



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

EDMILSON GOMES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO USO DAS CINZAS LEVES DE ALGARROBA (CLA) COMO FÍLER
ALTERNATIVO EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)**

Caruaru

2018

EDMILSON GOMES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO USO DAS CINZAS LEVES DE ALGAROA (CLA) COMO FÍLER
ALTERNATIVO EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico
do Agreste – CAA, da Universidade Federal
de Pernambuco como requisito à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Caruaru

2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

G633a Gomes Júnior, Edmilson.

Avaliação do uso das cinzas leves de algaroba (CLA) como fíler alternativo em concreto auto-adensável (CAA). / Edmilson Gomes Júnior. - 2018.
112f. ; il.: 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Concreto. 2. Materiais de construção. 3. Algaroba. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-100)

EDMILSON GOMES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO USO DAS CINZAS LEVES DE ALGARROBA (CLA) COMO FÍLER
ALTERNATIVO EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico
do Agreste – CAA, da Universidade Federal
de Pernambuco como requisito à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

A banca composta pelos professores abaixo, considera o discente Edmilson Gomes
Júnior aprovado com nota _____.

Caruaru, 19 de julho de 2018.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Ana Cecília Vieira da Nóbrega _____

Universidade Federal de Pernambuco (CAA/UFPE) – Orientador

Érika Pinto Marinho _____

Universidade Federal de Pernambuco (CAA/UFPE) – Avaliadora

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello _____

Universidade Federal de Pernambuco (CAA/UFPE) – Avaliadora

Elder Alpes de Vasconcelos _____

Universidade Federal de Pernambuco (CAA/UFPE) – Coordenador do Componente Curricular Trabalho
de Conclusão II.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, ao Senhor Deus, pela sua graça e bondade sempre conosco, e por me conceder mais essa realização.

À minha mãe, senhora Josefa Rodrigues, por todo apoio e incentivo, e por me ensinar a ter perseverança.

À minha namorada Ilma Campos, pela paciência e compreensão nos muitos momentos em que tive que me privar da sua companhia para me dedicar aos estudos.

À amiga e pedagoga Neide Menezes pela ajuda, e pelos sábios conselhos dados em momentos difíceis ao longo do curso.

À professora Ana Cecília, por compartilhar do seu conhecimento e do seu entusiasmo pela pesquisa científica, além das suas valiosas orientações, ao longo desse trabalho.

Aos alunos de mestrado Jonatercio Florencio e Rodrigo Lima, pelas conversas esclarecedoras a respeito dos assuntos abordados no trabalho e pelo apoio dado nos ensaios.

Aos colegas de classe da disciplina especial da área de Estruturas e Materiais do curso de Mestrado Acadêmico Humberto Mycael, Marlon Cabral, Cassiane Mendonça, Laysa Arão e Natali Gomes, por dividirem comigo esses momentos de aprendizado ao longo do semestre.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC e do Laboratório de Química, do Núcleo de Tecnologia – NT no Centro Acadêmico do Agreste – CAA, Fabiola Freire, Everton Rodrigues e Henrique, pela importante contribuição na realização dos ensaios e experimentos.

Aos professores que compõem corpo docente do Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste – NT/CAA/UFPE, pela dedicação e empenho em formar profissionais capacitados. A todos a minha admiração por essa profissão que forma todas as outras.

**“Com sabedoria se constrói a casa,
e com discernimento se consolida.
Pelo conhecimento os seus cômodos
se enchem do que é precioso e agradável.”**

Provérbios 24:3-4

RESUMO

O concreto auto-adensável vem sendo cada vez mais utilizado pela indústria da construção em virtude das vantagens que oferece em relação ao concreto convencional, devido às suas características reológicas. Porém, por ser muito fluido, sua obtenção demanda maiores cuidados quanto aos fenômenos de segregação dos agregados e exsudação da água de amassamento. Os quais podem ser controlados com a adição de materiais finos à mistura. Esses finos podem ser industrializados, mas também podem ser obtidos a partir de subprodutos, oriundos dos mais diversos processos industriais. Concomitante ao crescimento do consumo desse concreto de classe especial, houve também uma maior preocupação quanto às questões ambientais por parte de diversas linhas de pesquisa ligadas ao setor da construção. Que, dentre outros meios, promove a preservação do ambiente a partir de estudos que viabilizam a utilização de resíduos reciclados em materiais de construção. Tais como as cinzas leves de algaroba (CLA) - oriundas da queima da lenha de algaroba que é utilizada como matriz energética nas lavanderias do arranjo produtivo local (APL) de confecções da região agreste de Pernambuco – objeto desse trabalho. O qual avaliou a influência da incorporação em concretos auto-adensáveis da CLA, impulsionado pela sua constituição química composta predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO_3), o que lhe confere o efeito fíler. São benefícios do presente trabalho de conclusão de curso a viabilidade técnica do uso da CLA para a adição em CAA, sua destinação ecologicamente correta, e promoção do uso desse concreto de classe especial ainda pouco utilizado pela indústria da construção civil da região. As cinzas foram coletadas em uma lavanderia de médio porte representativa da região, peneiradas em malha 200, e avaliadas quanto as suas características físico-químicas. Todos os ensaios obedeceram ao que preconiza a ABNT. As propriedades analisadas no estado fresco foram: reologia do CAA (fluidez, viscosidade, capacidade passante e autoadensabilidade) e densidade de massa; e no estado endurecido foram: resistência à compressão, porosidade e permeabilidade. As formulações com adição do fíler alternativo foram comparadas com o CAA padrão, formulado com adições de superplastificante e fíler calcário comercial, conforme produzidos na indústria do concreto. Os resultados indicam que é possível a utilização da cinza como fíler no concreto auto-adensável, sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação às suas propriedades reológicas e mecânicas.

Palavras – chave: Cinza de algaroba. Concreto auto-adensável. Materiais cimentícios. Efeito fíler.

ABSTRACT

Self-compacting concrete has been increasingly used by the construction industry because of its advantages over conventional concrete due to its rheological characteristics. However, because it is very fluid, its production requires greater care regarding the phenomena of segregation of aggregates and exudation of kneading water. Which can be controlled by adding fine and inert materials to the blend. These fines can be industrialized but can also be obtained from by-products from the most diverse industrial processes. Concomitant to the growth in consumption of this special grade concrete, there was also a greater concern about environmental issues from several lines of research related to the construction sector. That, among other means, promotes the preservation of the environment from studies that make feasible the use of recycled waste in construction materials. Such as light algaroba ashes (CLA) - originating from the burning of the algaroba wood that is used as energetic matrix in the laundries of the local productive arrangement (APL) of confections of the agreste region of Pernambuco - object of this work. This study evaluated the influence of the incorporation on CLA self-compacting concrete, driven by its chemical composition, predominantly composed of calcium carbonate (CaCO_3), which gives it the filler effect. The technical feasibility of the use of CLA for the addition to CAA, its ecologically correct destination, and the promotion of the use of this special grade concrete still little used by the civil construction industry of the region are benefits of the present work of course completion. The ashes were collected in a medium-sized laundry representative of the region, sieved in mesh 200, and evaluated for their physicochemical characteristics. All the tests obeyed the one recommended by ABNT. The properties analyzed in the fresh state were: CAA rheology (fluidity, viscosity, throughput and self-absorption) and mass density; and in the hardened state were: compressive strength, porosity and permeability. Alternate filler addition formulations were compared to the standard CAA, formulated with additions of superplasticizer and commercial limestone, as produced in the concrete industry. The results indicate that it is possible to use the ash as a filler in the self-compacting concrete without damage to the cement systems, providing minimal changes in relation to its rheological and mechanical properties.

Keywords: Algaroba ash. Self-compacting concrete. Cementitious materials. Filler effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do método de dosagem para o CAA.....	34
Figura 2 – Termogravimetria da CLA.....	39
Figura 3 - Curva granulométrica da areia.....	44
Figura 4 - Cinzas leves de algaroba antes e depois de beneficiadas.....	46
Figura 5 – Compacidade da pasta.....	53
Figura 6 - Água compacta e em excesso.	55
Figura 7 – Compactação úmida.....	55
Figura 8 – Ensaio de água retida dos agregados.....	57
Figura 9 - Medição de água retida pelos agregados.	57
Figura 10 - Determinação do ponto C' correspondente à água retida.....	58
Figura 11- Cilindro metálico e pistão maciço.	60
Figura 12 - Compactação experimental.....	61
Figura 13 - Ensaio de compactação.....	61
Figura 14 - Ensaio de espalhamento (Slump Flow)	64
Figura 15 - Ilustração das classes de IEV.....	66
Figura 16: Dimensões do Anel J.....	67
Figura 17 - Anel J e cone de Abrams.	67
Figura 18: Caixa L.....	69
Figura 19 - Dimensões do Funil V.	71
Figura 20 - Coluna de segregação.	71
Figura 21 - Porção de agregados da base e do topo da coluna de segregação.....	72
Figura 22 - Distribuição granulométrica do CP-V ARI e CLA.....	76
Figura 23 - Difração de Raio-X do fíler calcário.....	78
Figura 24 - Difração de Raio-X da CLA.	79
Figura 25 - Gráfico de reatividade dos agregados.....	80
Figura 26 – Curva experimental da razão de vazios da pasta de referência.....	82
Figura 27 – Curva experimental extrapolada	83
Figura 28 – Curva experimental da razão de vazios da pasta alternativa.....	83
Figura 29 – Pontos da curva experimental para o R_{Vmin} da pasta alternativa.....	84
Figura 30 - Composição da pasta de referência.....	87
Figura 31 - Composição da pasta alternativa.....	87

Figura 32 - Medição da água retida pelos agregados (CAA de referência)	89
Figura 33 - Ponto C' correspondente a água retida (CAA de referência)	89
Figura 34 - Composição final da água de amassamento (CAA de referência).....	90
Figura 35 - Composição final da água de amassamento (CAA alternativo)	90
Figura 36 - Ensaio de Slump flow + T500 (CAA de referência)	91
Figura 37 - Ensaio de Slump flow + T500 (CAA alternativo)	92
Figura 38 - Ensaio de J-Ring (CAA de referência)	93
Figura 39 - Ensaio de J-Ring (CAA alternativo).....	93
Figura 40 - Ensaio de caixa L	94
Figura 41 - Ensaio de coluna de segregação.....	95
Figura 42 - Resistência à compressão dos CAA's.....	97
Figura 43 - Absorção por capilaridade	98
Figura 44 - Absorção total	99
Figura 45 - Determinação da água compacta das pastas	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fluorescência de Raio-X da CLA.	40
Tabela 2 - Características químicas do cimento.	42
Tabela 3 - Características físicas do cimento.	43
Tabela 4 - Curva granulométrica da areia e zonas de utilização	43
Tabela 5- Dados técnicos do aditivo superplastificante utilizado	45
Tabela 6 - Parâmetros da água para produção de concreto.	45
Tabela 7 - Sequência de mistura do CAA	63
Tabela 8 - Limites para o espalhamento <i>Slump flow</i>	64
Tabela 9 - Classe de espalhamento.....	64
Tabela 10 - Limites de tempo para o ensaio T-500	65
Tabela 11 - Classe de viscosidade plástica aparente	65
Tabela 12 - Classe de Índices de estabilidade visual (IEV)	66
Tabela 13 - Dimensões do Anel J.....	67
Tabela 14 - Classes de habilidades passantes sob fluxo livre.....	68
Tabela 15 - Classe de habilidade passante sob fluxo confinado.....	69
Tabela 16 - Limites para a razão de bloqueio no ensaio de caixa L.....	69
Tabela 17 - Limites de tempo para o funil V.....	70
Tabela 18 - Classe de viscosidade aparente sob fluxo confinado	71
Tabela 19 - Classe de resistência à segregação	72
Tabela 20 - Caracterização física dos materiais finos.	76
Tabela 21 - Densidade real dos materiais.....	77
Tabela 22 - Análise química por FRX da CLA e do fíler.....	78
Tabela 23 - Teor de álcalis dos materiais.	80
Tabela 24 - Teor de álcalis dos finos.....	81
Tabela 25 - Compacidade para a pasta de referência.	82
Tabela 26 - Resumo dos cálculos para a água compacta da pasta alternativa.....	84
Tabela 27 - Volume de água em excesso das pastas	85
Tabela 28 - Composição das pastas.....	87
Tabela 29 - Proporção dos agregados para a máxima compacidade	88
Tabela 30 - Composição do CAA.....	91
Tabela 31 - Resultados dos ensaios no estado fresco	96
Tabela 32 - Absorção de água por capilaridade	98

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1).....	49
Equação (2).....	49
Equação (3).....	49
Equação (4).....	50
Equação (5).....	53
Equação (6).....	53
Equação (7).....	54
Equação (8).....	54
Equação (9).....	54
Equação (10).....	54
Equação (11).....	54
Equação (12).....	55
Equação (13).....	56
Equação (14).....	56
Equação (15).....	56
Equação (16).....	59
Equação (17).....	59
Equação (18).....	61
Equação (19).....	62
Equação (20).....	68
Equação (21).....	72
Equação (22).....	74
Equação (23).....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	JUSTIFICATIVA	19
4	MOTIVAÇÃO	21
5	ESTADO DA ARTE	23
6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
6.1	Concreto Auto-Adensável (CAA)	26
6.1.1	<i>Características</i>	27
6.1.2	<i>Materiais</i>	28
6.1.2.1	<i>Cimento</i>	29
6.1.2.2	<i>Agregados</i>	29
6.1.2.3	<i>Água</i>	30
6.1.2.4	<i>Aditivos</i>	30
6.1.2.5	<i>Adições</i>	32
6.1.3	<i>Dosagem</i>	33
6.2	Cinzas geradas no APL de confecções pernambucano.	36
6.3	Adições minerais	37
6.3.1	<i>Adições inertes ou quase inertes (fíler)</i>	38
6.4	Caracterização da CLA	39
6.4.1	<i>Utilização do fíler em materiais cimentícios</i>	40
7	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
7.1	Seleção dos materiais	42
7.1.1	<i>Cimento</i>	42
7.1.2	<i>Fíler calcário</i>	43
7.1.3	<i>Agregados</i>	43
7.1.4	<i>Aditivo</i>	44
7.1.5	<i>Água</i>	45
7.1.6	<i>Cinzas</i>	46
7.2	Caracterização dos materiais	47

7.2.1	<i>Caracterização físico-química das cinzas</i>	47
7.2.1.1	<i>Fluorescência de Raios-X</i>	47
7.2.1.2	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i>	47
7.2.1.3	<i>Área superficial (Método BET)</i>	48
7.2.1.4	<i>Massa específica</i>	48
7.2.1.5	<i>Determinação da área específica (Método Blaine)</i>	49
7.3	<i>Determinação do traço do concreto auto-adensável – (CAA)</i>	50
7.3.1	<i>Determinação da água de amassamento.</i>	51
7.3.1.1	<i>Água da pasta</i>	51
7.3.1.1.1	<i>Água compacta</i>	51
7.3.1.1.2	<i>Água em excesso</i>	54
7.3.1.2	<i>Água de esqueleto granular</i>	56
7.3.2	<i>Determinação da proporção dos materiais constituintes do CAA</i>	58
7.3.2.1	<i>Proporção dos materiais constituintes da pasta</i>	58
7.3.2.2	<i>Proporção dos agregados.</i>	59
7.3.2.3	<i>Proporção do fíler alternativo (CLA) na mistura</i>	62
7.3.2.4	<i>Sequência de mistura do concreto</i>	62
7.4	<i>Ensaio</i>	63
7.4.1	<i>Ensaio no estado fresco</i>	63
7.4.1.1	<i>Ensaio de espalhamento (Slump flow)</i>	63
7.4.1.2	<i>Índice de estabilidade visual (IEV) sob fluxo livre.</i>	65
7.4.1.3	<i>Anel J</i>	66
7.4.1.4	<i>Caixa L</i>	68
7.4.1.5	<i>Ensaio do Funil V (V funil test)</i>	70
7.4.1.6	<i>Coluna de segregação</i>	71
7.4.2	<i>Ensaio no estado endurecido</i>	73
7.4.2.1	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	73
7.4.2.2	<i>Ensaio de compressão (3, 7, 14 e 21 dias)</i>	73
7.4.2.3	<i>Ensaio de absorção total (21 dias)</i>	74
7.4.2.4	<i>Ensaio de absorção de água por capilaridade (21 dias)</i>	74
8	<i>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.</i>	76
8.1	<i>Caracterização física do cimento e da cinza</i>	76
8.2	<i>Análise microestrutural da cinza (CLA)</i>	77
8.3	<i>Análise de reatividade dos agregados</i>	79

8.4	Constituição da pasta do CAA	81
8.4.1	<i>Água compacta</i>	81
8.4.2	<i>Água em excesso</i>	85
8.4.3	<i>Composição final das pastas.</i>	86
8.5	Constituição do esqueleto granular	88
8.6	Constituição do traço de CAA	90
8.7	Ensaio no estado fresco	91
8.8	Ensaio no estado endurecido	96
8.8.1	<i>Ensaio de resistência à compressão</i>	96
8.8.2	<i>Ensaio de absorção por capilaridade</i>	97
8.8.3	<i>Ensaio de absorção total</i>	98
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
10	CONCLUSÕES	103
11	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A: TEOR DE ÁLCALIS PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE FINOS	110
	APÊNDICE B: DETERMINAÇÃO DA ÁGUA COMPACTA DAS PASTAS	111

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios e obras civis são tidos como os produtos físicos com maior vida útil que a sociedade produz. Eles modificam a paisagem de áreas urbanas e rurais, alteram a natureza e a sua função. Essas atividades de construção civil são reconhecidas como uma das atividades propulsoras do desenvolvimento social e econômico, uma vez que gera desenvolvimento local e emprego para a população, pois mantém relações estreitas com as atividades precedentes, que produzem os insumos necessários para a materialização de um projeto concebido.

Essas relações estreitas se dão devido à forte dependência entre a atividade fim e as várias cadeias produtivas, no sentido de assegurar um bom desempenho da produção quanto à qualidade e produtividade (SILVA, 1994).

Nessa cadeia produtiva, bem como as de outros setores industriais, inúmeros resíduos de diferentes processos industriais são gerados e incorporam elevado conteúdo de energia, e que se caracterizam por sua composição química, apresentando reatividade, ou não, em meio aquoso, e que, devido a essas características, podem ser utilizados como fileres alternativos. Esses materiais são gerados nos diferentes setores da indústria, através do processo de combustão em seus queimadores. As cinzas provenientes dessa queima não são reutilizadas em seu processo produtivo, sendo descartada na natureza sem nenhum tipo de tratamento para minimizar os efeitos do seu descarte.

Um exemplo de uma dessas cadeias produtivas se encontra em parte do Agreste Meridional e setentrional, o Arranjo Produtivo Local (APL) de confecções pernambucano produz – por consequência da matriz energética utilizada (a lenha de algaroba, denominada cientificamente de *Prosopis juliflora*) para geração de energia térmica em suas caldeiras para aquecimento da água utilizada para a lavagem das peças jeans nas suas lavanderias - ao final do processo um tipo de resíduo, as cinzas da lenha de algaroba, em volumes elevados e sem possibilidade de reutilização na indústria geradora, mas com grande potencial para ser utilizadas como *filer* alternativo em materiais de base cimentícia.

Cinzas em geral vem sendo alvo de estudo com uma abordagem voltada ao desempenho estrutural do novo produto (CAVALCANTE ROCHA; CHERIAF, 1996). Legitimando essa afirmação, muitas pesquisas indicam benefícios na reologia, nas propriedades mecânicas e na durabilidade proporcionados pelo emprego de aditivos minerais em concreto (MALHOTRA e MEHTA, 1996; NEVILLE, 1997; MASSAZZA, 1998; SABIR *et al.*, 2001), possibilitando a produção de concretos com maior resistência e durabilidade, além de propiciar a redução de

custos e de mitigar os impactos ambientais decorrentes da disposição dos resíduos (CORDEIRO, 2006).

Nesse contexto, seria possível dar uma destinação final adequada a esse tipo de resíduo industrial, reutilizando-o de forma a gerar benefícios não apenas para o meio ambiente, como também para a sociedade? Essa pergunta é respondida ao longo do desenvolvimento deste trabalho, que avaliou a possibilidade de utilização das cinzas leves de algaroba (CLA) produzidas no Arranjo Produtivo Local (APL) de confecções pernambucano pela queima da lenha de algaroba no concreto auto-adensável (CAA).

As cinzas leves de algaroba (CLA) são ricas em carbonato de cálcio (CaCO_3), com morfologia esférica e superfície discretamente enrugada e partículas com dimensões inferiores a 75 μm (NASCIMENTO, 2014; MEHTA, 1994). Essas características físico-químicas e microestruturais conferem à CLA a possibilidade de atuar como fíler.

Os fíleres comercialmente empregados são carbonáticos, essencialmente carbonato de cálcio, provenientes de extração de rochas, de forma que são recursos não-renováveis. Nesse âmbito, a busca por fíleres alternativos que atuem adequadamente nos sistemas cimentícios se faz essencial. Além disso, ao utilizar o proposto fíler alternativo, por ser um subproduto industrial, contribuir-se-á, ainda mais fortemente ao âmbito ambiental.

Em termos de materiais cimentícios, atualmente, os concretos auto-adensáveis são os que mais demandam o uso dos fíleres. Segundo Tutikian (2004), o termo concreto auto-adensável, designa uma nova categoria cimentícia, capaz de escoar e preencher as formas apenas sob a ação de seu peso próprio, sem perder sua homogeneidade e sem deixar vazios no percurso. Representando uma evolução dos concretos especiais, pois elimina a necessidade de adensamento, evitando assim, problemas decorrentes desse processo. Diferentemente do concreto fluído, que é caracterizado apenas pela sua alta fluidez, não se atentando para a estabilidade da mistura, o concreto auto-adensável (CAA), além da sua capacidade de preenchimento, também se caracteriza pela sua capacidade de passar entre os espaços estreitos e pela boa resistência à segregação (SKARENDAHL; PETERSSIN, 2001 *apud* NUNES 2001; GOMES, 2002).

Essa capacidade de preenchimento é conseguida pela sua alta deformabilidade (COPPOLA, 2001) que só é possível devido a fluidez e coesão da mistura (GOMES, 2002). Se essa coesão for insuficiente, poderá ocorrer a segregação da mistura, que consiste na separação entre a pasta de cimento e os agregados durante o seu espalhamento (KHAYAT, 2000). Por isso, a adequada resistência à segregação garante a uniformidade na distribuição dos diversos componentes da mistura durante todo o processo, assegurando a qualidade das estruturas (COPPOLA, 2001).

Por esse motivo, em relação ao concreto convencional, o concreto auto-adensável requer uma maior quantidade de material fino (preferencialmente adições) e um menor volume de agregado graúdo, para que sua resistência mecânica seja aumentada, posto que, sua resistência mecânica diminui com o aumento do volume e/ou tamanho dos agregados graúdos. Essas proporções são necessárias pois ajudam, além disso, a manter a sua estabilidade.

Salienta-se que estudos similares mostram que a utilização de finos como alternativa aos aditivos químicos industriais, utilizados nos materiais cimentícios, contribuem para a resistência à segregação uma vez que conferem ao concreto uma maior homogeneização da mistura, por ter sua microestrutura melhorada com a presença desse fíler, o que possibilita uma redução da relação água/finos, diminuindo, conseqüentemente, os vazios existentes e promovendo, também, um reforço implementado na zona de transição, que é a região compreendida pela interface entre a superfície do agregado e a pasta propriamente dita, aumentando dessa maneira, a aderência entre a pasta e o agregado, ou seja, aumentando a resistência à segregação. Essa região é a mais fraca do concreto, pois, nela, a porosidade é elevada e há grande concentração de diferentes formas cristalinas de hidróxido de cálcio (cal hidratada), formada pela hidratação do cimento, ainda, com a vantagem adicional de proporcionar uma hidratação lenta com baixa liberação de calor e aumento da resistência do concreto aos sulfatos e a outros agentes agressivos ácidos.

O comportamento desse efeito fíler está intimamente ligado a granulometria da cinza, uma vez que a adição de partículas menores, preenchem melhor os poros do material cimentício quando da hidratação do cimento Portland e da formação da sua fase estrutural, elas ficam aprisionadas na matriz e entre os interstícios dos cristais de Portlandita fazendo com que diminua a porosidade e permeabilidade, bem como aumente a compacidade do meio (MEHTA, 1994). Assim, a durabilidade tende a aumentar, porque as cinzas são mais finas e preenchem melhor os poros do material cimentício. O resultado final é um material ainda mais compacto, com menor porosidade e permeabilidade e maior resistência à compressão, em função de uma matriz cimentícia mais densa (NOBREGA, 2010).

Por tanto, fica evidente que o fíler desempenha importante papel na otimização das propriedades relacionadas ao concreto auto-adensável, e outros materiais de base cimentícia

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O estudo tem por objetivo geral analisar a viabilidade técnica do uso de cinzas leves de algaroba (CLA) como fíler alternativo para a adição em concreto auto-adensável.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a metodologia de dosagem de água para o CAA.
- Avaliar a influência da cinza de algaroba no concreto auto-adensável no estado fresco e endurecido.
- Avaliar a viabilidade da utilização da CLA no CAA.

3 JUSTIFICATIVA

A lenha de algaroba é um recurso bastante utilizado como fonte de energia, através da combustão nas caldeiras para aquecimento da água durante o processo de tingimento do *Jeans*, nas mais de 240 lavanderias do APL de confecções Pernambucano, como também em outros APL como o de cerâmica e gesso, no Pólo Gesseiro do Araripe, que compreende os municípios de Araripina, Ipubi, Trindade, Bodocó e Ouricuri, onde é produzido 95% do gesso consumido em todo o Brasil. A lenha de algaroba é obtida da árvore algaroba, cientificamente denominada (*Prosopis Juliflora*), que embora não seja uma árvore nativa, se adaptou muito bem à região, tendo um rápido crescimento sobre diferentes classes de solos e resistindo bem a longos períodos de estiagem. E, é apropriada ao fim a que se destina (matriz energética) pois apresenta um bom rendimento gravimétrico de carbonização na ordem de 43% e geração de cinza de 1,6%, com densidade média de da ordem de 0,85 g.cm³ (Comunicado Técnico, 240 – EMBRAPA). De modo que o volume de cinzas de lenha de algaroba (CLA) produzidas por uma lavandeira de médio porte chega a 6.500 Kg por mês, segundo (MELO, 2012).

Dados da Agência Estadual de Meio Ambiente-Pernambuco (CPRH) de 2005, indicam que a lenha de algaroba é utilizada como fonte de energia, devido à facilidade para aquisição e baixo custo quando comparado com outros combustíveis. Em 2005, na cidade Toritama, foi realizada uma pesquisa pela CPRH em uma amostragem de 59 lavanderias e foi identificado que a lenha representa 69% da energia consumida nas caldeiras para geração de vapor e água produzindo grande quantidade de cinzas como resíduo.

Essas cinzas vêm sendo descartadas de forma inadequada, sem tratamento algum, degradando o meio ambiente e pondo em risco a saúde da população dessa região. Por ser muito fina e leve (BAN; RAMLI, 2011) tem um potencial poluidor do ar (BAN; RAMLI, 2011), água e solo, de forma que surge a necessidade de destinação ecologicamente correta do resíduo.

Este trabalho, portanto, apresenta-se validado na problemática ambiental do descarte inadequado das cinzas de madeira, além de difundir a utilização do concreto auto-adensável na região do agreste, onde ainda é pouco aproveitado.

A realização desse subproduto pode trazer benefícios para a sociedade, mitigando o impacto ambiental provocado pelo seu descarte inadequado - bem como relativo à extração de matéria prima - pois, sua reciclagem também reduz o volume de extração de matéria prima necessária à produção desses. Reduz, também, o volume de resíduos destinados a aterros sanitários e o risco de contaminação do meio ambiente, agravado pela disposição sem qualquer controle, observada em diferentes setores da atividade industrial no Brasil.

E como consequência, preservando os recursos naturais e corroborando para a diminuição na emissão de gases poluentes, como o CO₂ emitidos pela queima de combustível na produção desses superplastificantes e minerais utilizados na composição do concreto auto-adensável na indústria de concreto, reduzindo despesas, e consequentemente, possibilitando preços mais competitivos para esse produto. Por ser um material inerte, as cinzas não apresentam comportamento pozzolânico, podendo ser utilizada como fíler calcário alternativo em substituição aos aditivos superplastificantes em materiais cimentícios em geral, além de não necessitar de moagem no seu processamento, e ser de fácil peneiramento.

