al., 2009).

Sendo assim, foram realizados experimentos para avaliar a segregação por meio da determinação da resistência à segregação¹⁸ dos concretos produzidos com e sem argila expandida AE-1506, utilizando o método da coluna de segregação. Os procedimentos para a execução dos ensaios foram os descritos na norma ABNT NBR 15823-6, 2010. Os resultados destes ensaios são mostrados na Tabela 4.8 e ilustrados na Figura 4.22.

FIGURA 4.22 Espalhamento dos concretos autoadensáveis dosados com diferentes teores de argila expandida AE-1506 no ensaio com o anel - J

Fonte: O autor (2015)

Observando os dados relacionados na Tabela 4.8 e a Figura 4.19, nota-se que os valores da resistência à segregação (SR) atingem os limites estabelecidos na

¹⁸ Resistência à segregação é definida como a capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento (ABNT NBR 1823-1, 2010).

norma ABNT NBR 15823-1 (2010) ($SR < 20\%$), independentemente do teor de substituição do volume de agregado graúdo pelo agregado.

Os valores relacionados na Tabela 4.8 mostram que a resistência à segregação do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) apresentaram variações de 5,9% a 14,5%, enquanto que para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}), os valores variaram de 5,8% (CAA_{AE-20}) a 10,9% (CAA_{AE-100}).

Neste ponto, destacam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à segregação dos concretos confeccionados com 40% e 80% de substituição do agregado natural pela argila expandida AE-1506. Nestes casos, das duas misturas avaliadas em cada um dos concretos, em pelo menos uma das amostras de cada teor de substituição, foi detectado a “flutuação” do agregado leve. Os valores negativos de -1,3% (CAA_{AE-40}) e -9,1% (CAA_{AE-80}), mostrados na Tabela 4.8, indicam a ocorrência da flutuação aa argila expandida AE-1506.

A determinação da resistência à segregação (SR) é feita com base em pesagem para avaliar a diferença das massas de agregado graúdo presentes no topo e na base da coluna de segregação. Desta forma, além dos procedimentos previstos na aplicação do método, foram feitos outros experimentos com a finalidade de quantificar os volumes de pedra britada (brita 1) e agregado leve (argila expandida - AE-1506) existentes no topo e na base da coluna de segregação.

Para tanto, após a lavagem e pesagem das frações de grãos (agregado natural + agregado leve) presentes no topo e na base da coluna, os agregados foram separados por tipos, secos ao ar por 24 horas e, em seguida, pesados em balança eletrônica. Os resultados destes experimentos são mostrados na Tabela 4.10. A Figura 4.23 ilustra os agregados grãos presentes na base e no topo da coluna de segregação, após a lavagem na peneira de 4,76 mm em água corrente.

FIGURA 4.23 Fração de agregado graúdo encontrado na base e no topo da coluna de segregação

Fonte: O autor (2015)

TABELA 4.10 Volume efetivo de agregado graúdo no topo e na base da coluna de segregação

POSIÇÃO NA COLUNA	TIPO DE AGREGADO	Ensaio n°	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO PREVISTO (%)					
			0	20	40	60	80	100
TOPO	BRITA 1	1	100,0	78,2	59,1	36,4	15,9	0,0
		2		76,9	57,4	35,6	-	
		MÉDIA		78,5	58,3	36,0	15,9	
	AE-1506	1	0,0	21,8	40,9	63,6	84,1	100,0
		2		23,1	42,6	64,4	-	
		MÉDIA		22,8	41,8	64,0	84,1	
BASE	BRITA 1	1	100,0	77,4	54,2	31,0	16,0	0,0
		2		80,3	56,5	33,5	-	
		MÉDIA		78,9	55,4	32,3	16,0	
	AE-1506	1	0,0	22,6	45,8	69,0	84,0	100,0
		2		19,7	43,8	66,5	-	
		MÉDIA		21,2	44,8	67,8	84,0	

Fonte: O autor (2015)

A Figura 4.24 ilustra os resultados mostrados na Tabela 4.10 relacionando o volume efetivo e o volume teórico previsto para a argila expandida AE-1506 na composição dos concretos autoadensáveis, utilizando os agregados coletados no topo e na base da coluna de segregação.

FIGURA 4.24 Volume de argila expandida AE-1506 efetivo na coluna de segregação

Fonte: O autor (2015)

Considerando os valores relacionados na Tabela 4.10 e a Figura 4.24 é possível afirmar que a coluna de segregação pode ser utilizada para avaliar a segregação dos concretos produzidos com argila expandida.

Os resultados indicam uma boa distribuição do agregado gráudo no topo e na base da coluna. No topo as variações, em termos absolutos, foram de 1,8% (CAA_{AE-20}) a 4,1% (CAA_{AE-80}), enquanto que na base ficaram entre 1,2% e 7,8% (CAA_{AE-80}). As variações no volume da argila expandida, quando se comparam o material presente no topo e na base, foram de 0,6% a 3,8%.

A Figura 4.25 ilustra a qualidade do acabamento superficial recorrente do concreto autoadensável produzido nesta pesquisa. Observe a “flutuação” do agregado leve superficial após o alisamento com a colher de pedreiro. As causas disso, provavelmente estejam relacionadas às diferenças de massa específica fresca da argamassa ($\gamma_{arg} = 2.185 \text{ kg/m}^3$) e do agregado gráudo leve ($\gamma_s = 1.024 \text{ kg/m}^3$).

A Figura 4.26 ilustra a distribuição dos agregados gráudos observadas nos corpos de prova cilíndricos (100mm x 200mm), amostrados nos concretos autoadensáveis, após o ensaio de tração por compressão diametral.

FIGURA 4.25 Acabamento superficial do concreto autoadensável após alisamento com colher de pedreiro: CAA_{REF} (a) e CAA_{AE} (b) e (c)

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.26 Distribuição da pedra britada de basalto ($\phi 19$ mm) e argila expandida AE-1506 em corpos de prova cilíndricos de concreto (100 x 200)mm

Fonte: O autor (2015)

d) CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAA_{AE} NO ESTADO FRESCO PRODUZIDO NA FASE 3

Os concretos produzidos com argila expandida (CAA_{AE}), quando dosados com os mesmos parâmetros utilizados no CAA_{REF}, (Fase 1), apresentaram valores de espalhamento pelo tronco de cone (Slump Flow) que, dependendo do volume de agregado graúdo (V_g) e do teor de substituição (TS), que variaram de 690 mm a 430 mm, conforme mostra a Tabela 4.4.

A norma ABNT NBR 15823-1 (2010) estabelece faixas de espalhamento (Slump Flow) para os concretos autoadensáveis convencionais que variam de 550 mm a 750 mm. Os concretos produzidos nesta fase da pesquisa, à exceção do CAA_{AE}-100, atingiram a faixa de espalhamento de 650 mm a 750 mm, estabelecida pelo autor para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida..

No entanto, para atingir aos limites de autoadensabilidade previstos na norma ABNT NBR 15823-1 (2010) e a faixa de espalhamento estabelecida pelo autor, foram necessários especificar outros valores dos parâmetros adotados inicialmente na dosagem dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida AE-1506, conforme mostra a Tabela 4.11.

TABELA 4.11 Parâmetros de dosagem dos concretos autoadensáveis confeccionados com argila expandida AE-1506

PARÂMETROS DE DOSAGEM	CAA _{REF}	CAA _{AE}		CLAA _{AE}		
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Volume aparente do graúdo (V_{ap}) (m ³)	0,570	0,570	0,570	0,510	0,505	0,505
Volume absoluto do graúdo (V_g) (m ³)	0,332	0,332	0,332	0,286	0,284	0,284
Volume de agregado miúdo (V_s) (m ³)	0,304	0,304	0,304	0,321	0,309	0,309
Teor de argamassa (V_m) (%)	64,7	64,7	64,7	68,6	68,6	68,6
Relação V_w/V_p	1,050	1,050	1,100	1,120	1,120	1,120
Relação V_p/V_s (%)	54,9	54,9	53,6	53,3	57,6	57,6
Relação V_s/V_m (%)	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0
Teor de aditivo superplastificante (Sp/p) (%)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CARACTERÍSTICAS DE AUTOADENSABILIDADE						
Espalhamento (Slump Flow) (mm)	650 a 750	650 a 700		650 a 720		
T_{500} (s)	-	1,40 a 3,10		1,80 a 4,93		
T_{v-30} (s)	-	4,03 a 5,22		5,22 a 8,35		
Habilidade passante - Anel - J (PJ) (mm)	25 a 50	10 a 50		10 a 50		

Fonte: O autor (2015)

Os parâmetros de dosagem modificados em relação ao CAA_{REF} , foram o volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) o teor de argamassa (V_m) e a relação Volume de água/Volume de finos (V_w/V_p). A alteração na relação Volume de finos/Volume de miúdo (V_p/V_s) é decorrência das modificações nos parâmetros de dosagem. Nos concretos autoadensáveis com teores de substituição menores que 60%, alterou-se somente a quantidade de água para os concretos produzidos com 40% de argila expandida.

Portanto, considerando os resultados mostrados na Tabela 4.7, Tabela 4.8 e Tabela 4.11, pode-se afirmar, com relação aos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}) na condição fresca:

- a. O teor de argila interfere na dosagem dos concretos pois exigem modificações no volume aparente de agregado graúdo (V_{ap}), no volume de argamassa (V_m) e na relação volume de finos/Volume de agregado miúdo (V_p/V_s);
- b. Utilizando materiais com características similares aos usados nesta pesquisa, é possível produzir CLAA com fração de graúdo, em volume absoluto, constituída por 60% de argila expandida AE-1506, desde que utilizados os parâmetros de dosagem indicados na Tabela 4.11;
- c. Os concretos com até 40% de substituição foram produzidos com até 5% a menos de cimento, enquanto que para teores superiores a 80% podem exigir consumos superiores ao do CAA_{REF} em até 3%;
- d. Os limites mínimos de autoadensabilidade fixados pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010) foram garantidos nas misturas.

4.2.4 FASE 3: Desempenho dos concretos autoadensáveis na condição endurecida

Os concretos autoadensáveis produzidos na FASE 3 foram avaliados na condição endurecida nas suas características físicas e mecânicas, carbonatação e condutividade térmica. A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios.

TABELA 4.12 Características físicas e mecânicas dos concretos produzidos com argila expandida em substituição ao agregado normal

CAA	TS (%)	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO								
		C _c	RESISTÊNCIA		E _{sc}	ν	F _{EE}	ÍNDICES FÍSICOS (ABNT NBR 9778, 2009)		
			f _{c28}	ftc ₂₈				Ab	I _v	γ _s
REF	0	463,3	74,1	5,40	-	-	31,1	2,11	5,03	2.386,0
	0	464,3	80,0	-	36,0	0,171	33,9	3,21	7,56	2.359,2
	0	460,5	79,4	5,94	35,3	0,157	34,1	3,39	7,90	2.329,7
AE-20	20	454,7	60,4	4,87	34,9	0,2023	27,1	4,49	10,03	2.232,8
	20	454,2	63,7	5,00	34,6	0,1849	29,1	4,18	9,16	2.191,6
	20	454,5	61,5	-	-	-	-	-	-	-
AE-40	40	442,4	47,8	-	-	-	22,0	2,67	5,80	2.173,2
	40	440,5	52,0	-	28,6	0,1779	24,5	3,13	6,66	2.124,5
	40	441,0	49,4	4,60	37,9	0,1914	23,4	3,44	7,26	2.114,2
	40	442,4	49,3	-	-	-	-	-	-	-
AE-60	60	457,3	51,6	-	-	-	26,0	4,65	9,24	1.986,0
	60	458,2	51,7	-	29,2	0,1906	25,7	3,73	7,50	2.013,2
	60	458,2	52,7	4,41	23,5	0,1682	26,9	3,58	7,02	1.959,8
	60	457,6	56,8	-	-	-	-	-	-	-
AE-80	80	471,2	44,3	-	-	-	24,6	5,38	9,69	1.801,3
	80	472,2	48,3	-	24,5	0,1987	24,1	4,12	8,21	1.904,3
	80	469,9	44,3	3,59	26,8	0,1580	22,2	4,65	9,31	1.993,1
	80	469,6	48,4	-	-	-	-	-	-	-
AE-100	100	468,3	45,3	-	-	-	26,8	5,69	9,84	1.689,1
	100	473,5	44,2	-	24,1	0,1209	25,6	4,99	8,59	1.728,0
	100	472,7	42,6	3,60	23,6	0,1796	24,4	6,11	10,68	1.745,0
	100	472,8	48,4	-	-	-	-	-	-	-

LEGENDA:E_{sc} = Módulo de elasticidade, estático, em GPa

ν = Coeficiente de Poisson

Ab = Absorção de água, em %

γ_s = Massa específica do concreto seco

CAA = Concreto autoadensável

F_{EE} = Fator de eficiência estrutural, em MPa.dm³/kgf_{c28} = Resistência à compressão aos 28 dias, em MPaftc₂₈ = Resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, em MPaI_v = índice de vazios**OBSERVAÇÕES**

- Os resultados apresentados nesta tabela são valores médios dos resultados individuais mostrados no ANEXO 3, na Tabela AN 3.3, Tabela AN 3.5, Tabela AN 3.7, Tabela AN 3.9, Tabela AN 3.10, Tabela AN 3.11;
- O valor negativo da resistência à segregação indica flutuação do agregado leve (argila expandida AE-1506).

Neste ponto serão apresentadas algumas considerações relativas aos resultados dos ensaios relacionados na Tabela 4.12 (resistências à compressão e tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, absorção de água, índice de vazios e massa específica seca), carbonatação e condutividade térmica, obtidos nos concretos leves autoadensáveis feitos na FASE 3.

a) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO SECO

As resistências à compressão dos concretos foram obtidas a partir de corpos de prova cilíndricos (100mm x 200mm), cujo plano de rompimento foi 3/3; 3/7 e 3/28 (nº de corpos de prova por idade, em dia).

A Tabela 4.10 mostra o valor médio das resistências obtidas em 3 corpos de prova ensaiados aos 28 dias de moldagem para cada um dos concretos produzidos com e sem argila expandida AE-1506. Os traços foram repetidos três vezes (CAA_{REF} e CAA_{AE-20}) a quatro vezes (, CAA_{AE-40}, CAA_{AE-60}, CAA_{AE-80} e CAA_{AE-100}). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 3 dias e 7 dias podem ser observados no ANEXO 3 deste trabalho. A Figura 4.27 ilustra o desempenho dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida, considerando a média dos valores das resistências obtidas para cada uma das misturas relacionadas na Tabela 4.12.

FIGURA 4.27 Resistência à compressão (f_{c28}) em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

A Figura 4.28 ilustra o desempenho dos diversos concretos autoadensáveis relacionados na Tabela 4.12, considerando os valores médios da resistência à compressão, constantes no ANEXO 3 (Tabela A3-5, Tabela A3-7, Tabela A3-9 à Tabela A3-11), obtidos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

FIGURA 4.28 Resistência à compressão (fc_3 - fc_7 - fc_{28}) em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Observando-se a Figura 4.27 e a Figura 4.28 nota-se que a resistência à compressão dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}) apresentou tendência de queda à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo agregado leve, na comparação com o concreto de referência (CCA_{REF} - teor de substituição igual a zero), independentemente da idade avaliada.

Na Tabela 4.13 são apresentadas algumas relações determinadas a partir das resistências médias dos concretos autoadensáveis (CAA) nas idades de 3, 7 e 28 dias, considerando os teores de substituição do agregado graúdo natural pela argila expandida do tipo AE-1506.

TABELA 4.13 Desempenho dos concretos autoadensáveis sob o aspecto da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias

TEOR DE SUBSTITUIÇÃO / CAA	Consumo de cimento (C_c) (kg/m ³)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) ⁽¹⁾			COEFICIENTE DE CRESCIMENTO		QUEDA DA RESISTÊNCIA ENTRE DOS CONCRETOS (%) ⁽²⁾		
		f_{c3}	f_{c7}	f_{c28}	(3 para 7) dias	(7 para 28) dias	f_{c3}	f_{c7}	f_{c28}
0 REF	462,0	48,1	56,2	76,4	1,168	1,359	-	-	-
20 AE-20	454,5	46,0	49,7	61,9	1,080	1,245	4,4	11,5	19,0
40 AE-40	441,6	39,2	43,9	49,6	1,119	1,132	18,5	21,9	30,3
60 AE-60	457,8	38,2	44,3	53,2	1,160	1,200	20,6	21,1	30,3
80 AE-80	470,7	33,4	42,2	46,3	1,263	1,098	30,5	24,9	39,3
100 AE-100	471,8	37,7	40,9	45,1	1,086	1,104	21,7	27,2	40,9

OBSERVAÇÕES

1 - Valores médios das resistências obtidas nas repetições dos concretos autoadensáveis relacionados na Tabela 4.12. Os valores individuais das resistências são apresentados no Anexo 3 (Tabela A3-5, Tabela A3-7, Tabela A3-9 à Tabela A3-11)

2 - Valores calculados em relação ao concreto autoadensável de referência (CAA_{REF})

Fonte: O autor (2015)

Pela Tabela 4.11 nota-se que o concreto de referência (CAA_{REF}) apresenta os maiores coeficientes de crescimento das resistências. Os concretos autoadensáveis produzidos com teor de argila expandida superior a 20% apresentaram evoluções na resistência dos 7 dias para 28 dias, relativamente pequenos (9,8% a 20,0%), comparados aos verificados para os concretos CAA_{REF} (35,9%) e CAA_{AE-20} (24,5%).