O que proporciona um menor gasto de energia na produção do CAA e dos demais produtos da indústria do concreto. E para a sociedade acadêmica com o desenvolvimento de novos trabalhos a partir da metodologia, ensaios e conclusões observadas neste. Pois ensaios específicos e análises detalhadas são realizadas e discutidas para se chegar ao objetivo aqui pretendido. Uma vez que o concreto auto-adensável exige maiores cuidados para a sua produção, em comparação com o concreto comum, principalmente por ser muito sensível à variação das características dos constituintes e procedimentos de produção (DE LARRARD, 1999).

A escolha dos materiais precisa ser criteriosa, de forma que gerem composições com as propriedades desejadas para este tipo de concreto, tendo-se um cuidado especial para que suas características físicas não sejam muito variáveis em relação a sua granulometria.

Uma vez que, além dos aspectos econômicos e ambientais, destaca-se as vantagens técnicas advindas da incorporação desse tipo de material ao concreto, muitas pesquisas indicam benefícios na reologia, nas propriedades mecânicas e na durabilidade proporcionados pelo emprego de aditivos minerais em concreto (MALHOTRA e MEHTA, 1996; NEVILLE, 1997; MASSAZZA, 1998; SABIR *et al.*, 2001).

4 MOTIVAÇÃO

O setor da construção civil é responsável por alavancar os avanços da sociedade. Este nicho de mercado apresenta através do trabalho inúmeros fatores que colaboram para a economia de uma cidade, estado ou país, dada a sua grande capacidade de desenvolvimento da economia local, regional e nacional, com absorção de mão de obra tanto no canteiro de obra quanto nas indústrias ligadas ao setor, que conta com amplo campo no mercado de produtos e serviços, uma vez que a atividade de construção civil mantém estreitas relações com essas indústrias que produzem os insumos necessários à sua atividade, gerando assim, um círculo no qual todos os setores são beneficiados.

A movimentação econômica que gera a produção de um empreendimento altera fatores como taxas de emprego e demandas de mercado. Este setor tem em suas características de trabalho a seriedade e a responsabilidade por erguer produções de qualidade futuramente usufruídas pela sociedade. Por tanto, a função da construção civil é abrir caminhos para o progresso social da mesma forma que aceita o desafio de utilizar práticas sustentáveis que acompanhem o crescimento global. Este setor é um dos responsáveis por manter este equilíbrio entre sociedade e mundo

Além disso, a construção civil tem compromisso com o meio ambiente, suas ações tem a obrigação de pensar maneiras viáveis de realizar os avanços sociais sem danificar o habitat natural. Daí a importância de novas tecnologias e métodos que possibilitem desenvolver materiais de construção com melhores características a custos menores, o que leva a construções econômicas e eco eficientes.

Reconhecidamente, o setor da construção civil tem papel fundamental para a realização dos objetivos globais do desenvolvimento sustentável. O Conselho Internacional da Construção (CIB) aponta a indústria da construção como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais. Nesse contexto, os desafios para o setor da construção são diversos, porém, em síntese, consistem na redução e otimização do consumo de materiais e energia, na redução dos resíduos gerados, na preservação do ambiente natural e na melhoria da qualidade do ambiente construído.

No âmbito regional, mais especificamente no Agreste setentrional, onde se encontra o Arranjo Produtivo Local de Pernambuco (APL), que engloba as cidades de Caruaru, Toritama

e Santa Cruz do Capibaribe, um problema ambiental gerado pelo descarte sem nenhum tratamento de um resíduo gerado pela atividade humana desenvolvida no API de confecções de Pernambuco, as cinzas de algaroba, oriundas da queima da lenha da algaroba.

Essa problemática, em conjunto com as peculiaridades do CAA, motivaram a realização desse trabalho que avaliou a possibilidade de utilização desse subproduto, a CLA, usadas como fíler alternativo na composição do CAA. Visando dar uma destinação adequada a um tipo de resíduo que vem sendo descartado na natureza sem nenhum tipo de tratamento, contribuído, assim, para a melhoria da saúde da população local e para mitigar o impacto ambiental causado por esse resíduo. E também trazer benefícios para a construção civil local, apresentando e promovendo o uso do CAA na região, que ainda é tido como concreto de classe especial não somente pela sua alta performance, mas também por ser pouco conhecido pela indústria da construção civil local, através de todas as informações, análises e discussões constantes nesse trabalho.

Outro fator que corrobora para a fomentação do presente trabalho, é dar continuidade à linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida nos últimos anos pelo Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais (GPEMAT), da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA, que promove e realiza pesquisas de cunho ambiental para o desenvolvimento de novos materiais de construção a partir de subprodutos, como as cinzas leves de algaroba, objeto deste trabalho.

E ainda, instigar novos estudos apresentando métodos de ensaios, metodologia aplicada e discussão dos resultados para a utilização de outros tipos de resíduos, semelhantes ao estudado nesse trabalho, oriundos das mais diversas atividades humanas, como fíler alternativo na composição de materiais cimentícios.

Isto posto, fica clara, por tanto, a relevância desse trabalho, pelas inúmeras vantagens que se obtêm com a reciclagem desse tipo de resíduo. Além disso, reduz significativamente a produção de poluentes emitidos para a atmosfera e meio ambiente, gerado em grande quantidade durante a produção dos aditivos superplastificantes e minerais utilizados na composição do CAA, e outros na construção civil, que são normalmente utilizados como aditivos promotores de viscosidade, para que seja atingida a fluidez necessária. No entanto, o mesmo efeito conseguido por esses aditivos também pode ser conseguido através de um alto teor de finos, sendo observados resultados diferentes no concreto auto-adensável quando se adota uma ou outra medida. E, garantindo as características físicas e mecânicas, e em alguns aspectos até melhorando essas propriedades, tais como a resistência mecânica, durabilidade, viscosidade, fluidez, resistência à segregação e exsudação entre outros, do concreto auto-adensável (CAA).

5 ESTADO DA ARTE

Autores e pesquisadores tem se dedicado a trabalhos de pesquisas sobre a reutilização dos resíduos gerados pela queima de madeira para obtenção de energia térmica. Tais como Misra *et al.* (1993), que realizou estudos sobre a composição química das cinzas de madeira em função da sua temperatura de combustão. Em suas análises, feitas em madeiras como carvalho e pinus, verificou a presença de cálcio, potássio e magnésio, além de percentuais menores que 1% de silício e de alumínio.

Anteriormente, Etiégni e Campbell (1990) já haviam realizado estudos sobre as características físicas e químicas de cinzas de madeira, com o intuito de se obter novas alternativas para reciclagem do resíduo em função das questões ambientais. Constataram, em seus estudos, que as cinzas produzidas na combustão das madeiras são muito alcalinas, com pH variando entre 9 e 13,5, e que o comportamento químico e físico variava em função da temperatura de combustão. Eles afirmam ainda que cinzas de lenha podem ser utilizadas como *filler* na construção de pavimentos flexíveis para ruas e estradas.

Mais recente, Maschio *et al.* (2011) realizaram um estudo com cinzas de topo e cinzas de base geradas da queima de madeira de abeto, uma árvore conífera comum no hemisfério norte. Nesse estudo, fez-se a substituição parcial do cimento por essas cinzas em argamassas, com 5, 10, 20 e 30% de substituição e observou-se que cinzas com partículas inferiores a 300 μm modificaram a reologia das argamassas no estado fresco e que para percentuais de 5% de substituição, aos 28 dias, mantiveram a mesma resistência à compressão e absorção com relação a uma argamassa padrão.

Em um estudo semelhante, Cueah e Ramli (2012) avaliaram a substituição parcial, em argamassas, do cimento por cinzas de madeira com alto teor de cálcio, em percentuais de 5, 10, 15, 20 e 25% mantendo-se constante a proporção de água nessas amostras e constataram que no estado fresco não houve alteração na trabalhabilidade e que na substituição de 15% obteve-se maior resistência à compressão aos 90 dias.

Voltados para a problemática local, o descarte inadequado das cinzas leves de algaroba (CLA), no APL de confecções do agreste, podem ser citados os trabalhos de Melo, M. (2012), Leloup (2013), Mota (2014) e Nascimento (2014). Graças a esses trabalhos, a caracterização da cinza - em termos de composição química, granulometrias e propriedades físicas - foi sendo aprofundada, havendo, dessa forma, maior segurança na utilização das cinzas em materiais cimentícios.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa, devido principalmente à preocupação com esta cinza, e com a falta de destinação adequada deste resíduo gerado em quantidades consideráveis resultantes da queima da lenha de algaroba, o Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais (GPEMAT) da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA vem desenvolvendo pesquisas com o objetivo de encontrar uma destinação adequada final para esta cinza inserindo-a em materiais cimentícios.

A título de exemplos, podem ser citados os trabalhos de dissertação de mestrado de Nascimento (2014), que investigou a influência da substituição gradual da cal hidratada CH I pela cinza de algaroba (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) em termos de propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, tendo-se como hipótese norteadora do estudo que essas argamassas alternativas possuem características usuais à aplicação em obra. Também foi caracterizada a cinza de algaroba físico-química e microestruturalmente, os resultados indicaram que é possível substituir até 100% de cal por cinza de algaroba beneficiada em malha 200 sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas mistas.

Destaca-se também o trabalho de Pires (2016), que avaliou a influência da substituição do cimento Portland em diferentes porcentagens (0%, 5%, 10% e 20%) nas propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas, aplicando no traço (1-X):2:X:9 (cimento: cal: cinza: areia), em volume, comumente utilizado para emboço e argamassa de assentamento em obras da região. Nele foi feita a caracterização física e química da cinza, e as suas propriedades analisadas no estado fresco. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, a presença da cinza favoreceu, em todas as porcentagens estudadas, a redução no teor de água de amassamento, mantendo a trabalhabilidade das argamassas. As argamassas com teores de 5% de cinza preservam as propriedades do sistema compatíveis com as propriedades da argamassa de referência. Porém, até 10% é possível a introdução deste resíduo, em substituição ao cimento, sem prejuízos aos sistemas cimentícios, proporcionando alterações mínimas em relação à argamassa de referência, sendo promissor o uso desse resíduo em materiais cimentícios.

O presente trabalho vem dar continuidade à essa linha de pesquisa desenvolvida pelo GPEMAT – CAA - UFPE, tendo como marco teórico de referência a Tese de Diederich (2010), da universidade de Toulouse, na França. É um marco teórico de referência em que foi realizado um estudo, na prática, de modo a determinar, a parcela de responsabilidade das adições no comportamento fresco das misturas de cimento, focada na adição mineral e inicialmente apoiada sobre uma caracterização completa de agentes de enchimento de calcário como material em

pó. Em seguida, estes agentes de enchimento são inseridos gradualmente em misturas de cimento cada vez mais complexa para determinar os mecanismos de ação dos agentes de enchimento em contato com os vários componentes do concreto (isto é cimento, superplastificante e agregados). O estudo levou a propor um método de reconhecimento das propriedades de agentes de enchimento e as suas interações com o cimento e os aditivos químicos através da caracterização do regime de suspensão granular.

Dessa maneira, este trabalho observa que os resultados do uso de cinzas de algaroba em materiais cimentícios têm sido bastante promissores do ponto de vista científico e de propriedades, provavelmente devido a ação das cinzas como fíler na matriz cimentante, resultando em melhorias e/ou manutenção das propriedades do sistema cimentício adicionado com cinzas de algaroba. A constituição química predominante de carbonato de cálcio (CaCO_3) e seu efeito fíler nos impulsiona a verificar o comportamento do sistema quanto a sua utilização como fíler alternativo para concretos de alto desempenho, mais especificamente o concreto auto-adensável. Este tipo de concreto, para que suas propriedades sejam melhoradas, requer uma maior quantidade de material fino (preferencialmente adições) e um menor volume de agregado grúdo, essas proporções são necessárias pois ajudam, além disso, a manter a sua estabilidade.

Salienta-se que estudos similares mostram que a utilização de fíleres calcários como alternativa aos aditivos químicos industriais, utilizados nos materiais cimentícios, contribuem para a resistência à segregação uma vez que conferem ao concreto uma maior homogeneização da mistura, por ter sua microestrutura melhorada com a presença desse fíler, o que possibilita uma redução da relação água/cimento, diminuindo, consequentemente, os vazios existentes e promovendo, também, um reforço implementado na zona de transição, que é a região compreendida pela interface entre a superfície do agregado e a pasta propriamente dita, aumentando assim, a aderência entre a pasta e o agregado, ou seja, aumentando a resistência à segregação. Essa região é a mais fraca do concreto pois, nela, a porosidade é elevada e há grande concentração de diferentes formas cristalinas de hidróxido de cálcio (cal hidratada), formada pela hidratação do cimento. Com a vantagem adicional de proporcionar uma hidratação lenta com baixa liberação de calor e aumento da resistência do concreto aos sulfatos e a outros agentes agressivos ácidos.

Por tanto, fica evidente a necessidade de se estudar mais a respeito do assunto proposto para que as melhorias (ou ao menos a manutenção) nas propriedades desse tipo de concreto, com a adição do fíler, sejam alcançadas. Estimulando, ainda, estudos futuros para a ampliação da utilização da metodologia aqui apresenta em outros materiais de base cimentícia. Além, obviamente, das vantagens advindas do êxito deste trabalho para a sociedade e o meio ambiente.

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1 Concreto Auto-Adensável (CAA)

No Japão, no ano de 1986, por causa dos problemas no processo de adensamento, devido à complexidade das estruturas executadas, que possuíam grande quantidade de armadura, empregada devido à necessidade que as estruturas tinham de resistir aos abalos sísmicos que ocorriam naquela região, como também devido à escassez de mão de obra qualificada, levando a afetar a durabilidade e à redução da qualidade das construções (OKAMURA, 1997), surgiu então a necessidade de se desenvolver um concreto que apresentasse características tais que permitissem dispensar o seu adensamento. Para tanto, fez-se uso de concretos fluidos, conseguidos através da utilização de aditivos superplastificantes, conseguindo-se superar o problema do auto adensamento. No entanto, devido à alta fluidez atingida, o material apresentou a ocorrência de exsudação e segregação, limitando sua aplicação.

Logo, ainda existia a necessidade de se desenvolver um material que tivesse um comportamento fluido, a ponto de se eliminar o processo de adensamento, mas também, que possuísse adequada resistência à segregação e altos níveis de resistência mecânica. Foi então, que o professor Okamura da Universidade de Tóquio, em sua pesquisa acerca de uma nova categoria de material cimentício, desenvolveu, então, o CAA, garantido a execução de estruturas de concreto duráveis e incorporando qualidade ao processo de construção, tendo sua aplicação realizada em um protótipo no ano de 1988. Este apresentou bons aspectos com relação ao calor de hidratação, retração, densidade no estado endurecido, entre outras propriedades (LEITE, 2007). Segundo Okamura e Ouchi (2003), a primeira aplicação comercial do concreto auto-adensável, ocorreu em junho de 1990 no Japão, na execução de algumas partes de um edifício. Já em 1991, o CAA foi utilizado na construção das torres de uma ponte estaiada em concreto protendido

No Brasil, o CAA foi utilizado pela primeira vez na execução do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre/RS, optando-se pela utilização de concreto branco, em função da arquitetura da edificação (MANUEL, 2005). Em princípio, a execução seria realizada por um concreto convencional fluido, com 20 cm de abatimento, porém este apresentou diversos problemas no acabamento superficial, sendo então substituído pelo CAA, que solucionou estes problemas, além de ter se tornado viável economicamente (TUTIKIAN, 2007).

Salienta-se que, além das aplicações *in situ* do CAA, ultimamente ele vem sendo cada vez mais usado em elementos pré-moldados, apresentando vantagens em relação ao concreto

convencional, por reduzir o tempo de fabricação dos elementos, o que é muito importante neste setor.

6.1.1 Características

O termo concreto auto-adensável (CAA) identifica uma categoria de concreto que pode ser moldado em fôrmas preenchendo cada espaço vazio através exclusivamente de seu peso próprio, não necessitando de qualquer tecnologia de compactação ou vibração externa (TUTIKIAN, 2004). Descreve-se a auto-adensabilidade do concreto fresco como a capacidade de preenchimento dos espaços vazios e o envolvimento das barras de aço e outros obstáculos pelo material, exclusivamente através da ação da força gravitacional, mantendo uma adequada homogeneidade.

Segundo a *European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products* (EFNARC, 2002), entidade europeia com sede no Reino Unido, para um concreto ser considerado auto-adensável, ele deve apresentar três propriedades fundamentais: fluidez, coesão ou habilidade passante e resistência à segregação. Define-se fluidez como a capacidade do concreto auto-adensável de fluir dentro e através da fôrma preenchendo todos os espaços. Coesão ou habilidade passante como a capacidade de escoamento pela fôrma, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. Resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto em se manter coeso ou fluir dentro das fôrmas, passando ou não através de obstáculos.

Um dos principais diferenciais do CAA em comparação ao concreto fluido é elevada resistência à segregação, muito propícia pela elevada fluidez do CAA, que é o fenômeno de separação dos constituintes da mistura, através da perda de homogeneidade. Essa perda pode ocorrer também devido a inadequada quantidade de água na mistura, ou seja, tanto a água em excesso como insuficiente pode ocasionar a perda de homogeneidade, por tornar a viscosidade do concreto inadequada. Esse processo de segregação tende a ocorrer nas fases de transporte e lançamento do concreto. Outro fator que contribui para esse fenômeno é a diferença de massa específica e de dimensões de seus constituintes.

Outro fenômeno comum nos concretos de alta fluidez chama-se exsudação, que trata da incapacidade dos sólidos do concreto absorverem a água, fazendo com que esta fique em suspensão por possuir menor massa específica. Esta pode variar de acordo com as propriedades do cimento e agregados. A reologia é a ciência que estuda o fluxo e as deformações dos materiais,

e está intrinsecamente ligada às características do concreto auto-adensável, que são influenciadas por essas propriedades reológicas, normalmente, com relação a sua viscosidade plástica (η) e de sua tensão de escoamento (τ_0).

Essa viscosidade é definida como a capacidade de resistir à deformação do concreto quando tensionada, sendo variável de acordo com o atrito interno, em função da coesão da mistura (MANUEL, 2005). E, a sua tensão de escoamento é caracterizada pela tensão de cisalhamento inicial aplicada ao material para que este entre em movimento, como função do estado de dispersão das partículas (MELO, 2005).

Um fator importante o qual o concreto auto-adensável deve respeitar, ainda no estado fresco, é o tempo no qual este mantém a capacidade de escoar, e ainda a bombeabilidade que trata da capacidade deste ser bombeado a maiores distâncias ou alturas, sem que provoque danos aos equipamentos (REPETTE, 2011).

Já no estado endurecido, segundo Perius (2009), pela menor quantidade de agregado graúdo, o CAA apresenta um menor módulo de elasticidade e maior durabilidade em função da menor quantidade de vazios, como também, maior retração, ambos causados pela elevada presença de finos. E ainda, por essa sua constituição, inexistem bolhas e nichos de concretagem, com boa homogeneidade de cor e textura (REPETTE, 2011).

Dessa forma, as vantagens do concreto auto-adensável, ficam evidentes, pois proporcionam o aceleração da construção, a redução de trabalhadores no canteiro, o melhor acabamento da superfície, a possibilidade de concretagens de formas de desenhos diferenciados e com altas taxas de armadura, a eliminação do ruído dos vibradores, e ainda uma possível redução dos custos finais da obra (TUTIKIAN et al, 2006). E mais, é capaz de atingir elevadas resistências mecânicas, próximas de 60MPa, em dosagens usuais (PERIUS, 2009). Enquadrando-se na categoria de concretos de auto desempenho (CAD).

6.1.2 Materiais

De modo geral, os materiais que constituem o CAA são os mesmos do concreto convencional, diferenciando-se, basicamente, nas suas proporções, aditivos e adições. No entanto, para a sua produção, reque-se a escolha mais específica dos materiais empregados, com um controle dos fatores responsáveis pela garantia da fluidez desejada, por esse concreto ser bastante sensível a algumas características dos seus materiais constituintes, tais como tamanho e forma dos agregados e distribuição granulométrica. Sua principal diferenciação com relação aos demais

concretos ocorre com relação aos materiais finos requeridos neste e rejeitados no concreto convencional (PERIUS, 2009).

6.1.2.1 Cimento

Não há especificações quanto ao tipo e uso do cimento. Todos os cimentos Portland podem ser utilizados para a obtenção do concreto auto-adensável, a escolha deve ser feita a partir das propriedades deste, de acordo com a composição química, índice de finura, adições minerais, e, até mesmo do fabricante, pois reagem de maneiras diferentes devendo cada dosagem ser específica para cada tipo de cimento (REPETTE, 2011).

Devido a maior necessidade de finos no CAA, algumas características do cimento Portland devem ser avaliadas, dentre elas, a sua finura, pois tão maior será a superfície específica de um cimento quanto maior for sua finura, e quanto maior essa superfície específica, menor será a tensão de escoamento e maior será a viscosidade plástica da mistura, pela diminuição da distância entre as partículas, e ainda, por consequência, o aumento de colisão das partículas, o que provoca maior liberação de calor de hidratação. Sendo este último um efeito indesejado.

Além das características do cimento Portland, o seu teor na mistura também deve ser avaliado e limitado, para que se atinja uma viscosidade plástica adequada, para a sua finura quanto na mistura, e se evite problemas como a alta liberação de calor de hidratação e aumento da retração plástica, além do custo elevado desse insumo na composição do CAA.

Uma outra característica do cimento a ser observada é quanto a sua composição química, no cimento Portland, os principais responsáveis pela adsorção dos aditivos são o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro-aluminato (C_4AF). Nunes (2001), recomenda a utilização de cimentos com menores teores destes componentes, afim de se obter uma maior homogeneidade da distribuição dos aditivos de propriedades dispersantes.

6.1.2.2 Agregados

Para que se obtenha uma fluidez e adensabilidade adequadas no CAA, é necessário, entre outros fatores, uma menor quantidade de agregado graúdo e um aumento no teor de partículas finas chegando-se dessa forma uma proporção ideal entre agregado graúdo e miúdo, que é um importante aspecto que pode influenciar na reologia do CAA. Quanto ao tipo do agregado utilizado no CAA, de modo geral, é o mesmo utilizado no concreto convencional, ressaltando-

se apenas a recomendação com relação à sua forma, pois segundo Repette (2011), esta imposição se deve ao fato de que grãos lamelares causam maior intertravamento de partículas, além de maior adsorção de água, necessitando de uma maior quantidade de pasta para a obtenção da fluidez desejada.

A distribuição granulométrica desses agregados deve ser contínua, para que se evite problemas no concreto como redução da fluidez – por haver uma relação direta entre a granulometria e a área superficial dos agregados, o que confere maior ou menor viscosidade plástica à mistura - e existência de mais vazios entre os agregados, como também, uma granulometria descontínua aumenta a tendência à segregação.

E ainda, uma granulometria contínua promove melhor compactação dos agregados (empacotamento) e corrobora para menor demanda de água na mistura para obter o mesmo volume de concreto, afirma (LEITE, 2007).

A área superficial dos agregados é função do diâmetro médio deles, que comumente são empregados com dimensão máxima de 19mm, devendo-se atentar para a dimensão das aberturas para que não ocorra restrição do fluxo.

6.1.2.3 Água

Um cuidado especial deve-se ter com relação a quantidade de água a ser utilizada no concreto auto-adensável, pois quanto maior for a quantidade de água no concreto, menor é a tensão de escoamento deste que está relacionada com a deformabilidade, e menor será também a viscosidade da mistura. Provocando desta forma a segregação dos materiais, além de comprometer a sua resistência mecânica. Para Melo (2005), a quantidade de água empregada no amassamento não deve ser muito maior que a quantidade necessária para promover a hidratação do cimento, sendo então obtida a fluidez necessária através do emprego de aditivos superplastificantes. A quantidade ideal de água a ser adicionada à mistura pode ser definida a partir da relação água/materiais finos (NUNES, 2001).

6.1.2.4 Aditivos

Aditivos são materiais empregados em concretos e argamassa com o propósito de modificar suas propriedades, tornando-os mais adequados em termos de trabalhabilidade, manuseio, economia e outros fins, sendo o componente mais importante na composição do CAA.

Dentre os aditivos mais utilizados para a fabricação do concreto auto-adensável, destaca-se os superplastificantes e os modificadores de viscosidade (estes últimos constituídos por polímeros solúveis em água), que são indispensáveis para garantir as principais características no estado fresco, a elevada fluidez e a viscosidade necessária para manter a homogeneidade da mistura (MELO, 2005). O que torna esse concreto adequado para ser aplicado em áreas com pequena acessibilidade ou com alta densidade de armadura, além de serem capazes de promover um aumento na sua bombeabilidade (RONCERO, 2000).

Os aditivos mais recomendados para CAA são os ditos de terceira geração, sendo estes formados por éster policarboxílicos (SILVA *et al.*, 2009). Esses aditivos são também conhecidos como policarboxilatos - são aditivos superplastificantes redutores de água, que permitem reduções de 30 a 45% da água a ser empregada (LEITE, 2007).

A. Aditivos superplastificantes:

Ramachandran *et al.* (1998) definem superplastificantes como sendo aditivos químicos capazes de manter uma baixa relação água/cimento por um período de tempo sem afetar as propriedades de pega e endurecimento, e ainda melhorando a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Leite (2007) cita ainda que, além da redução da quantidade de água de amassamento necessária, algumas vantagens podem ser elencadas como consequência desta, entre elas o aumento da resistência mecânica, a amenização dos fenômenos de segregação e exsudação, o aumento da durabilidade das estruturas, mas principalmente, a elevada fluidez que pode ser atingida com tal aplicação.

No que se refere a sua estrutura química, os superplastificantes são basicamente surfactantes poliméricos com elevada massa molecular, as distinções ocorrem segundo a forma como estes agem na mistura. As primeiras gerações de aditivos têm sua ação através da repulsão eletrostática das partículas de cimento.

Nos aditivos de terceira geração também ocorrem interações por repulsão eletrostática, porém, este não é seu principal agente. A repulsão dita elétrica, conhecida pela formação de longas cadeias laterais, ligadas a vários pontos centrais do polímero, possui forte efeito dispersante, causado pela formação de uma capa de adsorção de grande volume, impedindo a aproximação de partículas de cimento (HARTMANN e HELENE, 2003).

B. Aditivos promotores de viscosidade:

Outro aditivo muito presente e importante no CAA é o modificador de viscosidade, os quais são formados a partir de derivados da celulose, ou ainda polissacarídeos, e possuem como

principal atuação o aumento da tensão de escoamento, e consequente aumento da viscosidade da pasta de cimento, evitando assim, os fenômenos de segregação e exsudação da mistura (LEITE, 2007).

Eles podem ser constituídos de polímeros solúveis em água à base de celulose, acrílico ou glicol, biopolímeros, e agentes inorgânicos. A sua ação no concreto pode se dar através de dois mecanismos, o primeira é por meio da adsorção destes às partículas de cimento, provocando uma redução da adsorção do superplastificante, fazendo com que ele não ocupe este espaço. Conseguindo-se, deste modo, um aumento na viscosidade por meio de uma redução na fluidez do concreto.

O segundo modo de atuação destes aditivos se dá através da dispersão em água, onde as cadeias poliméricas podem embeber água livre existente no concreto, o que promove o aumento da viscosidade. Neste segundo, o modo de ação não se dá por adsorção, sendo então, o mais indicado para aplicações em CAA (MELO, 2005).

6.1.2.5 Adições

As adições no concreto são feitas com a finalidade de se adicionar propriedades especiais a ele e/ou melhorar suas características já existentes, são materiais finamente moídos, provenientes de subprodutos da indústria cuja reciclagem ou destinação final adequada é complexa ou onerosa, representando um sério problema ambiental

Elas são empregadas em substituição parcial do cimento, onde os teores usuais para substituição segundo a literatura, para o concreto auto-adensável, são de 30% e são classificadas conforme sua ação no concreto. As adições inertes promovem uma ação física no concreto por meio de uma maior compacidade, estes materiais melhoram a coesão da mistura por intermédio do melhor empacotamento dos grãos. No caso da ocorrência da influência por efeito químico, as partículas da adição reagem com a portlandita, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um dos responsáveis pela resistência dos materiais cimentícios (PERIUS, 2009).

Já as adições reativas contribuem para a formação dos hidratos, e se subdivide em pozolanas (cinza volante com baixo teor de cálcio cinza da casca de arroz e sílica ativa, por exemplo) e cimentantes, como a escória de alto forno. Em geral, as adições utilizadas em concreto auto-adensável, necessárias para manter a coesão da mistura, e evitar a segregação dos materiais, são geralmente finos minerais, inertes ou pozolânicos (PERIUS, 2009). A depender da reatividade da adição, no estado fresco, estas podem ser responsáveis por aumentos na coesão da mistura e

deformabilidade, e diminuição na ocorrência da exsudação. Já no estado endurecido, podem ser registrados aumento na resistência característica e durabilidade das estruturas (LEITE, 2007).

Segundo Melo (2005), a eficácia no uso das adições depende, entre outros fatores, de questões como sua reatividade, granulometria, tamanho e forma das partículas, além da textura superficial e absorção das mesmas. O filer calcário, produzido através da moagem de rochas calcárias, possui partículas prismáticas, e muito embora não seja um material completamente inerte, seu principal modo de ação é através do efeito físico na mistura. Sua aplicação em CAA provoca redução na tensão de escoamento, porém, não apresenta acréscimo significativo à viscosidade da pasta. Alguns estudos indicam que este material pode reduzir a deformabilidade do concreto, controlando a segregação e exsudação do mesmo (LEITE, 2007; MELO, 2005).

A cinza volante, produzida a partir da queima do carvão mineral, é um material de características pozolânicas, podendo, dependendo da origem, apresentar características cimentantes (quando possui teores significativos de cálcio), com grãos arredondados. Seu uso como adição em concretos pode reduzir a quantidade de água necessária para obter uma mesma fluidez, proporcionar uma maior coesão da mistura, controlar a ocorrência dos fenômenos de segregação e exsudação, bem como a redução do calor de hidratação (LEITE, 2007; MELO, 2005).

A sílica ativa, subproduto da obtenção do silício metálico e das ligas de silício, caracterizada por possuir estrutura amorfa quase esférica, é uma adição altamente reativa. Como vantagens da sua aplicação podem ser elencadas o aumento da coesão e da fluidez da mistura, seguida do controle dos fenômenos de exsudação e retração plástica, além da redução do calor de hidratação e da permeabilidade das estruturas (LEITE, 2007; MELO, 2005).

A escória de alto-forno, obtida como subproduto da produção do ferro gusa em alto-forno, possui finura e forma das partículas variáveis de acordo com sua obtenção e moagem. Quando utilizada em associação com cimentos e pozolanas, contribui positivamente nas propriedades do concreto. Entre as vantagens de seu uso, podem ser citadas o aumento na fluidez e viscosidade das pastas, maior tempo de pega e redução da exsudação (MELO, 2005).

6.1.3 Dosagem

Basicamente, além dos aditivos utilizados para a obtenção de determinadas propriedades e/ou características, é a dosagem dos materiais constituintes do concreto auto-adensável que o diferencia dos demais. Nessa etapa são selecionados os componentes e determinadas suas proporções relativas para que se obtenha, da maneira mais econômica possível, as características mínimas necessárias para os concretos, de modo geral, como

resistência, consistência e durabilidade, e para o CAA, além dessas, fluidez e resistência a segregação.

Existem hoje disponíveis na literatura diversos métodos de dosagem para a obtenção do concreto auto-adensável, métodos esses criados com fundamentação empírica assim como o concreto convencional, entretanto diferenciados entre si. Os métodos de dosagem para os concretos convencionais podem ser baseados na granulometria dos agregados ou no teor de argamassa, para esse último, os mais conhecidos são o método da ABCP e o do IPT/EPUSP.

O principal responsável pela criação do CAA, o professor Okamura, em sua proposta, considera que o concreto é composto por duas fases, a argamassa e o agregado graúdo. A quantidade de agregado graúdo seria definida por 50% do volume sólido de agregado, e adicionada a argamassa, composta de 40% de seu volume por areia e corrigindo-se, por fim, a dosagem dos aditivos.

Outros métodos de dosagem são propostos por outros autores na literatura, entre eles, um dos mais bem aceitos é o método de Gomes, cujo fluxograma é apresentado na Figura 1, que consiste em duas etapas: a primeira etapa envolve a determinação do esqueleto granular dos agregados, ou seja, a proporção mais adequada entre agregado graúdo e agregado miúdo, para se obter o menor índice de vazios. E a segunda etapa visa a obtenção de uma pasta de cimento, com características de fluidez e coesão, a partir de teores ideais de aditivo superplastificante e adições de finos, necessários a se adquirirem as três propriedades fundamentais do CAA que são resistência à segregação, capacidade passante e fluidez.

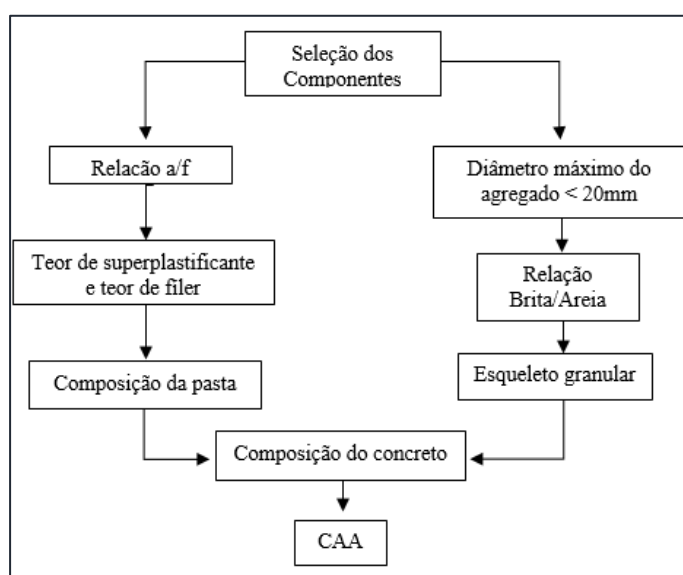


Figura 1 - Fluxograma do método de dosagem para o CAA.

Fonte: Adaptado de (Gomes, 2002)

Esse teor ideal de aditivo superplastificante é obtido a partir de ensaios do cone de Marsh, esse ensaio determina o tempo necessário para que 200ml de pasta escoem, de uma quantidade inicial de 800ml. Para tal determinação, as quantidades de água, fíler e cimento são fixados anteriormente, variando-se apenas o teor de aditivo. O ponto ideal é aquele no qual ocorre a saturação do aditivo, ou seja, o acréscimo da quantidade de aditivo na pasta não representa diminuição no tempo de escoamento (LISBÔA, 2004; FIORENTIN, 2011). Nele podem ser avaliadas a fluidez e trabalhabilidade da mistura.

Já para a obtenção da dosagem ideal de fíler, é feito o ensaio de *mini slump*, nele são aferidas e posteriormente avaliadas a fluidez e a deformabilidade da pasta por medições do espalhamento total desta e pelo aspecto da circunferência formada. Nesse ensaio, se houver a presença de água nas bordas, ou uma película da mesma formada na superfície significa a ocorrência de exsudação. Já a irregularidade da borda, bem como a presença de maior concentração de material no centro, indica a ocorrência de segregação, podendo estas acontecerem simultaneamente ou não (FIORENTIN, 2011). Para a primeira etapa do método de Gomes, a determinação do esqueleto granular, preenche-se um recipiente de 5 litros com uma mistura de areia e brita, obtendo-se a massa unitária e o volume de vazios da mistura, a partir das propriedades dos dois materiais. Repete-se o ensaio para diferentes proporções dos dois materiais, e a escolha se dá por aquele que apresentar maior densidade e menor índice de vazios (LISBÔA, 2004).

E para a segunda etapa, onde se determina o volume de pasta ótimo, são produzidos concretos com diferentes teores de pasta, de modo a se obter aquele que melhor se adaptar ao produto exigido. Este deve preencher os vazios do esqueleto granular, e ao mesmo tempo obter os critérios de auto adensabilidade, sendo estes medidos através do *slump flow* pelo cone de Abrams, pela caixa L e funil V (LISBÔA, 2004).

No ensaio de *slump flow* é feita a aferição do espalhamento do concreto já finalizado, de modo a verificar o preenchimento deste, e, através da circunferência final dele, é mostrada a ocorrência de segregação e/ou exsudação. Ele é realizado com o mesmo cone com o qual realiza-se o ensaio de *slump test* do concreto convencional, mas, com a principal diferença de não haver a etapa de adensamento do concreto, uma vez que deve ser obedecido o critério de auto-adensabilidade do mesmo. A circunferência final medida ideal deve estar compreendida entre 600 e 800mm, com espalhamento homogêneo, sem que ocorra exsudação e segregação (ABNT NBR 15823/2010).

A habilidade passante, uma das três características do CAA, e de preenchimento dele é verificada no ensaio da caixa L, onde o concreto deve passar por barras de aço, que simula a formação de obstáculos, sem que haja a obstrução do seu fluxo bem como a adensabilidade

deste, aferindo-se as alturas finais obtidas no início e fim do curso do concreto na caixa, sendo valores ideais para a proporção H_f/H_i , aqueles compreendidos entre 0,8 e 1,0 (ABNT NBR 15823/2010).

O ensaio realizado no funil V determina o tempo que um dado volume conhecido de concreto leva para escoar através de uma seção reduzida, sendo mostrados neste a habilidade em preencher e passar por obstáculos. Este tempo deve estar compreendido entre 5 e 10 segundos de escoamento, para o funil completo até a borda (ABNT NBR 15823/2010).

6.2 Cinzas geradas no APL de confecções pernambucano.

O desenvolvimento de uma região, Estado ou país é fortemente dependente dos seus setores produtivos, ou seja, da sua capacidade de produzir bens e serviços. Dentre esses setores produtivos, a indústria é a que exerce maior impacto no seu crescimento e desenvolvimento econômico. Arranjos Produtivos Locais (APLs) são aglomerações de empresas, localizadas em um mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, e interação entre si. Algumas dessas estruturas industriais - cuja economia, embora significativa para a região, ainda se encontra em desenvolvimento, e por esse motivo acabam não tendo acesso à novas tecnologias - fazem uso de fontes de energia primárias em seus processos produtivos.

A exemplo disso, tem-se o Arranjo produtivo local de confecções de Pernambuco que, em grande parte, utiliza a biomassa como matriz energética nas caldeiras de suas lavanderias. Em consequência disso, como também em alguns outros processos, há uma drástica alteração na maneira de exploração e utilização dos recursos naturais e no meio ambiente. Embora a utilização desse tipo de combustível renovável, a biomassa, em substituição ao combustível fóssil seja benéfica ao meio ambiente, existe uma crescente preocupação com relação ou descarte final dos resíduos gerados nesse processo.

Localizado em parte do Agreste central e Setentrional Pernambucano, o APL é formado pela alta concentração de empresas do ramo de confecção têxtil, levando o Estado a ocupar o terceiro lugar, a nível nacional, em produção no setor de confecções têxteis (Pesquisa Anual Industrial do IBGE, 2006).

Essa indústria têxtil e de confecções, ao se inter-relacionar com outras atividades produtivas em toda a sua cadeia produtiva – a qual engloba desde a fabricação de máquinas e equipamentos para a indústria e o fornecimento de insumos para a fabricação de tecidos, como também, o setor de comércio – representa um importante papel para a economia da região.

O APL também vem demonstrando ter uma expressiva relevância para o crescimento industrial do Estado, no ano de 2006, que representou um período importante para a economia do país, com significativas taxas de crescimento econômico, os dados da Pesquisa Anual Industrial (PIA), indicaram que a indústria têxtil e de confecções, respondeu por 11,4% do pessoal ocupado na indústria de transformação do Estado de Pernambuco e por 4% do valor bruto da produção industrial gerado por toda a indústria de transformação do Estado (Pesquisa Anual Industrial do IBGE, 2006)

O Arranjo Produtivo Têxtil/Confecção do Agreste pernambucano abrange, em especial, três principais municípios: Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, sendo o município de Caruaru o mais importante economicamente dos três, pois, no ano de 2006, gerou um Produto Interno Bruto (PIB) de quase dois bilhões de reais, e, sediou 1.441 empresas da indústria de transformação (IBGE-Cidades).

Assim, localizado entre a parte norte do agreste central e sul do agreste setentrional, o Arranjo Produtivo local de confecções de Pernambuco, que integra atualmente 10 cidades, incluindo Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, é o terceiro maior setor de confecções do Brasil. Com faturamento representando 7% do PIB pernambucano, representa atualmente 60% da produção do estado. Tendo como principais produtos fabricados, o jeans, a malharia em algodão e as peças de moda casual em tecido (SEBRAE, 2008).

Dados da Agência Estadual de Meio Ambiente Pernambuco (CPRH) de 2005, indicam que a lenha de algaroba é utilizada como fonte de energia, devido à facilidade para aquisição e baixo custo quando comparado com outros combustíveis. Em 2005, na cidade Toritama, foi realizada uma pesquisa pela CPRH em uma amostragem de 59 lavanderias e foi identificado que a lenha representa 69% da energia consumida nas caldeiras para geração de vapor e água produzindo grande quantidade de cinzas como resíduo.

6.3 Adições minerais

Mehta; Monteiro (1994), definem adições minerais como sendo materiais altamente sílicos finamente divididos, que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades

As adições comumente usadas na indústria do concreto são resíduos são resíduos provenientes de outras indústrias, que geralmente são descartados em grandes quantidades e sem nenhuma reutilização. A incorporação desses resíduos ao cimento resulta na promoção das suas características técnicas.

Essas adições minerais podem ser classificadas, segundo Dal Molin (2011), como:

Material pozolânico: que são materiais silicosos ou sílico-aluminosos finamente divididos, e que, quando em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes;

Material cimentante: representado pela escória granulada de alto forno, são os que não necessitam de hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos como o C-S-H. Além disso, a sua auto hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material com fins estruturais.; e

Material Fíler: material finamente dividido sem atividade química, com atuação resumida ao efeito físico de empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para a hidratação do cimento.

6.3.1 Adições inertes ou quase inertes (fíler)

Adições inertes ou quase inerte são aquelas que devido a sua composição química, composta predominantemente por Carbonato de Cálcio (CaCO_3), praticamente não apresentam reatividade durante a fase de hidratação do cimento, tendo ação apenas física na melhora das características de concretos e materiais cimentícios, tais como trabalhabilidade, a tendência de fissuração e a permeabilidade.

Esse composto químico presente em maior quantidade no material fíler é formado a partir da queima a altas temperaturas do óxido de cálcio (CaO), que reage diretamente com o CO_2 presente no ar, produzindo então o CaCO_3 (NASCIMENTO, 2014)

O fíler pode ser definido como sendo um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas características de concretos e argamassas, quando presente em quantidades inferiores a 15% da massa de cimento (DAL MOLIN, 2011).

Ele é dito como sendo um material ‘praticamente’ inerte porque, mesmo que em quantidade não significativa, pode apresentar alguma atividade hidráulica ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer.

Segundo Taylor (1997), cerca de 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do C_3S .

A ABNT NBR 11578/1991 determina que para um determinado material calcário ser utilizado como fíler, ele deve ter no mínimo 85% de CaCO_3 , e estabelece o limite de 10% na quantidade de fíler a ser usada nos cimentos Portland compostos.

6.4 Caracterização da CLA

Leloup (2013) e Nascimento (2014), os quais foram integrantes do grupo de pesquisa do PPGECA – CAA – UFPE constataram que, assim como outras cinzas de madeira, a CLA é rica em carbonato de cálcio, e que possui morfologia esférica, com parte de seus diâmetros inferiores a 75 μm , e com superfície um pouco enrugada. São essas características que conferem à CLA, o efeito fíler.

Na Figura 2 é mostrada a imagem do gráfico gerado na análise gravimétrica feita na CLA por (NASCIMENTO, 2014), onde é possível observar uma grande perda de massa de 31,07%, no pico de 800°C, referente a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) presente na cinza.

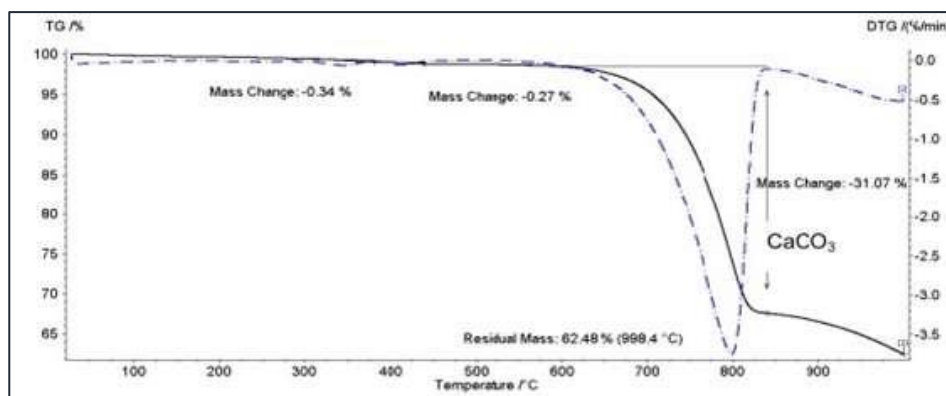


Figura 2 – Termogravimetria da CLA

FONTE: Nascimento (2014).

É devido a essa quantidade elevada de carbonato de cálcio presente na CLA que ela pode ser tida como um material inerte, pois o composto químico presente em maior quantidade, o CaCO_3 , praticamente não participa de reações químicas em nenhuma fase de hidratação do cimento. Tornando possível a sua adição como fíler em materiais cimentícios.

O CaCO_3 também é resultado do processo de carbonatação da cal hidratada presente nas argamassas de revestimento, auxiliando na redução de poros e por consequência aumento na durabilidade do revestimento (NASCIMENTO, 2014).

Quanto a análise química da CLA produzida no APL de confecções pernambucano, na Tabela 1 é apresentada a quantidade dos componentes químicos da CLA (77,85%) de cálcio, e demais elementos significativos, potássio (13,81%), silício (4,09%) e ferro (2,14%).

Tabela 1 - Fluorescência de Raio-X da CLA.

<i>Óxidos</i>	<i>Percentuais (%)</i>
CaO	77,85
K ₂ O	13,81
SiO ₂	4,09
Fe ₂ O ₃	2,14
SO ₃	1,60
Sc ₂ O ₃	0,27
MnO	0,12
ZnO	0,10
CuO	0,03

FONTE: Nascimento (2014).

Da mesma forma que a ABNT NBR 11578/1991) estabelece parâmetros para que um material calcário possa ser utilizado como fíler, a ABNT NBR 12653/2012), inspirada na definição dada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), em sua norma C 125-03, define que, para um material ser considerado pozolânico, ele deve possuir um valor mínimo de 50% para o somatório dos percentuais de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃. Assim sendo, a análise feita na CLA, que apresentou um total de 6,23% de SiO₂ (4,09%) + Fe₂O₃ (2,14%), além de não apresentar Al₂O₃, aponta que a CLA não possui as condições químicas mínimas necessárias para desenvolver atividade pozolânica.

Embora ela possa ser caracterizada como material inerte, o fíler pode apresentar alguma atividade hidráulica, ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer, como o C₃S. Segundo Taylor (1997), cerca de 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do C₃S. O que ainda assim, não é suficiente para torna-la um material reagente quimicamente.

6.4.1 Utilização do fíler em materiais cimentícios

As melhoras nas propriedades dos materiais cimentícios, pela adição do *fíler*, são conseguidas devida a capacidade desse de melhorar a distribuição das partículas e preencher os vazios entre os grãos do clínquer, que se formam quando acontecem as reações químicas de hidratação do cimento Portland, melhorando o empacotamento e a resistência do sistema, assim como, proporcionando a diminuição da sua porosidade.

7 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este tópico trata da descrição dos materiais empregados e dos procedimentos experimentais adotados na execução do trabalho. A fase experimental foi desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, do departamento de Engenharia Civil, Núcleo de Tecnologia – NT do Centro Acadêmico do Agreste – CAA da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

O procedimento experimental adotado neste trabalho consta das seguintes etapas:

- Seleção e caracterização dos materiais

A escolha do material se deu em função da sua utilização na região de estudo, e da obtenção satisfatória das propriedades requeridas para o CAA através de ensaios específicos tais como DRX, FRX, RAA, BET, compacidade máxima, e outros.

- Determinação da água de amassamento

Inicialmente, foi determinada experimentalmente a relação água/finos em função da máxima compacidade, levando-se em conta a quantidade de superplastificante contida na mistura, e se chegando à quantidade de água compacta da pasta. Posteriormente, obteve-se a quantidade de água em excesso, por meio de ensaio de BET e determinação da espessura de água aderida à área superficial dos finos. Composto, dessa forma, a água da pasta. Por fim, a partir do esqueleto granular, a sua demanda de água, denominada água do esqueleto granular, foi determinada; formando, assim, a água de amassamento utilizada nos experimentos.

- Determinação das proporções dos materiais na confecção do CAA

As proporções dos materiais usados no traço do CAA foram determinadas a partir da quantidade de cimento utilizada como sendo de referência (350 Kg/m^3 de concreto), observando-se a adequada porcentagem de cada componente com relação a essa quantidade. A proporção ideal dos agregados foi obtida por meio do ensaio proposto por De Larrard, para a qual se obtém a máxima compacidade para o esqueleto granular.

- Produção do concreto

O concreto auto-adensável (CAA), com incorporação das cinzas leves de algaroba (CLA), foi produzido de modo que atendessem aos requisitos estabelecidos pelas Normas para

concretos de alto desempenho, tais como estabilidade da mistura, segregação e adequada resistência ao bloqueio. Verificados através de ensaios de espalhamento, Funil V e caixa L, por exemplo. Como também, avaliou-se a necessidade de ajustes para atendimento aos requisitos de autocompactabilidade definidos por esses ensaios. E ainda, avaliados em relação à exsudação e a resistência à compressão.

7.1 Seleção dos materiais

7.1.1 Cimento

O cimento escolhido para utilização neste trabalho foi o CP V-ARI, uma vez que este possui área específica em torno de 300 m²/kg de cimento (NBR 5733/91); sendo este, entre os tipos de cimento disponíveis no mercado, o que possui maior finura e, conseqüentemente, maior superfície específica, o que proporciona às misturas uma maior viscosidade plástica. Além disso, a escolha do CP V-ARI firmou-se também na sua característica de elevado ganho de resistência para os primeiros dias de cura, necessária para os ensaios de compressão realizados nos corpos de prova para os tempos de cura de 3, 7, 14 e 21 dias.

Optou-se por omitir a marca comercial do cimento utilizado. Porém, como diferentes marcas de cimento podem ser determinantes em dosagens de CAA, uma vez que, mesmo sendo das mesmas categorias, as características químicas e físicas do cimento podem variar dentro de uma faixa. As características químicas e físicas do cimento utilizado são apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente, e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2 - Características químicas do cimento.

Determinação	CPV-ARI (%)
Resíduo insolúvel	≤ 1,00
Perda ao fogo	≤ 4,37
SiO ₂	20,43
Al ₂ O ₃	4,90
Fe ₂ O ₃	1,83
CaO	65,40
SO ₃	3,60
MgO	1,06
K ₂ O	0,27

FONTE: Boletim técnico fornecido pelo fabricante (2018).

Tabela 3 - Características físicas do cimento.

Determinação		CPV-ARI
Composição	Clínquer	98,50%
	Calcário	0 a 10%
Densidade	g/cm ³	3,09
Finura	Resíduo na peneira 75 µm (%)	≤ 0,22
	Área específica Blaine (cm ² /g)	≥ 4,692
Tempo de pega	Início (min)	≥ 95
	Término (min)	≤ 180
Expansibilidade	A quente (mm)	≤ 2
	1 dia (MPa)	≥ 17,48
Resistência à compressão	3 dias (MPa)	≥ 27,00
	7 dias (MPa)	≥ 36,00

FONTE: Boletim técnico fornecido pelo fabricante (2018).

7.1.2 Fíler calcário

Os finos no CAA são necessários para promover maior viscosidade; devido a isso, a adição foi empregada neste trabalho. Elegeu-se o usual fíler calcário industrializado, adquirido em um estabelecimento comercial da localidade.

7.1.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi obtido na região; para a sua utilização, secou-se na estufa a 105 °C por 24 horas e foi peneirado. Posteriormente, foi devidamente caracterizado por: massa específica e granulometria. Sua curva granulométrica é apresentada na Tabela 4, bem como as zonas de utilização para esse material, determinada conforme a NBR 7211/05,

Tabela 4 - Curva granulométrica da areia e zonas de utilização

Peneiras ABNT (mm)	Amostra areia natural		Porcentagem, em massa, retida acumulada				
			Peso 500 g	Limites inferiores		Limites superiores	
	Peso retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Zona uti- lizável	Zona ótima	Zona uti- zável	Zona ótima
9.50	0.00	0.00%	0.00%	0%	0%	0%	0%
6.30	0.00	0.00%	0.00%	0%	0%	7%	0%
4.75	1.90	0.38%	0.38%	0%	0%	10%	5%
2.36	25.50	5.10%	5.48%	0%	10%	25%	20%
1.18	68.30	13.66%	19.14%	5%	20%	50%	30%
0.60	274.20	54.84%	73.98%	15%	35%	70%	55%
0.30	72.00	14.40%	88.38%	50%	65%	95%	85%
0.15	37.50	7.50%	95.88%	85%	90%	100%	95%
Fundo	20.60	4.12%	100.00%				
Total	500.00	100.00%					

ABNT NBR 7211/2009 - Pg. 5

Nota: as porcentagens retidas e acumuladas que constam na Tabela 4 para a os limites superiores e limites inferiores foram retiradas da NBR 7211/05 – p.5

FONTE: O autor (2018).

A areia possui um módulo de finura (MF) de 2,83, que a classifica como areia média, com diâmetro máximo característico é de 4,75 mm. Uma melhor exposição dos dados é feita pela Figura 3, que apresenta o gráfico da curva granulométrica da areia e suas zonas de utilização.

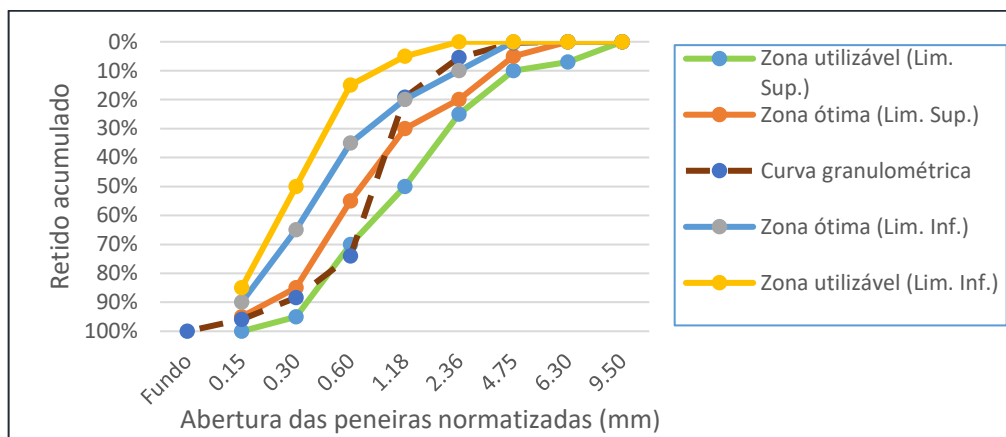


Figura 3 - Curva granulométrica da areia

Nota: as porcentagens retidas e acumuladas utilizadas para a composição das curvas para os limites superiores e limites inferiores foram retiradas da NBR 7211/2005 – p.5

FONTE: O autor (2018).

Observa-se na Figura 3 que a curva granulométrica se encontra dentro dos parâmetros estabelecidos pela Norma supracitada, estando bem próxima da zona ótima.

Da mesma forma, para o agregado graúdo, empregou-se a brita 0 de origem granítica, comumente empregado em aplicações convencionais, encontrado facilmente na localidade, de modo a não se obterem variações neste quesito, com $d_{máx}$ igual a 12,5 mm, MF de 5,74, e massa específica (γ) igual a 2,63 g/cm³.