Observando-se a Figura 4.28 e os valores médios das resistências relacionadas na Tabela 4.13, verifica-se a diminuição da resistência em até 40% (CAA_{AE-100}) em relação aos valores médios da resistência à compressão do CAA_{REF}. Note que, a queda nos valores de resistência ocorre independentemente do teor de substituição utilizados nos concretos, mesmo com acréscimos de 2,1% no consumo de cimento em relação ao do CAA_{REF}.

Estes fatos corroboram com o apregoado por Cui, Lo e Xing (2010) de que, as características do concreto leve autoadensável (CLAA) estado endurecido, são limitadas às propriedades do agregado leve utilizado.

No geral, a variação do consumo de cimento/m³ de concreto, em relação ao do CAA_{REF}, foi da ordem de (462 kg/m³±2%). Estes valores são compatíveis os valores

de consumo de cimento de concretos autoadensáveis produzidos com e sem agregados leves (GOMES, 2002; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010; YGUNOGLU; TOPÇU, 2011; BORJA, 2011).

Diversos órgãos normalizadores, conforme relacionado anteriormente na Tabela 2.7, classificam como concreto leve estrutural aquela mistura cujo valor da massa específica seca (γ_s) seja menor ou igual a 2000 kg/m³. Por esta classificação, note pela Figura 4.29, que o teor de 60% substituição é o limite entre concreto autoadensável normal (CAA) e concreto leve autoadensável para misturas produzidas com argila expandida AE-1506 (CAA_{AE}).

FIGURA 4.29 Massa específica seca (γ_s) dos em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Considerando a média dos valores da massa específica e do consumo de cimento/m³ de concreto para cada teor de substituição, apresentados na Tabela 4.12, percebe-se que em relação ao concreto autoadensável de referência (CAA_{REF} - 2.358,3 kg/m³) a massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis produzidos com 60% de substituição (CAA_{AE-60} - 1.986,3 kg/m³) diminui 15,8%. Os concretos leves autoadensáveis (CLAA) produzidos utilizando somente a argila expandida AE-1506 (CAA_{AE-100} - 1.720 kg/m³) apresentaram redução de 27,0%.

Esses valores de massa específica seca são superiores aos obtidos por Borja (2011) em concretos autoadensáveis produzidos com adições de metacaulin e cinzas de biomassa de cana, areia lavada natural e argila expandida AE-0500 e AE-1506, com consumos de cimento (CP V-ARI) de 444 kg/m³ a 555 kg/m³ e massa específica seca de 1.529 kg/m³ a 1.564 kg/m³ e inferiores ao limite máximo (1.800 kg/m³), sugerido por Rossignolo (2009) para concretos leves estruturais (CLE) produzidos com argila expandida brasileira.

Segundo Cui, Lo e Xing (2010) a densidade seca do concreto leve autoadensável diminui levemente com o aumento do conteúdo de finos. De fato, conforme mostra a Figura 4.30, o consumo de cimento não interferiu significativamente nos valores da massa específica seca dos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida AE-1506.

FIGURA 4.30 Relação entre o consumo de cimento e massa específica seca (γ_s) dos em concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Note que, para um incremento de 2,1% no consumo em relação ao CAA_{REF} , ocorreram decréscimos 19,5% (CAA_{AE-80}) a 27% nos concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE-100}). Percebe-se, entretanto, o teor de argila expandida, como o esperado, é um fator decisivo no peso por unidade de volume destes concretos.

O ar incorporado ou aprisionado naturalmente na etapa de mistura dos componentes, tem influência nas características do concreto no estado fresco e endurecido. Pela Figura 4.31 observa-se que o teor de ar aprisionado aumenta à medida que a massa específica diminui conforme afirmam Mehta e Monteiro (2008).

Considerando o valor médio do teor de ar (T_{ar}) das misturas relacionados na Tabela 4.6, determinado segundo o prescrito na norma ABNT NBR 9833 (2009), variou de 0,86% (CAA_{REF}) a 4,33% (CAA_{AE-80}). A incorporação de 1% no teor de ar do concreto leve pode resultar em reduções de até 20 kg/m³ na massa específica seca e 5% na resistência mecânica do concreto (AİTCIN, 2000).

FIGURA 4.31 Relação entre a massa específica seca (γ_s) e o teor de ar (T_{ar}) incorporado nos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Choi et al., (2006) afirma que, nos concretos autoadensáveis leves, a resistência à compressão diminui à medida que ocorre redução na densidade do concreto. Esta tendência foi verificada nos CAA_{AE} , conforme mostra a Figura 4.32.

FIGURA 4.32 Relação entre a massa específica seca (γ_s) e a resistência à compressão (f_{c28}) dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

A avaliação da relação entre a resistência e a massa específica seca nos concretos autoadensáveis foi feita por meio do Fator de Eficiência Estrutural (F_{EE}), definido na equação 2.5. A Figura 4.33 ilustra os valores médios dos fatores de eficiência estrutural (F_{EE}) obtidos nos concretos relacionados na Tabela 4.12.

FIGURA 4.33 Fator de eficiência estrutural dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Destaca-se na Figura 4.33 o valor médio do F_{EE} determinado para as misturas com teor de substituição de 60%. Comparados ao CAA_{REF} ($F_{EE} = 33,0 \text{ MPa.dm}^3.\text{kg}^{-1}$) observa-se uma tendência de queda nos valores do fator de eficiência estrutural, independentemente do teor de substituição do agregado leve utilizado na mistura.

Nota-se uma diminuição de 29,5% no fator de eficiência (F_{EE}) médio determinado nos concretos produzidos com 40% de substituição ($CAA_{AE-40} / F_{EE} = 23,3 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$) enquanto que, os concretos leves autoadensáveis CAA_{AE-60} , CAA_{AE-80} e CAA_{AE-100} apresentaram eficiência estrutural levemente superior, considerando que as reduções no F_{EE} foram de 20,7%, 28,4% e 22,5% na mesma comparação, respectivamente. Ainda assim, estes valores do F_{EE} são superiores aos obtidos por CHOI et al., (2006) e BORJA (2011).

b) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As resistências à tração por compressão diametral dos concretos foram obtidas a partir de corpos de prova cilíndricos (100mm x 200mm), ensaiados nas idades de 7 e 28 dias.

Os valores mostrados na Tabela 4.12 representam a média dos valores individuais da resistência à tração por compressão diametral mostradas no ANEXO 3 (Tabela AN 3.3, Tabela AN 3.5, Tabela AN 3.7, Tabela AN 3.9, Tabela AN 3.10 e Tabela AN 3.11). A Figura 4.34 ilustra os valores obtidos para este parâmetro nos diversos concretos relacionados na Tabela 4.12.

FIGURA 4.34 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

Tendo como base os valores das resistências à compressão e à tração por compressão diametral (Tabela 4.12), foi possível estabelecer a correlação mostrada na Tabela 4.14, aplicável aos concretos tratados nesta pesquisa.

Topçu e Uygunoglu (2010) estabelece uma correlação aplicável, de forma geral, ao concreto autoadensável e leve autoadensável. Neste caso, a resistência à compressão foi determinada em corpos de prova cúbicos. As expressões matemáticas que representam estas correlações são apresentadas na Tabela 4.14.

TABELA 4.14 Relação entre as resistências à compressão e tração por compressão diametral dos concretos autoadensável e leve autoadensável

CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CAAs	APLICAÇÕES MAIS ADEQUADAS	Fonte
$f_{tc28} = 1,2841 + 0,0582.f_{c28}$ (MPa) ($r^2 = 0,9266$)	CLAA produzidos com argila expandida AE-1506 e brita do basalto	O autor (2015)
$f_{tc} = 0,2009 + 0,0602.f_c$ (MPa) ($r^2 = 0,9274$)	CAA: Brita de calcário CLAA: Pedra pome, turfa vulcânica e diatomita (Turquia)	Topçu e Uygunoglu (2010),

Fonte: O autor (2015)

A Figura 4.35 ilustra as correlações entre a resistência à tração por compressão diametral ($f_{tc,28}$) e a resistência à compressão (f_{c28}) para concretos leves autoadensáveis produzidos com diferentes agregados leve.

FIGURA 4.35 Relação entre as resistências à compressão e tração por compressão diametral para CAAs feitos com agregados normal e leve

Fonte: O autor (2015)

Levando em consideração a relação estabelecida pela equação mostrada na Tabela 4.14, estabelecida para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida (CAA_{AE}) nesta pesquisa, percebe-se que a resistência à tração por compressão corresponde de 7,4% (CAA_{REF}) a 8,8% (CAA_{AE-100}) da resistência à compressão aos 28 dias de idade. Estes valores estão próximos àqueles obtidos por Rossignolo (2009) para o concreto leve estrutural feito com argila expandida brasileira.

A Tabela 4.15 mostra algumas relações estabelecidas entre a resistência à tração por compressão diametral, para os valores obtidos entre as idades de 7 dias e 28 dias nos concretos produzidos com e sem argila expandida AE-1506.

TABELA 4.15 Relações entre a resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida

TEOR DE SUBSTITUIÇÃO / CAA		Consumo de cimento (C _c) (kg/m³)	VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA (MPa) ⁽¹⁾			COEFICIENTE DE CRESCIMENTO (TRAÇÃO POR COMPRESSÃO) (7 para 28 dias)	QUEDA DA RESISTÊNCIA ENTRE DOS CONCRETOS (ftc ₂₈) (%) ⁽²⁾
			COMPRESSÃO (f _{c28})	TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIÂMETRAL			
				ftc ₇	ftc ₂₈		
0	REF	462,7	77,8	4,31	5,67	1,316	-
20	AE-20	454,5	61,9	3,55	4,94	1,390	13,0
40	AE-40	441,6	49,6	3,01	4,60	1,528	18,9
60	AE-60	457,8	53,2	3,28	4,41	1,345	22,2
80	AE-80	470,7	46,3	3,35	3,59	1,071	36,7
100	AE-100	471,8	45,1	3,17	3,60	1,136	36,5

OBSERVAÇÕES

1- Valores médios das resistências obtidas nas repetições dos concretos autoadensáveis relacionados na Tabela 4.12. Os valores individuais das resistências são apresentados no ANEXO 3, na Tabela AN 3.3, Tabela AN 3.5, Tabela AN 3.7, Tabela AN 3.9, Tabela AN 3.10, Tabela AN 3.11;

2 – Porcentagens calculadas em relação aos valores de resistência à compressão (f_{C28}) do CAA_{REF}.

Fonte: O autor (2015)

Pelos valores contidos na Tabela 4.15 nota-se que as resistências à tração por compressão diametral obtida aos 7 dias para 28 dias evoluíram, dependendo da mistura, de 7,1% (CAA_{AE-80}) a 52,8% (CAA_{AE-40}) enquanto que, o CAA_{REF} apresentou crescimento de 31,6%.

c) MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

Os ensaios de módulo de elasticidade do concreto foram feitos seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 8522 (2008) para a determinação do módulo de deformação secante (E_{cs}) – metodologia A – Tensão σ_a fixada em 0,5 MPa e σ_b igual a 30% da tensão de ruptura ou seja $\sigma_b = 0,30.f_c$. Os resultados dos ensaios contidos na Tabela 4.10 são representados na Figura 4.36 em função do teor de argila expandida do tipo AE-1506 (Cinexpan)

FIGURA 4.36 Módulo de elasticidade para concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

O módulo de elasticidade do concreto depende principalmente do módulo de elasticidade da matriz de cimento hidratado, das características do agregado graúdo, da composição da argamassa e da relação água/aglomerante (AÏTCIN, 2000).

Observa-se na Figura 4.36 que os valores do módulo de elasticidade diminuíram à medida que se incrementou a quantidade de agregado leve na fração de graúdo das misturas. Considerando os valores médios relacionados na Tabela 4.12, representados na figura pela linha tracejada, nota-se a queda de 20,8% entre os valores obtidos para o CAA_{AE-40} (33,3 GPa) e CAA_{AE-60} (26,4 GPa).

Observa-se na Tabela 4.7 que os concretos confeccionados com 60% de substituição, em relação aos produzidos com 40%, tiveram aumentados a relação água/finos (a/p) de 0,359 para 0,366 e teor de argamassa (V_m) de 64,7% para 68,3.

A Figura 4.37 ilustra o desempenho dos concretos produzidos com e sem argila expandida quando se comparam os valores obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade (E_{sc}) e massa específica seca do concreto (γ_s). Note pela Figura 4.36 e pela Figura 4.37, que os concretos leves autoadensáveis (CLAA) ($\gamma_s < 2000 \text{ kg/m}^3$), como o esperado, apresentam desempenho inferior aos concretos autoadensáveis com massa específica seca superior a 2.000 kg/m^3 .

FIGURA 4.37 Relação entre o módulo de elasticidade (E_{sc}) e a massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis confeccionados com agregados naturais e leve

Fonte: O autor (2015)

Considerando os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão, para os diferentes teores de substituição do agregado gráúdo natural pelo agregado leve apresentados na Tabela 4.10, ilustrados na Figura 4.33, percebe-se o desempenho diferenciado entre as diversas misturas.

Os concretos autoadensáveis com massa específica seca superior a 2.000 kg/m^3 apresentam módulo de elasticidade superior aos concretos leves autoadensáveis (CLAAE) ($\gamma_s \leq 2000 \text{ kg/m}^3$). Desta forma, não parece ser prudente estabelecer uma correlação única para misturas que apresentaram valores de módulo de elasticidade tão diferenciados.

Assim, foram determinadas a equação 4.1 e equação 4.2, que correlacionam a resistência à compressão (f_{c28}) e o módulo de elasticidade ($E_{sc,28}$) para os dois tipos de concreto autoadensáveis produzidos com argila expandida, mostradas na Tabela 4.12, cujas curvas ajustadas são representadas na Figura 4.35.

FIGURA 4.38 Relação entre o módulo de elasticidade (E_{sc}) e a resistência à compressão (f_{c28}) dos CAA_{AEs} dosados com agregado normal e argila expandida

Fonte: O autor (2015)

- $0\% \leq \text{Teor de substituição (TS)} < 60\%$ (concreto autoadensável)

$$E_{sc} = 12,8410 + 5,2386 \cdot \ln(f_c) \quad r^2 = 0,9586 \quad (4.1)$$

- $60\% \leq \text{Teor de substituição (TS)} \leq 100\%$ (concreto leve autoadensável)

$$E_{sc} = -23,1611 + 12,5710 \cdot \ln(f_c) \quad r^2 = 0,8338 \quad (4.2)$$

Onde:

TS = Teor de substituição do agregado normal pela argila expandida AE-1506

E_{sc} = Módulo de elasticidade (secante), aos 28 dias de idade, em GPa;

f_c = Resistência à compressão, aos 28 dias de idade, em MPa.

A Tabela 4.16 mostra alguns de módulo de elasticidade determinados segundo as correlações fornecidas pela norma ACI 318R (03), Rossignolo (2005), estabelecidas para concreto leve estrutural (CLE) e, a correlação estabelecida pelo autor (2015) para os concretos leves autoadensáveis produzidos com argila expandida e agregados normais.

TABELA 4.16 Módulo de elasticidade calculados em função da resistência à compressão para diferentes tipos de concretos

CLAA _{AE} E MASSA ESPECÍFICA SECA	f _{c28} (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) (GPa)		
		ACI 318R (03) $E_c = 0,043 \cdot \gamma^{1,5} \cdot f_c^{1/2}$	Rossignolo (2005) $E_c = 0,049 \cdot \gamma^{1,5} \cdot f_c^{1/2}$	O autor (2015) $E_{sc} = -23,1611 + 12,571 \cdot \ln(f_c)$
CAA _{AE} -60	51,6	27,3	31,2	26,4
$\gamma_s = 1.986,3 \text{ kg/m}^3$	56,8	28,7	32,7	27,6
CAA _{AE} -80	44,3	25,3	28,9	24,5
$\gamma_s = 1.899,6 \text{ kg/m}^3$	48,4	26,5	30,2	25,6
CAA _{AE} -100	42,6	24,8	28,3	24,0
$\gamma_s = 1.750,7 \text{ kg/m}^3$	48,4	26,5	30,2	25,6

Fonte: O autor (2015)

Os valores mostrados na Tabela 4.16 foram calculados para diferentes tipos de concretos leves estruturais (CLE). Entretanto, observa-se que os concretos leves autoadensáveis (CLAA_{AE}) apresentam-se mais deformáveis que os concretos leves estruturais, muito provavelmente, em função das diferenças reológicas que os caracterizam, especialmente com relação ao teor de argamassa (V_m) das misturas.

Os valores do coeficiente de Poisson (ν), calculado para os concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506, variaram em função do teor de argila nas misturas. Considerando o valor médio verifica-se variações de 0,150 (CAA_{AE}-100) a 0,194 (CAA_{AE}-80).

A Figura 4.39 ilustra os valores individuais e médios (linha tracejada) do coeficiente de Poisson obtidos para os concretos relacionados na Tabela 4.12.

FIGURA 4.39 Coeficiente de Poisson dos concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida

Fonte: O autor (2015)

Analisando os valores médios, (linha tracejada), nota-se que o coeficiente de Poisson (ν) situa-se na faixa de 0,170 para os concretos leves autoadensáveis (CAA_{AE}-60 a CAA_{AE}-100) e de 0,190 para os concretos autoadensáveis com massa específica seca menor que 2.000 kg/m³ (CAA_{AE}-20 e CAA_{AE}-40).

Observa-se pela Figura 4.39, certa constância para os valores obtidos entre os concretos produzidos com 20% e 80% de substituição do agregado graúdo normal pela argila expandida AE-1506, cujos valores, em relação ao CAA_{AE}-20, tiveram quedas entre 4,6% e 7,9%.