7.1.4 Aditivo

O aditivo superplastificante empregado foi o Glenium 51 (superplastificante de 3ª geração) à base Policarboxilatos fabricado pela empresa BASF. Na Tabela 5 é apresentada as informações técnicas deste aditivo fornecidas pelo fabricante. O teor de aditivo utilizado neste trabalho está fixado em função da quantidade de cimento de referência e dos finos utilizados como fíler, que também possuem suas quantidades determinadas em função daquela. Sendo sua quantidade equivalente a 1% da massa dos finos. Não foram utilizados outros tipos de aditivos como os promotores de viscosidade, por exemplo.

Tabela 5- **Dados técnicos do aditivo superplastificante utilizado**

Parâmetro	Dado
Função principal	Superplastificante (3ª geração)
Base química	Polícarboxilatos
Aspecto	Bege
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5 %
Viscosidade	95 a 160 cps

FONTE: Boletim técnico fornecido pelo fabricante (2018).

7.1.5 Água

A água utilizada no concreto, chamada de água de amassamento, tem fundamental atuação na obtenção de um concreto adequado às suas finalidades; a água de amassamento, como visto, requer especial cuidado no que diz respeito à qualidade, pois se alguns de seus parâmetros de qualidade para utilização nos concretos não estiverem de acordo com os limites estabelecidos pela ABNT NM137/1997, conforme a Tabela 6, poderão ocorrer problemas como queda de resistência, alteração do tempo de pega, entre outros. E para o estudo realizado, pode interferir nos resultados das análises e reações químicas entre os elementos constituintes do CAA.

Tabela 6 - **Parâmetros da água para produção de concreto.**

PARÂMETROS	LIMMITES
PH	5,5 – 9,0
Sólidos Totais	≤ 5000 mg/l
Sulfatos	≤ 2000 mg/l
Cloreto concretos simples	≤ 2000 mg/l
Cloreto concretos armado	≤ 700 mg/l
Cloreto concretos protendido	≤ 500 mg/l
Açúcar	≤ 5 mg/l
Matéria Orgânica	3 mg/l

FONTE: ABNT NM137/1997

Por esse motivo, optou-se por destilar a água utilizada em todas as etapas deste trabalho. O processo de destilação foi realizado no Laboratório de Química do Núcleo de Tecnologia – NT no Centro Acadêmico do Agreste – CAA.

Contudo, ressalta-se que, par fins práticos, o uso da água destilada não se faz necessário, tampouco viável para produção de concretos auto-adensáveis. Para utilização em CAA, basta apenas que a água atenda aos limites estabelecidos pela ABNT NM137/1997, conforme a Tabela 6.

7.1.6 Cinzas

Há dois tipos de cinzas geradas nas caldeiras das lavanderias do APL de Pernambuco, a CT (cinzas de topo) e CB (cinzas de base). Nas formulações, utilizaram-se apenas as cinzas de topo, pois são mais leves, finas e de melhor qualidade. As cinzas leves de algaroba foram classificadas em peneira de malha 200 (75 μm), para que pudessem promover o efeito fíler no sistema. Ressalta-se que, neste estudo, não se aproveitou a porção de cinza retida na malha 200 (75 μm); pois, num primeiro momento, o emprego de qualquer energia adicional de moagem gera um custo adicional para o processo de beneficiamento das cinzas, sobretudo, quando se vislumbra aplicações futuras no mercado.

Contudo, como nesta pesquisa prepondera o caráter ecológico e sustentável, observa-se que a opção de moagem gera um rendimento bem superior, dada a característica pulverulenta e friável das cinzas. O que sugere o desenvolvimento de um estudo posterior para o máximo aproveitamento do resíduo aqui estudado, através de um processo de beneficiamento que apresente baixo custo financeiro e operacional para tal.

Na Figura 4 pode-se ver o aspecto da cinza após seca em estufa e peneirada em malha 200, e como foram coletadas.



Figura 4 - Cinzas leves de algaroba antes e depois de beneficiadas.
Fonte: O autor (2018)

7.2 Caracterização dos materiais

7.2.1 Caracterização físico-química das cinzas

Os diferentes aspectos relacionados à composição e à estrutura dos materiais mantêm estreitas ligações com as propriedades químicas e físicas deles, daí a importância da caracterização físico-química desses através de técnicas instrumentais de análise, objetivando a compreensão desses aspectos, e assim, propiciar indicativos de possíveis aplicações desses compostos.

7.2.1.1 Fluorescência de Raios-X

A determinação da composição química foi feita através de fluorescência de Raios-X (FRX) por energia dispersiva em um equipamento Shimadzu, modelo EDX-820.

Os espectros de fluorescência de Raios-X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg de amostra em pó fino beneficiada através de um processo que consistiu em aquecer a amostra por 72 horas e armazená-la em cápsulas plásticas. Posteriormente, depositado em um porta amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de Raios-X na faixa de energia de interesse com abertura do cromador de 10 mm (abertura da área para passagem dos raios-X, atingindo a amostra).

O tempo real de integração foi 200 s. A análise química da cinza de algaroba foi realizada no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE).

7.2.1.2 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado no cimento e cinza de algaroba (*Prosopis Juliflora*), em um equipamento Empyrean, Panalytical, com detector Plxcel3D. A amostra foi avaliada a partir do método de DRX convencional (no pó seco) e as variáveis do ensaio foram fixadas em: radiação de cobre, fenda automática de 0,5°, filtro de Níquel e frequência de *spinning* de 2 segundos por rotação. As medidas foram feitas com passo de 0,02°, permanecendo em cada passo por 60 segundos, no intervalo de $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$.

Para o preparo das amostras nos suportes, procedeu-se da seguinte maneira: colocou-se a amostra no suporte, fez-se o arrasamento da amostra, pesou-se, retirou-se o excesso da pesagem e então, retirou-se a amostra do suporte pronta para ser ensaiada. Posteriormente foi levada para o dessecador, de modo a evitar o contato com a umidade, até a realização do ensaio.

7.2.1.3 Área superficial (Método BET)

O método de BET (Brunauer, Emmett e Teller), é uma teoria matemática, com o objetivo de descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida, e serve como base para uma técnica de análise importante para medição de área superficial específica de um material.

O ensaio foi realizado em um equipamento Gemini 2375, Micromeritics, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de 100 μ mHg por 24 horas.

7.2.1.4 Massa específica

A determinação da massa específica, ou densidade real, foi realizado pelo método descrito na (ABNT NM 52/2009), sendo feito uma média de 5 repetições de cada matéria-prima (CP V-ARI e CLA). Um picnômetro de gás hélio, em um equipamento Multipycnometer da marca Quantachrome Instruments, foi utilizado para a determinação da densidade real dos materiais.

Esse ensaio objetiva determinar o verdadeiro volume de sólido presente nas amostras, mesmo na presença de porosidade. Isso é conseguido por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Para sua realização, procedeu-se de seguinte maneira; inicialmente, preenche-se o cadinho escolhido com o material e é registrado a massa dele. Logo em seguida, esta amostra com massa conhecida foi colocada na câmara e certificou-se de que neste momento o marcador do equipamento estivesse na posição “REF”. Então, iniciou-se o ensaio com a liberação do gás hélio na câmara de referência e a válvula foi fechada quando o visor marcar a pressão entre 17 e 17,3 psi, aguardou-se aproximadamente 1 minuto para estabilizar a pressão e anotou-se este primeiro valor de pressão P1.

Seguindo, mudou-se o marcador do equipamento para a posição “CELL”, com isso, o gás que estava na câmara de referência é transferido para a câmara que contém o cadinho com

o material, gerando um novo valor de pressão P2 que é também anotado. Para finalizar o ensaio, basta abrir a válvula que permite a saída do gás da câmara.

É possível calcular a massa específica real dos materiais, na condição hipotética do comportamento ideal do gás hélio, através do procedimento identificado na equação 1 e equação 02, a seguir.

$$V_{mat} = V_{cell} - \left(\frac{P_1}{P_2 - 1} \right) * V_{ref} \quad (1)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_{mat}}{V_{mat}} \quad (2)$$

na qual,

ρ_{mat} é a massa específica do material, em g/cm³;

m_{mat} é a massa do material, em g;

V_{mat} é o volume do material, em cm³;

V_{ref} é o volume da câmara de referência, em cm³;

V_{cell} é o volume da câmara com o material, em cm³;

P1 é a pressão medida na câmara de referência, em psi; e

P2 é a pressão medida na câmara com o material, em psi.

7.2.1.5 Determinação da área específica (Método Blaine)

A finura do cimento é determinada como superfície específica, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas. Sob condições normalizadas, a superfície especificada do cimento é proporcional a t, onde t é o tempo para determinada quantidade de ar atravessar a camada compactada de cimento. O número e a faixa de tamanho dos poros individuais em uma camada especificada são determinados pela distribuição das partículas de cimento, que também determina o tempo para um dado fluxo de ar.

O método é mais comparativo que absoluto e, portanto, requer uma amostra de superfície específica conhecida para calibração do aparelho.

A superfície específica, S, em cm²/g é obtida pela equação 03, a seguir.

$$S = \frac{K}{\rho} * \frac{\sqrt{\varepsilon^3}}{(1-\varepsilon)} * \frac{\sqrt{t}}{0,1\eta} \quad (3)$$

na qual,

K é a constante do aparelho;

ε é a porosidade da camada;

t é o tempo medido, em segundos;

ρ é a massa específica do cimento, em gramas por centímetro cúbico;

η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio, tomada da tabela 1 da NM 76/98 em pascal por segundo.

Com a porosidade de $\varepsilon = 0,500$ e a temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, a Equação 3 pode ser simplificada e resulta na Equação 4.

$$S = 524,2 \frac{K\sqrt{t}}{\rho} \quad (4)$$

O procedimento para o ensaio consiste em inserir a superfície cônica da célula no topo do manômetro, usando, se necessário, uma camada fina de graxa para garantir a estanqueidade, e cuidando para não alterar a camada de cimento. Fechar o topo do cilindro com um tampão. Abrir o registro e, por meio de aspiração, levantar o nível do líquido manométrico para a marca mais alta. Fechar o registro e observar se o nível do líquido manométrico permanece constante. Se o nível cair, refazer a junta célula/manômetro e verificar o registro.

Repetir o teste de vazamento até que o nível do líquido manométrico não desça. Abrir o registro e, por aspiração, ajustar o nível do líquido à linha mais alta. Fechar o registro. Remover o tampão do topo do cilindro. O líquido manométrico começará a fluir. Marcar os tempos para que o líquido atinja a segunda linha e a terceira linha. Registrar o tempo, t, com aproximação de 0,2 s e a temperatura com aproximação de 1 °C. Repetir o procedimento na mesma camada e registrar os valores adicionais de tempo e temperatura. Preparar uma nova camada do mesmo cimento com uma segunda amostra. Realizar o ensaio de permeabilidade duas vezes na segunda camada, registrando os tempos e temperaturas como antes.

7.3 Determinação do traço do concreto auto-adensável – (CAA)

O adequado proporcionamento dos materiais constituintes do CAA é importante para assegurar as propriedades reológicas e mecânicas desse material, o que requer cuidados específicos e metodologia própria para tal. E ainda, deve ser feito de modo a atender às exigências de projeto, bem como à técnica de execução e o custo do concreto a ser obtido.

7.3.1 *Determinação da água de amassamento.*

Na execução de concreto estrutural, o controle da quantidade de água de amassamento na fase de mistura é um item de fundamental importância para se obter a máxima de resistência para um determinado traço de concreto.

Neste, essa quantidade de água é composta pela água da pasta - constituída água compacta mais a água em excesso, e expressa através do fator água/finos que consiste na razão entre a massa de água e a massa de cimento utilizada. – e, pela água do esqueleto granular.

O concreto estrutural deve ser preparado com o mínimo de água possível, mantendo as condições de trabalhabilidade recomendadas para a sua aplicação. Diversas bibliografias relacionadas afirmam que, quanto mais água é adicionada na fase de mistura do concreto, menor será sua resistência mecânica.

O embasamento dessa afirmação se deve à segregação dos materiais envolvidos – durante o estado plástico – ser facilitada quando a quantidade de água presente é maior que a soma daquela necessária para garantir às reações de hidratação do cimento, estabelecendo novas ligações moleculares, e assim, o estado sólido da mistura, e a que garante uma adequada trabalhabilidade, não necessariamente envolvida nas reações.

7.3.1.1 *Água da pasta*

Boa parte das propriedades do CAA no estado fresco, como fluidez e viscosidade, é governada pela reologia da pasta. Logo, sendo o estado da pasta intimamente dependente da quantidade de água da pasta calculada, é de suma importância que ela seja determinada de modo a se conduzir à otimização de tais propriedades.

7.3.1.1.1 *Água compacta*

A água compacta, que juntamente com a água em excesso constitui a água da pasta, é obtida através da determinação da máxima compactidade da mistura. Essa determinação não pode ser realizada para finos com diâmetros menores que 100 μm no estado seco, devido às forças interpartículas (do tipo Vander Waals) que tão maior será quanto menor for o diâmetro dessas partículas, logo, tornando-se significativas com relação à gravidade (FAYED, 1997).

Sendo assim, como alternativa, uma metodologia conveniente e adequada para a compacidade, e consequente determinação da demanda de água compacta, utilizada neste trabalho foi aquela estabelecida por Wong e Kwan (WONG, 2008; KWAN, 2008) a partir da medição da compacidade em suspensão. Cujas principais vantagens são a de integrar direta e instantaneamente as propriedades das cargas, tais como morfologia e granulometria. Bem como, as interações com os demais constituintes da mistura cimentícia.

Em suma, a determinação da compacidade da massa é baseada em medidas de densidade que são então realizadas para proporções variáveis de volume de água/finos até atingir o vazão mínimo. De forma análoga, a quantidade mínima de água que preenche os vazios entre os sólidos em suspensão com compacidade máxima pode ser determinada, e tem-se, então, a água compacta.

São preparadas amostras com a mesma quantidade e proporção de finos (CP V - ARI + fíler + CLA), variando-se apenas a relação água/finos, iniciada com uma relação de 0,15 e incrementada de 0,01, que terá sua compacidade aferida através da aplicação dos valores obtidos no ensaio (massa e volume) nas expressões adiante apresentadas.

Para sua realização, confecciona-se dois cilindros pequenos com diâmetro de 6 cm e altura também de 6 cm, de modo que o seu volume seja conhecido e constante. Para esse volume, uma massa de cimento de 600 g exatos é suficiente para cada amostra de diferentes relações água/finos. A quantidade de superplastificante e adição do fino (fíler calcário, para a pasta de referência, ou a CLA, para a pasta alternativa) é determinada em função da dessa massa de cimento, sendo de 1% e 35%, respectivamente.

Inicialmente, é colocada toda a água, com a sua relação previamente determinada, e todo o superplastificante; também se adiciona no misturador 50% da massa de finos (cimento + adição) e mistura-se por três minutos. Em seguida, a outra metade da massa de finos é dividida em quatro partes iguais (cerca de 12,5% da massa total) que serão adicionadas à mistura com intervalos regulares de três minutos, totalizando quinze minutos. Após isso, os dois cilindros são colocados sobre uma mesa vibratória e terão 25% dos seus volumes preenchidos simultaneamente a cada minuto de vibração, totalizando quatro minutos. Por fim, pesa-se cada cilindro, com a pasta compacta, subtrai-se da massa total o peso do cilindro, e calcula-se a média aritmética das duas massas. O valor encontrado será a massa da pasta para a relação água/finos para ela determinada, que será utilizada nos cálculos.

Adverte-se que, mesmo tendo o aditivo superplastificante também a função de desfloculante, se faz necessário a otimização da mistura para se assegurar a correta e completa homogeneização das diferentes amostras de pastas formadas, a fim de se evitar, ou, ao menos, limitar

o aumento do volume de vazio na mistura por meio da captura de ar pelos flocos formados pelas partículas, devido a sua inadequada homogeneização.

Com essas relações é traçada uma curva resultante, conforme a Figura 5, cujo gráfico apresenta, na abscissa, os valores da proporção do volume de água na amostra em função da relação água/finos, obtidos a partir da equação 5, e na sua ordenada, os valores da proporção de vazios que representa a compacidade das amostras, obtidas a partir do ensaio. Quanto menor for essa proporção de vazios, maior será a sua compacidade. Para o seu cálculo é necessário conhecer o volume de sólidos, obtido pela Equação (6). O valor do $R_{vmin.}$ é então conseguido através da Equação (7).

Na mesma Figura 5, a bissetriz ($R_v=R_A$), representa os valores para os quais todos os vazios são preenchidos por água. Nela, pode-se ver que a curva traçada tende a afastar-se da bissetriz quando se aproxima do ponto de maior compacidade ($R_{vmin.}$). Isso significa que existe uma quantidade de ar incorporado na mistura que não pode ser eliminado do processo mesmo mediante vibração aplicada durante a medição, cujo valor pode ser calculado a partir da equação (8). A máxima compacidade é por fim calculada pela equação (9), e a Equação (10) apresenta uma relação entre os volumes constituintes do volume total da mistura.

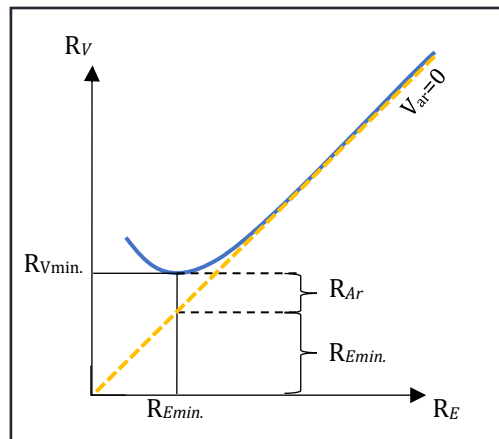


Figura 5 – Compacidade da pasta
 FONTE: Adaptado de Diederich (2010)

$$R_{A/F} = R_{\text{água}} = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{sólido}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{sólido}} = \frac{M}{\rho_e R_e + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_\gamma R_\gamma} \quad (6)$$

na qual,

M é a massa da amostra;

$\rho\alpha, \rho\beta, \rho\gamma$ são as densidades dos constituintes sólidos;

α, β, γ os constituintes da pasta (cimento, adição e superplastificante);

$R\alpha, R\beta, R\gamma$, suas respectivas proporções de volume na composição.

$$R_{Vmin.} = \frac{(V_{Pasta} - V_{Sólido})}{V_{Sólido}} \quad (7)$$

na qual,

$R_{Vmin.}$ é a razão de vazios

V_{pasta} é o volume do cilindro confeccionado

$$R_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{Sólido}} \quad (8)$$

$$Compac_{Máx.} = \frac{1}{1 + R_{Vmin}} \quad (9)$$

$$V_{água min} + V_{Ar} = V_{Vazios} = V_{Pasta} - V_{Sólido} \quad (10)$$

O volume de água compacta (V_{AC}) será definida a partir das medidas de vazios na estrutura da suspensão, Equação 11.

$$V_{AC} = M_{finos} * R_{A/F} \quad (11)$$

na qual,

M_{finos} é a massa de finos em Kg.

$R_{A/F}$ é a relação de água encontrada pela Equação (5)

7.3.1.1.2 Água em excesso

A água em excesso configura uma quantidade de água adicional na pasta necessária para garantir a formação de uma espessura de água distribuída sobre a área de superfície cumulativa dos finos, sendo esta área determinada através do ensaio de BET (Brunauer, Emmett e Teller), suficiente para anular o atrito intergranular (Figura 6) e ainda reduzir as interações devido às cargas, segundo Brouwers (2005) e Wong (2008).

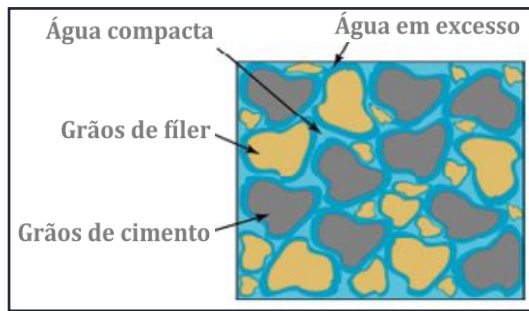


Figura 6 - Água compacta e em excesso.
FONTE: Adaptado de Diederich (2010).

Esses autores desenvolveram o conceito de excesso de espessura de água em relação às propriedades de fluxo das suspensões do cimento. Nesse estudo, eles determinaram através de experimentos uma espessura de água em excesso crítica, para, a partir da qual, as propriedades de fluxo das diferentes misturas são homogêneas. Ou seja, eles fixaram uma espessura mínima de água em excesso de 0,050 μm necessária para se ter um fluxo similar, independentemente das propriedades do fíler utilizado.

Essa quantidade adicional somada ao volume de água compacta e à parte líquida do superplastificante constitui o estado de pasta ótima, conforme apresentado na Figura 7, e Equação (12). Salienta-se que essa espessura mínima pode variar em função da natureza do fíler, uma vez que diferentes fíleres exigem diferentes espessuras de água em excesso para adquirirem o mesmo comportamento homogêneo.

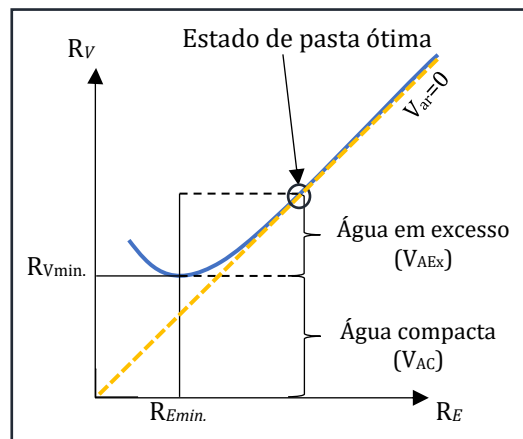


Figura 7 – Compactação úmida
FONTE: Adaptado de Diederich (2010)

$$V_{AEx} = V_{AT} - V_{AC} \quad (12)$$

Para a determinação dessa espessura de água em excesso (ESP_{AEx}), coloca-se o volume de água em excesso (V_{AEx}) em função desta e da área de superfície dos finos (S_{finos}), conforme as equações (13), (14) e (15)

$$V_{AEx} = ESP_{AEx} * S_{finos} \quad (13)$$

$$S_{finos} = M_{fíler} * S_{S,BET} + M_{cimento} * S_{S,BET} \quad (14)$$

$$ESP_{AEx} = \frac{V_{AT}-V_{AC}}{S_{finos}} \quad (15)$$

na qual,

V_{AEx} é o volume de água em excesso;

ESP_{AEx} é a espessura de água em excesso;

M é a massa do fino;

$S_{S,BET}$ é a área superficial específica do fino; e

S_{finos} é a área superficial combinada dos finos.

7.3.1.2 Água de esqueleto granular

O conhecimento dessa demanda de água é importante para que não se altere a água da pasta; bem como, suas propriedades de fluxo. A água retida pelo esqueleto granular (agregado graúdo + agregado miúdo) é formada por duas partes:

- a água absorvida devido à porosidade aberta dos grãos, que depende da natureza da rocha; e,
- a água que molha a superfície dos grãos formando um filme de água adsorvida e que depende da granulometria das partículas.

O método mais adequado para medir essa água retida é o utilizado por El Barrak (2005) e Coutand (2007), realizado por filtração sob pressão da água contida no esqueleto. É preparado um volume representativo conhecido de agregados na proporção que se deseja usar para o concreto, calculada por ensaio específico para sua determinação, como será visto adiante, no tópico 7.3.2.2. Essa amostra fica então imersa por 24 horas em um recipiente com água de volume

definido, com a finalidade de se deixar a água penetrar na porosidade aberta dos grãos. O recipiente deve estar adequadamente fechado de modo a se evitar variações significativas do volume de água nele contido por meio da evaporação.

Em seguida, essa amostra é colocada em um funil de filtro conectado a uma bomba de vácuo (Figura 8). Assim que a filtração à vácuo é ligada, marca-se o tempo e a água filtrada é medida usando uma bureta graduada, e deduz-se a água retida no esqueleto.

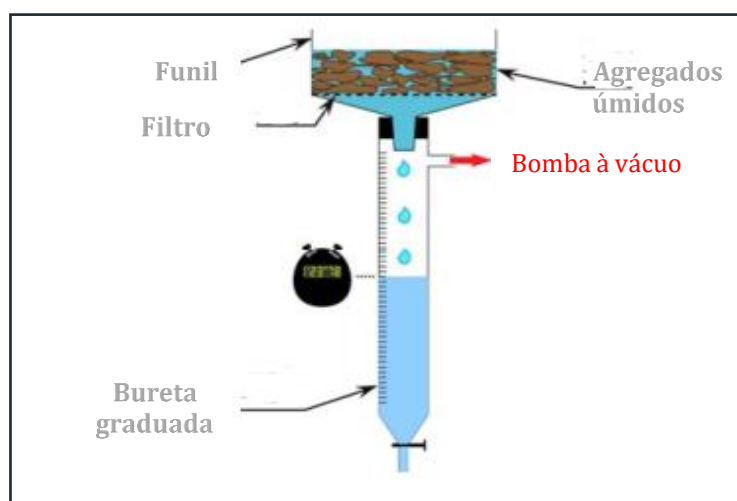


Figura 8 – Ensaio de água retida dos agregados
FONTE: Adaptado de Diederich (2010)

Após isso, traça-se a curva de retenção de água com o tempo, semelhante à mostrada na Figura 9. Onde, de acordo com Diederich (2010), são definidas três partes, as quais dizem respeito às três partes de água contidas na amostra:

- **Trecho AB:** porção linear correspondente à filtração de água em excesso;
- **Trecho BC:** corresponde à destruição progressiva dos meniscos capilares entre os grãos; e
- **Trecho CD:** filtração de água contido nos poros dos agregados.

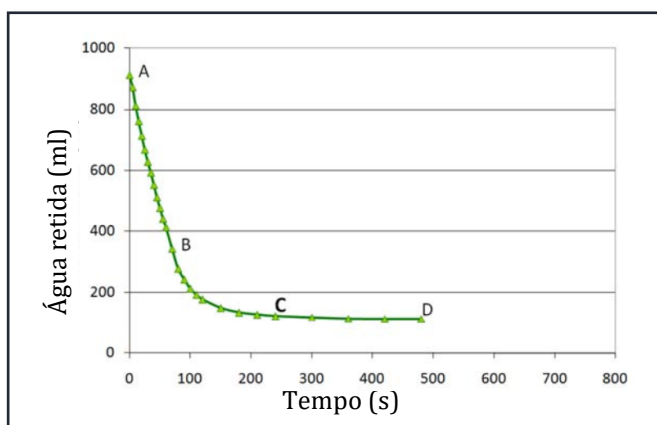


Figura 9 - Medição de água retida pelos agregados.
FONTE: Diederich (2010)

O volume de água retido pelo esqueleto granular será ajustado pelo ponto C', na interseção das tangentes em AB e CD (Figura 10).

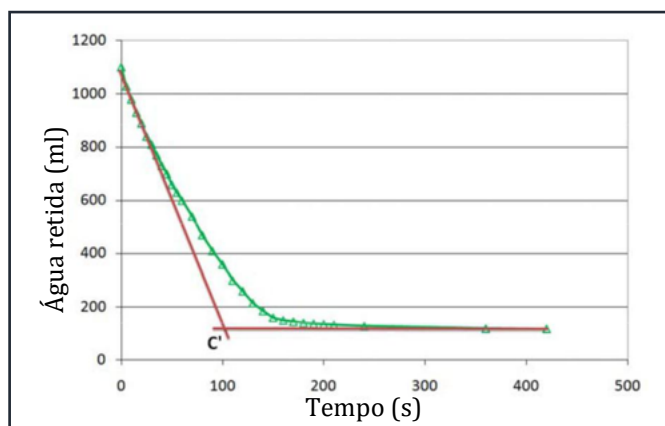


Figura 10 - Determinação do ponto C' correspondente à água retida.
 FONTE: Diederich (2010)

O valor encontrado é convertido por cálculo para porcentagem de água retida por volume de agregado. Em outras palavras, o volume de água retida representará uma porcentagem do volume conhecido de agregado utilizado no ensaio. Essa medida pode conter uma dispersão significativa, ao passo que, para um intervalo de confiança de 95%, realizaram-se 5 medidas.