Desconsiderando-se a discrepância entre os valores individuais obtidos nos concretos autoadensáveis leves CAA_{AE}-100, nota-se que as diferenças do coeficiente de Poisson entre estes tipos concretos e o CAA_{REF} são pequenas. Não foram detectados nos valores do coeficiente de Poisson, aquelas diferenças observadas entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos autoadensável normal (CAA) e o autoadensável leve (CLAA_{AE}).

d) ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os ensaios para a determinação da absorção de água e índice de vazios dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida foram realizados segundo o preconizado pela norma ABNT NBR 9778 (2005). Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios são mostrados na Tabela 4.12 e representados na Figura 4.40.

FIGURA 4.40 Absorção de água e índice de vazios dos concretos autoadensáveis feitos com agregados naturais e argila expandida

Fonte: O autor (2015)

Observando os resultados dos experimentos ilustrados na Figura 4.40 e considerando os valores médios (linhas tracejada e cheia) mostrados na Tabela 4.12, verifica-se que os valores da absorção de água por imersão total (Ab_{24h}) tiveram variações de 2,9% (CAA_{REF}) a 5,6% (CAA_{AE-100}), enquanto que o índice de vazios (I_v) variaram de 6,8% (CAA_{REF}) a 9,7% (CAA_{AE-100}).

Desconsiderando os resultados obtidos nos concretos CAA_{AE-20} ¹⁹, nota-se que a absorção de água e o índice de vazios entre o CAA_{REF} e o CAA_{AE-40} tiveram variação de 1%, respectivamente. Os concretos leves autoadensáveis (CLAA) produzidos com teores de substituição maiores que 60% apresentaram variações de aproximadamente 2%. A porosidade do concreto está diretamente ligada à quantidade de água absorvida pelo agregado. Isso é especialmente importante para o caso dos agregados leves à medida que estas características afetam as propriedades dos concretos confeccionados com este tipo de agregado. Observando a Figura 4.41 nota-se que a massa específica do concreto seco (γ_s) diminui à medida que aumenta a porosidade, representada pelo índice de vazios (I_v) dos concretos. A conectividade entre os poros, as características de superfície e a porosidade dos agregados e o uso de adições são alguns dos fatores determinam a maior ou menor absorção de água dos concretos. (KARAHAN et al., 2012).

¹⁹ A discrepância mostrada nos resultados obtidos nos concretos CAA_{AE-20} pode ser decorrência de falhas na execução dos ensaios e/ou deficiências na moldagem dos corpos de provas utilizados nos ensaios.

FIGURA 4.41 Relação entre a massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos autoadensáveis com agregados naturais e argila expandida

Fonte: O Autor (2015)

e) ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO

A carbonatação do concreto é um fenômeno químico resultante da transformação dos íons alcalinos (cátions de sódio, potássio e, principalmente o cálcio) em sais de carbonatos pela ação dos gases dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), sulfídrico (H_2S), que depende das condições ambientais, características e forma de execução do concreto. A difusão do CO_2 depende da estrutura dos poros intersticiais do concreto. No entanto, questões relacionadas às condições de exposição (concentração de CO_2 no ar, temperatura e umidade) e características do concreto (relação a/c, tipo e consumo de cimento, adições minerais, adensamento, cura e idade) são fatores que interferem no grau de carbonatação do concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011; WERLE, 2010).

O desempenho dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida foi avaliado por meio da medida direta da frente de carbonatação detectada com o uso da fenolftaleína²⁰. As amostras foram preparadas em laboratório e colocadas em câmara de carbonatação acelerada, calibrada para teor de CO_2 de 10%, umidade relativa de 70% e temperatura igual a 23°C. Os corpos de prova foram avaliados nas idades de 4 dias, 14 dias e 28 dias de exposição. A Figura 4.42 ilustra os corpos de prova submetidos à exposição do CO_2 por 28 dias, decorridos 30 minutos da aspersão da solução de fenolftaleína.

²⁰ Após a aplicação da fenolftaleína a superfície adquire coloração vermelha carmin, indicando pH entre 8,0 a 9,8. Caso fique incolor presume-se que aquele concreto esteja carbonatado (CASCUDO E CARASEK, 2011).

FIGURA 4.42 Aspecto dos corpos de prova de concretos autoadensáveis com e sem argila expostos ao CO₂ por 28 dias após aspersão de fenolftaleína

Fonte: O autor (2015)

Observa-se na Figura 4.42 que as superfícies dos corpos de prova aspergidas pela fenolftaleína apresentaram coloração vermelha carmim, independentemente do teor de substituição do agregado natural pela argila expandida AE-1506. Esse resultado indica que não ocorreu carbonatação dos concretos.

Entre todas as características avaliadas nestes, concretos algumas delas podem ter contribuído por não ter ocorrido carbonatação nos corpos de prova de concreto autoadensáveis. Destacam-se neste ponto, a baixa relação água/finos (a/p) e o uso de sílica ativa como adição mineral nas misturas.

A relação água/materiais finos (a/p) das misturas variaram de 0,343 (CAA_{REF}) a 0,366 (CAA_{AE-100}). Na literatura há relatos de que para relação a/p entre 0,45 e 0,50 ou menores não se observa a ocorrência de carbonatação (CASCUDO; CARASEK, 2011; KULAKOWSKI, 2002; PAULLETTI, 2004; WERLE, 2010).

Outro fator positivo foi o uso da sílica ativa. Cascudo e Carasek (2011) apregoam que o uso da sílica ativa inibe a carbonatação do concreto, à medida que melhora a estrutura da matriz cimentícia pois dificulta difusão do CO_2 em função do efeito filer (físico) e pozolânico (químico) da adição mineral.

A redução da reserva alcalina da matriz cimentícia é um efeito caracterizado por Cascudo e Carasek (2011) como negativo pelo uso da sílica ativa. Isso é causado pelas reações pozolânicas que promove a redução do $Ca(OH)_2$, e com isso reduz a proteção da matriz cimentícia contra a carbonatação. Esses pesquisadores relatam bons resultados em concretos produzidos com sílica ativa e metacaulin por considerar que estas adições geram misturas com microestrutura mais compacta e, portanto, mais densa.

Note que os valores do fator de eficiência (F_{EE}) das diversas misturas, relacionados na Tabela 4.12, mostram concretos com resistência à compressão elevadas, indicando que a matriz cimentícia apresenta-se com qualidade apesar das características físicas e mecânicas da argila expandida. Na Tabela 4.17 estão identificadas as algumas características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de carbonatação do concreto.

TABELA 4.17 Características físicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de carbonatação dos concretos autoadensáveis

CONCRETO AUTOADENSÁVEL	TEOR DE UMIDADE (%)		MASSA ESPECÍFICA APARENTE (γ_{ap}) (kg/m ³) ⁽²⁾
	NATURAL ⁽¹⁾	SECO A 50°C (72 horas)	
CAA _{REF}	3,7	2,9	2.366,3
CAA _{AE-20}	4,7	4,1	2.214,7
CAA _{AE-40}	3,8	3,0	2.016,4
CAA _{AE-60}	3,6	2,9	1.824,9
CAA _{AE-80}	3,6	2,9	1.802,9
CAA _{AE-100}	5,3	4,7	1.738,5

OBSERVAÇÕES

- 1 - O valor médio do teor de umidade natural determinado nos corpos de prova (100 mm x 200 mm) utilizados na determinação da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica (ABNT NBR 9778 (2005);
- 2 - Corresponde à relação massa / volume do corpo de prova após o corte com disco mecânico, considerando suas dimensões reais medidas com paquímetro, em dada condição de umidade. Os valores apresentados são a média dos valores obtidos nos 6 corpos de prova avaliados nas idades de 4, 14 e 28 dias de imersão na câmara de carbonatação acelerada.

Fonte: O autor (2015)

f) CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para cada um dos tipos de concretos autoadensáveis produzidos na pesquisa foram realizados ensaios de condutividade térmica (λ) utilizando-se o medidor de condutividade térmica modelo DTC-300 (TA instruments).

Para tanto, foram coletados 2 (dois) corpos de prova (pastilhas) com diâmetro de 50 mm e altura de 25 mm, extraídos por meio de corte no terço médio de corpos de prova cilíndricos (50mm x 100mm).

Os corpos de prova foram ensaiados aos 80 (oitenta) dias de idade, contados a partir da data de moldagem. Os valores de condutividade térmica (λ), mostrados na Tabela 4.18, representam os valores médios obtidos nestes corpos de prova, são ilustrados na Figura 4.40.

TABELA 4.18 Condutividade térmica obtida nos concretos autoadensáveis com e sem argila expandida AE-1506

CONCRETO AUTOADENSÁVEL	TEOR DE UMIDADE (%)		MASSA ESPECÍFICA (1) (kg/m ³)		CONDUTIVIDADE TÉRMICA (λ) (T = 30°C) (W/m.K)
	NATURAL (1)	SECO A 50°C (72 horas)	APARENTE (2) (γ_{ap})	SECA (γ_s)	
CAA _{REF}	3,7	2,2	2.316,6	2.358,3	1,587
CAA _{AE-20}	4,7	3,7	2.140,1	2.212,2	1,353
CAA _{AE-40}	3,8	2,7	2.054,1	2.137,3	1,251
CAA _{AE-60}	3,6	2,7	2.125,2	1.986,3	1,259
CAA _{AE-80}	3,6	2,6	2.065,1	1.899,6	1,258
CAA _{AE-100}	5,3	4,0	1.842,9	1.720,7	1,036

OBSERVAÇÕES

- 1 - O valor médio do teor de umidade natural e massa específica seca, obtidos nos corpos de prova (100 mm x 200 mm) utilizados na determinação da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica (ABNT NBR 9778 (2005);
- 2 - Corresponde à relação massa / volume das pastilhas (50mm x 25mm), considerando suas dimensões reais medidas com paquímetro, na umidade do ensaio. Os valores apresentados são a média dos valores obtidos nos 6 corpos de prova avaliados aos 28 dias de idade.

Fonte: O autor (2015)

FIGURA 4.43 Relação entre a condutividade térmica e massa específica seca CCAs em função do teor de substituição da pedra britada pela argila expandida

Fonte: O autor (2015)

Pela Figura 4.43 nota-se que a condutividade térmica (λ) diminui à medida que decresce a massa específica seca (γ_s) dos concretos produzidos com argila expandida e agregado graúdo natural.

A diminuição, quando comparados os valores de condutividade do CAA_{AE-100} com os do CAA_{REF}, é de aproximadamente 35%. A redução nos valores da condutividade térmica entre o CAA_{REF} e o CAA_{AE-60} é de aproximadamente 21%, enquanto que para os concretos produzidos com teores de substituição maiores o decréscimo é de 13%.

Isso significa que concretos autoadensáveis produzidos com 60% do volume de agregado graúdo por argila expandida AE-1506 têm desempenho, sob o aspecto de isolamento térmico satisfatório, se comparados aos produzidos com maiores teores de argila expandida.

A equação 4.3 mostra a expressão matemática que relaciona a condutividade térmica (λ) e a massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506, com massa específica seca variando de 1.700 kg/m³ a 2.400 kg/m³ (FIGURA 4.44)

$$\lambda = 0,4098e^{0,0006 \cdot \gamma_s} \quad r^2 = 0,8553 \quad (4.3)$$

FIGURA 4.44 Relação entre a condutividade térmica (λ) e massa específica seca (γ_s) dos concretos autoadensáveis produzidos com e sem argila expandida AE-1506

Fonte: O autor (2015)

A norma ABNT NBR 15220-1 (2005) estabelece valores de condutividade térmica de concretos convencionais e leves em função da massa específica seca do concreto, conforme mostra a Tabela 4.19. Observa-se que os valores de condutividade térmica, determinados pela equação 4.3, são próximos aos sugeridos pela norma NBR 15220, para as faixas de massa específicas nas quais os concretos leves autoadensáveis (CLAA) desenvolvidos nesta pesquisa se enquadram.

TABELA 4.19 Valores de referência da condutividade

MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (λ) (W/m.K)	
			NBR 15220 ⁽¹⁾	O autor ⁽²⁾
2200	-	2400	1,75	1,53 - 1,73
1600	-	1800	1,05	1,07 - 1,21
1400	-	1600	0,85	-
1200	-	1400	0,70	-
1000	-	1200	0,46	-

OBSERVAÇÕES

1 - Valores de condutividade térmica aplicáveis a concretos com consumo de cimento Portland superior a 300 kg/m³;

2 - Valores de condutividade térmica estimadas com base na equação 4.3.

Fonte: ABNT (NBR 15220-1, 2005)

A condutividade térmica (λ) é um parâmetro importante na caracterização do concreto leve sob o ponto de vista do desempenho térmico do material. Seus valores dependem das características do agregado leve, densidade e grau de adensamento e das características da matriz de cimento do concreto (TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010; SACHT, 2008; SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010; FROTA; SHIFFER, 2001).

A princípio, valores da relação água/finos (a/p) reduzidos conduzem a pastas compactas e com baixa porosidade que por sua vez, elevam a condutividade térmica do concreto (TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010). A Figura 4.45 ilustra a relação entre a condutividade térmica e a relação água/finos (a/p) dos concretos autoadensáveis confeccionados com e sem argila expandida.

Observa-se que ocorre aumento no valor da condutividade térmica das misturas mesmo para aquelas cuja relação a/p mantenha-se constante. Isso é uma indicação de que a melhoria do isolamento térmico é decorrência das características do agregado leve, principalmente na porosidade das partículas.

FIGURA 4.45 A condutividade térmica e a relação água/finos dos CAAs em função do teor de substituição da pedra britada pela argila expandida

Fonte: O autor (2015)

A Tabela 4.20 mostra os valores da condutividade térmica (λ), de concretos leve estrutural (CLE), autoadensável (CAA) e leve autoadensável (CLAA) estimados por meio de correlações indicadas pela norma ACI 213R-03 e pelos pesquisadores Topçu e Uygonoglu (2010), SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS (2010) e pelo autor, respectivamente.

Observe, pelos valores da Tabela 4.20, que a condutividade térmica diminui à medida que decresce a massa específica seca (γ_s), independentemente do tipo de concreto. Isso ocorre, provavelmente, em função do ar aprisionado nos poros do agregado leve, reduzindo a transferência e a absorção de calor. Note ainda, que os valores da condutividade térmica estimados pelo autor, são compatíveis com os determinados pelas correlações disponíveis na literatura.

TABELA 4.20 Expressões utilizadas para estimativa da condutividade térmica em concretos leve estrutural, autoadensável e leve autoadensável

Massa específica seca (γ_s) (kg/m ³)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (λ) W/m.K)			
	ACI 213R-03 (CLE) Agregado leve $\lambda = 0,0864e^{0,00125 \cdot \gamma_s}$	TOPÇU E UYGONUĞLU (2010) (CAA e CLAA) Pedra pome, diatomita e tufo vulcânico $\lambda = 0,1242e^{0,0011 \cdot \gamma_s}$ $r^2 = 0,8736$	SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS (2010) (CLE) Argila expandida brasileira (AE-500 e AE-1506) $\lambda = -0,8284 + 0,0011 \cdot \gamma_s$ $r^2 = 0,9924$	Autor (2015) (CLAA) Argila expandida brasileira (AE-1506) $\lambda = 0,4098e^{0,0006 \cdot \gamma_s}$ $r^2 = 0,8553$
2400	1,74	1,74	1,81	1,73
2200	1,35	1,40	1,59	1,53
2000	1,05	1,12	1,37	1,36
1800	0,82	0,90	1,15	1,21
1600	0,64	0,72	0,93	1,07

Fonte: O autor (2015)

4.3 Concretos autoadensáveis com e sem argila expandida: considerações finais

Os concretos com argila expandida foram dosados a partir do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}), substituindo-se o volume do agregado graúdo natural, brita de basalto (V_g) pelo volume equivalente do agregado leve (argila expandida) nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

Os experimentos, os resultados e experiências tratadas ao longo do trabalho, nas etapas de dosagem e caracterização dos concretos na condição fresca e endurecida permitem algumas observações.

4.3.1 O concreto autoadensável de referência

Os concretos produzidos com argila expandida foram dosados a partir de um concreto autoadensável convencional (CAA_{REF}), dosado pela metodologia proposta por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificada. Foram modificados os parâmetros relacionados à argamassa e ao concreto, especificamente.

As argamassas foram dosadas com relação V_s/V_m igual a 0,47 ao invés de 0,40 e a relação $R_m/G_m^{0,4} = 0,882$ e não 0,525, como proposto originalmente na metodologia, como parâmetros para as argamassas autoadensáveis. O concreto de

referência foi dosado considerando o volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) igual a 0,570, ao invés de 0,500.

Estas alterações mostraram-se adequadas à dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}). O consumo de materiais cimentícios da ordem de 510 kg/m^3 , atende aos limites de consumo indicados por Repette (2011), EFNARC (2005) e Mehta e Monteiro (2008).

No estado fresco o CAA_{REF} apresentou fluidez, coesão e resistência à segregação, adequadas aos limites de autoadensabilidade propostos pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010), com espalhamentos de 680 mm a 720 mm. A baixa relação água/materiais cimentícios (a/p), o uso de sílica ativa contribuíram para a obtenção de resistência compressão de até 80 MPa.

4.3.2 A dosagem do concreto autoadensável com argila expandida

Foram produzidos concretos autoadensáveis, dosados a partir de teores de substituição de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do volume absoluto do agregado graúdo natural, brita de basalto (brita 1), pelo volume absoluto equivalente de agregado leve (argila expandida AE-1506). Este procedimento se mostrou adequado, pois permitiu detectar as variações na reologia das misturas, facilitando a identificação dos parâmetros de dosagem determinados inicialmente, que deveriam ser modificados para que as misturas atingissem os limites da autoadensabilidade indicados na norma NBR 15823-1 (2010)

Decorrente disso, foi possível concluir que o teor de argila interfere na dosagem dos concretos autoadensáveis, à medida que exigem modificações nos parâmetros volume aparente de agregado graúdo (V_{ap}), no volume de argamassa (V_m) e na relação Volume de finos/Volume de agregado miúdo (V_p/V_s), na comparação com os concretos autoadensáveis confeccionados com agregado graúdo proveniente da rocha basáltica.