7.3.2 Determinação da proporção dos materiais constituintes do CAA

7.3.2.1 Proporção dos materiais constituintes da pasta

Para determinação das proporções dos materiais constituintes do CAA, optou-se por não trabalhar com as dosagens, o que implicaria na realização de diversos experimentos para a sua determinação, levando-se em conta a quantidade de componentes na composição da mistura (água, cimento, fíleres e superplastificante). Assim, trabalhou-se com as proporções de massa entre os constituintes, conforme os parâmetros a seguir apresentados.

$$\text{Parâmetro 1: } \frac{\text{fíler}}{\text{cimento}} \text{ ou } \frac{F}{C}$$

$$\text{Parâmetro 2: } \frac{\text{água}}{\text{fíler} + \text{cimento}} \text{ ou } \frac{A}{F + C}$$

$$\text{Parâmetro 3: } \frac{\text{superplastificante}}{\text{fíler + cimento}} \text{ ou } \frac{SP}{F + C}$$

Fixou-se, inicialmente, uma quantidade padrão de cimento por metro cúbico de concreto, sendo essa quantidade de referência 350 kg/m³ de concreto.

Em seguida, para determinação do parâmetro 1 (P1) e do parâmetro 3 (P3), adotaram-se aqueles encontrados por Diederich (2010) por meio da técnica de redes uniformes Doeblert (1970). O ponto de partida do desenho experimental foi escolhido de modo que a composição correspondente da pasta fosse fluida e homogênea.

O parâmetro 2 (P2) foi determinado no tópico 7.3.1.1, através do ensaio de compacidade máxima. Com isso, obteve-se a determinação das proporções dos elementos da pasta do concreto.

7.3.2.2 Proporção dos agregados.

Agora, já sabida a quantidade de água que precisa ser adicionada para molhar os agregados, calculada no tópico anterior, o cálculo do volume de agregados pôde ser realizado pela equação (16), por metro cúbico de concreto, com o auxílio da Equação (17).

$$V_{Agreg} + V_{A,ret} = 1 - (V_P + V_V) \quad (16)$$

na qual,

V_{Agreg} é o volume de agregado (gráúdo + miúdo)

$V_{A,ret}$ é o volume de água retido no esqueleto granular;

V_P é o volume da pasta definido na Equação 17

V_V é o volume de vazios que é fixado em 25 l/m³ de concreto.

$$V_P = V_{Finos} + (V_{A,C} + V_{A,Ex}) + V_{SP} \quad (17)$$

na qual,

V_{Finos} é volume de finos (cimento + fíler);

$V_{A,C}$ é o volume água compacta;

$V_{A,Ex}$ é o volume de água em excesso; e

V_{SP} é volume de superplastificante.

Entretanto, para que se chegasse à definição da proporção do esqueleto granular no traço do concreto foi necessário, antes, determinar a proporção dos seus constituintes (agregado grúdo/agregado miúdo) para a qual se obtenha a máxima compacidade. Na máxima compacidade se tem o mínimo volume de vazios.

Essa medição da compacidade experimental do esqueleto granular foi realizada por meio do método desenvolvido por De Larrard (1999), indicado para partículas maiores que 100 μm , utilizando-se o protocolo de empacotamento que usa a vibração associada à compressão, com índice de compressão $K=9$, utilizado para a formulação de concreto auto-adensável.

O ensaio foi implementado no Laboratório de Química do CAA/UFPE, com adaptação do procedimento à mesa de vibração utilizada, do modelo TVR 2x1 Trillor Montana, com potência de 3 CV e faixa de velocidade de vibração de 3900 – 4800 vibrações por minuto (65 – 80 Hz), e aos aparelhos de medição (catetômetro) KM 1001 – Wild, de precisão 0,10 mm.

E consistiu em, inicialmente, preparar algumas amostras com diferentes proporções de agregados; e então, para cada uma delas, colocou-se em um recipiente cilíndrico, com diâmetro de 160 mm e altura de 320 mm, já posicionado sobre a mesa de vibração e cujas dimensões são mostradas na Figura 11. Após, foi introduzido o pistão maciço com peso de 200 N que provoca uma tensão constante de 10 KPa sobre o material confinado. Fez-se, então, uso do catetômetro para a leitura da posição inicial do pistão. Iniciou-se a vibração da mesa com frequência de 68 Hz durante 3 minutos. Esse esquema é ilustrado na Figura 12.

Por fim, foi feita uma nova leitura do pistão com a utilização do catetômetro. O volume aparente dessa amostra será medido após esse procedimento, através da altura “h” final do material compactado, de acordo com a Figura 13. Realizou-se esse procedimento para cada amostra com as diferentes proporções de agregados.

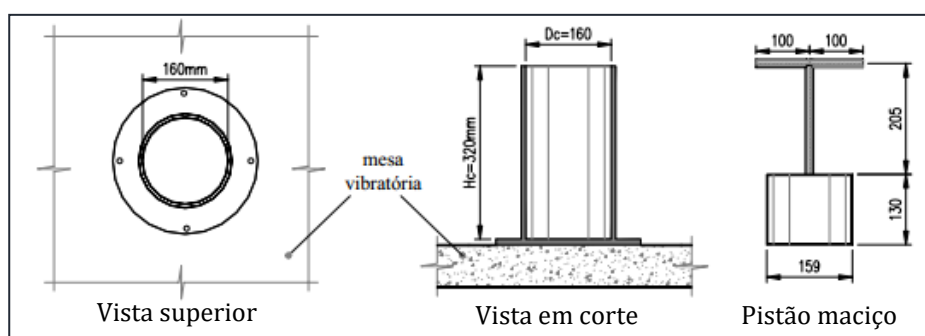


Figura 11- Cilindro metálico e pistão maciço.

FONTE: Silva (2004)

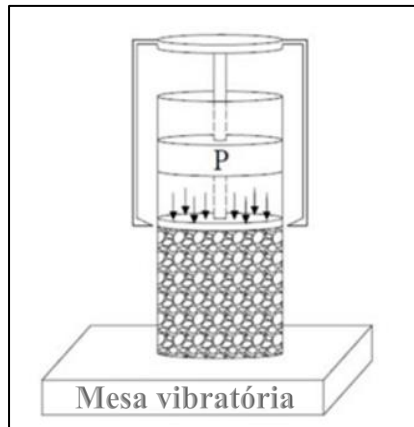


Figura 12 - Compactação experimental.
FONTE: Adaptado de El Barrak (2005)

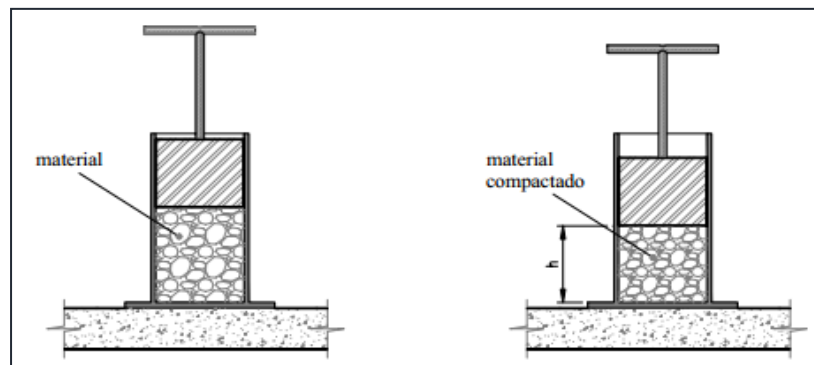


Figura 13 - Ensaio de compactação.
FONTE: Silva (2004)

De posse do valor da altura “h” final do pistão, o valor da compacidade real (experimental) de cada amostra para o protocolo descrito é dado pela Equação (18), a seguir:

$$C = \frac{4.M_S}{\pi.D_C^2.h_f.\rho_S} \quad (18)$$

na qual,

ρ_S é a densidade do material;

M_S é a massa do material seco;

D_C é o diâmetro do cilindro; e

h_f é a altura final do pistão.

7.3.2.3 Proporção do fíler alternativo (CLA) na mistura

A determinação da maior proporção permitida de fíler alternativo (CLA) na mistura foi feita de acordo com o que preconiza a ASTM C227-03 e ASTM C150-12, que estabelecem limites para o teor de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O) existentes no concreto. Devido ao fato de o fíler alternativo, a CLA, conter significativa quantidade de potássio na sua composição, cerca de 13,81%, conforme Tabela 1 do tópico 6.4 deste trabalho, sua quantidade na mistura deve ser limitada, para que não favoreça o fenômeno de reação álcali-agregado (RAA).

De acordo com Tiecher (2006), a RAA é um processo que envolve os íons de sódio (Na^+) e o de potássio (K^+), derivados do cimento (provenientes de frações argilosas como argila ou xisto), da água de amassamento, de aditivos químicos, de adições pozolânicas ou carbonáticas, entre outros; e íons hidroxilas (OH^-), além de alguns minerais que compõem os agregados. Para que a RAA possa ocorrer em estruturas de concreto, os seguintes fatores se fazem indispensáveis: concentração de hidróxidos alcalinos suficientes na solução dos poros do concreto para reagir com o agregado, agregados reativos, e umidade suficiente. Na ausência de qualquer um desses três fatores, a reação não ocorrerá (LOPES, 2004).

Por, na maioria das vezes, não ser possível a inexistência de algum desses fatores citados por Lopes, é conveniente que haja uma forma de controlar esse fenômeno, mesmo em meio à essas condições favoráveis à sua ocorrência. Isso pode ser feito através do que preconiza a ASTM C150-12, o que limitou o equivalente alcalino nos cimentos em 0,60% com o propósito de se evitar a reação entre os álcalis do cimento, ou da pasta, e os agregados reativos.

Esse valor, em porcentagem, pode ser calculado, segundo Mehta e Monterio (2008), de acordo com a Equação (19). O seu limite (0,60%), em relação à massa de cimento, decorre da origem dos cimentos com baixo teor de álcalis.

$$\text{Na}_2\text{O}_{eq} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 * \text{K}_2\text{O} \leq 0,60\% \quad (19)$$

7.3.2.4 Sequência de mistura do concreto

A sequência de mistura dos materiais, apresentada na Tabela 7, é importante para se obter a maior homogeneidade possível. Tanto a ordem de adição quanto o tempo de mistura foram pensados de modo a compatibilizar uma boa higienização com um tempo de mistura suficientemente curto para impedir o início da hidratação do cimento. Tendo em vista a sutileza desses materiais utilizados.

Tabela 7 - Sequência de mistura do CAA

Sequência	Tempo de mistura
1. Homogeneização dos materiais: (agregados e filer/cinza)	1 minuto
2. Adição de 3/5 da água de amassamento	+1 minuto
3. Adição do cimento, dos 2/5 restantes da água e de 1/3 do superplastificante	+1 minuto
4. Adição dos 2/3 restantes do superplastificante	+1 minuto
5. Possível ajuste do volume de água para a manutenção das propriedades auto-adensável da mistura.	+30 segundos por ajuste

FONTE: Diederich (2010)

7.4 Ensaios

O CAA diferencia-se dos demais concretos principalmente devido às suas propriedades no estado fresco, pelas quais é caracterizado. Isso se dá de tal modo que os métodos de caracterização aplicados aos concretos convencionais não são os mais adequados para este material. Por isso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou a ABNT NBR 15823/2010, uma norma específica para a avaliação de concretos auto-adensáveis, que prociniza seu desempenho no estado fresco (controle, classificação e aceitação). Nesse trabalho, essa norma foi utilizada e rigorosamente seguida para a realização dos ensaios a seguir apresentados, que objetivaram avaliar o CAA de acordo com as seguintes propriedades medidas: capacidade de preenchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação.

7.4.1 Ensaios no estado fresco

Os ensaios realizados para o estado fresco do CAA foram aqueles preconizados pela ABNT NBR 15823/2010 e reproduzidos estritamente segundo essa Norma para avaliação, classificação, controle e aceitação deste no estado fresco.

7.4.1.1 Ensaio de espalhamento (*Slump flow*)

O ensaio de *Slump flow*, ou de espalhamento, é feito para se determinar a capacidade de preenchimento, ou deformabilidade do CAA, sob ação do peso próprio.

Ainda, segundo alguns autores (ESPING, 2003; SHOYA *et al.*, 1999) este ensaio relaciona-se com a propriedade reológica do material sob análise. Também é possível, por este

ensaio, medir o tempo necessário para que o CAA escoe até o diâmetro de 500 mm (T_{500}), que está relacionado com a viscosidade e velocidade de fluidez. Dando-se maior aproveitamento ao ensaio, pode-se, ainda, de acordo com os autores Tutikian (2004); Repette (2005) e Gomes *et al.* (2006), ser feita uma avaliação visual da mistura para verificação da ocorrência exsudação ou segregação.

O procedimento para realização do ensaio consiste na medição do diâmetro em duas direções ortogonais entre si, conforme a Figura 14, o resultado será a média aritmética entre eles. Alguns autores como Gomes (2002); Araújo *et al.* (2003) e demais constantes na Tabela 8, estabelecem limites para os quais o espalhamento deve atender para que se assegure as características de fluidez e coesão ao concreto. Já a Tabela 9, apresenta os limites para esse mesmo ensaio estabelecidos pela ABNT NBR 15823/2010 – Parte 2 de acordo com a sua classe de espalhamento.

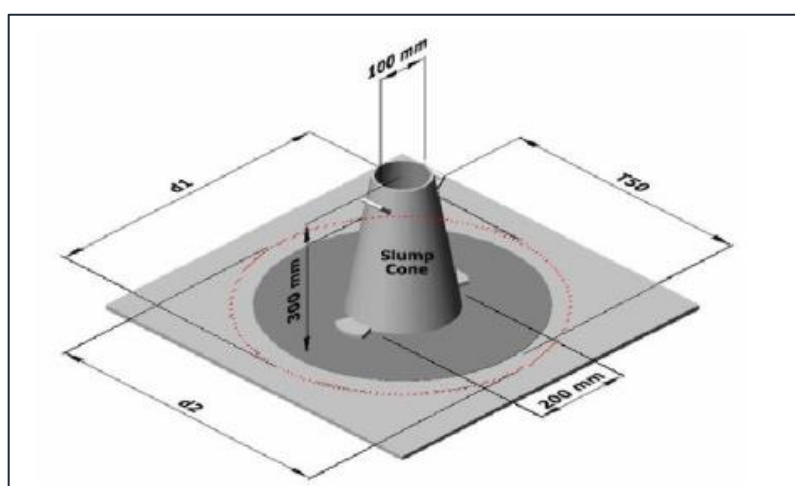


Figura 14 - Ensaio de espalhamento (Slump Flow)
FONTE: Cavalcante (2006)

Tabela 8 - Limites para o espalhamento *Slump flow*

Referência	Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC	650	800
Gomes (2002)	600	700
Araújo <i>et al.</i> (2003)	650	800
Repette (2005)	600	800

FONTE: O autor (2018)

Tabela 9 - Classe de espalhamento

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 2

Para que o ensaio T-500 possa ser realizado simultaneamente com o ensaio de espalhamento, é necessário a inscrição de um círculo de 500 mm de diâmetro no centro da base, e utilização de um cronômetro que deve ser acionado assim que o cone for erguido para a marcação do tempo em que o CAA alcança a marca de 500 mm. Assim como no ensaio de espalhamento, os mesmos autores estabelecem intervalos de tempo – apresentados na Tabela 10 – para os quais o tempo de espalhamento é considerado adequado para o concreto.

Isso significa que, estando ele dentro desse intervalo, as propriedades de fluidez e coesão estarão satisfatórias para o concreto auto-adensável. Dá mesma forma, a Tabela 11 classifica o concreto quanto à viscosidade plástica em função do tempo de escoamento medido nesse ensaio.

Tabela 10 - Limites de tempo para o ensaio T-500

Referência	Tempo (Seg.)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC	2	5
Gomes (2002)	4	10
Araújo <i>et al.</i> (2003)	2	5
Repetto (2005)	-	-

FONTE: O autor (2018).

Tabela 11 - Classe de viscosidade plástica aparente

Classe de viscosidade plástica aparente	t ₅₀₀ (seg.)
VS1	≤ 2
VS2	> 2

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 2

7.4.1.2 Índice de estabilidade visual (IEV) sob fluxo livre.

A NBR 15823/10 estabelece classes para o concreto auto-adensável de acordo com o índice de estabilidade visual (IEV) realizado durante o ensaio de espalhamento e/ou T-500. O seu resultado é determinado pela análise visual do concreto logo após o término do escoamento.

Nessa análise deve ser observada a distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da fração de argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação, e classifica-lo segundo a Tabela 12 (cuja ilustração é mostrada na Figura 15) que apresenta os valores de IEV e seus respectivos critérios para avaliar qualitativamente a estabilidade do CAA.

Tabela 12 - Classe de Índices de estabilidade visual (IEV)

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Uma pequena auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 2

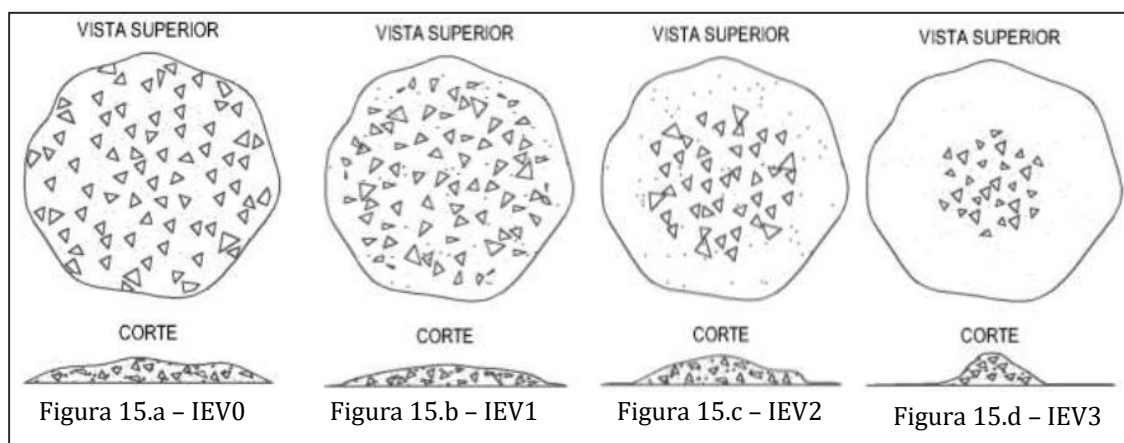


Figura 15 - Ilustração das classes de IEV do CAA.

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 2.

7.4.1.3 Anel J

Também conhecido como *J-ring test*, este ensaio consiste em avaliar a capacidade de o CAA atravessar os obstáculos – barras verticais, simulando armaduras reais - sem apresentar segregação de seus constituintes. Podendo ser tido como um complemento dos ensaios *Slump flow* + T-500.

O anel J é metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de (16 ± 3) mm de diâmetro a cada (59 ± 2) mm, conforme Figura 16, cujas dimensões estão na Tabela 13. A Norma diz que em casos particulares podem ser adotadas barras verticais com diâmetro e espaçamento definidos de forma particular, desde que o espaçamento não seja maior que três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Esse anel junto com a base e o cone Abrams compõem a aparelhagem necessária ao ensaio.

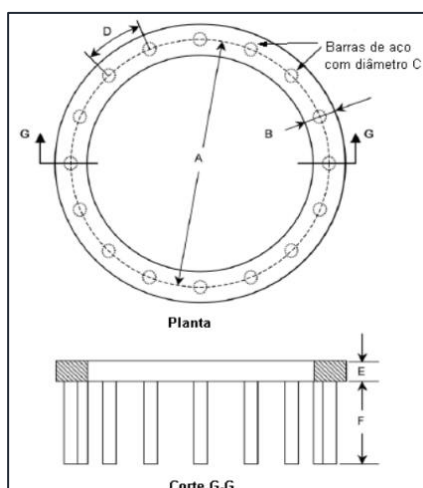


Figura 16: Dimensões do Anel J.

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 3.

Tabela 13 - Dimensões do Anel J.

Dimensões (mm)	
A	$300 \pm 3,3$
B	$38 \pm 1,5$
C	$16 \pm 3,0$
D	$59 \pm 2,0$
E	$256 \pm 1,5$
F	$120 \pm 1,5$

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 3.

Para a execução do ensaio deve-se posicionar o molde sobre a placa de base, centrando-o na marcação circular de diâmetro 200 mm, conforme Figura 17. Efetuar a desmoldagem levantando cuidadosamente o molde pelas alças, na direção vertical, até uma distância do chão de 225 ± 75 mm, com velocidade constante e uniforme em 3 ± 1 s, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. Todo o processo de preenchimento até a desmoldagem deve ser efetuado em um tempo não superior a 1 min.



Figura 17 - Anel J e cone de Abrams.
FONTE: EFNARC (2002).

E ainda, observar visualmente qualquer obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel J, e o indício de segregação, tanto no centro da amostra quanto na passagem pelas barras. Seguido todo o procedimento descrito para a realização do ensaio, o resultado será a diferença entre o diâmetro médio, calculado através da Equação (20), para o espalhamento final com a utilização do anel J (j_f), e o diâmetro médio obtido no ensaio de *Slump flow*.

$$J_f = \frac{(j_1 + j_2)}{2} \quad (20)$$

na qual,

j_1 é o diâmetro maior obtido através do ensaio do Anel J, em milímetros;

j_2 é o diâmetro menor obtido através do ensaio do Anel J, em milímetros.

Procede-se então, com esse resultado encontrado para a classificação do CAA de acordo com a Tabela 14, como previsto na ABNT NBR 15823/2010 - Parte 3.

Tabela 14 - Classes de habilidades passantes sob fluxo livre

Classe de habilidade passante sob fluxo livre	Anel J (mm)
PJ1	0 a 25
PJ2	26 a 50

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 3.

7.4.1.4 Caixa L

Nesse ensaio, determina-se a sua deformabilidade, sua resistência ao bloqueio e à segregação, observando-se a capacidade do material passar por limitações impostas, que simulam as armaduras das peças estruturais.

O ensaio é feito primeiramente fixando a caixa L em um local plano e nivelado, em seguida preenche-se a parte vertical da caixa em formato de L, mostrada na Figura 18, que possui uma passagem na parte mais baixa limitada três barras verticais, por onde o material deve passar, escoando por elas, até a parte horizontal da caixa. O excesso de concreto da superfície deve ser retirado com o auxílio da colher de pedreiro. Após $60 \text{ s} \pm 10 \text{ s}$ do final do preenchimento da câmara vertical, deve ser efetuada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal.

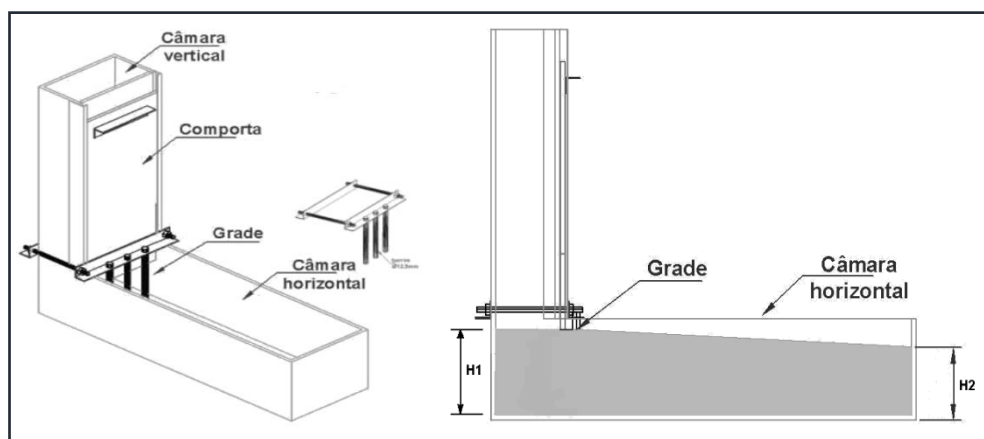


Figura 18: Caixa L.

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 4.

O resultado do ensaio será a razão (H_2/H_1) entre as alturas nas partes vertical (H_1) e horizontal (H_2) da caixa. Esse resultado, denominado razão de bloqueio, é uma indicação da facilidade com que o concreto escoar e passa por restrições impostas pelas barras que tão maior será quanto menor for esse resultado, sendo classificado quanto a sua habilidade passante sob fluxo confinado de acordo com a Tabela 15, segundo a NBR 15823/10 – Parte 4.

Tabela 15 - Classe de habilidade passante sob fluxo confinado

Classe de habilidade passante sob fluxo confinado	Caixa L(H_2/H_1)
PL1	$\geq 0,80$ com 2 barras
PL2	$< 0,80$ com 3 barras

FONTE: ABNT NBR 15823/2010 – Parte 4.

Os autores, citados nos ensaios anteriores, são unânimes na determinação de um intervalo de aceitação, trazido na Tabela 16, para a razão de bloqueio (H_2/H_1), para o qual o concreto atenderá aos critérios impostos ao CAA para esse tipo de ensaio.

Tabela 16 - Limites para a razão de bloqueio no ensaio de caixa L.

Referências	Razão de bloqueio (h_2/h_1)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC	0,80	1,00
Gomes (2002)	0,80	1,00
Araújo et. Al. (2003)	0,80	1,00
Repete (2005)	0,80	1,00

FONTE: O autor (2018).

7.4.1.5 Ensaio do Funil V (V funil test)

Este ensaio apresenta uma avaliação da capacidade do concreto de passar por seções estreitas, servindo também como indicativo da viscosidade, além de indicar a frequência de contato entre as partículas, quando são submetidas à deformação imposta por uma restrição de passagem na parte mais estreita do funil. Pois, segundo (SUGAMATA *et al.*, 2003), tanto a frequência de contato entre as partículas quanto o tempo de escoamento no funil são inversamente proporcionais à relação água/finos.

A resistência à segregação é outra propriedade do CAA à qual este ensaio está relacionado, podendo ser avaliada através da repetição do ensaio cinco minutos após a primeira determinação, e verificando se houve acréscimo de tempo, em relação à medição inicial maior que três segundos (EFNARC, 2002). Para que o concreto esteja dentro dos padrões característicos de um auto-adensável, essa medição inicial, deve estar dentro de um intervalo estabelecidos por alguns autores pesquisadores, constantes na Tabela 17.

Tabela 17 - Limites de tempo para o funil V

Referências	Tempo (Seg.)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	6	12
Gomes (2002)	10	15
Araújo <i>et al.</i> (2003)	6	12
Repetto (2005)	-	10

FONTE: O autor (2018).

Para a realização deste ensaio, o funil de seções retangulares, cujas dimensões são apresentadas na Figura 19, deve ser preenchido com o CAA, a abertura da comporta deve ser efetuada em um tempo de 10s +/- 2s após o final de seu preenchimento. O cronômetro deve ser acionado simultaneamente à abertura da comporta e parado quando todo o concreto houver escoado. O intervalo de tempo para escoamento completo do concreto (T10seg) deve ser registrado e usado para classificar o concreto quanto à classe de viscosidade plástica sob fluxo confinado, conforme a Tabela 18.

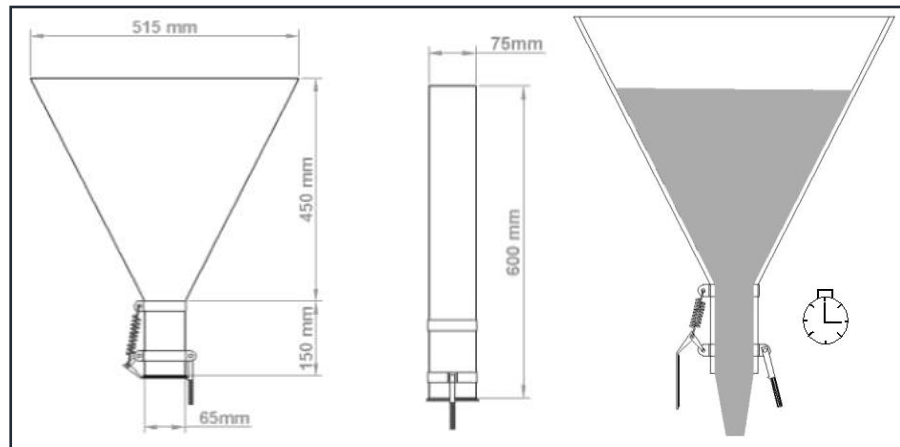


Figura 19 - Dimensões do Funil V.
 FONTE: NBR 15823/2010 – Parte 5.

Tabela 18 - Classe de viscosidade aparente sob fluxo confinado

Classe de viscosidade aparente	Funil V (seg.)
VF1	< 9
VF2	9 a 25

FONTE: NBR 15823/2010 – Parte 5.

7.4.1.6 Coluna de segregação

O ensaio para determinação da resistência à segregação do CAA, é feito pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo (m_T), e na base (m_B) da coluna de segregação, Figura 20. Após a moldagem da coluna, é aguardado 20 minutos e então devem ser retiradas, porções de concreto do topo e da base com o auxílio de uma chapa metálica, ilustrado na Figura 21.

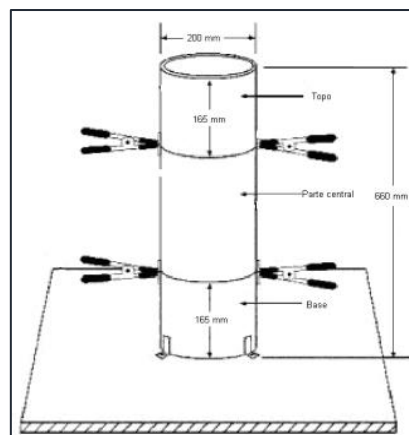


Figura 20 - Coluna de segregação.
 FONTE: NBR 15823/2010 – Parte 6.

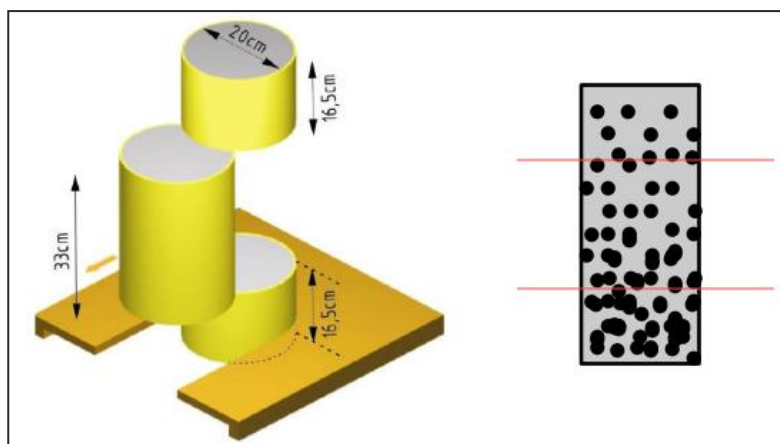


Figura 21 - Porção de agregados da base e do topo da coluna de segregação.
 FONTE: <https://www.google.com/imghp?hl=pt-pt>

Então, cada parte da amostra deve ser lavada individualmente sobre uma peneira com abertura de malha de 4,8 mm, de forma a remover totalmente a argamassa, limpando os agregados graúdos. Em seguida, devem ser submetidos a uma secagem superficial, com utilização de pano ou papel absorvente (condição saturado superfície seca, SSS). Depois, devem ser pesados, obtendo-se as massas de cada amostra.

O resultado do ensaio é dado pelo índice de resistência à segregação (SR), determinado em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base e do topo da coluna de segregação calculado a partir dos dados do ensaio através da Equação (21), e utilizado para a classificação do material cimentício quanto à resistência à segregação consoante a Tabela 19.

$$SR = \frac{2 \cdot (m_B - m_T)}{(m_B + m_T)} \cdot 100 \quad (21)$$

Tabela 19 - Classe de resistência à segregação

Classe de resistência à segregação	Coluna de segregação %
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

FONTE: NBR 15823/10 – Parte 6.

na qual,

SR é o índice de resistência à segregação;

m_B é a massa dos agregados da base, e

m_T é a massa dos agregados do topo.

7.4.2 Ensaios no estado endurecido

O controle tecnológico do concreto é importante para que se garanta as suas propriedades mecânicas e se assegure o desempenho esperado para esse material. Dentre os principais ensaios para esse tipo controle estão: ensaio de resistência à compressão, ensaio de absorção por capilaridade e ensaio de absorção total.

7.4.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados ao todo 21 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e altura igual a duas vezes o seu diâmetro, curados por imersão em água potável pelo período de tempo mínimo necessário para a realização do ensaio de compressão axial para 3, 7, 14 e 21 dias, respeitando-se a tolerância para a idade de ensaio, conforme a tabela 1 da ABNT NBR 5739/2007. Para o ensaio de absorção total foram moldados três corpos de prova para cada concreto, e seguidas as recomendações da NBR 9778/05 para corpos de prova de concreto, e também curados imersos em água potável por 21 dias.

7.4.2.2 Ensaio de compressão (3, 7, 14 e 21 dias)

Para a avaliação dessa propriedade teve-se como referência a ABNT NBR 5739/2007. Os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica servo-controlada da marca Shimadzu, com capacidade de célula de carga de 200 t, com fundo de escala de 10 t e 4 todo tipo Classe 1 para laboratórios (conforme ABNT NB NM ISO 7500-1), com um par de pratos adaptador, inferior e superior, para encaixe do neoprene, que foi o material usado para capeamento dos corpos de prova. Procedeu-se da seguinte forma:

- Os corpos de prova devem ter relação altura/diâmetro máxima de 2,02;
- Manter os corpos de prova em cura úmida ou saturada até o momento do ensaio;
- Apoiar o corpo de prova no prato inferior da prensa, centrado e com o topo de moldagem para cima;
- Escolher a escala de força de maneira que o rompimento ocorra no intervalo de calibração da prensa;
- Aplicar o carregamento continuamente e sem choques, na velocidade entre (0,30 + 0,60) MPa/segundo, até a ruptura.

7.4.2.3 Ensaio de absorção total (21 dias)

Para realização do ensaio procede-se da seguinte forma:

- a. *Secagem em estufa*: secar as amostras em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C por 72 horas. Após, retirou-se as amostras da estufa e resfriou-se em temperatura ambiente; determinou-se e registrou-se a massa das amostras secas (M_s), em gramas.
- b. *Saturação da amostra e determinação de sua massa na condição saturada e imersa em água*: completada a secagem em estufa e determinada a massa, procedeu-se à imersão da amostra em água à temperatura de (23 ± 2) °C, durante 72h. A amostra deve ser mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 h e 2/3 nas 4h subsequentes, sendo completamente imerso nas 64h restantes. Determinar a massa, decorridas 24h, 48h e 72h de imersão. As determinações devem ser efetuadas após enxugar-se a superfície da amostra com toalha absorvente. Para referência, registrar a massa da amostra após 72h de imersão em água e informar complementarmente as medidas intermediárias das massas. Calcular a absorção (A), em porcentagem, pela Equação (22). O resultado será a média das três determinações.

$$A(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (22)$$

7.4.2.4 Ensaio de absorção de água por capilaridade (21 dias)

A realização do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu o método indicado pela NBR 9779/05, que avalia a variação de massa de um corpo de prova padronizado, estando uma de suas faces imersa em água, ao longo do tempo.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados segundo o que especifica NBR 5738/15, com diâmetro de 10 cm e altura igual ao dobro desse diâmetro. As três amostras foram desmoldadas após 24 horas, e curadas imersas em água por 21 dias.

Posterior a esse período de cura, para a realização do ensaio, cumpriu-se as seguintes etapas: os corpos de prova foram secos em estufa por 72 horas à temperatura de 105 °C, obedecendo o limite expresso pela Norma (105 ± 5 °C). Em seguida, foram resfriados à temperatura ambiente (23 ± 2 °C) e então, tiveram uma de suas faces lixadas e limpas, e foram pesados, sendo registrada a medida de sua massa em gramas.

Seguindo, posicionou-se todos com sua face lixada para baixo sobre um suporte em um recipiente com nível d'água constante em 5 ± 1 mm acima da sua face inferior lixada. O posicionamento dos corpos de prova sobre o suporte foi tal, que permitiu o maior contato possível da face inferior imersa das amostras com a água.

Durante o ensaio, determinou-se a massa dos três corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contados a partir da colocação destes em contato com a água. Tendo sido todos previamente enxugados com um pano limpo e úmido a cada medição de massa. A absorção de água por capilaridade foi expressa em g/cm² e calculada pela equação (23).

$$A_{A,T} = \frac{m_T - m_0}{A_S} \quad (23)$$

na qual,

$A_{A,T}$ é a absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

m_T é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

m_0 é a massa do corpo de prova seco após resfriado em temperatura ambiente, lixado e limpo, em g; e

A_S é a área da seção transversal do corpo de prova, em cm².

8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

São apresentadas neste tópico os resultados obtidos para os ensaios e caracterizações dos materiais constituintes do CAA, objeto dessa pesquisa, abordados na metodologia experimental deste, como também, a discussão a respeito das análises: química e de caracterização física e dos ensaios no estado fresco e endurecido do material estudado.

8.1 Caracterização física do cimento e da cinza

Como diferentes marcas de cimento, mesmo sendo do mesmo tipo (CP-V ARI), podem apresentar pequenas variações em seus parâmetros físico-químicos - podendo acontecer o mesmo com cimentos da mesma marca porém de lotes distintos - realizaram-se ensaios de densidade real e área superficial específica (pelo método BET e Blaine) com o objetivo de confirmar as informações técnicas constantes na Tabela 3 desse trabalho, o mesmo foi feito para o fíler calcário e para a CLA e encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização física dos materiais finos.

Propriedade	Unidade	CP-V ARI	CLA	Fíler calcário
Área superficial (BET)	(m ² /g)	1,902	2,297	1,037
Área superficial (Blaine)	(m ² /g)	0,408	0,486	0,214
Densidade real	(g/cm ³)	3,150	2,760	2,720

FONTE: Grupo de pesquisa PPGECAM - CAA - UFPE (2018).

Para a cinza (CLA) e o cimento (CP-V ARI), tem-se na Figura 22 as suas distribuições granulométricas.

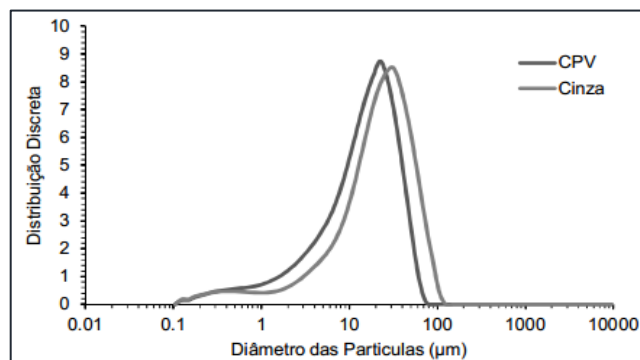


Figura 22 - Distribuição granulométrica do CP-V ARI e CLA.
FONTE: Nascimento (2014).

Uma primeira observação feita sobre as informações trazidas na Tabela 20 é que, embora os dois métodos, BET (Brunauer, Emmett e Teller) e Blaine, tenham sido empregados para conhecimento da mesma propriedade física dos materiais, a área superficial, apresentam resultados distantes.

Isso se dá devido ao fato de o método BET ser realizado por meio de equipamento eletrônico que utiliza técnica de adsorção física de moléculas de gás sobre essa superfície do material, tornando-o muito preciso em seus resultados. Enquanto que o método Blaine determina a finura do material como superfície específica baseado no tempo necessário para que uma quantidade de ar flua através de uma camada compacta do material sob condições normatizadas, requerendo, ainda, a calibragem prévia do aparelho que aumenta a probabilidade de resultados imprecisos, por conseguinte, é um método menos preciso, sendo, portanto, utilizado mais como comparativo.

Da mesma tabela, é possível extrair que os materiais apresentam elevada área superficial específica; isso significa, por consequência, uma maior demanda de água no sistema. Sobre tudo, quando utilizada a cinza, com 2,297 (m²/g), em substituição ao fíler calcário, com área superficial cerca de 54,85% menor que a da cinza. Essa afirmação ficará comprovada mais adiante nos resultados obtidos para a demanda de água compacta das pastas com o fíler calcário e com a cinza.

Na Figura 22 é mostrada a semelhança entre a distribuição granulométrica da CLA e do CP-V ARI o que pode induzir maior ou menor aceleração nas fases de hidratação do material cimentício. Fato observado nos ensaios no estado fresco do CAA. A Tabela 21 apresenta a massa específica de todos os constituintes do concreto auto-adensável utilizados no trabalho.

Tabela 21 - Densidade real dos materiais

Material	Cimento	Fíler	CLA	Areia	Brita 0	SP	Água
Densidade real (g/cm ³)	3,15	2,72	2,76	2,58	2,63	1,10	1,00

FONTE: Grupo de pesquisa PPGECAAM - CAA - UFPE (2018).

8.2 Análise microestrutural da cinza (CLA)

Observa-se nos resultados da caracterização química da CLA, obtidos por Fluorescência de Raio-X, expostos na Tabela 22, que o elemento predominante é o cálcio (77,71%), seguido do potássio, com uma quantidade ainda significativa (8,19%).

Essa quantidade expressiva de cálcio presente na cinza é característica de fíleres calcários, o que fornece um forte indício de que ela pode ser utilizada em substituição a esses fíleres. Além disso, a ABNT NBR 12653/2012 estabelece o valor mínimo de 50% para o somatório dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 , e Al_2O_3 para que um material seja tido como pozolânico, fato que não se observa na sua constituição para o somatório desses elementos, atingindo apenas a soma total de 5,03%; ou seja, muito a quem do que preconiza a citada norma. Em suma, os resultados deste ensaio colaboram fortemente para a afirmativa de que a cinza pode atuar como fíler alternativo no CAA e em outros materiais cimentícios.

Tabela 22 - Análise química por FRX da CLA e do fíler

Óxidos (%)	Material	
	Fíler	Cinza
CaO	88,89	77,71
SiO_2	5,23	2,42
MgO	3,50	3,28
Fe_2O_3	0,61	1,31
Al_2O_3	0,80	1,33
SO_3	0,09	0,99
K_2O	0,20	8,19
P_2O_5	0,09	2,56
Cl	0,01	1,21
SrO	0,57	1,00

FONTE: Grupo de pesquisa PPGECAAM - CAA - UFPE (2018).

O gráfico de difração de Raios-X do fíler calcário utilizado no traço de referência é apresentado na Figura 23; nele, se observa a predominância do composto carbonato de cálcio (CaCO_3), característico desse tipo de material. Seu pico de maior intensidade acontece, aproximadamente, em 29° para esse elemento.

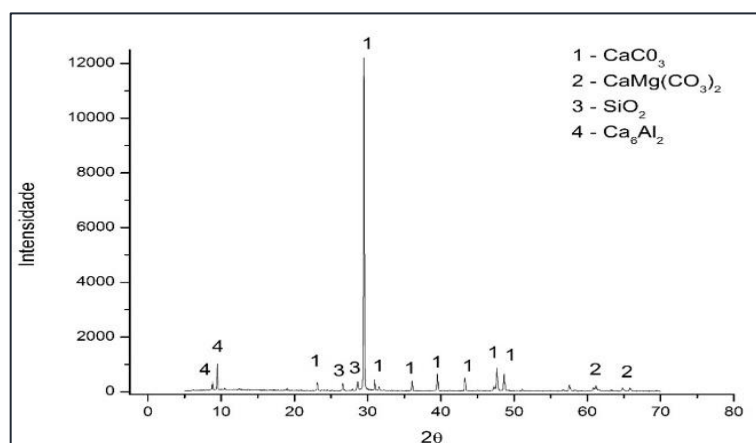


Figura 23 - Difração de Raio-X do fíler calcário.

FONTE: Grupo de pesquisa PPGECAAM - CAA - UFPE (2018).

Analisando o difratograma das cinzas leves de algaroba (CLA), Figura 24, é possível constatar que os elementos presentes estão de acordo com aqueles apresentados no FRX da cinza na Tabela 22.

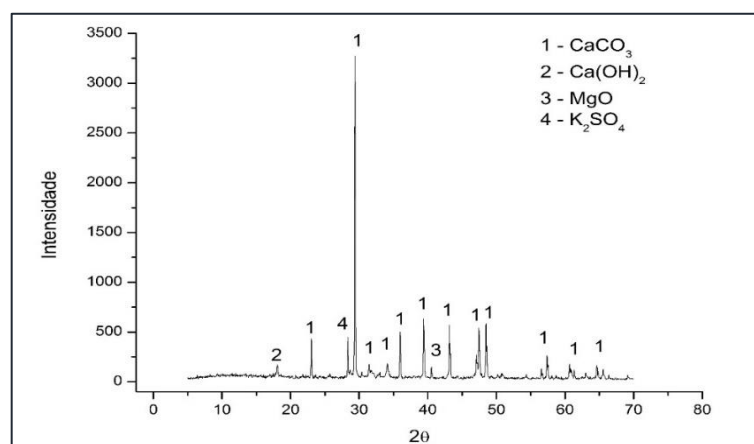


Figura 24 - Difração de Raio-X da CLA.

FONTE: Grupo de pesquisa PPGECAAM - CAA - UFPE (2018).

Além disso, o seu gráfico é muito semelhante ao do fíler calcário, com pico de maior intensidade ocorrendo também em 29°, onde também se encontra o carbonato de cálcio; evidenciando, dessa forma, que a cinza possui características e elementos constituintes muito próximos aos do fíler calcário. Ademais, isso é um fator muito favorável, uma vez que se trata de um composto químico inerte e que é facilmente encontrado em produtos cimentícios, inclusive em todos os tipos de cimento Portland. Pois é o único elemento que pode ser adicionado ao cimento CP-V na sua fabricação, até um percentual máximo de 5%, sendo o restante dele composto unicamente por clínquer.

8.3 Análise de reatividade dos agregados

Na Figura 25 é apresentada a variação dimensional em função do tempo do potencial reativo dos agregados miúdo e graúdo constituintes do CAA.

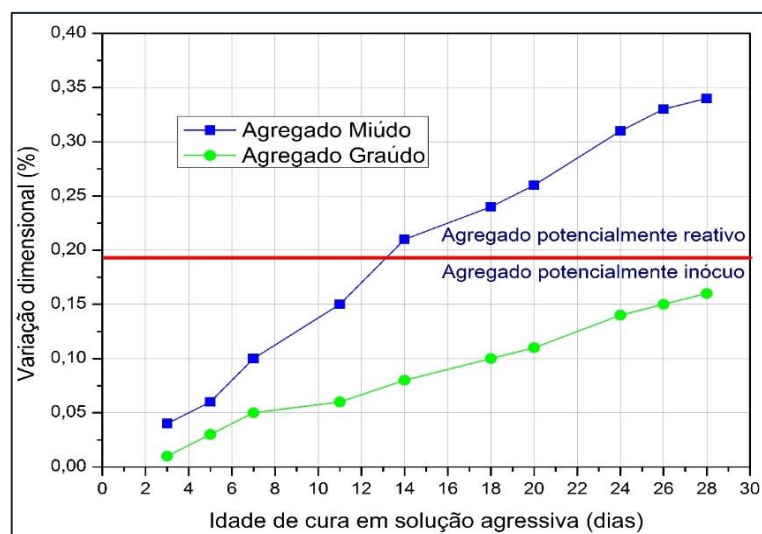


Figura 25 - Gráfico de reatividade dos agregados.
 FONTE: Grupo de pesquisa PPGE CAM - CAA - UFPE (2018).

A linha horizontal contínua a meia altura no gráfico da Figura 25 representa o limite de potencialidade inócua, ou seja, o valor limite para o qual o agregado é considerado não reativo. Nota-se, portanto, que o agregado graúdo (brita 0), pela análise feita, não apresenta potencial reativo, sendo considerado potencialmente inócua; enquanto que o agregado miúdo (areia média) apresenta potencial reativo próximo de 0,34% para 28 dias, sendo considerado potencialmente reativo.

Diante dessa análise, faz-se necessário o controle do teor de álcalis - que não diferencia entre sódio (Na_2O) e potássio (K_2O) - no cimento, e na mistura como um todo, a fim de mitigar o fenômeno de reação álcali-agregado (RAA). Por conseguinte, a presença, em quantidade significativa, de potássio (8,19%) apontada por Fluorescência de Raio-X na cinza é o fator limitante para a sua adição no concreto auto-adensável. De acordo com o que preconiza as ASTM C227-03 e ASTM C150-12, o limite para o teor de álcalis (calculado na forma de equivalente em óxido de sódio) deve ser igual ou inferior a 0,60%. Esse limite é calculado de forma prática utilizando as informações da Tabela 23 - composta por dados extraídos da Tabela 2 e da Tabela 22 - necessárias ao cálculo, e também a Equação (19) - conforme apresentada no tópico 7.3.2.3.

Tabela 23 - Teor de álcalis dos materiais.

Material	Álcali	
	Na_2O	K_2O
CP-V ARI	0,00	8,19
CLA	0,00	0,27
Fíler c	0,00	0,20

FONTE: O autor (2018).

Realizado o cálculo, o percentual máximo de substituição permitido para que não ocorra a reação álcali-agregado de forma significativa no estado endurecido do CAA, foi de 30%, para um teor de sódio equivalente de 0,5751%; abaixo, portanto, do limite de 0,60%. Isso significa que, para o total de adição, definido previamente como sendo de 35% da quantidade de referência de cimento (0,35x350 kg/m³ de concreto), apenas 30% do fíler calcário poderá ser substituído pela cinza. Colocando os valores em função dessa quantidade de referência, tem-se 24,50% de adição de fíler calcário e 10,50% de adição de cinza, totalizando os 35,00%.

Contudo, embora essa análise seja de elevado grau de importância para a viabilidade técnica do emprego da cinza no CAA, de modo a se manter o padrão de qualidade e durabilidade dos elementos estruturais confeccionados com esse material, optou-se neste trabalho pela substituição total do fíler calcário pela cinza, com a intenção de realçar os efeitos da CLA no sistema cimentício; permitindo, dessa maneira, uma análise mais determinante dos resultados obtidos.

Na Tabela 24 encontram-se resumidos os resultados do teor de sódio equivalente obtidos para a não substituição (0%), substituição parcial (30%) e substituição total (100%) do fíler por cinza. E na Tabela A1 do apêndice A, os resultados da RAA para diferentes percentuais de substituição.

Tabela 24 - **Teor de álcalis dos finos**

Substituição	Proporções (%)			Soma	Teor de álcalis
	Cimento	Cinza.	Fíler		
0%	0.7407	0	0.2593	1	0.1664
30%	0.7407	0.0778	0.1815	1	0.5751
100%	0.7407	0.2593	0	1	1.5288

FONTE: O autor (2018).

8.4 Constituição da pasta do CAA

8.4.1 Água compacta

O volume dos materiais finos constituintes da pasta do CAA foi determinado em função da quantidade de cimento; logo, a única variável a ser calculada é a água da pasta, composta pela água compacta e pela água em excesso. Na Figura 26 é apresentado o gráfico com a curva da razão de vazios para a pasta de referência.

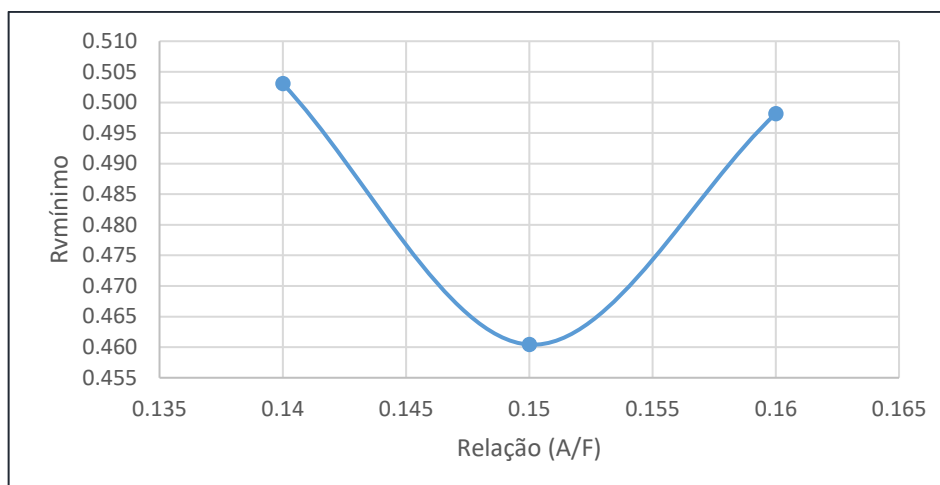


Figura 26 – Curva experimental da razão de vazios da pasta de referência
 FONTE: O autor (2018).

Foi possível encontrar a menor razão de vazios com apenas três relações água/finos diferentes, 0,14; 0,15 e 0,16; e, de acordo com o gráfico da Figura 26, os valores do $R_{v\min}$ e da relação A/F são 0,460 e 0,15; respectivamente. Com esse, calculou-se o volume de água compacta pela Equação 11, e com aquele, o valor da máxima compactidade através da Equação 9.

A Tabela 25 apresenta de forma resumida os valores calculados para a determinação da água compacta da pasta de referência, e de forma detalhada na Figura 45 do Apêndice B.

Tabela 25 - Compactidade para a pasta de referência.

Pasta experimental		Densidade da Pasta	Volume de Sólido	Razão Vazios	Compactidade
Pasta	Rel. A/F	D (g/cm³)	VS	RVmin	ϕ
1	0.14	2.25	91.42	0.503	0.665
2	0.15	2.34	94.09	0.460	0.685
3	0.16	2.34	91.72	0.498	0.667

FONTE: O autor (2018).

Da análise da Tabela 25, tem-se que, embora as pastas 2 e 3 tenham apresentado a mesma densidade de massa, 2,34 g/cm³, a pasta 2 apresenta maior volume de sólido que a 3, o que significa que há menos vazios na pasta 2 do que na pasta 3, uma vez que o volume do cilindro é constante. Ou ainda, que na pasta 3 existe uma quantidade de água maior que a necessária para preencher os vazios nela existentes.

E esse excesso, juntamente com a água presente nos vazios e os sólidos, proporcionou uma densidade de massa semelhante à da pasta 2, com menos água e mais sólidos. Além disso, conclui-se que, a máxima compactidade encontrada através dos cálculos comprova que os dados obtidos experimentalmente estão corretos.

Para colaborar com essa afirmação e se comprovar que a relação (A/F) encontrada para o $R_{v\min}$ está correta, a Figura 27 apresenta a extrapolação da mesma curva experimental da razão de vazios do gráfico anterior.

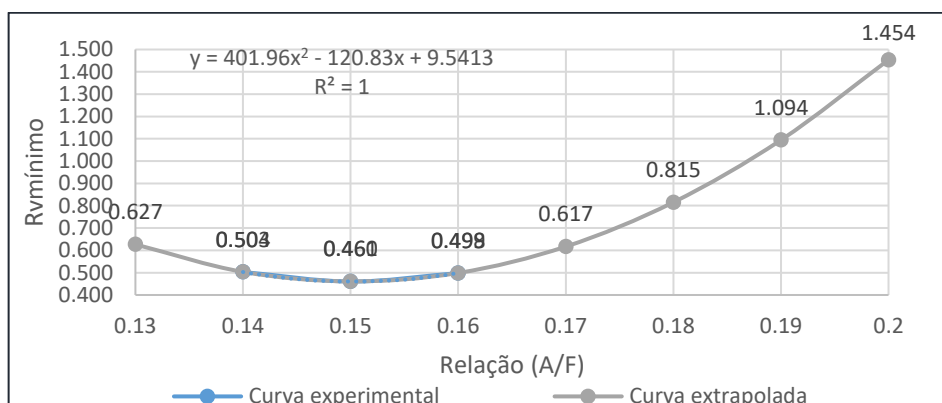


Figura 27 – Curva experimental extrapolada
FONTE: O autor (2018).

Com a extrapolação da curva no gráfico acima fica comprovado que o menor valor possível para a razão de vazios realmente é aquele encontrado no experimento. Ela apresenta comportamento exatamente igual à curva experimental, o que pode ser confirmado pelo valor do R^2 no gráfico. A curva da razão de vazios para a pasta com a cinza é trazida no gráfico da Figura 28.