Desta forma, foram dosados concretos com valores de volume aparente (V_{ap}) de 0,505, 0,510 e 0,570 e relação Volume de agregado miúdo/Volume de argamassa (V_s/V_m) de 0,47. Estes valores são superiores aos recomendados por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), fixados em 0,50 e 0,40 m^3/m^3 , respectivamente. Os concretos autoadensáveis dosados com argila expandida (CAA_{AE}), a partir destes parâmetros

de dosagem, atenderam aos limites de autoadensabilidade propostos na norma NBR 15823-1 (2010) da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Após ajustes nos parâmetros de dosagens, foram obtidos concretos com massa específica que variaram de 1.700 kg/m³ a 2.200 kg/m³. Os experimentos demonstraram que concretos dosados com teor de argila expandida igual ou superior a 60%, volume aparente de agregado graúdo $V_{ap} = (0,500 \pm 0,05)$ m³/m³, relação V_w/V_p igual a 1,120, relação V_s/V_m igual a 0,47, teor de argamassa (V_m) de 68,6% e teor de aditivo superplastificante (Sp/p) de 1,00%, são concretos leves autoadensáveis (CLAA), sem sinais evidentes de segregação. Misturas com estas características físicas tiveram espalhamentos de 650 mm a 720 mm.

Por outro lado, foram produzidos concretos autoadensáveis com massa específica seca superior a 2.000 kg/m³, com teores de substituição de até 40%, dosados com características físicas iguais ao concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}), incrementando-se apenas a relação V_w/V_p em cerca de 5%. Misturas com 20% de argila expandida foram produzidas com os mesmos parâmetros que o CAA_{REF}. Estas misturas atingiram espalhamentos de 650 mm a 700 mm.

4.3.3 O desempenho do concreto leve autoadensável com argila expandida

A resistência mecânica do concreto leve autoadensável, conforme mostra a literatura, comparada à do concreto autoadensável produzido com agregados normal, é menor, principalmente por conta das características do agregado leve.

Os concretos leves autoadensáveis (CLAA) produzidos na pesquisa apresentaram a mesma tendência. Os valores de resistência à compressão destes concretos, comparados às obtidas no concreto autoadensável confeccionado com agregado graúdo normal (CAA_{REF}), diminuíram à medida que se aumentaram os teores de argila expandida nas misturas.

No caso dos concretos autoadensáveis produzidos com 60% de argila expandida (CAA_{AE-60}), esta redução foi da ordem de 30% (76,4 MPa para 53,2 MPa), em misturas produzidas consumo de cimento muito semelhante ao do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF})

As modificações nos parâmetros, indicados na Tabela 4.11, V_{ap} , V_m e V_w/V_p mostraram-se adequadas e abaixo dos valores de $V_g = 325 \text{ l/m}^3$ e V_s/V_m de 0,41 a 0,49, propostos por Bogas, Gomes e Pereira (2012) para a obtenção concretos leves autoadensáveis, independentemente do tipo de agregado leve utilizado.

Os experimentos indicaram que misturas com teor de substituição maior ou igual a 60% podem ser classificados como concretos leves autoadensáveis. Considerando as modificações indicadas na Tabela 4.11, foi possível estabelecer dosagens em função dos teores de substituição adotados nesta pesquisa.

Obteve-se concretos leves autoadensáveis com massa específica seca variando de $1.986,3 \text{ kg/m}^3$ (CAA_{AE-60}) a $1.720,0 \text{ kg/m}^3$ (CAA_{AE-100}), com fator de eficiência estrutural (F_{EE}) da ordem $25 \text{ MPa.dm}^3.\text{kg}^{-1}$. O uso de 60% de argila expandida AE-1506 implica em redução de 15,9% a 27,0% no peso próprio da estrutura, quando comparados ao valor da massa específica do CAA_{REF}.

A expressão matemática da curva que correlaciona a resistência à tração por compressão diametral com a resistência a compressão mostrou-se adequada. Os valores estimados por meio desta correlação, para o concreto leve autoadensável produzido com argila expandida AE-1506 (CLAA_{AE}) é de 7% a 9%, compatíveis com a literatura estrangeira e nacional.

Os resultados obtidos nos ensaios do módulo de elasticidade (E_{sc}) e o coeficiente de Poisson (ν) refletiram as diferenças entre os concretos autoadensáveis normais ($\gamma_s > 2.000 \text{ kg/m}^3$ - 34,0 GPa) e os concretos leves autoadensáveis ($\gamma_s \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ - 26,0 GPa), o que representa em si, diferença de 23,5%. Os efeitos decorrentes dos incrementos nos teores de argila expandida e aumento no volume de argamassa (V_m), nos valores do módulo de elasticidade, fez com que se definisse dois modelos de comportamento: um para teores de argila expandida inferiores a 60% e outro para teores iguais ou superiores a 60%.

Os concretos leves autoadensáveis (CLAA) apresentaram coeficientes de Poisson (ν) que variaram de 0,150 (CAA_{AE-100}) a 0,190 (CAA_{AE-60}), idênticos aos indicados para concretos convencionais pela norma NBR 6118 (2014).

Os concretos produzidos na pesquisa não apresentaram sinais de carbonatação. O desempenho positivo sob este aspecto foi decorrência da baixa

relação água/finos (a/p) e do uso da sílica ativa que diminui a conectividade entre os poros, dificultando a difusão do CO₂.

Os concretos leves autoadensáveis (CLAA_{AE}) tiveram melhor desempenho (menor valor de condutividade térmica) em relação à capacidade de isolamento que os concretos autoadensáveis produzidos com teores de substituição menores que 60%. A curva que relaciona a condutividade térmica (λ) com a massa específica seca (γ_s), mostrou-se adequada para ser utilizada na estimativa deste parâmetro para os concretos produzidos nesta pesquisa.

4.3.4 O uso dos dispositivos da norma NBR 15823 na avaliação de desempenho CLAA_{AE}

Os dispositivos de ensaios propostos na norma ABNT NBR 15823 (2010) são aplicáveis na avaliação de desempenho do concreto leve autoadensável produzido com argila expandida AE-1506 (CLAA_{AE-1506}).

Dentre os limites de autoadensabilidade propostos por esta norma, aqueles que relacionam a classe de viscosidade plástica aparente com os tempos de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V, T_{V-30} (VS 2/VF 2) mostraram-se inadequados para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida. Os tempos T_{V-30} determinados nos experimentos, na maioria das vezes, foram inferiores aos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 15823-1(2010).

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre um tipo de concreto, identificado como concreto leve autoadensável (CLAA), com características nas condições fresca e endurecida que o diferenciam em relação ao concreto autoadensável convencional.

Estes concretos leves autoadensáveis, dosados a partir de um concreto autoadensável convencional, foram produzidos com cimento Portland CP V-ARI, sílica ativa, areia natural, quartzosa, pedra britada do basalto, argila expandida brasileira e aditivo superplastificante.

Quando avaliado na condição fresca, segundo os parâmetros da norma ABNT NBR 15823-1 (2010), estes CLAAs apresentaram características e propriedades que reiteram sua identidade como um tipo de concreto autoadensável. Na condição endurecida tiveram o desempenho mecânico que os qualificam para uso em diversas áreas da indústria da construção civil.

O uso da argila expandida em substituição ao agregado graúdo natural na composição do CLAA provocou alterações na reologia da mistura quando comparado ao concreto autoadensável (CAA) convencional. Neste ponto, o programa experimental mostrou-se adequado para identificar as influências na reologia e nas propriedades mecânicas decorrentes de tais substituições, o que se constitui no objetivo principal traçado para esta pesquisa.

Desta forma, apresentam-se as conclusões que foram extraídas dos resultados e experiências tratadas ao longo do trabalho, nas etapas de dosagem e caracterização dos concretos na condição fresca e endurecida.

5.1 O concreto autoadensável de referência

Os concretos produzidos com argila expandida foram dosados a partir de um concreto autoadensável convencional (CAA_{REF}), dosado pela metodologia proposta por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) modificada. Foram modificados parâmetros relacionados à argamassa e ao concreto especificamente. A respeito disso pode-se concluir:

1. As modificações nos parâmetros de dosagem do concreto autoadensável originalmente propostos na metodologia de Okamura, Ozawa e Ouchi, (2000) foram adequadas. A alteração do volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) de 0,50 para 0,57 e o teor de agregado miúdo no volume de argamassa de (V_s/V_m) de 40% para 47% permitiu a obtenção de concretos autoadensáveis que atenderam aos limites de autoadensabilidade impostos pela norma ABNT NBR 15823-1, 2010, com resistência à compressão da ordem de 80 MPa;

5.2 A influência da argila expandida nas características dos concretos autoadensáveis

O teor de argila expandida AE-1506, quando presente na composição de agregado graúdo do concreto autoadensável (CAA_{AE}), interfere significativamente nas características de autoadensabilidade, (fluidez, coesão e resistência à segregação), físicas (absorção de água e massa específica seca) e mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) das misturas. Em decorrência disso, pode-se concluir:

1. O teor de argila expandida na composição de grãos do concreto autoadensável interfere significativamente nas características físicas (fluidez, coesão e resistência à segregação) das misturas. Na composição com agregado graúdo normal, o teor de substituição tem maior influência que o volume de agregado graúdo (V_g) da mistura;

2. Para que as misturas dosadas com brita de basalto (brita 1) e agregado leve (argila expandida AE-1506) apresentem características de autoadensabilidade similares à de concretos autoadensáveis dosados somente com agregado graúdo originário do basalto, faz-se necessário modificar os seguintes os parâmetros de dosagem:

- Diminuir o volume de agregado graúdo (V_g),
- Aumentar o volume de argamassa (V_m);
- Aumentar a relação Volume de água/Volume de finos (V_w/V_p).

Foram produzidos concretos autoadensáveis com teores de argila expandida e brita de basalto variáveis, que atenderam aos limites de autoadensabilidade propostos na norma ABNT NBR 15823-1 (2010), com valores de volume aparente (V_{ap}) de 0,505, 0,510 e 0,570 e relação Volume de agregado miúdo/Volume de argamassa (V_s/V_m) de 0,47. Estes valores são superiores aos recomendados por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), fixados em 0,50 e 0,40 respectivamente

3. Concretos autoadensáveis com até 40% de argila expandida na composição de agregados graúdos, podem ser dosados alterando-se somente a quantidade de água (V_w/V_p), quando comparados a concretos autoadensáveis produzidos com agregados normais, para uma dada trabalhabilidade da mistura;
4. Os concretos autoadensáveis, dosados com teores de substituição maiores ou iguais a 60%, tiveram os parâmetros volume aparente de agregado graúdo (V_{ap}) e a relação Volume de finos/Volume de agregado miúdo (V_p/V_s) diminuídos, enquanto que o volume de argamassa (V_m) e o Volume de água/Volume de finos (V_w/V_p) foram aumentados;
5. A resistência à compressão dos CAAs produzidos com brita de basalto e argila expandida AE-1506, comparada à resistência à compressão do concreto autoadensável produzido com agregado normal, é menor, principalmente por conta das características do agregado leve;
6. A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão dos concretos leves autoadensáveis produzido

com brita de basalto e argila expandida AE-1506 (CLAA_{AE}) é compatível com os valores encontrados na literatura nacional e estrangeira para este tipo de concreto autoadensável;

7. Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade (E_{sc}) e o coeficiente de Poisson (ν) refletiram as diferenças entre os concretos autoadensáveis normais ($\gamma_s > 2.000 \text{ kg/m}^3$; 34,0 GPa) e os concretos leves autoadensáveis ($\gamma_s < 2000 \text{ kg/m}^3$; 26,0 GPa). Os efeitos nos valores do módulo de elasticidade, decorrentes dos incrementos nos teores de argila expandida e o aumento no volume de argamassa (V_m), fez com que se definissem dois modelos de comportamento: um para teores de argila expandida inferiores a 60% e outro para teores iguais ou superiores a 60%. Os concretos leves autoadensáveis (CLAA_{AE}) apresentaram coeficientes de Poisson (ν) que variaram de 0,150 (CAA_{AE}-100) a 0,190 (CAA_{AE}-60), idênticos aos indicados pela norma NBR 6118 (2014) para os concretos convencionais;
8. Os concretos autoadensáveis produzidos com brita de basalto (Brita 1) e argila expandida AE-1506, não apresentaram sinais evidentes de carbonatação, quando avaliados por meio do indicador de pH (fenolftaleína). Esse efeito positivo, provavelmente foi provocado pelo uso da adição mineral (sílica ativa) que promove a elevação da densidade da matriz cimentícia da mistura;
9. Os concretos leves autoadensáveis (CLAA_{AE}), apresentaram melhor desempenho em termos de isolamento térmico (menor valor de condutividade térmica) que os concretos autoadensáveis (CAA_{AE}) produzidos de argila expandida menores que 60% e, finalmente
10. Os limites de autoadensabilidade propostos pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010), que relacionam a classe de viscosidade plástica aparente com os tempos de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V, (VS 2/VF 2) mostraram-se inadequados para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida.

5.3 O uso dos dispositivos da norma NBR 15823 na avaliação do desempenho do CLAA_{AE}

1. Os dispositivos de ensaios propostos na norma ABNT NBR 15823 (2010) são aplicáveis na avaliação do concreto leve autoadensável produzido com argila expandida AE-1506.
2. Dentre os limites de autoadensabilidade propostos por esta norma, aqueles que relacionam a classe de viscosidade plástica aparente com os tempos de espalhamento T_{500} e o tempo de escoamento pelo funil-V, (VS 2/VF 2) mostraram-se inadequados para os concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida.

5.4 Indicações para pesquisas futuras

Durante o desenvolvimento dos experimentos desta pesquisa, alguns aspectos relacionados aos concretos leves autoadensáveis (CLAAs), requerem avaliações futuras, a saber:

- Análise de outros concretos produzidos com argila expandida com outras dimensões nominais, outros tipos de adição mineral e cimento Portland;
- Avaliação do concreto leve autoadensável sob o aspecto da microestrutura;
- Avaliação do desempenho do concreto leve autoadensável dosado agregado graúdo normal e leve no que se refere à carbonatação;
- Avaliação dos equipamentos de mistura utilizados na mistura e homogeneização do concreto leve autoadensável sob o aspecto da eficiência e energia de mistura;
- O uso de aditivo modificador de viscosidade no concreto leve autoadensável dosado agregado graúdo normal e leve;

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto auto-adensável**: produção de pré-fabricados. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 211.2-98**: Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. American Concrete Institute, 1998.

_____. **ACI 213R-03**: Guide for structural lightweight - aggregate concrete. American Concrete Institute, 2003.

_____. **ACI 318R-11**: Building Code requirements for reinforced concrete. American Concrete Institute, 2011.

ARAÚJO, J. G. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedra na nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM C330-03**: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM E1530-11**: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522**: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. Versão Corrigida 2009.

_____. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico das edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

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

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

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

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

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural: especificação. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 45**: Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BOGAS, J. A.; GOMES, A.; PEREIRA, M. F. C. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. **Construction and Building Materials**, Guildford, no. 35, p. 1013-1022, 2012.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CHOI, Yun Wang et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, n. 36, p. 1595-1602, 2006.

CUI, H. Z.; LO, T. Y.; XING, F. Properties of self-compacting lightweight concrete. **Material Research Innovations**, [S.l.], n. 5, p. 392-395, 2010.

CONDUTIVIDADE TÉRMICA Disponível em:

<<http://thermophysical.tainstruments.com/PDF/brochure/BROCH-ThermalConductivityDiffusivity-2014-EN.pdf>> Acesso em: 28 nov. 2015.

DAL MOLIN, Denise C. C. Adições minerais. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 261 – 309.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, Barking, n. 28, p. 197 - 208, 2006.

DONIAK, Íria L. O. Editorial: É tempo de acreditar. **Informativo ABCIC**, São Paulo, n. 18, dez. 2013. Disponível em: <http://www.abcic.org.br/Informativo/informativo_dez13.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2014.

DONIAK, Íria L. O.; GUTSTEIN, Daniela. Concreto pré-fabricado. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1569 – 1613.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. **The European Guidelines for self-compacting concrete**: specification, production and use. May, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. EN 206-9: **Concrete. Additional rules for self-compacting concrete (SCC)**. Apr. 2010.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GESOGLU, M. et al. Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete. **Jornal of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 235-236, p. 352-358, Aug. 2012.

GOMES, Paulo. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009.

GRABOIS, Thiago Melo. **Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GRABOIS, T. M.; TOLEDO FILHO, R. D.; CORDEIRO, G. C. Caracterização reológica e mecânica de concretos leves autoadensáveis. In: CONGRESSO IBÉROAMERICANO SOBRE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL – Avanços e oportunidades, 3., 2012, Madrid. **Anais...**, Madrid: [s.n.], 2012. p. 411 – 419.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; BOOYA, E. Fresh properties of self-compacting cold bonded fly ash lightweight aggregate concrete with different mineral admixtures. **Materials and Structures**, London, v.45, n.12, p.1849-1859. Dec, 2012.

HARTMANN, Carine A. et al. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 347 – 380.

HELA, R.; HUBERTO VÁ, M. Development of lightweight self-compacting concrete using liapor lightweight aggregate. **Centre for integrated Design of Advanced Structures**, Czech Republic, 2005.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2, p. 905 – 944.

HER-YUNG, W. Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 23, n.6, p. 2332-2337, June 2009.

HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. **US Army Corps Engineer Research in Development Center**. ERDC/SL TR-00-3. 116p. 2000.

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

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – A miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregate**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 95–102, Jan.1980.

KARAHAN, O. et al. Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 31, p. 320-325, June 2012.

KULAKOWSKI, Marlova Piva. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, Malek M.; MOUSAVI, S. Y. An investigation on the fresh properties of self-compacting lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 25, n.9, p. 3721 - 3731, Sept. 2011.

MARTINS, Daniel das Neves. **Concretos de agregados leves: absorção de água pelos agregados de argila expandida**. 163f. 1985. Dissertação (Mestrado)-Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1985.

MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Trad. de Antonio C. Filho, Denise C. Dal Molin. 1. ed. São Paulo: Pini,1994.

_____. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Trad. de Cristina Borba. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

_____. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Trad. de Cristina Borba. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. Cap. 3. 23 p. Disponível em: <[http://www.metso.com / inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent](http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent).> Acesso em; 29 mar. 2016.

NEVILLE, ADAM M. **Propriedades do concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. 2001.168 f. Dissertação (Mestre em Estruturas de Engenharia Civil)-Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, 2001.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa. **Performance-based design of self-compacting concrete (SCC): a contribution to enhance SCC mixtures robustness**. 2008. 319 f. Dissertação (Tese) (Doutor em Engenharia Civil)-Programa de Pós-

graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, 2008.

OKAMURA H.; OZAWA K.; OUCHI M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, [S.l.], v. 1, n. 1, p.3-17, Mar. 2000.

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

PAPANICOLAOU, C. G.; KAFFETZAKIS, M. I.; Lightweight aggregate self-compacting concrete: state-of-the-art & pumice application. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [S.l.], v. 9, n.1, p.15-29, Feb., 2011.

REPETTE, Wellington L. Concreto Autoadensável. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1768 – 1806.

RICO, Joana R.; **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: implications for high performance concretes. 2000.188f. Tese (Doutorado)-Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000.

RHODIA SOLVAY GROUP. **Technyl**. Disponível em: <<http://www.rhodia.com.br/pt/mercados-e-produtos/catalogo-de-produtos/technyl.html>> Acesso em: 2 nov. 2015.

ROSSIGNOLO, João Adriano. Módulo de deformação do concreto leve estrutural de alto desempenho. **Revista Minerva**, v. 2, n. 1, p.99-106, jan/jun. 2005.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto Leve Estrutural**: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1 ed. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, João A.; AGNESINI, Marcos V. C. Concreto Leve Estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1531 – 1568.

SACHT, Helenice. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco**: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. 2008. 286 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Universidade de São Paulo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos (USP/São Carlos), São Carlos, 2008.

SACHT, Helenice. M.; ROSSIGNOLO, João. A.; SANTOS, Wilson. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.15, n. 1, p. 31-39, 2010.

SETHY, K. P.; PASLA, D.; SAHOO, U. C. Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete. **CJournal of Cleaner Production**, [S.l.], n.112, p. 581-587, Jan. 2016

SBRIGHI NETO, CLAUDIO. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 233 – 260.

SPITZNER, J. High-strength LWA concrete. In: **High-Strength Concrete**. RILEN, Cap. 2 – Aggregates. 1994.

SHI C.; Wu Y. Mixture Proportioning and Properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. **Materials Journal**, [S.l.], v. 102, n. 5, p. 355-363, Sept. 2005.

SU, Nan; HSU, K.; CHAI, H. T. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 31, n.12, p. 1799-1807, Dec. 2001.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Guide to Construction of High Flowing Concrete**. Tokyo: Gihoudou Pub., 1988.

TOPÇU, Ilker B.; UYGUNOGLU, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 24, n.7, p. 1286-1295, July 2010.

TUTIKIAN, Bernardo F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em engenharia na modalidade acadêmico)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, Bernardo F.; DAL MOLIN, Denise C. **Concreto autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2015.

_____. **Concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

UYGUNOGLU, T.; TOPÇU, I. B. Influence of aggregate type on workability of self-consolidating lightweight concrete. **Magazine of Concrete Research**, [S.l.], v. 63, n.1, Mar. 2011.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Tradução: Edson Monteiro. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

WU, Zhimin et al. An experimental study on the workability of self-Compacting lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 23, n. 5, p. 2087 – 2092, May 2009.

ANEXO 1 - Caracterização física dos materiais

Neste capítulo são apresentados os resultados relativos à caracterização física dos seguintes materiais (aglomerantes e agregados) utilizados na confecção dos concretos autoadensáveis:

Cimento Portland CP V-ARI (Ultra Fino) / Votorantin Cimentos

Sílica ativa / (FERBASA)

Agregados naturais (areia lavada e pedra britada do basalto) / Maringá-PR.

Argila expandida / CINEXPAN

Aditivo superplastificante - GLENIUN 51 / Basf S.A

Os ensaios foram realizados, em sua maioria, nos laboratórios dos fabricantes (cimento Portland e sílica ativa), no Laboratório de Materiais e Ambiente Agrária da FZEA - USP (Pirassununga, SP.) e no Laboratório de Materiais de Construção / DEC da Universidade Estadual de Maringá - Maringá-PR.

AN 1.1 Cimento Portland

Os concretos serão produzidos utilizando-se o cimento Portland do tipo CP V-ARI-ULTRA FINO, marca Votoran, fabricado pela Votorantim Cimento S.A. A Tabela AN 1.1 apresenta as características físicas, mecânicas e químicas, fornecidas pelo fabricante, à exceção do ensaio de massa específica, determinada na Laboratório de Materiais de Construção / DEC da Universidade Estadual de Maringá.

A Figura AN 1.1 mostra a composição granulométrica determinada pelo Laboratório de Materiais da FZEA-USP, Pirassununga - SP. Os tamanhos das partículas (granulometria a laser) foram determinados por meio de do Analisador de tamanho de partículas à laser modelo LA-950 marca HORIBA.

TABELA AN 1.1 Caracterização química, física e mecânica do cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos (CP V ARI-RS)
(Adaptada de Votorantim Cimentos S.A., 2013)

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MECÂNICA DO CIMENTO CP V ARI-RS	Limites (NBR 5737/92)	VALORES			Desvio Padrão
		Médio	Mínimo	Máximo	
1 – ENSAIOS QUÍMICOS					
1.1 - Produtos Fundentes (PF) (%)	≤ 4,5	3,3	3,0	3,5	0,1
1.2 – MgO (%)	≤ 6,5	5,7	5,5	5,9	0,1
1.3 - SO ₃ (%)	Não Aplicável	3,1	2,8	3,5	0,2
1.4 - Resíduos Insolúveis (RI) (%)	Não Aplicável	11,6	9,1	14,9	1,6
2 – ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS					
2.1 - Massa específica (kg/m ³)		2,99	-	-	-
2.2 -Finura por peneiramento (%)					
# 200	≤ 6,0	0,0	0,0	0,0	0,1
# 325	Não Aplicável	0,6	0,5	0,3	2,8
2.3 – Finura blaine (cm ² /g)	≥ 3.000	5.130	4.860	5.370	124
2.4 – Água para pasta de consistência normal (%)	Não Aplicável	31,1	30,0	31,6	0,4
2.5 – Tempos de pega					
Início de pega (min)	≥ 60	244	220	260	15
Fim de pega (min)	≤ 600	311	280	335	19
2.6 – Expansabilidade à quente (mm)	≤ 5,0	0,5	0,0	1,00	0,3
2.7 – Resistência à compressão (MPa)					
1 dia	≥ 11,0	22,4	21,3	23,6	0,6
3 dias	≥ 24,0	33,8	32,2	35,4	0,8
7 dias	≥ 34,0	39,3	37,7	41,3	1,0
28 dias	Não Aplicável	49,0	46,8	50,6	1,1

Fonte: Boletim de Análise de Cimento atualizado em 25/10/2015

FIGURA AN 1.1 Curva granulométrica do cimento Portland CP V-ARI (Votoran) usado nos concretos autoadensáveis

Fonte: Laboratório de Materiais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), Pirassununga - SP

AN 1.2 Adição mineral

Os concretos foram produzidos com adição mineral de sílica ativa amorfa não cristalina (SiO_2) fabricada pela Ferbasa e fornecida pela empresa Tecnosil Silica Ativa (Itupeva - SP.), cujas características físicas e composição química são apresentadas na Tabela AN 1.2.

A Figura AN 1.2 mostra a composição granulométrica da sílica ativa utilizada nos experimentos, cujo ensaio foi realizado pelo Laboratório de Materiais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), Pirassununga - SP. Os tamanhos das partículas (granulometria a laser) foram determinados por meio de do Analisador de tamanho de partículas à laser modelo LA-950 marca HORIBA.

TABELA AN 1.2 Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada na produção dos concretos autoadensáveis**ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICAS E QUÍMICAS****1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Massa específica (ABNT NBR NM 23:2001) ^(*)	2.166 kg/m ³
Massa unitária na condição seca e solta (ABNT NBR NM 45, 2006) ^(*)	382 kg/m ³
Superfície específica	-
Formato da partícula	-

2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% de massa)

SiO ₂	88,4
SO ₃	-
Fe ₂ O ₃	-
CaO	-
Al ₂ O ₃	-
MgO	-
K ₂ O	1,85
Na ₂ O	1,12
Cr ₂ O ₃	-
MnO	-
ZnO	-
% PF	2,78

Observação:

(*) Valores experimentais determinados no Laboratório de Materiais de Construção / DEC-UEM

Fonte: Companhia de Ferro e Ligas da Bahia - Ferbasa

FIGURA AN 1.2 Curva da sílica ativa usada na composição dos concretos autoadensáveis

Fonte: Laboratório de Materiais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), Pirassununga - SP

AN 1.3 Agregado miúdo

Foram utilizados como agregado miúdo duas areias naturais (AF₁ e AF₂). A fração de agregado miúdo dos concretos autoadensáveis foi resultado da composição dessas duas areias naturais (50% de cada uma delas, em massa), quartzosas adquiridas na cidade de Maringá-PR. Estes agregados miúdos são originários do Rio Paraná e beneficiados (dragados) no município de Porto São José – PR.

A Tabela AN 1.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização destas areias naturais (AF₁ e AF₂) individualmente e da composição utilizada na produção dos concretos. A Figura AN 1.3 mostra as curvas granulométricas obtidas das areias e pela composição, em porcentagem de massa de 50%AF₁ mais 50%AF₂, respectivamente.

TABELA AN 1.3 Ensaios de caracterização dos agregados miúdos utilizados na confecção dos concretos autoadensáveis

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO			AREIA NATURAL, QUARTZOSA		COMPOSIÇÃO AF ₁ + AF ₂ (50% AF ₁ + 50% AF ₂)
			Areia 1 (AF ₁)	Areia 2 (AF ₂)	
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (% retida e acumulada) (ABNT NBR NM 248, 2003)	Abertura das peneiras	9,5 mm	0	0	0
		6,3 mm	0	0	0
		4,75 mm	0	0	0
		2,36 mm	0	1	0
		1,18 mm	1	4	2
		600 μm	1	14	5
		300 μm	11	48	24
		150 μm	92	97	89
		75 μm	-	-	100
		Fundos	100	100	100
	Dimensão máxima característica		600 μm	1,18 mm	600 μm
	Módulo de finura (MF)		1,050	1,640	1,200
- Porcentagem de material passado na peneira 150 μm (%)			8,2	2,8	10,4
- Massa específica aparente seca (kg/dm³) (NBR NM 52)			2.653,0	2.665,0	2.653,0
- Massa unitária (solta) (kg/dm³) / Espaços vazios (NBR NM 45)			1.460,0	11.532,0	1.460,0
- Espaços vazios (solta) (%)			45,0	42,5	45,0
- Massa unitária (compactada) (kg/dm³) / Espaços vazios (NBR NM 45)			1.598,0	1.654,0	1.598,0
- Espaços vazios (compactada) (%)			39,8	38,0	39,8
- Absorção de água (%) (ABNT NM 30, 2001)			0,60	0,40	-
- Teor de material pulverulento (%) (ABNT NM 46, 2001)			0,2	0,1	-

Fonte: O autor (2015)

FIGURA AN 1.3 Curvas granulométrica das areias AF₁, AF₂ e da composição 50%AF₁ + 50%AF₂

Fonte: O autor (2015)

AN 1.4 Agregados graúdo

Foram utilizados como agregado graúdo dois tipos de materiais: um agregado natural, de peso normal, britado de rocha basáltica, coletados na cidade de Maringá e região e um agregado leve (argila expandida - AE - 1506 / Cinexpan).

AN 1.4.1 Agregado graúdo natural

Foram avaliados agregados graúdos britados de rocha basáltica beneficiados por duas pedreiras instaladas nas cidades de Maringá-PR e Marialva - PR, identificadas neste projeto como Pedreira 1 e Pedreira 2, respectivamente. Os materiais, cujos resultados dos ensaios de caracterização física e de qualidade, são mostrados na Tabela AN 1.4, são identificados pelo nome comercial de brita 0 (zero), brita 5/8" ou 16 mm, brita 1 e brita 1/2".

A Figura AN 1.4 mostra as curvas granulométricas obtidas para estes agregados enquanto que a Figura AN 1.5 ilustra os agregados avaliados nas duas pedreiras pesquisadas.

TABELA AN 1.4 Ensaio de caracterização dos agregados graúdos coletados para seleção na confecção dos concretos autoadensáveis

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO			PEDREIRA 1		PEDREIRA 2	
			Brita 5/8" (16 mm)	Brita 0	Brita 1/2"	Brita 1
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (% retida e acumulada) (ABNT NBR NM 248, 2003)	Abertura das peneiras	25 mm	0	0	0	0
		19 mm	0	0	0	3
		12,7 mm	23	0	26	93
		9,5 mm	72	2	74	98
		6,3 mm	96	72	98	99
		4,75 mm	98	96	99	99
		2,36 mm	99	100	99	99
		1,18 mm	99	100	99	99
		600 µm	99	100	99	99
		300 µm	99	100	99	99
		150 µm	99	100	99	99
		Fundos	100	100	100	100
	Dimensão máxima característica (mm)	19,0	9,5	19,0	19,0	
	Módulo de finura	6,650	5,980	6,660	6,950	
- Massa específica aparente seca (kg/dm³) (ABNT NM 52, 2002)		2.802,0	2.895,0	2.794,0	2.801,0	
- Massa unitária, solta (kg/dm³) (ABNT NM 45, 1995)		1.606,0	1.358,0	1.455,0	1.556,0	
- Espaços vazios (solta) (%) (ABNT NM 45, 1995)		42,7	53,1	47,9	44,5	
- Massa unitária, compactada (kg/dm³) (ABNT NM 45, 1995)		1.667,0	1.559,0	1.633,0	1.739,0	
- Espaços vazios (compactada) (%) (ABNT NM 45, 1995)		40,5	46,2	41,6	37,9	
- Absorção de água (%) (ABNT NM 30, 2001)		2,52	1,71	3,23	2,96	
- Teor de material pulverulento (%) (ABNT NM 46, 2001)		1,6	0,4	1,5	2,5	
- Índice de forma (If) (DNER - ME 086/94)		0,94	-	-	-	

Fonte: O autor (2015)

FIGURA AN 1.4 Curvas granulométrica dos agregados graúdos - pedra britada do basalto -, Maringá-PR e região

Fonte: O autor (2015)

Entre os agregados selecionados foi escolhida a pedra britada fornecida pela pedreira 1, identificada comercialmente como brita 5/8". Foi o material que mais aproximou-se da granulometria e forma arredondada da argila expandida AE-1506, conforme confirma o ensaio do índice de forma (I_F) mostrado na Tabela AN 1.4.

AN 1.4.2 Agregado leve

O agregado leve usado na substituição do agregado normal (pedra britada de basalto) foi a argila expandida tipo AE-1506 produzida pela Cinexpan Indústria e Comércio Ltda (Várzea Paulista – SP), única empresa a fabricar agregado leve no país. Segundo a fabricante, a argila expandida é um tipo de agregado leve produzido em forno rotativo pelo processo de nodulação à temperaturas médias de 1.100°C. Apresenta forma arredondada regular, com estrutura interna formada por espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida, resistente e de baixa porosidade.

Suas principais características são: leveza, baixa densidade, isolamento térmico, isolamento acústico, durabilidade e resistência a altas temperaturas. A Figura AN 1.5 ilustra o aspecto, enquanto que a Figura AN 1.8 mostra a curva granulométrica do material utilizado nos experimentos

FIGURA AN 1.5 Aspecto superficial e forma da argila expandida AE-1506 (Cinexpan)

Fonte: O autor (2015)

Para a ensaios de caracterização física da AE-1506 (Tabela AN 1.5), dadas as características do material, houve necessidade de adaptar alguns procedimentos para a realização de alguns destes ensaios, a saber:

- ***Massa específica seca***

Em se tratando de agregado graúdo a norma ABNT NBR NM 53 (2009) estabelece os procedimentos para a realização deste ensaio. Entretanto, a ocorrência da flutuação do agregado impediu a pesagem do agregado quando imerso em água.

Desta forma, para determinar a massa específica seca utilizou-se os procedimentos previstos na norma ABNT NBR NM 52 (2009), fazendo uso do frasco de vidro com rolha esmerilhada. A Figura AN 1.6 ilustra o fenômeno da flutuação do agregado e o frasco de vidro com a amostra de argila expandida, preparado para o ensaio.