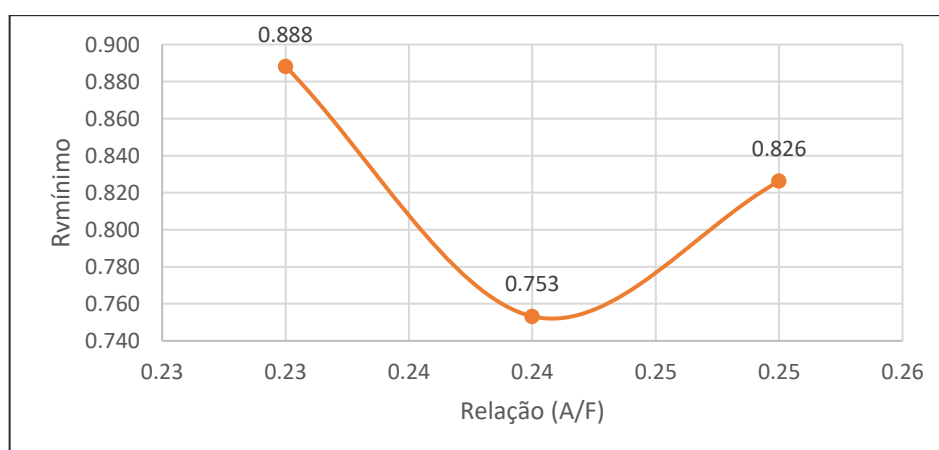


Figura 28 – Curva experimental da razão de vazios da pasta alternativa
FONTE: O autor (2018).

Como já era esperado, há uma relação água/finos maior para a pasta com substituição total por cinza (0,24), em comparação à curva do gráfico da Figura 26. Isso é explicado pelo fato da CLA possuir granulometria menor que o fíler calcário; ou seja, o diâmetro médio dos seus grãos é menor que o diâmetro médio dos grãos de fíler - o que pode ser comprovado através

da área superficial específica deles, medidas no ensaio de BET e apresentada na Tabela 20. Quanto mais fino o material, maior sua área superficial; por esse motivo, existe uma maior quantidade de vazios entre os grãos da cinza que entre os grãos do fíler. O que, por consequência, demandou uma maior quantidade de água compacta para preencher esses vazios.

Para a determinação da melhor relação A/F que promove a menor razão de vazios para a pasta com a cinza, foram necessárias sete proporções diferentes. Estas são apresentadas na Figura 29.

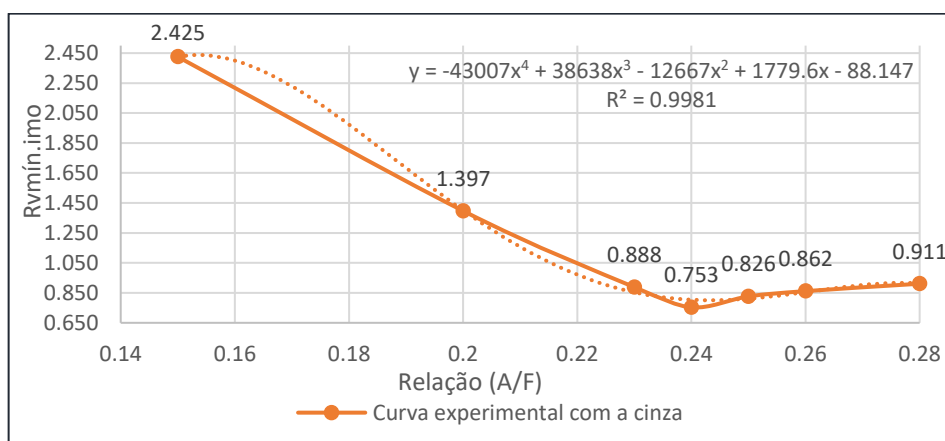


Figura 29 – Pontos da curva experimental para o R_{Vmin} da pasta alternativa
FONTE: O autor (2018).

O gráfico dessa figura, com todos os pontos experimentais da pasta alternativa, comprova que a menor razão de vazios possível é encontrada para uma proporção de água igual a 0,24. A Tabela 26 apresenta de forma resumida os valores calculados para a determinação da água compacta da pasta alternativa, e de forma detalhada na Figura 45 no Apêndice B.

Tabela 26 - Resumo dos cálculos para a água compacta da pasta alternativa

Pasta experimental		Densidade Pasta	Volume de Sólido	Razão Vazios	Compacidade
Pasta	Rel. A/F	D (g/cm ³)	VS	RVmin	ϕ
1	0.15	1.00	40.12	2.425	0.292
2	0.20	1.52	57.32	1.397	0.417
3	0.23	1.98	72.78	0.888	0.530
4	0.24	2.11	78.38	0.753	0.570
5	0.25	2.04	75.25	0.826	0.548
6	0.26	2.02	73.81	0.862	0.537
7	0.28	2.03	71.91	0.911	0.523

FONTE: O autor (2018)

Os cálculos para a determinação da máxima compacidade mostram, por meio do seu resultado, que os dados obtidos no experimento para a água da pasta alternativa estão coerentes. E observa-se que a pasta com cinza possui maior compacidade que a pasta com adição do fíler. A explicação para isso é o fato da massa específica da cinza ser maior que a do fíler, e também que, em consequência disso, a cinza ocupa um volume menor para a mesma quantidade de massa, medida em gramas, que o fíler. E como a massa dos dois no experimento são iguais, pesados em função da massa de cimento, cabe uma quantidade maior de material fino dentro do cilindro de volume constante com a pasta adicionada de cinza do que com a pasta adicionada de fíler, implicando, logicamente, uma massa maior para aquela.

Além disso, sabido que a compacidade é diretamente proporcional à massa da pasta para o experimento mantido constante o volume; justifica-se, assim, o fato observado. No concreto auto-adensável, essa maior compacidade observada com a cinza significa maior coesão e menor índice de vazios, o que promove maior resistência e durabilidade no seu estado endurecido.

Em suma, com todos os dados extraídos do experimento e aqui discutidos, o volume de água compacta encontrado para a pasta de referência e para a pasta alternativa foi de 70,875 l/m³ de concreto e 113,400 l/m³ de concreto, respectivamente. Isto representa um aumento de cerca de 60% para esse componente do CAA.

8.4.2 Água em excesso

A determinação da água em excesso das pastas, mostrada na Tabela 27, foi feita por meio de cálculos com o auxílio das Equação (13), em função da área superficial total dos finos - que foi então determinada tendo em conta a dosagem de massa de cada componente e sua área específica, obtida pelo BET (Tabela 20) - e também, em função da espessura de água em excesso, que por sua vez está em função das propriedades reológicas dos grãos de finos na mistura.

Tabela 27 - Volume de água em excesso das pastas

Propriedade	Valor com fíler	Valor com cinza	Unidade
Espessura de água em excesso	5.00E-06	8.50E-06	cm
Superfície específica do cimento	19025	19025	cm ² /g
Superfície específica da adição	10369	22966	cm ² /g
Massa do cimento	350000	350000	g
Massa da adição	122500	122500	g
Área específica total	7.93E+09	9.47E+09	cm ²
Volume de água em excesso	39.64	80.51	Litros/m³

FONTE: O autor (2018)

É importante notar que, na Tabela 27, dos 39,64 litros de água em excesso calculados para a pasta de referência, 6,35 litros (cerce de 16%) correspondem aos grãos de fíler, enquanto que do total da água em excesso da pasta alternativa 23,91 litros (ou aproximadamente 30%) correspondem aos grãos de cinza.

Como a quantidade dessas adições é a mesma em cada pasta, significa que novamente a cinza foi a responsável pelo aumento da demanda de água, que se deu em função do BET da cinza ser 54,85% maior que o BET do fíler, e também pelo aumento da espessura de água em excesso para a pasta com cinza.

Esse aumento foi necessário devido à natureza da cinza, que deve ser levada em consideração, de acordo com os autores indiretamente citados em 7.3.1.1.2, deste trabalho. Uma vez que, para se obter os mesmos parâmetros de fluidez independentemente das propriedades da adição utilizada, diferentes espessuras de água em excesso se fazem necessárias. Ou seja, os valores da espessura de água foram ajustados de modo que as propriedades reológicas das suspensões fossem asseguradas, e se tornassem semelhantes.

Em outras palavras, esses valores foram ajustados para que se obtivesse a melhor relação possível entre as propriedades de fluxo do material cimentício constituído e as propriedades dos materiais finos (cimento, fíler e a cinza) sob a influência do superplastificante.

Nesse sentido, alguns estudos mostram que a qualidade de autoadensamento dos CAA's é estreitamente dependente das propriedades de fluxo das pastas. Por sua vez, essas propriedades de fluxo estão relacionadas com a quantidade e características do material utilizado como adição.

Uma dessas características, para o caso da cinza, que influencia fortemente as propriedades de fluxo, é a sua porosidade. Uma análise realizada pelo grupo do PPGECAAM – CAA – UFPE, mostrou que seu valor é de 0,0414 cm³/g, um valor considerado elevado. Isso faz com que ela absorva uma quantidade significativa de água, retirando essa quantidade do sistema cimentício para si e, conseqüentemente, interferindo nos parâmetros reológicos dele.

8.4.3 Composição final das pastas.

A seguir, é apresentada a Tabela 28, com o volume dos elementos constituintes das pastas, além do seu volume total.

Tabela 28 - Composição das pastas

Material	Pasta		Unidade
	Com fíler	Com cinza	
Cimento	350	350	Kg/m ³ de concreto
Fíler	122,5	-	Kg/m ³ de concreto
Cinza	-	122,5	Kg/m ³ de concreto
Superplastificante	4,72	4,72	Kg/m ³ de concreto
Rvmin.	0,460	0,753	-
Água da VAC.	70,88	113,40	L/m ³ de concreto
pasta VAEx.	39,64	80,51	L/m ³ de concreto
VAtot.	110,52	193,91	L/m ³ de concreto
Volume de pasta	271,13	353,70	L/m ³ de concreto

FONTE: O autor (2018)

Para melhor visualização da composição das pastas, a Figura 30 e a Figura 31 apresentam as informações constantes na Tabela 28 convertidas para L/m³ de concreto, para a pasta de referência e para a pasta alternativa, respectivamente.

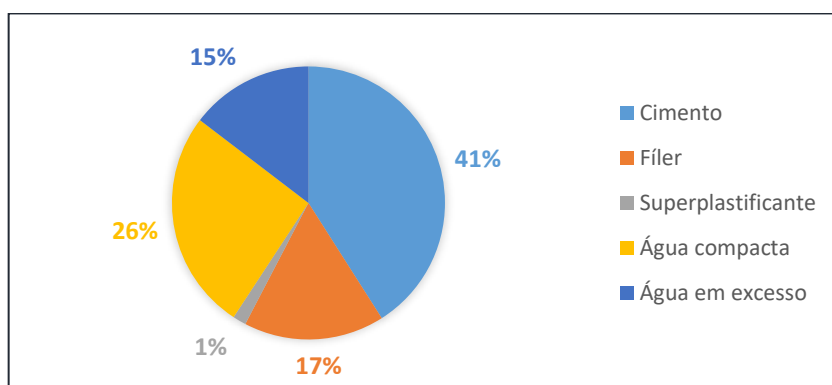


Figura 30 - Composição da pasta de referência em volume
FONTE: O autor (2018)

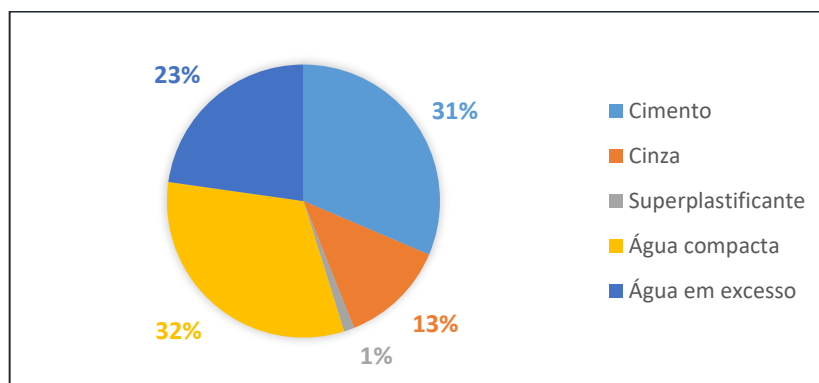


Figura 31 - Composição da pasta alternativa em volume
FONTE: O autor (2018)

Como as quantidades e proporções ideais dos insumos foram calculados para 1 m³ de concreto, ou seja, em unidade de volume, é conveniente que eles sejam obtidos na mesma unidade, e posteriormente convertidos para a unidade de interesse.

Neste ponto, não cabe fazer alguma comparação entre os dois gráficos trazidos nas figuras, pois eles apresentam volumes totais distintos, como verificados na Tabela 28, servindo apenas para melhor análise individual da sua composição, e melhor exposição dos dados.

8.5 Constituição do esqueleto granular

As diferentes proporções experimentais dos agregados constituintes do esqueleto granular, cuja medição da compacidade experimental foi feita por meio do método desenvolvido por De Larrard (1999), são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 - **Proporção dos agregados para a máxima compacidade**

Relação (Brita /Areia)	Altura (h) (cm)	Massa (kg)	Diâmetro (cm)	Massa esp. (ρ) (kg/cm³)	Compacidade (C)
0.9	20.55	7.50	16.00	0.002604	0.6971
1.0	20.47	7.50	16.00	0.002605	0.6996
1.1	18.60	7.50	16.00	0.002606	0.7697
1.2	20.36	7.50	16.00	0.002607	0.7027

FONTE: O autor (2018)

A proporção dos agregados mais adequada para o traço do CAA foi a de - 1,1 - para a qual se obteve a maior compacidade - 0,7697 - calculada pela Equação (18). Significa que para essa proporção tem-se o menor volume de vazios possível no esqueleto granular.

Com essa relação de agregados, determinou-se o volume de água do esqueleto granular, realizado por filtração sob pressão, conforme 7.3.1.2. Sua curva de retenção e o ponto C' correspondente ao seu volume são mostrados na Figura 32 e Figura 33, respectivamente.

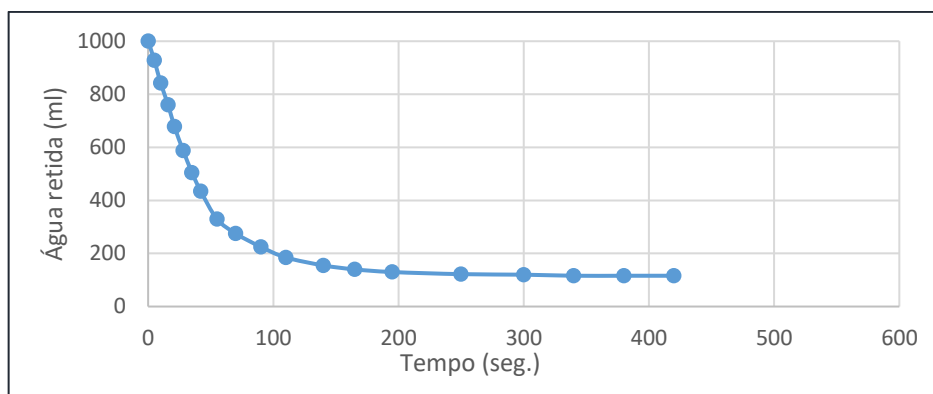


Figura 32 - Medição da água retida pelos agregados (CAA de referência)
 FONTE: O autor (2018)

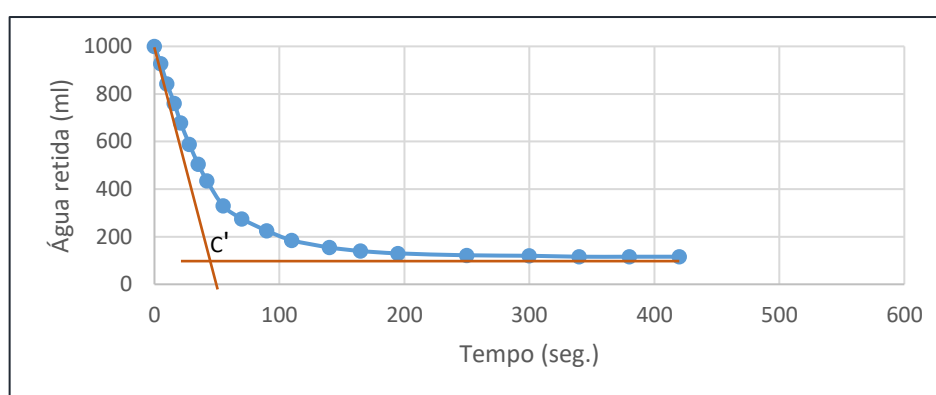


Figura 33 - Ponto C' correspondente a água retida (CAA de referência)
 FONTE: O autor (2018)

O ponto C' correspondente ao volume de água retida foi encontrado pela interseção das retas tangentes traçadas e acusou um volume de água retida igual a 80 ml. A expressão do resultado foi em seguida convertida por meio de cálculo em porcentagem de água retida por volume de agregado, considerando no cálculo as suas massas específicas. E, assim, o volume de água do esqueleto granular corresponde a 11% do seu volume.

Por fim, foi determinado o volume do esqueleto granular e o volume de sua água através da Equação (16), para um volume de vazios (V_v) igual a 25 l/m^3 de concreto. Os valores encontrados ao final foram 69,75 litros de água para o esqueleto granular e 634,12 litros, de volume de agregados para o CAA com fíler. E, de 61,57 litros de água para o esqueleto granular, e 559,73 litros de volume de agregados para o CAA com cinza.

Nota-se, que o volume de agregados para o traço com a cinza foi menor que o do traço de referência, isso é explicado pela equação utilizada no cálculo. Como os volumes são calculados para 1 m^3 de concreto, valor esse fixo, quanto maior o volume de sua pasta, menor terá de ser o seu volume de agregados.

8.6 Constituição do traço de CAA

A composição final da água de amassamento dos traços de referência e alternativo (somada a água contida no superplastificante) é mostrada nas Figuras 34 e 35, respectivamente.

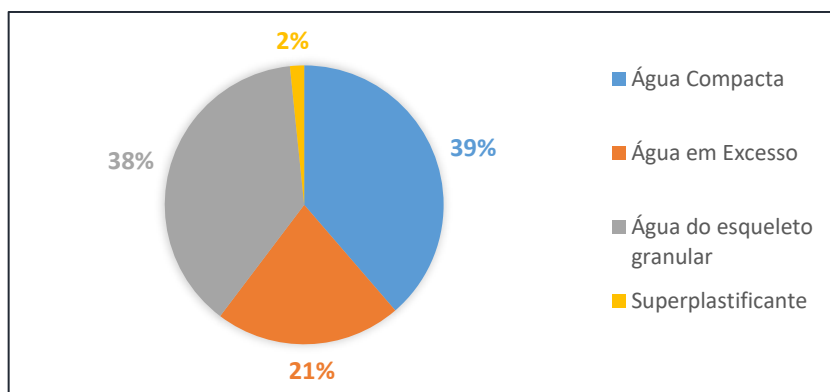


Figura 34 - Composição final da água de amassamento (CAA de referência)
 FONTE: O autor (2018)

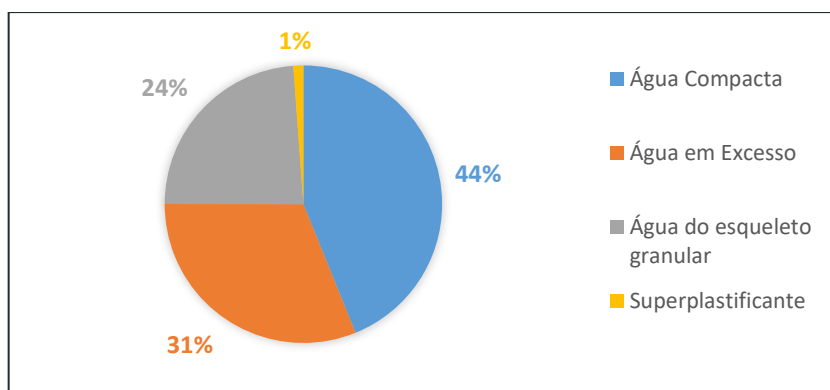


Figura 35 - Composição final da água de amassamento (CAA alternativo)
 FONTE: O autor (2018)

Embora em quantidades e proporções diferentes devido à influência da cinza na mistura, os gráficos apresentam comportamentos semelhantes. Em ambos, a maior demanda é pela água compacta; no entanto, a informação que deles se destaca é a significativa demanda de água do esqueleto granular, necessária para que se mantenha inalterada a as propriedades de fluxo da pasta. A Tabela 30 apresenta a constituição final dos traços de referência e alternativo do concreto auto-adensável, para a quantidade de 1 m³ e para a fração de 40 litros utilizada nos ensaios.

Tabela 30 - Composição do CAA

Traço de referência			Traço alternativo		
Insumo	Qtde. (kg)		Insumo	Qtde. (kg)	
	(1 m³)	(40 litros)		(1 m³)	(40 litros)
AREIA	786.97	31.48	AREIA	694.64	27.79
BRITA	865.66	34.63	BRITA	764.11	30.56
CIMENTO	350.00	14.00	CIMENTO	350.00	14.00
Fíler	122.50	4.90	Cinza	122.50	4.90
(1/3) SP	1.58	0.063	(1/3) SP	1.58	0.063
(2/3) SP	3.15	0.126	(2/3) SP	3.15	0.126
ÁGUA	180.27	7.211	ÁGUA	255.48	10.22
Rel. A/F	0.38		Rel. A/F	0.54	

FONTE: O autor (2018)

8.7 Ensaios no estado fresco

Nas Figuras de 36 a 41 são ilustrados os ensaios obtidos em laboratório. As respectivas análises e comentários que classificam os traços de CAA no estado fresco de acordo com a metodologia proposta são descritas na sequência.

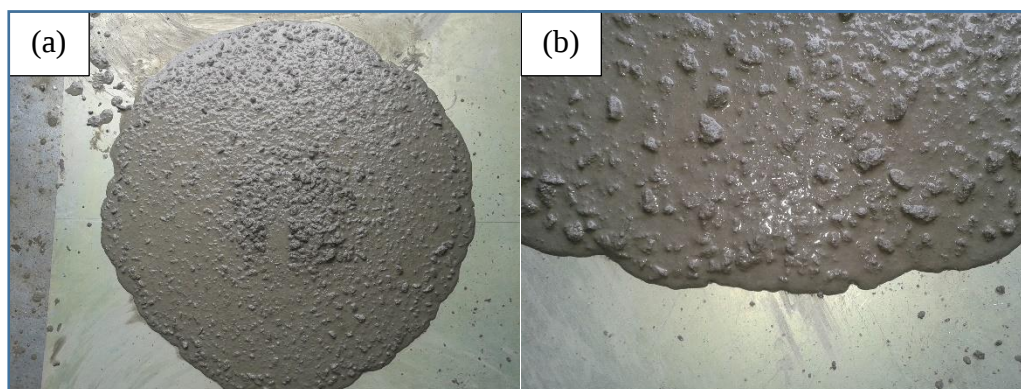


Figura 36 - Ensaio de Slump flow + T500 para o CAA de referência. (a) Espalhamento do concreto, (b) Detalhe das bordas do espalhamento do concreto.

FONTE: O autor (2018)

Na Figura 36.a, observa-se que o concreto obteve um bom espalhamento, com *Slump flow* de 685 mm, dentro dos parâmetros especificados pelos autores da Tabela 8, classificado conforme a ABNT NBR 15823/2010 como classe SF2, de acordo com a Tabela 9.

Para o ensaio de T500, o concreto atingiu o diâmetro inscrito na base em 3 segundos, atendendo ao parâmetro de tempo de Araújo *et al.* (2003) e da EFNARC, Tabela 10. Porém, não atendendo ao intervalo estabelecido por Gomes (2002) nesta mesma tabela. E, sendo classificado como classe VS2, conforme a mesma Norma.

Na Figura 36.b, uma imagem mais aproximada da borda, é possível notar que não houve exsudação, e também ver que os agregados foram espalhados de forma homogênea do centro até as bordas; não havendo, portanto, segregação. Isso evidencia a estabilidade da dosagem, porém como na Figura 36.a observa-se uma pequena auréola (≤ 10 mm) de agregado no centro do espalhamento, classifica-se como IEV de 2 (instável).

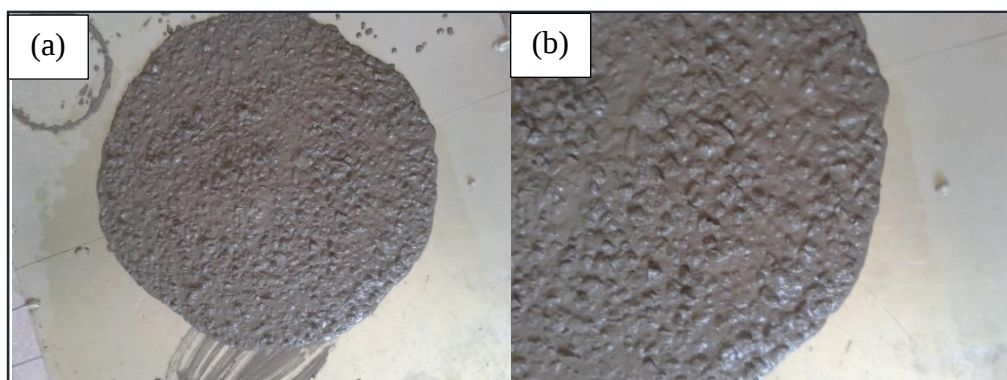


Figura 37 - Ensaio de Slump flow + T500 para o CAA alternativo. (a) Espalhamento do concreto, (b) Detalhe das bordas do espalhamento do concreto.
FONTE: O autor (2018)

Realizado as mesmas análises, agora para o CAA alternativo, observa-se na Figura 37.a, que o concreto obteve também um bom espalhamento, com *Slump flow* de 630 mm, dentro dos parâmetros especificados pelos autores da Tabela 8, classificado conforme a ABNT NBR 15823/2010 como classe SF1, de acordo com a Tabela 9.

Para atingir a marca do diâmetro de 500 mm inscrito, o concreto levou iguais 3 segundos, atendendo ao parâmetro de tempo de Araújo *et al.* (2003) e da EFNARC, Tabela 10. E não atendendo ao intervalo estabelecido por Gomes (2002) dessa tabela. E, sendo classificado como classe VS2, conforme a Norma.

Na Figura 37.b, constata-se que não houve exsudação, e também os agregados foram espalhados de forma homogênea do centro até as bordas, ainda em melhores condições que o CAA de referência. Portanto, sem evidência de segregação, o que ratifica a estabilidade da mistura e classifica-o como IEV de 0 (altamente estável).

Comparando o resultado do índice de inspeção visual, verifica-se que a cinza promoveu maior homogeneidade e coesão ao sistema, contribuindo para tornar o concreto mais estável. Por outro lado, as diferenças nos valores de espalhamento das misturas indicam um desempenho, sob o aspecto do espalhamento (fluidez), para o CAA alternativo, abaixo do esperado.

Tendo em vista que este possui maior volume de pasta, o que implica proporcionalmente em um menor volume de agregados e, por consequência disso, um menor atrito interno entre as

partículas; esse menor atrito favorece a viscosidade e a fluidez do material. Além da ação física da cinza, como filler, potencializar essas propriedades de fluidez.

A Figura 38.a e 38.b mostram o espalhamento para o ensaio do anel J (*J-Ring*) para o traço de referência.

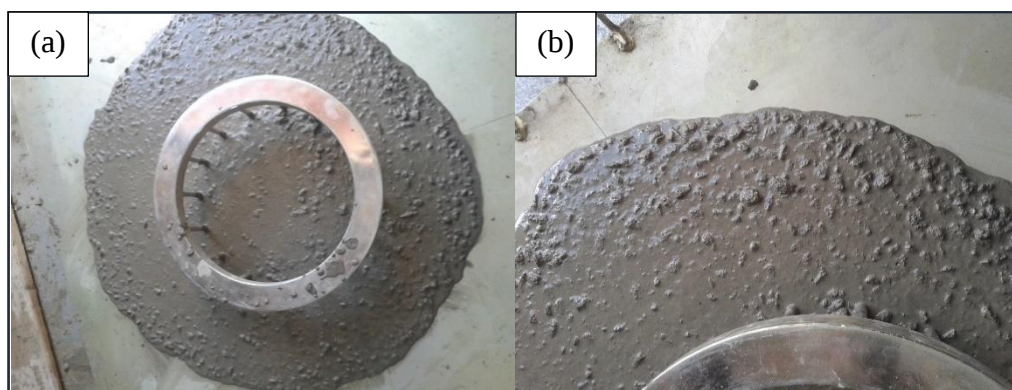


Figura 38 - Ensaio de J-Ring para o CAA de referência. (a) Espalhamento do concreto, (b) Detalhe das bordas do espalhamento do concreto.
FONTE: O autor (2018)

O resultado obtido nele foi um *flow* de 675 mm, apenas 10 mm menor que o *Slump flow*, sendo classificado de acordo com a ABNT NBR 15823/2010 como JP1. Nota-se na Figura 38.b, que não há indícios de segregação e/ou exsudação, confirmando os resultados obtidos no *Slump flow*. Para o CAA alternativo, o mesmo ensaio é ilustrado na Figura 39.