FIGURA AN 1.6 Flutuação do agregado leve – argila expandida AE-1506 (Cinexpan)

Fonte: O autor (2015)

Para o ensaio o agregado foi seco em estufa até a constância de massa e, em seguida, colocado no interior do frasco. A pesagem do conjunto frasco + argila expandida + água foi feita decorridos 15 minutos da imersão do agregado no frasco de vidro. Os valores da massa específica seca (γ_s), mostrado na Tabela AN 1.5 foram obtidos por meio da equação AN 1.1.

$$\gamma_s = \frac{m}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}} \quad (\text{AN 1.1})$$

Onde:

γ_s = Massa específica do agregado graúdo seco (g/cm^3)

m = massa do agregado leve na condição seca em estufa a $100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (g)

V = Volume do frasco (cm^3)

m_1 = Massa do conjunto (frasco + agregado leve) (g)

m_2 = Massa do conjunto (frasco + agregado leve + água) (g)

ρ_a = Massa específica da água (g/cm^3)

• **Absorção de água**

O ensaio de absorção de água da argila expandida AE - 1506 foi feito com o agregado na condição seca ao ar, à sombra. Nestas condições, o teor de umidade do agregado leve foi de 1,7 %.

As pesagens dos materiais na condição úmida foram feitas decorridos os tempos de (1- 5 - 15 - 30) minutos e (1 - 2 - 6 - 24) horas da imersão do material em água. Para cada um destes tempos foi preparada uma amostra do material. A Figura AN 1.7 ilustra uma amostra do material imerso em água. Os valores da absorção de água para os diversos tempos de imersão analisados são mostrados na Tabela AN 1.5.

FIGURA AN 1.7 Agregado leve imerso em água para o ensaio de absorção de água

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 1.5 Ensaio de caracterização física e química da argila expandida do tipo AE - 1506 utilizada na confecção dos concretos autoadensáveis

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA		OUTROS ENSAIOS FÍSICOS			
Abertura das peneiras	PORCENTAGEM DE MASSA RETIDA E ACUMULADA				
25,0 mm	0	- Absorção de água (ABNT NM 30, 2001)			
19,0 mm	0				
12,5 mm	5				
9,5 mm	39				
6,3 mm	86				
4,75 mm	99				
2,36 mm	100				
1,18 mm	100	- Massa específica aparente seca (ABNT NM 52, 2002) 1.024 kg/m³			
600 µm	100				
300 µm	100				
150 µm	100				
FUNDOS	100				
Dimensão máxima característica	12,5 mm	- Massa unitária, seca e solta (ABNT NM 45, 1995) 561 kg/dm³			
Módulo de Finura	6,380				
		- Massa unitária, seca e compactada (ABNT NM 45, 1995) 590 kg/dm³			
		- Espaços vazios inter-grãos (%) (ABNT NM 45, 1995)			
		Condição seca e solta 45,2 %			
		Condição seca e compactada 42,4 %			

Fonte: O autor (2015)

FIGURA AN 1.8 Curva granulométrica da argila expandida AE-1506 (CINEXPAN)

Fonte: O autor (2015)

AN 1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado nesta pesquisa será o Glenium 51 da marca BASF. O produto é líquido, cor branco turvo foi desenvolvido segundo o fabricante, para produção de concretos fluídos, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado, atuando como agente dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução água, tornado o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. A Tabela AN 1.6 apresenta algumas características do aditivo superplastificante Glenium 51.

TABELA AN 1.6 - Parâmetros físicos do aditivo superplastificante Glenium 51

Parâmetros de avaliação	Especificação
pH	5 - 7
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5
Viscosidade	< 150

Fonte: Ficha técnica da BASF S/A(<http://www.basf-cc.com.br>)

ANEXO 2 - Dosagem do Concreto Autoadensável: Método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) Modificado

---

Neste capítulo serão mostradas as principais etapas relacionadas ao proporcionamento do traço de concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) utilizando o método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000). As misturas são produzidas a partir da incorporação de agregados, sendo as propriedades mecânicas resultantes características da mistura no estado fresco.

Por essa técnica, ensaios feitos na pasta identificam a composição que apresente capacidade de escoamento e resistência a segregação. O teor superplastificante é definido com base no teor de saturação da pasta e o agregado miúdo é incorporado à pasta (REPETE, 2011).

A argamassa assim obtida é avaliada por meio dos ensaios de espalhamento e de escoamento utilizando-se os dispositivos de tronco de cone e funil V para argamassas. A incorporação do agregado graúdo é definida experimentalmente de tal forma que se obtenha o máximo de empacotamento das partículas. Por fim, o teor de aditivo, obtido inicialmente nos ensaios de pasta, é ajustado na fase de estudo da argamassa e do concreto propriamente dito. Estas etapas, aplicadas na dosagem do CAA_{REF} , podem ser conferidas a seguir.

AN 2.1 Teor de substituição do cimento pela adição mineral

A definição do teor de adição mineral (sílica ativa) a ser utilizada nos estudos da argamassa e do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) em substituição ao cimento Portland (CP V ARI-Ultra Fino) foi feita meio de ensaios realizados com pastas constituídas de cimento, sílica ativa e água.

Para tanto, foram avaliadas pastas produzidas com a substituição, em massa, de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% do cimento pela sílica ativa. Para cada teor de substituição foram produzidas um conjunto de quatro pastas com diferentes relações volume de água / volume de finos (V_w/V_p), cujos pares de valores ($G_p : V_w/V_p$) quando ajustados por equações de reta ($V_a/V_p = E_p \cdot G_p + \beta_p$), permite a determinação da razão de água retido pelos finos (β_p) e do fator de deformação da pasta (E_p). A Tabela AN 2.1 mostra os dados experimentais e expressões matemáticas enquanto que a Figura AN 2.1 ilustra graficamente as retas de ajustes para os diferentes teores de substituições nas pastas avaliadas.

TABELA AN 2.1 Características das pastas (cimento Portland + sílica ativa + água) dosadas com diferentes teores de substituições

TEOR DE SUBSTITUIÇÃO		EQUAÇÃO REDUZIDA DO TIPO		DADOS EXPERIMENTAIS			
Massa	Volume (F)	$V_w/V_p = E_p \cdot G_p + \beta_p$	r^2	G_p	V_w/V_p	Massa específica fresca (kg/m ³)	Ar Incorporado (%)
0 %	0 %	$V_a/V_p = 0,1356 \cdot G_p + 1,2413$	0,971	2,33	1,575	1.779,1	3,0
				1,76	1,470	1.796,7	3,9
				3,06	1,649	1.755,4	3,1
5 %	6,7 %	$V_a/V_p = 0,1282 \cdot G_p + 1,2687$	0,991	1,96	1,519	1.799,4	1,6
				2,42	1,568	1.769,9	2,4
				2,96	1,666	1.745,1	2,1
				4,36	1,823	1.678,9	3,5
10 %	12,5 %	$V_a/V_p = 0,1045 \cdot G_p + 1,3814$	0,990	1,84	1,561	1.752,7	2,2
				2,15	1,617	1.744,8	1,8
				3,06	1,708	1.715,4	2,0
				4,06	1,800	1.696,2	1,7
15 %	17,7 %	$V_a/V_p = 0,0917 \cdot G_p + 1,3949$	0,985	1,77	1,556	1.700,9	4,2
				2,65	1,642	1.710,1	2,3
				4,02	1,746	1.661,6	3,5
				4,24	1,798	1.638,7	4,1
20 %	22,3 %	$V_a/V_p = 0,1053 \cdot G_p + 1,4430$	0,989	1,58	1,600	1.690,2	3,2
				2,71	1,730	1.655,7	3,2
				3,91	1,877	1.607,6	4,0
				5,20	1,975	1.590,5	3,7

Fonte: O autor (2015)

FIGURA AN 2.1 Retas de ajustes para pastas com diferentes teores de substituição do cimento Portland pela sílica ativa

Fonte: O autor (2015)

Analisando as informações contidas na Tabela AN 2.1 e na Figura AN 2.1 nota-se que com o aumento do teor de substituição do cimento Portland pela sílica ativa (F) aumenta-se o coeficiente linear da reta (β_p), indicando a sílica ativa exige demanda maior de água nos concretos.

Pela Figura AN 2.2 percebe-se que o teor de substituição do cimento (F) interfere na quantidade de ar incorporado na pasta. Nos teores de substituição analisados, destaca-se o teor de 12,5% de substituição do volume de cimento Portland pela sílica ativa.

FIGURA AN 2.2 Influência do teor de substituição (F) na quantidade de ar incorporado das pastas de cimento e sílica ativa

Fonte: O autor (2015)

Percebe-se que para teores de 0% a 12,5% ocorre, de forma geral, diminuição nos teores de ar incorporado enquanto que para valores superiores a 12,5% ocorre aumento no teor de ar incorporado à mistura. Desta forma, considerando estas análises, foi adotado para as etapas posteriores da aplicação do método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), o teor de substituição do cimento Portland pela sílica ativa (F) igual a 12,5% em volume ou o equivalente a 10% em massa.

AN 2.2 Dosagem do aditivo superplastificante

A definição do teor do aditivo superplastificante de acordo como a metodologia de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) é feita com base em estudos realizados com argamassas dosadas com diferentes relações volume de água/volume de finos (V_w/V_p) e teor de aditivo superplastificante (Sp/p).

Desta forma, foram confeccionadas argamassas (cimento Portland, sílica ativa, agregados miúdos (areia AF_1 , areia AF_2), aditivo superplastificante e água), cuja relação volume de miúdo / volume de argamassa (V_s/V_m) foi fixada em 47%, teor de substituição do cimento (F) igual a 12,5%, em volume, estabelecido no estudo das pastas. A fração de partículas finas do agregado miúdo (ksf)²¹ igual a 8,2% e 2,8% para a areia 1 (ksf_{AF1}) areia 2 (ksf_{AF2}), respectivamente. A proporção entre as areias no traço da argamassa foi fixada em 50% de cada uma, em massa.

As misturas foram avaliadas sob os aspectos da coesão, analisado sob a ótica do espalhamento, e da fluidez. Para tanto, foram utilizados os dispositivos do tronco de cone e funil V para argamassas, que forneceram os índices de deformabilidade (G_m) e de viscosidade (R_m), obtidos nos ensaios de espalhamento e fluidez da argamassa, respectivamente.

Os experimentos feitos com as argamassas foram conduzidos para obtenção de espalhamentos que variaram de 190 mm a 300 mm e tempos de fluidez de 5 segundos a 20 segundos. Os limites de espalhamento são ligeiramente superiores à faixa de 200 mm a 280 mm, sugeridos por Nunes (2001) . A Figura AN 2.3 mostra os dispositivos do tronco de cone e funil V para argamassas utilizados nos ensaios,

---

²¹ A fração de finos das areias (ksf) foi a do material passante na peneira de malha quadrada de 150 μm .

enquanto que a Tabela AN 2.2 relaciona algumas características das argamassas confeccionadas nesta etapa dos experimentos.

FIGURA AN 2.3 Fôrma tronco-cônica e funil-V usados nos ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 2.2 Características das argamassas (cimento Portland + sílica ativa + agregado miúdo + água) dosadas com diferentes teores de substituições

TEOR DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (Sp/p) (Líquido) (%)	PARÂMETROS DE DOSAGEM			DADOS EXPERIMENTAIS			
	Volume de finos (V _p)	Volume de água/Volume de sólidos (V _w /V _{sol})	Volume de água/Volume de finos (V _w /V _p)	G _m	R _m	Massa específica fresca (kg/m ³)	Ar Incorporado (%)
0,60	0,259	0,373	1,050	2,61	1,37	2.172,1	2,72
	0,252	0,384	1,100	2,90	1,51	2.147,9	3,34
	0,247	0,396	1,150	3,10	1,56	2.154,7	2,53
0,80	0,259	0,373	1,050	4,18	1,58	2.181,8	2,22
	0,252	0,384	1,100	4,76	1,76	2.179,6	1,86
	0,247	0,396	1,150	6,10	1,94	2.194,7	0,66
1,00	0,270	0,351	0,960	5,63	1,34	2.166,6	3,85
	0,268	0,356	0,980	6,43	1,57	2.191,3	2,51
	0,265	0,361	1,000	6,84	1,77	2.197,9	2,01
1,20	0,269	0,353	0,970	5,76	1,11	2.175,3	3,30
	0,266	0,358	0,990	6,84	1,40	2.186,2	2,58
	0,252	0,384	1,100	7,85	1,70	2.154,5	2,83

Fonte: O autor (2015)

A estimativa do teor adequado do aditivo superplastificante (Sp/p) foi estabelecida pelo ajuste dos pontos (Sp/p ; G_m/R_m) a uma curva e equação conhecida. Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) estabelecem como ideal aquele teor de aditivo que atenda a relação G_m/R_m igual a 5,0.

Para o caso desta pesquisa, considerando os valores obtidos experimentalmente indicados na Tabela AN-2.2 e o limite máximo do aditivo superplastificante de 1,0%, sugerido pelo fabricante do produto, foi estabelecido como ideal o teor líquido de aditivo que atenda a faixa de $(1,0\% \pm 0,1\%)$ em relação à massa de finos da mistura.

A Figura AN 2.4 mostra a curva ajustada para a definição do teor ideal de aditivo superplastificante (Sp/p), considerando os pontos (Sp/p ; G_m/R_m) indicados na Tabela AN 2.2. Como resultado obteve-se Sp/p igual a 1,009%, que corresponde na curva ajustada à relação G_m/R_m igual a 4,1.

FIGURA AN 2.4 Curva de comportamento utilizada na estimativa do teor de aditivo superplastificante (Sp/p)

Fonte: O autor (2015)

Uma vez estimado o teor de aditivo superplastificante (Sp/p), o próximo passo da metodologia de dosagem, é a estimativa da quantidade de água em relação ao volume de finos (cimento Portland + sílica ativa).

Para tanto, elaborou-se uma bateria de argamassas variando-se a relação V_w/V_p de tal maneira que, por meio de uma reta ajustada, obtenha-se $R_m/G_m^{0,4}$ igual a 0,525, conforme sugerido por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000). A Tabela AN 2.3 mostra os valores experimentais obtidos nas argamassas utilizadas para a estimativa do teor V_w/V_p . A Figura AN 2.5 mostra a curva de ajuste, na qual, por aproximação linear, determinou-se V_w/V_p igual a 1,022, correspondente à $R_m/G_m^{0,4}$ de 0,882.

TABELA AN 2.3 Características das argamassas (cimento Portland + sílica ativa + água) dosadas com diferentes teores de substituições

V_w/V_p	G_m	R_m	$R_m / G_m^{0,4}$
0,960	3,31	1,18	0,731
0,980	3,67	1,28	0,761
1,000	4,88	1,49	0,790
1,020	5,20	1,57	0,812
1,050	5,76	1,70	0,844

Fonte: O autor (2015)

FIGURA AN 2.5 Curva de ajuste para estimativa adequada da relação V_w/V_p a ser adotada na dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF})

Fonte: O autor (2015)

AN 2.3 Dosagem do concreto autoadensável

Conhecidos os parâmetros iniciais de dosagem teor de substituição do cimento Portland pela sílica ativa (F), teor de aditivo superplastificante (Sp/p) e relação V_w/V_p determinados nos ensaios de pasta e argamassa respectivamente, foram feitos experimentos que auxiliaram na definição do traço do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}).

Desta forma, foram elaboradas quatro composições com diferentes teores de aditivo superplastificante (Sp/p) e relação V_w/V_p , cujas características nas condições fresca e endurecida foram avaliadas nos ensaios de espalhamento (Slump Flow e anel J), viscosidade (Funil V) e resistência à compressão, respectivamente. Os parâmetros de dosagem e os resultados obtidos nos experimentos efetuados nestes concretos são apresentados na Tabela AN 2.4. Uma vez ajustados aos limites de autoadensabilidade impostas para este estudo, este traço servirá de referência (CAA_{REF}) na produção de concretos cujo volume do agregado graúdo natural, em parte ou no total, é substituído pelo agregado leve.

Alguns parâmetros adotados na dosagem dessas composições foram modificados se comparados com aqueles propostos pelo método de Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), destacando-se o volume aparente do agregado graúdo (V_{ap}) e o teor de agregado miúdo em relação ao teor de argamassa (V_s/V_m) alterados de 0,50 para 0,57 m³/m³ e de 40% para 47%, respectivamente. Teoricamente, estas mudanças podem diminuir em menos 6% no volume da pasta de finos na comparação misturas confeccionadas com aqueles propostos por Okamura, Ozawa e Ouchi (2000), contribuindo, assim, para a redução dos custos dos concretos.

As características físicas dos agregados e a possibilidade da ocorrência de segregação (flutuação) do agregado leve nas misturas contribuíram na tomada de decisão para promover tais mudanças. Areias finas aliadas a pedra britada de forma arredondada podem contribuir positivamente na coesão, na mobilidade das partículas do graúdo e no consumo de aglomerantes da mistura.

Levando-se em conta que nos concretos a serem produzidos neste estudo, parte do agregado graúdo natural será substituído por agregado leve, é importante que as misturas sejam dosadas com características tais que, promovam a fluidez,

coesão e resistência a segregação ascendente (flutuação) das partículas de agregado leve (argila expandida AE-1506).

TABELA AN 2.4 Traços utilizados no ajuste do concreto autoadensável de referência

1 – PARÂMETROS DE DOSAGEM					
Volume aparente do agregado graúdo (V _{ap})		0,57 m³			
Volume absoluto do agregado graúdo (V _g)		0,332 m³			
Fração de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V _s /V _m)		47 %			
Massa da areia 1 em relação à massa total de agregado miúdo (m ₁ /M _s)		50 %			
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)		12,5 %			
Teor de argamassa (V _m)		64,8%			
2 - CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO (kg/m³)		IDENTIFICAÇÃO DOS TRAÇOS			
		CAA _{REF} -N1	CAA _{REF} -N2	CAA _{REF} -N3	CAA _{REF} -N4
Cimento Portland – CP V-ARI		469,30	456,30	418,10	460,00
Sílica ativa		46,93	45,63	41,81	46,00
Areia 1 (natural, quartzosa)		409,23	409,76	405,98	407,10
Areia 2 (natural, quartzosa)		409,23	409,76	405,98	407,10
Pedra britada, basalto – Brita 1		941,42	942,72	934,45	936,56
Água total		199,45	204,42	215,74	201,02
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)		4,69	5,02	4,60	5,06
Teor de aditivo superplastificante (Sp/p) (%)		0,900	1,000	1,000	1,000
Relação volume de água / volume de finos (V _w /V _p)		1,020	1,080	1,250	1,050
Relação volume de finos/volume de miúdos (V _p /V _s)		55,8	54,2	50,1	55,0
Relação água/cimento (a/c)		0,367	0,388	0,450	0,377
Relação água/finos (a/p)		0,333	0,353	0,409	0,343
Slump Flow	Espalhamento (mm)	560	630	850	740
	Viscosidade plástica - T ₅₀₀ (s)	-	-	-	1,10
Anel J	Habilidade passante – PJ (mm)	90	60	-	40
	Viscosidade plástica – T _{500-J} (s)	-	-	-	2,81
Funil V	Viscosidade plástica - T ₃₀ (s)	-	-	-	3,95
	Viscosidade plástica – T ₃₀₀ (s)	-	-	-	5,43
Resistência à Compressão (MPa)	Idade = 3 dias (f _{c3})	45,0 – 50,9	43,1 – 43,2	-	49,4 – 49,8
	Idade = 7 dias (f _{c7})	48,4 – 54,0	55,0 – 56,1	-	58,6 – 59,8
	Idade = 28 dias (f _{c28})	49,5 – 56,3	-	-	74,1 – 79,9
Consumo de cimento teórico (kg/m³)		464,09	450,70	416,65	457,29
Massa específica do concreto fresco (kg/m³)		2.433,8	2.427,2	2.380,8	2.416,6
Teor de ar incorporado (%)		0,79	0,67	1,55	1,30

OBSERVAÇÕES

- 1- Na fração de água total da mistura estão inclusos a quantidade necessária para a hidratação do cimento e a fração correspondente à taxa de absorção de água dos agregados e descontada a parcela de água de diluição do aditivo superplastificante;
- 2- O traço REF_{AI}-N3 apresentou sinais evidentes de segregação. Não foram feitos ensaios de controle.

Fonte: O autor (2015)

Os ajustes dos traços mostrados na Tabela AN 2.4 foram feitos tendo como referência os limites de espalhamento 660 mm a 750 mm (ABNT NBR 15823-2,2010) e habilidade passante pelo anel-J (16 barras), sob fluxo livre, de 25 mm a 50 mm (ABNT NBR 15823-3,2010). O dimensionamento das quantidades dos componentes das misturas foi feito com base nas equações apresentadas no item 3.2 (MATERIAIS E MÉTODOS) deste trabalho.

A primeira composição (CAAREF-N1) foi elaborada com valores do teor de aditivo (Sp/p) e volume de água / volume de finos (V_w/V_p) menores que aqueles apontados nos ensaios de argamassa, ou seja, $Sp/p = 1,00\%$ e $V_w/V_p = 1,022$. Observou-se que esta composição apresentou espalhamento inferior e habilidade passante superior aos limites estabelecidos para as misturas na condição fresca. A Figura AN 2.6 ilustra os espalhamentos desta composição nos ensaios feitos com os dispositivos cone de Abrams e anel J.

FIGURA AN 2.6 Espalhamentos do traço CAAREF-N1: cone de Abrams (a) Anel-J (b)

Fonte: O autor (2015)

Na segunda iteração foi produzida a mistura CAAREF-N2. Neste caso, foram adotados teor de aditivo (Sp/p) de 1,00 % e a relação V_w/V_p de 1,080. Observe que estas modificações melhoraram a fluidez da mistura. Entretanto, não se atingiu os limites mínimos estabelecidos na pesquisa. A Figura AN 2.7 ilustra os espalhamentos obtidos para essa mistura.

FIGURA AN 2.7 Espalhamentos do traço CAA_{REF}-N2: Cone de Abrams (a) Anel-J (b)

Fonte: O autor (2015)

Na terceira iteração foi produzida a mistura CAA_{REF}-N3. Neste caso, foram adotados teor de aditivo (Sp/p) de 1,00 % e a relação V_w/V_p igual a 1,250. Estas modificações produziram uma mistura cuja segregação da pasta ficou visível e destacada. A Figura AN 2.8 ilustra o espalhamento obtido no ensaio realizado com o cone de Abrams.

FIGURA AN 2.8 Espalhamentos do traço CAA_{REF}-N3: ocorrência de segregação da pasta.

Fonte: O autor (2015)

Por fim, foi realizada a quarta e última iteração. Neste caso, foram adotados teor de aditivo (S_p/p) de 1,00 % e a relação V_w/V_p igual a 1,050. Neste caso, o concreto obtido, além de atender às faixas estabelecidas para esta fase da pesquisa, não apresentou sinais evidentes de segregação. Pelas características apresentadas, o traço CAA_{REF}-N4 poderá ser utilizado como traço de referência.

Para confirmar esta indicação o traço CAA_{REF}-N4 este traço foi replicado por quatro vezes. Outros ensaios foram realizados e definiu-se como sendo esta mistura a ser adotada como o traço do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}) da pesquisa. A Tabela AN 2.5 apresenta os resultados obtidos na replicação do traço de referência.

Os resultados dos experimentos feitos na replicação desta mistura são apresentados no item 4 (Resultados: Apresentação e discussões). A Figura AN 2.9 ilustra os espalhamentos obtidos para essa mistura.

FIGURA AN 2.9 Espalhamentos do traço CAA_{REF}-N4: Slump Flow (a) Anel J (b)

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 2.5 Replicação do traço do concreto autoadensável de referência (CAA_{REF}-N4) para verificação da repetibilidade da mistura

1 – PARÂMETROS DE DOSAGEM					
Volume aparente do agregado graúdo (V_{ap})	0,57 m ³				
Volume absoluto do agregado graúdo (V_g)	0,332 m ³				
Fração de agregado miúdo em relação ao volume de argamassa (V_s/V_m)	47 %				
Massa da areia em relação à massa de agregado miúdo (m_1/M_s)	50 %				
Porcentagem de substituição do volume de Cimento Portland por sílica ativa (F)	12,5 %				
Teor de argamassa (V_m)	64,8%				
2 – PARÂMETROS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE					
Teor de aditivo superplastificante (líquido) (Sp/p) (%)	1,000				
Relação volume de água/volume de finos (V_w/V_p)	1,050				
Relação volume de finos/volume de agregado miúdo (V_p/V_s)	55,0				
Relação água/cimento (a/c)	0,377				
Relação água/aglomerantes (água/(cimento + sílica) (a/p)	0,343				
3 – COMPOSIÇÃO DO TRAÇO DE REFERÊNCIA AJUSTADO ^(*)	Concreto autoadensável de referência (CAA _{REF})				
	Traço unitário (kg)	Consumo de materiais/m ³ ^(**2) (kg/m ³)			
		CAA _{REF} -N4 Repetição 1	CAA _{REF} -N4 Repetição 2	CAA _{REF} -N4 Repetição 3	CAA _{REF} -N4 Repetição 4
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	465,60	460,00	461,00	463,30
Sílica ativa	0,100	46,56	46,00	46,10	46,33
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,885	412,06	407,10	407,99	410,02
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,885	412,06	407,10	407,99	410,02
Pedra britada, basalto – Brita 16 mm (5/8")	2,036	947,96	936,56	938,60	943,28
Água total ^{***(3)}	0,437	203,47	201,02	201,46	202,46
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,12	5,06	5,07	5,10
Consumo de cimento teórico		457,29	457,29	457,29	457,29
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)		2.445,7	2.416,6	2.421,9	2.433,8
Teor de ar incorporado (%)		0,11	1,30	1,08	0,59
OBSERVAÇÕES					
^{*(1)} Os materiais foram dosados e utilizados na condição seca ao ar;					
^{** (2)} A estimativa de consumo de materiais por m ³ de concreto foi calculada com base no consumo de cimento/m ³ determinado experimentalmente (NBR 9833:2009);					
^{*** (3)} Na fração de água total da mistura estão inclusos a quantidade necessária para a hidratação do cimento mais a fração correspondente à taxa de absorção de água dos agregados, descontada a parcela de água de diluição do aditivo superplastificante					

Fonte: O autor (2015)

ANEXO 3 - Características Físicas e Mecânicas dos CAAs no estado endurecido

---

Neste anexo são relacionados os resultados obtidos nos concretos autoadensáveis no estado endurecido produzidos durante a pesquisa, a saber:

- **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

Massa específica do concreto na condição fresca

Massa específica do concreto na condição endurecida

Absorção de água por imersão total (24 horas)

Índice de vazios

Teor de ar incorporado

- **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA**

Resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias;

Resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7 e 28 dias;

Módulo de elasticidade (E_{sc}) - Método secante, com estimativa do coeficiente de Poisson aos 28 dias de idade

TABELA AN 3.1 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 1: Definição do traço CAA_{REF}

CONCRETO DE REFERÊNCIA - <i>Fase de definição</i>	CAA _{REF} - N1			CAA _{REF} - N2			CAA _{REF} - N3			CAA _{REF} - N4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m ³)												
Cimento Portland – CP V-ARI	469,30			456,30			418,10			460,00		
Sílica ativa	46,93			45,63			41,81			46,00		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	409,23			409,76			405,98			407,10		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	409,23			409,76			405,98			407,10		
Pedra britada, basalto – Brita 1	941,42			942,72			934,45			936,56		
Argila expandida AE-1506	-			-			-			-		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	199,45			204,42			215,74			201,02		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	4,69			5,02			4,60			5,06		
Relação água/cimento (a/c)	0,367			0,388			0,450			0,377		
Relação água/finos (a/p)	0,333			0,353			0,409			0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ_{ct}) (kg/m ³)	2.433,8			2.427,2			2.380,8			4.416,6		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)	0,79			0,67			1,55			1,30		
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS												
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{cj}) (MPa)												
Idade = 3 dias (f_{c3})	45,0	50,9	-	43,1	43,2	-	-	-	-	49,4	49,8	-
Idade = 7 dias (f_{c7})	48,4	54,0	-	55,0	56,1	-	-	-	-	58,6	59,8	-
Idade = 28 dias (f_{c28})	49,5	56,3	-	-	-	-	-	-	-	74,1	79,9	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.2 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 2: Validação do traço CAA_{REF}-N4

CONCRETO DE REFERÊNCIA - <i>Fase de validação</i>	CAA _{REF} -N4 Repetição 1			CAA _{REF} -N4 Repetição 2			CAA _{REF} -N4 Repetição 3			CAA _{REF} -N4 Repetição 4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)												
Cimento Portland – CP V-ARI	465,6			460,00			461,00			463,30		
Sílica ativa	46,56			46,00			46,10			46,30		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	412,06			407,10			407,99			410,02		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	412,06			407,10			407,99			410,02		
Pedra britada, basalto – Brita 1	947,96			936,56			938,60			943,28		
Argila expandida AE-1506	-			-			-			-		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	203,47			201,02			201,46			202,46		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	5,12			5,06			5,07			5,10		
Relação água/cimento (a/c)	0,377			0,377			0,377			0,377		
Relação água/finos (a/p)	0,343			0,343			0,343			0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m³)	2.445,70			2.416,60			2.421,9			2.433,8		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)	0,11			1,30			1,08			0,59		
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS												
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{ci}) (MPa)												
Idade = 3 dias (f _{c3})	49,4	49,8	-	48,5	51,8	52,8	49,1	50,7	51,1	40,3	42,5	42,7
Idade = 7 dias (f _{c7})	58,6	59,8	-	53,6	54,0	54,5	56,3	58,2	60,3	54,5	55,2	57,0
Idade = 28 dias (f _{c28})	74,1	79,9	-	73,5	73,7	75,2	72,5	74,1	74,7	71,2	72,1	72,4

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.3 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável de referência: FASE 3: Caracterização do CAA_{REF}

CONCRETO DE REFERÊNCIA - <i>Fase de definição</i>	CAA _{REF} - N9			CAA _{REF} - N10			CAA _{REF} - N11		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)									
Cimento Portland – CP V-ARI	463,30			464,30			460,50		
Sílica ativa	46,33			46,43			46,05		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	410,02			410,91			407,55		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	410,20			410,91			407,55		
Pedra britada, basalto – Brita 1	943,42			945,46			937,72		
Argila expandida AE-1506	-			-			-		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	202,24			202,68			201,02		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	5,10			5,11			5,07		
Relação água/cimento (a/c)	0,377			0,377			0,377		
Relação água/finos (a/p)	0,343			0,343			0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m³)	2.433,8			2.439,1			2.419,2		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)	0,59			0,38			1,19		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS									
Absorção de água (Ab) (%)	1,92	2,30	-	2,95	3,47	-	3,20	3,38	3,60
Índice de vazios (Iv) (%)	4,61	5,45	-	7,07	8,06	-	7,43	7,90	8,37
Massa específica seca (kg/m³)	2.405,8	2.366,2	-	2.320,2	2.398,2	-	2.327,8	2.319,7	2.341,7
Massa específica saturada (kg/m³)	2.451,9	2.420,7	-	2.400,8	2.468,9	-	2.411,6	2.393,9	2.420,7
Massa específica real (kg/m³)	2,522,1	2,502,53	-	2.523,6	2.580,7	-	2.540,5	2.505,7	2.542,6
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS									
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{ci}) (MPa)									
Idade = 3 dias (f _{c3})	48,5	51,8	52,8	49,0	52,3	48,9	50,8	48,1	-
Idade = 7 dias (f _{c7})	53,6	54,0	54,5	56,2	61,3	-	56,1	56,4	-
Idade = 28 dias (f _{c28})	73,5	73,7	75,2	79,7	79,7	80,5	78,4	78,5	81,4
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f_{tdi}) (MPa)									
Idade = 7 dias (f _{c7})	3,92	3,72	-	-	-	-	3,70	4,70	-
Idade = 28 dias (f _{c28})	4,64	5,40	-	-	-	-	5,53	5,94	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E_s) (GPa)	-	-	-	35,2	36,8	-	34,4	36,9	34,8
COEFICIENTE DE POISSON (ν)	-	-	-	0,175	0,168	-	0,141	0,165	0,166
3.3 – EFICIÊNCIA ESTRUTURAL									
Fator de eficiência estrutural (F _{ef,28d}) (MPa.dm³.kg ⁻¹)	30,1	31,1		34,4	33,2	-	33,6	33,8	34,8

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.4 Características físicas e mecânicas dos CAA_{AE} produzidos com 20% de argila expandida: FASE 1 e FASE 2

CONCRETO CAA _{AE} -20 - V _{ap} variável	Vap = 0,570 m³/m³									Vap = 0,500 m³/m³				Vap = 0,650 m³/m³					
	CAA _{AE} 20-1			CAA _{AE} 20-2			CAA _{AE} 20-3			CAA _{AE} 20-1				CAA _{AE} 20-1					
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)																			
Cimento Portland – CP V-ARI				451,50			451,00			452,30			492,40				406,30		
Sílica ativa				45,15			45,10			45,23			49,24				40,63		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)				399,56			399,14			400,29			418,54				359,56		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)				399,56			399,14			400,29			418,54				359,56		
Pedra britada, basalto – Brita 1				735,49			734,68			736,80			661,79				813,41		
Argila expandida AE-1506				67,27			67,20			67,39			60,57				74,35		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)				195,95			195,73			196,30			209,27				180,80		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)				4,97			4,96			4,98			5,42				4,47		
Relação água/cimento (a/c)				0,377			0,377			0,377			0,377				0,377		
Relação água/finos (a/p)				0,343			0,343			0,343			0,343				0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ _{cf}) (kg/m³)				2.256,3			2.253,6			2.260,3			2.306,6				2.196,7		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)				3,12			3,23			2,94			0,59				6,06		
3 – PROPPRIEDADES MECÂNICAS																			
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f _c) (MPa)																			
Idade = 3 dias (f _{c3})				43,3	44,3	44,7	42,7	44,2	47,0	37,5	38,9	-	48,1	49,0	50,4	37,8	38,4	38,4	
Idade = 7 dias (f _{c7})				51,9	52,6	53,6	46,1	48,6	49,3	43,3	48,2	-	49,3	51,2	53,2	45,1	45,8	46,1	
Idade = 28 dias (f _{c28})				60,2	60,9	62,6	57,8	58,6	60,7	56,5	61,2	-	63,0	64,9	65,7	57,9	59,0	59,9	

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.5 Características físicas e mecânicas dos CAA_{AE} produzidos com 20% de argila expandida: FASE 3

CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS AJUSTADOS	TRAÇO UNITÁRIO (kg/kg)	CAA _{AE} 20-1			CAA _{AE} 20-2			CAA _{AE} 20-3		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)										
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	454,70			454,20			454,50		
Sílica ativa	0,100	45,47			45,42			45,45		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,885	402,41			401,97			402,24		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,885	402,41			401,97			402,24		
Pedra britada, basalto – Brita 1	1,629	740,73			739,92			740,40		
Argila expandida AE-1506	0,149	67,68			67,60			67,65		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	-	197,25			197,03			197,16		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,00			5,00			5,00		
Relação água/cimento (a/c)		0,377			0,377			0,377		
Relação água/finos (a/p)		0,343			0,343			0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m³)		2.272,20			2.269,50			2.270,90		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)		2,43			2,55			2,49		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS										
Absorção de água (Ab) (%)		4,38	4,60	-	3,78	4,59	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)		9,66	10,40	-	9,99	8,34	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)		2.204,8	2.260,8	-	2.176,2	2.207,1	-	-	-	-
Massa específica saturada (kg/m³)		2.301,4	2.364,8	-	2.276,1	2.290,4	-	-	-	-
Massa específica real (kg/m³)		2.440,5	2.523,1	-	2.417,6	2.407,8	-	-	-	-
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS										
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f _{ci}) (MPa)										
Idade = 3 dias (f _{c3})		45,0	45,7	-	46,7	47,0	49,6	44,7	44,8	-
Idade = 7 dias (f _{c7})		46,9	50,0	50,7-	51,9	54,1	51,2	47,1	47,9	-
Idade = 28 dias (f _{c28})		58,5	58,9	63,9	59,9	63,9	63,3	58,5	65,4	-
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f _{td}) (MPa)										
Idade = 7 dias (f _{c7})		3,32	3,45	3,87	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias (f _{c28})		4,50	4,87	5,00-	4,92	4,95	5,12	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E _s) (GPa)		34,2	35,6	-	34,2	36,9	32,8	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)		0,149	0,165	-	0,213	0,195	0,149	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F _{EE,28d}) (MPa.dm³.kg ⁻¹)		26,5	26,1	-	27,5	29,0	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.6 Características físicas e mecânicas dos CAA_{AE} produzidos com 40% de argila expandida: FASE 1 e FASE 2

CONCRETO CAA _{AE} -40 - V _{ap} variável	V _{ap} = 0,570 m³/m³						V _{ap} = 0,500 m³/m³			V _{ap} = 0,650 m³/m³		
	CAA _{AE} 40-1			CAA _{AE} 40-2			CAA _{AE} 40-1			CAA _{AE} 40-1		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)												
Cimento Portland – CP V-ARI	449,00			453,50			485,40			416,70		
Sílica ativa	49,00			45,35			48,54			41,67		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	407,24			411,32			429,58			377,95		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	407,24			411,32			429,58			377,95		
Pedra britada, basalto – Brita 1	562,15			567,68			489,28			521,71		
Argila expandida AE-1506	136,95			138,32			119,41			127,09		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	202,50			204,53			205,32			187,93		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	4,94			4,99			5,34			4,58		
Relação água/cimento (a/c)	0,395			0,395			0,377			0,377		
Relação água/finos (a/p)	0,359			0,359			0,343			0,343		
Massa específica do concreto fresco (γ _{cf}) (kg/m³)	2.128,5			2.149,7			2.170,9			2.121,9		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)	3,66			2,70			2,02			3,65		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS												
Absorção de água (Ab) (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 – PROPPRIEDADES MECÂNICAS												
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f _{ci}) (MPa)												
Idade = 3 dias (f _{c3})	40,6	41,4	43,4-	40,1	40,1	42,2	42,0	46,7	46,9	35,3	35,3	39,2
Idade = 7 dias (f _{c7})	40,5	44,4	48,5	44,6	45,1	46,7	46,5	49,1	49,5	42,8	43,7	43,9
Idade = 28 dias (f _{c28})	47,7	53,1	54,5	54,8	59,5	61,8	49,2	58,2	58,4	44,9	48,7	49,9
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f _{trc}) (MPa)												
Idade = 7 dias (f _{c7})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias (f _{c28})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E _s) (GPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F _{EE,28d}) (MPa.dm³.kg ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.7 Características físicas e mecânicas dos CAA_{AE} produzidos com 40% de argila expandida: FASE 3

CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS AJUSTADOS	TRAÇO UNITÁRIO (kg/kg)	CAA _{AE} 40-1				CAA _{AE} 40-2			CAA _{AE} 40-3			CAA _{AE} 40-4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)														
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	442,40				440,50			441,00			442,40		
Sílica ativa	0,100	44,24				44,05			44,10			44,24		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,907	401,07				399,35			399,80			401,07		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,907	401,07				399,35			399,80			401,07		
Pedra britada, basalto – Brita 1	1,252	553,69				551,31			551,94			553,69		
Argila expandida AE-1506	0,305	134,90				134,32			134,47			134,90		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	-	199,38				198,53			198,75			199,38		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	4,87				4,84			4,85			4,87		
Relação água/cimento (a/c)		0,395				0,395			0,395			0,395		
Relação água/finos (a/p)		0,359				0,359			0,359			0,359		
Massa específica do concreto fresco (γ _{cf}) (kg/m³)		2.140,40				2.131,10			2.133,80			2.140,40		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)		2,77				3,19			3,07			2,77		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS														
Absorção de água (Ab) (%)		2,41	2,75	3,06	2,47	3,51	2,76	-	2,92	3,96	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)		5,24	5,84	6,54	5,58	7,53	5,79	-	6,21	8,32	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)		2.173,2	2.120,9	2.136,9	2.261,7	2.127,3	2.101,1	-	2.147,3	2.101,6	-	-	-	-
Massa específica saturada (kg/m³)		2.225,6	2.179,3	2.201,3	2.317,4	2.189,4	2.184,3	-	2.222,6	2.159,6	-	-	-	-
Massa específica real (kg/m³)		2.293,4	2.252,4	2.286,4	2.395,3	2.268,3	2.291,7	-	2.322,2	2.300,9	-	-	-	-
3 – PROPPRIEDADES MECÂNICAS														
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f _{cj}) (MPa)														
Idade = 3 dias (f _{c3})		38,0	39,0	39,0	-	36,1	36,2	37,2	41,8	41,2	-	39,3	40,8	-
Idade = 7 dias (f _{c7})		40,6	41,4	41,5	-	42,0	43,8	43,8	39,7	50,7	-	44,9	46,7	-
Idade = 28 dias (f _{c28})		48,0	47,5	-	-	49,9	50,6	55,6	47,0	50,0	51,2	48,6	49,3	-
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f _{trj}) (MPa)														
Idade = 7 dias (f _{c7})		-	-	-	-	2,35	3,19	3,48	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias (f _{c28})		-	-	-	-	-	-	-	4,10	4,50	5,21	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E _s) (GPa)		-	-	-	-	27,7	29,4	-	38,2	37,5	-	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)		-	-	-	-	0,167	0,190	-	0,149	0,233	-	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F _{EE,28d}) (MPa.dm³.kg ⁻¹)		-	-	-	-	23,5	24,1	-	22,1	23,8	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.8 Características físicas e mecânicas dos CAAAE produzidos com 60%, 80% e 100 % de argila expandida: FASE 1 e FASE 2

CONCRETO CAA _{AE} -60 / CAA _{AE} -80 e CAA _{AE} -100 - V _{ap} variável	V _{ap} = 0,570 m³/m³									V _{ap} = 0,500 m³/m³-								
	CAA _{AE} 60-1			CAA _{AE} 80-1			CAA _{AE} 100-1			CAA _{AE} 60-1			CAA _{AE} 60-2					
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)																		
Cimento Portland – CP V-ARI	453,80			454,40			451,70			483,8			479,2					
Sílica ativa	45,38			45,44			45,17			48,38			47,92					
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	415,23			383,51			381,23			428,16			424,09					
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	415,23			383,51			381,23			428,16			424,09					
Pedra britada, basalto – Brita 1	324,47			154,50			0,00			394,30			390,55					
Argila expandida AE-1506	177,89			225,84			280,51			216,26			214,20					
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	207,76			201,75			199,65			207,07			205,10					
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	4,99			5,00			4,97			5,32			5,27					
Relação água/cimento (a/c)	0,377			0,377			0,377			0,377			0,377					
Relação água/finos (a/p)	0,343			0,339			0,339			0,343			0,343					
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m³)	2.034,9			1.921,00			1.794,00			2.061,60			2.041,70					
Teor de ar incorporado (Tar) (%)	2,63			2,93			3,09			2,34			3,28					
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS																		
Absorção de água (Ab) (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS																		
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_c) (MPa)																		
Idade = 3 dias (f _{c3})	35,7	40,4	-	33,5	34,7	-	37,1	37,5	-	40,8	41,4	41,8	38,6	39,2	43,6			
Idade = 7 dias (f _{c7})	37,0	41,5	-	35,9	39,6	-	40,8	42,4	-	42,1	46,0	49,3	42,7	46,2	46,8			
Idade = 28 dias (f _{c28})	44,9	49,8	-	46,4	46,6	-	44,3	49,8	-	47,1	48,0	50,3	47,9	49,4	50,8			
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f_{td}) (MPa)																		
Idade = 7 dias (f _{c7})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Idade = 28 dias (f _{c28})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E_s) (GPa)																		
COEFICIENTE DE POISSON (ν)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F_{EE,28d}) (MPa.dm³.kg⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.9 Características físicas e mecânicas dos CAA_{AE} produzidos com 60% de argila expandida: FASE 3

CONCRETOS AJUSTADOS	AUTOADENSÁVEIS	TRAÇO UNITÁRIO (kg/kg)	CAA _{AE} 60-1			CAA _{AE} 60-2			CAA _{AE} 60-3			CAA _{AE} 60-4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)														
Cimento Portland – CP V-ARI		1,000	457,30			458,20			458,20			457,60		
Sílica ativa		0,100	45,73			45,82			45,82			45,76		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)		0,995	418,53			419,35			419,35			418,80		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)		0,995	418,53			419,35			419,35			418,80		
Pedra britada, basalto – Brita 1		0,715	326,99			327,63			327,63			327,20		
Argila expandida AE-1506		0,392	179,25			179,60			179,60			179,37		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)		0,449	205,34			205,74			205,74			205,47		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)		0,011	5,03			5,04			5,04			5,04		
Relação água/cimento (a/c)			0,402			0,402			0,402			0,402		
Relação água/finos (a/p)			0,366			0,366			0,366			0,366		
Massa específica do concreto fresco (γ _{cf}) (kg/m³)			2.017,9			2.021,9			2.023,2			2.019,2		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)			3,74			3,55			3,48			3,67		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS														
Absorção de água (Ab) (%)			4,08	4,67	5,20	3,77	3,69	-	3,56	3,60	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)			8,06	9,37	10,28	7,58	7,43	-	6,72	7,31	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)			1.974,6	2.006,5	1.976,9	2.011,8	2.014,5	-	1.888,6	2.030,9	-	-	-	-
Massa específica saturada (kg/m³)			2.055,3	2.100,2	2.079,7	2.173,2	2.217,1	-	1.955,9	2.104,0	-	-	-	-
Massa específica real (kg/m³)			2.147,9	2.213,9	2.203,4	2.249,8	2.303,4	-	2.024,8	2.191,1	-	-	-	-
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS														
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f _{cd}) (MPa)														
Idade = 3 dias (f _{cd3})			37,9	39,0	-	36,4	38,5	-	34,2	36,8	-	38,6	44,0	-
Idade = 7 dias (f _{cd7})			46,8	47,2	-	47,8	49,0	-	45,3	43,2	-	42,5	42,7	-
Idade = 28 dias (f _{cd28})			53,7	54,0	57,1	50,0	52,0	56,0	55,7	55,8	56,5	50,9	52,6	56,9
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f _{tdg}) (MPa)														
Idade = 7 dias (f _{cd7})			-	-	-	2,75	3,38	3,70	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias (f _{cd28})			-	-	-	-	-	-	4,02	4,31	4,91	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E _s) (GPa)			-	-	-	28,1	30,4	-	24,8	22,3	-	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)			-	-	-	0,190	0,192	-	0,186	0,158	-	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F _{EE,28d}) (MPa.dm³.kg ⁻¹)			-	-	-	24,9	25,8	-	24,2	27,5	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.10 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável CAA_{AE}-80: FASE 3

CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS AJUSTADOS	TRAÇO UNITÁRIO (kg/kg)	CAA _{AE} 80-1			CAA _{AE} 80-2			CAA _{AE} 80-3			CAA _{AE} 80-4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)													
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	471,20			472,20			469,90			469,60		
Sílica ativa	0,100	47,12			47,22			46,99			46,96		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,844	397,89			298,73			396,79			396,53		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,844	397,89			398,73			396,79			396,53		
Pedra britada, basalto – Brita 1	0,340	160,06			160,40			159,62			159,52		
Argila expandida AE-1506	0,497	233,98			234,48			233,34			233,19		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	0,449	209,30			209,74			208,72			208,59		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,18			5,19			5,17			5,16		
Relação água/cimento (a/c)		0,402			0,402			0,402			0,402		
Relação água/finos (a/p)		0,366			0,366			0,366			0,366		
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m³)		1.886,8			1.899,7			1.880,5			1.880,1		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)		4,80			4,60			5,07			5,13		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS													
Absorção de água (Ab) (%)		3,93	7,33	4,88	4,15	4,09	-	4,76	4,53	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)		6,92	13,10	9,06	8,26	8,15	-	9,34	9,29	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m³)1.		1.761,1	1.786,7	1.885,9	1.907,0	1.901,6	-	1.992,7	1.993,4	-	-	-	-
Massa específica saturada (kg/m³)		1.830,2	1.917,7	1.946,6	2.075,2	2.054,3	-	2.075,4	2.074,9	-	-	-	-
Massa específica real (kg/m³)		1.891,9	2.056,0	2.041,0	2.157,9	2.162,9	-	2.172,2	2.170,3	-	-	-	-
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS													
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (fc) (MPa)													
Idade = 3 dias (fc ₃)		34,7	37,5	38,1	36,4	37,0	-	21,0	22,6	24,7	36,9	37,9	-
Idade = 7 dias (fc ₇)		43,8	44,5	46,1	39,8	41,3	-	31,5	38,6	43,4	41,1	42,5	-
Idade = 28 dias (fc ₂₈)		43,9	44,2	49,4	43,3	46,4	55,2	41,8	45,5	45,7	42,8	54,0	-
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f_{TG}) (MPa)													
Idade = 7 dias (fc ₇)		-	-	-	3,55	3,56	2,93	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias (fc ₂₈)		-	-	-	-	-	-	3,21	3,56	4,00	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E_s) (GPa)		-	-	-	23,1	26,1	-	23,3	26,1	27,5	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)		-	-	-	0,193	0,205	-	0,257	0,175	0,140	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL (F_{EE,28d}) (MPa.dm³.kg⁻¹)		-	-	-	22,7	24,4		21,0	22,8	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)

TABELA AN 3.11 Características físicas e mecânicas do concreto autoadensável CAA_{AE}-100: FASE 3

CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS AJUSTADOS	TRAÇO UNITÁRIO (kg/kg)	CAA _{AE} 100-1			CAA _{AE} 100-2			CAA _{AE} 100-3			CAA _{AE} 100-4		
1 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m ³)													
Cimento Portland – CP V-ARI	1,000	468,30			473,50			472,70			472,80		
Sílica ativa	0,100	46,83			47,35			47,70			47,28		
Areia 1 (natural, quartzosa) (AF ₁)	0,844	395,44			399,83			399,15			399,24		
Areia 2 (natural, quartzosa) (AF ₂)	0,844	395,44			399,83			399,15			399,24		
Pedra britada, basalto – Brita 1	-	-			-			-			-		
Argila expandida AE-1506	0,621	290,68			293,91			293,41			293,47		
Água total (hidratação + absorção - aditivo)	0,442	206,94			209,24			208,86			208,93		
Aditivo superplastificante (Gleniun 51)	0,011	5,15			5,21			5,20			5,20		
Relação água/cimento (a/c)		0,402			0,402			0,402			0,402		
Relação água/finos (a/p)		0,366			0,366			0,366			0,366		
Massa específica do concreto fresco (γ_{cf}) (kg/m ³)		1.774,8			1.794,7			1.791,4			1.792,1		
Teor de ar incorporado (Tar) (%)		5,40			4,34			4,51			4,58		
2 – PROPRIEDADES FÍSICAS													
Absorção de água (Ab) (%)		3,93	7,33	4,88	4,50	4,48	-	5,77	6,46	-	-	-	-
Índice de vazios (Iv) (%)		6,92	13,10	9,06	9,18	8,00	-	9,93	11,42	-	-	-	-
Massa específica seca (kg/m ³)		1.730,0	1.707,3	1.630,0	1.669,5	1.786,4	-	1.721,0	1.768,9	-	-	-	-
Massa específica saturada (kg/m ³)		1.875,4	1.810,4	1.788,0	1.761,3	1.866,4	-	1.820,4	1.883,1	-	-	-	-
Massa específica real (kg/m ³)		1998,6	1.993,5	1.856,5	1.838,2	1.941,6	-	1.910,8	1.996,9	-	-	-	-
3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS													
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (f_{c_j}) (MPa)													
Idade = 3 dias (f_{c_3})		35,4	36,6	39,4	38,0	38,7	39,3	35,8	36,5	-	36,9	40,2	-
Idade = 7 dias (f_{c_7})		40,5	41,9	45,2	38,2	40,2	-	40,0	38,5	-	41,4	43,5	-
Idade = 28 dias ($f_{c_{28}}$)		44,9	45,4	45,5	43,7	44,0	44,8	40,8	41,4	45,6	47,4	49,3	-
RESIST. À TRAÇÃO POR COMPR. DIAMETRAL (f_{Tdj}) (MPa)													
Idade = 7 dias (f_{c_7})		2,63	3,00	3,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Idade = 28 dias ($f_{c_{28}}$)		-	-	-	-	-	-	3,34	3,40	4,06	-	-	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE (secante) (E_s) (GPa)		-			24,2	25,3	-	22,6	24,8	23,5	-	-	-
COEFICIENTE DE POISSON (ν)		-			0,144	0,150	-	0,188	0,171	0,179	-	-	-
FATOR DE EFICIÊNCIA ESTRUTURAL ($F_{EE,28d}$) (MPa.dm ³ .kg ⁻¹)		-			26,2	24,6	-	23,7	23,4	-	-	-	-

Fonte: O autor (2015)