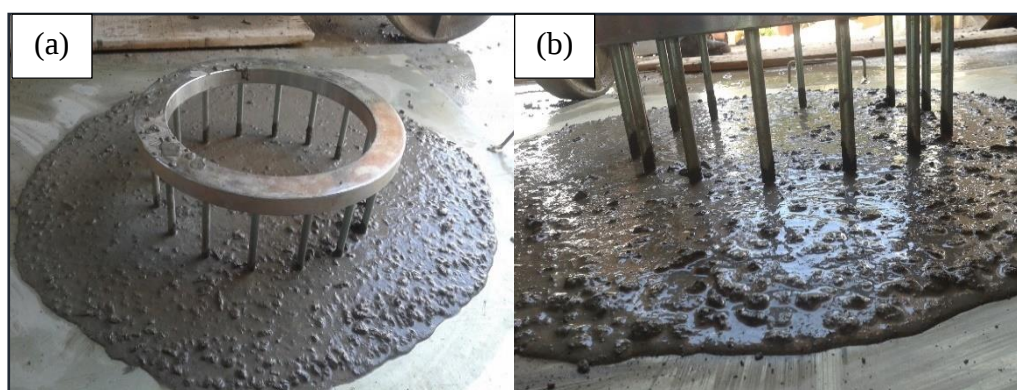


Figura 39 - Ensaio de J-Ring para o CAA alternativo. (a) Espalhamento do concreto, (b) Detalhe das bordas do espalhamento do concreto.
FONTE: O autor (2018)

Obteve-se que o concreto se apresenta com um *flow* de 596 mm, ficando apenas 34 mm menor que o seu *Slump flow*, e assim classifica-se como JP2 de acordo com a referida Norma (ABNT NBR 15823/2010). Ambas as classificações caracterizam os traços como sendo de concreto auto-adensável. Entretanto, esperava-se um diâmetro médio (J_f) mais próximo do *Slump*

flow por causa do maior volume de argamassa, que tenderia a facilitar a mobilidade entre as partículas de agregado graúdo, melhorando a fluidez da mistura e consequentemente a sua habilidade passante.

Uma possível justificativa para isso pode ser a quantidade de água no sistema que ainda está sendo retirada do meio para o interior da cinza por absorção, mesmo após a mistura ter sido completada. Todavia, os resultados são satisfatórios.

A Figura 40.a e a Figura 40.b ilustram os resultados para o ensaio de caixa L do CAA de referência e o alternativo, respectivamente.



Figura 40 - Ensaio de caixa L. (a) Ensaio de caixa L para o CAA de Referência, (b) Ensaio de caixa L para o CAA alternativo.
FONTE: O autor (2018)

Como mostrado na Figura 40.a e 40.b, o ensaio foi realizado com três barras, que simularam limitações impostas, e acusou a classe PL1 para o CAA de referência, com uma razão de bloqueio de 0,83; e classe PL2 para o CAA alternativo, com razão de bloqueio igual a 0,76. Esse resultado, corrobora com os anteriores e mostrou que o CAA alternativo apresentou dificuldade quanto à habilidade passante, não atendendo ao limite mínimo dos autores da Tabela 16.

A partir desses resultados obtidos na avaliação dos traços de CAA, acredita-se que exista ainda uma demanda de água por parte da cinza não suficientemente considerada nos cálculos da água de amassamento, que se trata da água absorvida pela cinza. E isso faz com que a CLA retire água do sistema; e, dessa maneira, haja alguma perda de qualidade na lubrificação entre as partículas de agregado, por consequência, aumentando a tensão de escoamento. E ainda, a CLA como filer alternativo age também fisicamente, preenchendo os espaços vazios da pasta

do concreto, o que o torna mais denso e viscoso. Isso, em alguma medida, pode estar influenciando a sua fluidez.

Posterior ao ensaio de caixa L, realizou-se o ensaio de funil-V para um tempo t de 10 segundos (T_{10}). Nesse ensaio, ambos os traços foram classificados como VF1, conforme a NBR 15823/10-5 com tempos T_{10} para o escoamento de 4,28 segundos e 6,54 segundos respectivamente para os traços de referência e o alternativo.

Da análise dos valores conclui-se que a resistência ao escoamento do material se relaciona de forma direta com o atrito entre as partículas de agregado; sobretudo, quando forçado entre obstáculos ou mesmo aberturas estreitas. E assim, o tempo de escoamento do CAA pelo funil-V foi influenciado por algumas de suas propriedades como densidade de massa, formato dos grãos e granulometria, além, da viscosidade da pasta. Por essa razão o concreto com maior viscosidade levou mais tempo para fluir, como visto nos resultados.

A Figura 41 ilustra o ensaio realizado para medição do índice de segregação (SR) dos materiais.

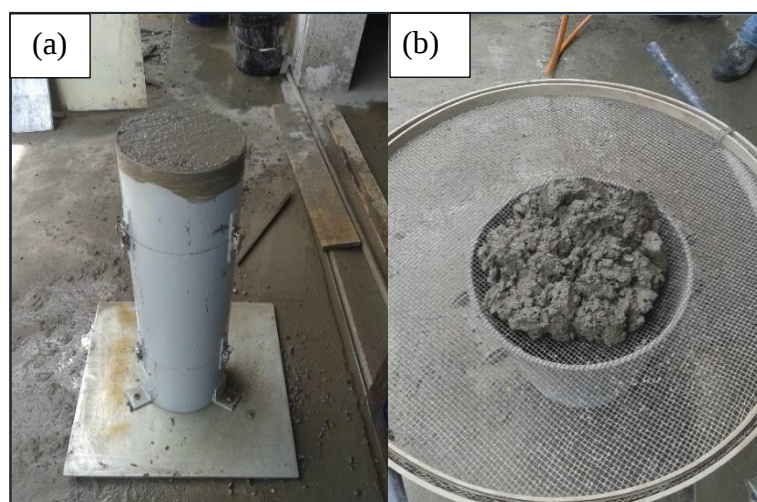


Figura 41 - Ensaio de coluna de segregação. (a) Coluna de segregação Preenchida, (b) Tratamento das porções de agregados do topo e da base. FONTE: O autor (2018)

A resistência à segregação do concreto foi determinada em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base e do topo da coluna de segregação, calculada pela Equação (21), após seguida toda a metodologia de execução. Neste quesito, o resultado do CAA de referência foi 30,56%, com massa de topo e de base iguais 3050 g e 4150 g, respectivamente. Como esse valor excede o limite máximo de 20% para o índice de segregação, de acordo a ABNT NBR 15823/2010, e como mostrado na Tabela 19, o resultado indica que houve segregação do material graúdo.

O CAA alternativo apresentou um índice de segregação de 25,09%, com massa da base igual a 4060 g e de topo igual a 3155 g. Mesmo tendo mostrado melhor desempenho no ensaio, o resultado também indicou a ocorrência de segregação. Esses resultados estão associados aos fenômenos de sedimentação, que ocorre quando o concreto está em repouso dentro das formas, caracterizando a segregação estática. Já a diferença percentual entre os resultados obtidos pode ser explicada pela diferença de densidade entre a pasta e os agregados que compõem cada traço ensaiado. Como a pasta do CAA alternativo apresenta-se mais densa (tornando, portanto, essa diferença menor) ela consegue manter os agregados em suspensão por mais tempo, agindo contra a ação da gravidade que atua neles.

Na Tabela 31 é apresentado o resumo dos os resultados obtidos para o concreto no estado fresco, bem como suas classificações conforme ABNT NBR 15823/2010.

Tabela 31 - **Resultados dos ensaios no estado fresco**

Ensaio	CAA com Fíler		CAA com Cinza	
	Resultado	Classificação	Resultado	Classificação
Slump	685 mm	SF2	630 mm	SF1
T500	3 seg.	VS2	3 seg.	VS2
IEV	2	IEV2	0	IEV0
Anel J	10 mm	JP1	34 mm	JP2
Caixa L	0.83	PL1	0.76	PL2
Funil V	4.58 seg.	VF1	6.54 seg.	VF1
Col. Segr.	30.56%	**	25.09%	**

NOTA: ** Não classificado

FONTE: O autor (2018)

8.8 Ensaios no estado endurecido

Também foram realizados ensaios no estado endurecido para se verificar a influência do fíler alternativo na resistência à compressão e na capacidade de absorção do concreto auto-adensável com cinza, em comparação com o mesmo concreto produzido com fíler calcário. Essas propriedades são essenciais para a qualidade, durabilidade e segurança das estruturas.

8.8.1 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para idades de 3, 7, 14 e 21 dias, e extrapoladas nos gráficos para 28 dias, conforme mostrado no gráfico da Figura 42. Com cura imersa em água, desde a desmolda dos corpos de prova até a realização do ensaio.

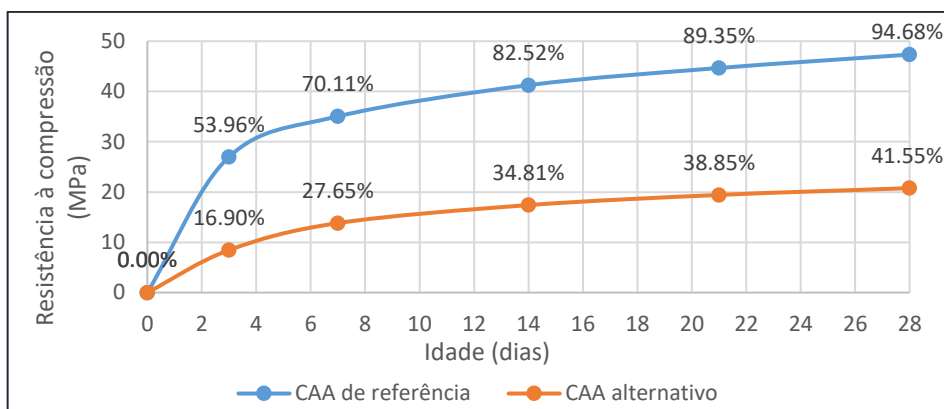


Figura 42 - Resistência à compressão dos CAA's
 FONTE: O autor (2018)

De acordo com o gráfico o desempenho do CAA com cinza se mostrou muito a quem da resistência em função das idades de cura para o CP-V ARI indicado pelo fabricante, constante na Tabela 3. De acordo com o fabricante, é esperada uma resistência média em final de cura (aos 28 dias) de 50 MPa. É possível extrair do gráfico que o concreto de referência atingiu 94,68% dessa resistência em final de cura, enquanto que o concreto com as cinzas atingiu apenas 41,55% dessa resistência para a mesma idade.

O motivo para tal resultados deve-se à interferência da elevada relação água/finos calculada para o CAA alternativo que naturalmente aumenta a porosidade do concreto e, em decorrência disso, enfraquece de forma progressiva a matriz, o que resulta em uma baixa resistência.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a relação água/finos é o mais importante fator que influencia as propriedades mecânicas do concreto, pois ela interfere tanto na porosidade da matriz da pasta de cimento como na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, fragilizando-as. Essa influência se refletiu também nos resultados dos demais ensaios no estado endurecido, em que pôde-se observar uma maior capacidade de absorção de água para o concreto com cinza em decorrência desses fatores.

8.8.2 Ensaio de absorção por capilaridade

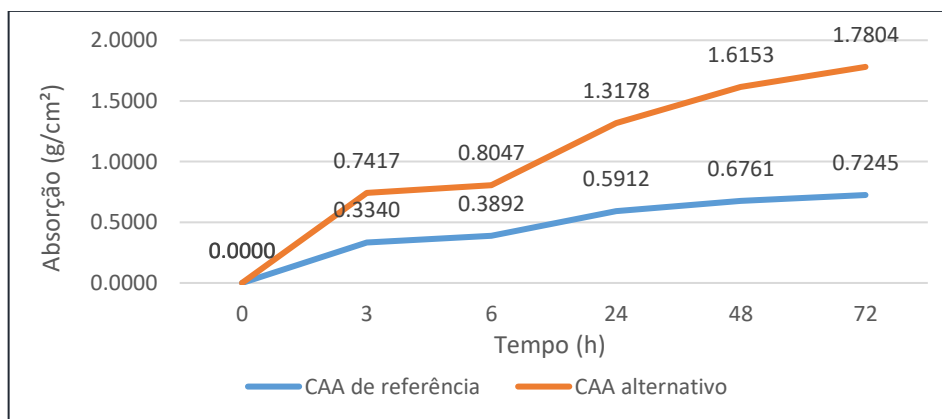
O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado para a idade de cura de 21 dias, e seus resultados apresentados na Tabela 32

Tabela 32 - Absorção de água por capilaridade

Tempo (h)	Absorção (g)	
	CAA com filer	CAA com cinza
0	0.00	0.00
3	26.23	58.14
6	30.57	63.20
24	46.43	103.50
48	53.10	126.87
72	56.90	139.83

FONTE: O autor (2018)

Embora a cinza possua menor granulometria que a adição calcária, proporcionando um melhor preenchimento dos espaços vazios entre as partículas da mistura, esse efeito foi anulado pela porosidade deixada com a evaporação da água intergranular durante o período de secagem em estufa para a realização do ensaio, de acordo com o protocolo de execução deste, especificado por norma. Esses valores são apresentados em forma gráfica na Figura 43 em g/cm², consoante a essa mesma Norma.

**Figura 43** - Absorção por capilaridade

FONTE: O autor (2018)

8.8.3 Ensaio de absorção total

O ensaio de absorção total foi realizado com corpos de prova curados por 21 dias. Ressalta-se que o ideal seria após o término do tempo de cura; no entanto, não foi possível no presente trabalho aguardar esse tempo para posterior realização dele. Os resultados são apresentados na Figura 44.

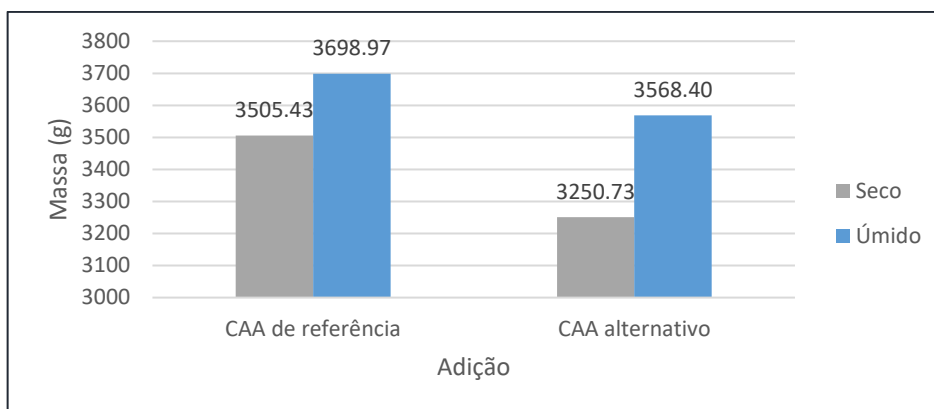


Figura 44 - Absorção total
 FONTE: O autor (2018)

Da análise gráfica realizada, percebe-se que os resultados corroboram com os dos ensaios anteriores, reafirmando a tendência de maiores índices de vazios e porosidade do concreto adicionado de cinza. Segundo a Equação (22), esse mostrou uma absorção total de 8,90%, com uma diferença final de massa de 317,67 gramas. Enquanto que o CAA de referência absorveu o equivalente a 5,23%, com diferença de 193,53 gramas de peso.

Outro ponto importante observado no gráfico da Figura 44 é a massa seca de ambos, o concreto com fíler apresenta maior massa, o que indica empiricamente menor quantidade de vazios, tendo em vista que os moldes utilizados para confecção dos corpos de prova são padronizados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta buscava, por meio de ensaios laboratoriais normatizados e caracterizações físico-químicas dos materiais de partida, determinar a viabilidade do uso das cinzas leves de algaroba provenientes das caldeiras das lavanderias do Arranjo Produtivo Local (APL) de Pernambuco como fíler alternativo no concreto auto-adensável. A otimização da dosagem de água para esse material cimentício também fazia parte do escopo. São apresentados nos parágrafos seguintes as principais observações extraídas durante a sua realização em função dos resultados obtidos, e suas respectivas conclusões.

Em se tratando da caracterização físico-química da CLA, pode-se concluir que a cinza comprovadamente pode ser utilizada como fíler alternativo em virtude do seu comportamento inerte, pois na sua composição química há baixa concentração de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , o que indica a falta de características químicas para o desenvolvimento de atividade pozolânica. Os resultados físico-químicos também mostraram que a CLA possui alta alcalinidade através da significativa quantidade de carbonato de cálcio na sua composição, o que é benéfico para um material cimentício.

Além de não apresentar óxidos expansivos e morfologia esférica, como também, apresenta a maior área superficial específica dentre os materiais finos constituintes do concreto, densidade real superior e volume inferior ao do fíler calcário, tornando o CAA mais denso e coeso, e distribuição granulométrica semelhante ao do cimento utilizado no experimento, o CP-V ARI, o que proporcionou ao sistema uma absorção de água mais lenta e uma maior retenção de água.

Ainda na análise microestrutural, um dos agregados apresentou potencial reativo para o RAA, o que impôs uma limitação na quantidade de cinza utilizada, determinada pelo teor equivalente em sódio. Por esse resultado, a cinza deveria ter sido limitada em 10,50% para que fosse mitigado esse tipo de reação indesejada.

Quanto à metodologia para otimização da dosagem de água para o CAA, se mostrou prática e eficiente no cálculo da água de amassamento dos traços, por não ter se observado, por meio dos ensaios de espalhamento e inspeção visual, em ambos os traços, exsudação e/ou segregação dos materiais.

Conquanto, o volume final calculado é passível de ajustes em ambos os concretos, como ficou demonstrado por meio do ensaio da coluna de segregação, pois o cálculo da água da pasta é determinado de forma a se conduzir à otimização das propriedades reológicas dessa pasta. A sua viscosidade resultante não foi analisada como sendo otimizada para a formulação da mistura

final. Além disso, a medição da água retida do esqueleto granular carrega uma incerteza significativa. De modo simples, significa que essa metodologia conduz a um valor para o volume de água de amassamento muito próximo do ideal.

Os materiais empregados foram adequados para a confecção de CAA, e isso representa um ponto importante na sua dosagem, uma vez que suas características, como granulometria, atuam diretamente na deformabilidade e estabilidade do concreto. O uso da brita 0 contribuiu para a obtenção das propriedades desejadas; no entanto, o teor obtido de 37,4 % para o traço de referência e 34,9% para o traço alternativo estão um pouco acima do que se tem empregado em misturas de CAA, que é de 30%, conforme a literatura.

No que se diz respeito à avaliação da influência da cinza no CAA, pôde-se observar que, com o uso da cinza, houve um aumento considerável da relação água/finos. Isso ocorreu para que fosse garantida a viscosidade adequada da mistura, atingida com base na metodologia de dosagem de água empregada. De forma tal, que não houve instabilidade no estado fresco, como ficou comprovado pelos ensaios de espalhamento e inspeção visual. Entretanto, essa elevada relação afetou o desempenho do CAA em outros quesitos, tais como o índice de resistência à compressão. Isso permite inferir que a sua utilização em menores proporções atenderá melhor aos parâmetros analisados.

No ensaio de *Slump flow*, o CAA com cinza apresentou menor diâmetro em comparação com o CAA com fíler, isso representa uma menor capacidade de preenchimento. Com o T-500, realizado simultaneamente ao *Slump*, os tempos foram equivalentes, significando que ambos possuem a mesma capacidade de fluidez.

Aproveitando ao máximo o ensaio de espalhamento, o IEV foi realizado logo em seguida, e constatou-se que o CAA com cinza se mostrou mais homogêneo com presença de agregados até à borda do espalhamento, caracterizando assim a não segregação do material, além da ausência de exsudação.

Para o ensaio do anel J (*J-Ring*) e da caixa L (*L-Box*), o CAA com fíler foi o que obteve melhor desempenho; ou seja, melhor capacidade de passar por obstáculos mantendo sua coesão. E para o tempo de escoamento, determinado pelo ensaio de funil-V, também o CAA de referência apresentou melhor tempo, conseqüentemente melhor capacidade de escoamento passando por seções pequenas.

Quando avaliada a resistência característica à compressão, os resultados do CAA alternativo mostraram-se inferiores àqueles do CAA de referência, tanto para as primeiras idades quanto para a idade final de ganho de resistência. Isso significa que a cinza interferiu no ganho de resistência à compressão do material cimentício. Embora a presença da cinza no concreto

possa ter favorecido a hidratação inicial do cimento, o que explicaria uma contribuição para o aumento de resistência nas idades iniciais, a demanda de água consequente dessa adição, em certa medida, prejudicou tal ganho.

Um ponto importante observado em todos os ensaios que pode explicar, em parte, o fato dos resultados obtidos para o CAA alternativo terem apresentado, na sua maioria, resultados inferiores aos obtidos nos mesmos ensaios para o CAA de referência, foi a rápida perda de fluidez do CAA com a cinza ao longo do tempo de realização dos ensaios. O mais baixo índice de desempenho obtido foi para o ensaio de caixa L - o qual apresenta-se como sendo o mais restritivo dentre os empregados neste trabalho, que foi realizado logo após os ensaios de espalhamento e anel J - decorrendo, em média, seis minutos desde a finalização da mistura até a abertura do compartimento inferior da caixa para a aferição dos resultados, o concreto com cinza já apresentava aspecto menos fluido que no início.

A perda de fluidez é incomum para os CAA's, especialmente quando se considera a utilização de superplastificante neles; pois, segundo os fabricantes, seu efeito na manutenção da fluidez chega a 2 horas. Buscou-se, então, na literatura uma explicação que justificasse tal comportamento. Yamada *et al.* (1999) indicam que temperaturas elevadas podem influenciar no desempenho do superplastificante, chegando ao ponto de bloquear o seu efeito na manutenção da fluidez. Todavia, os concretos foram produzidos e ensaiados sempre no período matutino, sob temperaturas amenas.

Outra possível explicação para essa perda de fluidez registrada no CAA alternativo, poderia ser a que é apresentada por Kordtz e Breit (2003), que observaram a ocorrência de perda de fluidez do CAA em função da relação água/cimento e do teor de aditivo. Eles afirmam que quanto menor for essa relação maior será essa perda de fluidez no concreto, em decorrência da pequena espessura da água em excesso e do surgimento de uma nova camada devido à hidratação. No entanto, a relação água/finos do CAA alternativo encontrada através dos métodos de dosagem se mostrou significativamente mais elevada em comparação com a do CAA de referência.

Mas, mesmo a relação água/finos do CAA alternativo sendo elevada, em comparação com aquela, ela pode ser ainda insuficiente, devido a imprecisão no método utilizado para o cálculo da água absorvida pela cinza. Adotando essa hipótese como verdadeira, a explicação trazida por Kordtz e Breit seria a mais plausível para dilucidar a questão observada.

10 CONCLUSÕES

Em síntese, conclui-se, portanto, que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado com a produção do concreto auto-adensável (CAA) a partir da utilização de cinzas leves de algaroba (CLA) como fíler alternativo; e com a comprovação, através dos ensaios preconizados por Norma específica, da sua eficácia técnica e econômica. Além disso, os objetivos secundários também foram alcançados com a adequação do método de dosagem usado, que se mostrou pertinente para esse tipo de concreto especial.

Avaliado na condição fresca, em conformidade com a ABNT NBR 15823/2010, o CAA alternativo apresentou características e desempenho que reiteram sua identidade como concreto auto-adensável, com uma ressalva para a alteração do tempo de início de perda de fluidez. No estado endurecido, seus resultados o qualificam para o uso em alguns elementos da indústria da construção civil. Logo, é perfeitamente possível e viável, do ponto de vista técnico e econômico, a produção de CAA com o uso de cinza de algaroba – beneficiada por meio de tratamento simples - em substituição parcial do fíler calcário industrializado, preferencialmente em proporções menores que os 35% utilizado no presente trabalho.

11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo criterioso da perda de fluidez do concreto auto-adensável com a utilização de cinzas antes mesmo do tempo de início de pega do cimento. Pois, para garantir o adequado preenchimento das formas, é preciso que as características de autocompactabilidade sejam mantidas até o seu lançamento.

A realização dos mesmos ensaios para diferentes percentuais de substituição, de preferência menores que o utilizado nesse trabalho, é também um importante ponto.

Outra recomendação é o estudo para o desenvolvimento de um método mais eficaz de se determinar unicamente a quantidade de água absorvida pela cinza, sem que se comprometa ou se altere a metodologia de dosagem da água de amassamento do CAA utilizada. Já que o modo de cálculo dessa água absorvida se tratou de uma adequação, sujeita, portanto, a margens de imprecisão maiores.

Por último, sugere-se um estudo específico para a determinação do melhor tempo de mistura para o caso do CAA produzido com a utilização de cinza. Pois, como ela promove uma absorção mais lenta, em decorrência da sua distribuição granulométrica e por esta ser próxima ao do cimento (CP-V ARI), ocorre de ela continuar retirando água do sistema mesmo após a finalização da etapa de mistura dos materiais na betoneira.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1. **Concreto Auto-adensável – Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

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

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

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

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

_____. NBR 5738. **Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 7211. **Agregado para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão-de-corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – Índices de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. NBR 15577-1. **Reatividade álcali-agregado – Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 12655. **Concreto – Preparo, controle e recebimento.** Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-ISO 137: **Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland.** Rio de Janeiro, 1997

_____. NBR NM 23. **Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 76. **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (Método Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C150 / C150M - 12 **Standard Specification for Portland Cement.** West Conshohocken, 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-227: **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).** West Conshohocken, 2003.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning – A scientific approach**. E&FN Spon, London, 1999. p.1 - 72. Disponível em: < https://scholar.google.com.br/scholar?q=DE+LARRARD,+F.+Concrete+Mixture+Proportioning+%E2%80%93+A+scientific+approach.+E%26FN+Spon&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar >. Acesso em: 12 mar. 2018.

EFNARC. **Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Reino Unido, 2002. Disponível em: < <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

Construction and Building Materials. **Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash**. ELSEVIER, 15 April 2013. p. 1444 – 1450.

SEBRAE, **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Relatório final. Recife, Maio 2013.

DIEDERICH, Paco. **Contribuição ao estudo da influência das propriedades de fíleres calcários no comportamento autocompactável do concreto**. Doutorado – Engenharia Civil. Universidade de Toulouse. Toulouse, 2010.

MELO, Karoline A. - **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

NASCIMENTO, Jônatas E. - **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2014.

PIRES, Dannúbia R. - **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local (APL) de confecções pernambucano**. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2016.

ALMEIDA, Marcos H. - **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (*prosopis juliflora*) moldado sob pressão**. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2014.

BARBOSA, Marcelo O. - **produção do concreto auto-adensável (CAA) com a utilização de materiais da região de Belém-PA**. Dissertação – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2008.

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

HASSE, Jéssica A. - **Influência do uso de adição de fíler cerâmico no controle de segregação e exsudação de concretos auto-adensáveis**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2014.

FIORENTIN, Thais R. - **Influência do aditivo modificador de viscosidade e do fíler calcário no comportamento de pastas e argamassas de concreto auto-adensável**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

HARTMANN, Carine T.; HELENE, Paulo R. L. - **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

LEITE, Francisco C. M. - **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. 2007. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007.

NUNES, Sandra C. B. - **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. Dissertação - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2001.

OKAMURA, Hajime; OUSHI, Masahiro - **Self-Compacting Concrete**. 2003. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, 5-15 - Japan Concrete Institute. Japão, 2003

REPETTE, Wellington L. - **Concreto Auto-adensável**. Concreto: Ciência e Tecnologia. Vol. 2, 1a ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia/IBRACON, 2011.

TUTIKIAN, Bernardo F. - **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, Bernardo F. - **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BASF. The Chemical Company. **Ficha Técnica do Produto: MasterGlenium® 51**. Disponível em: < <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/basf/GLENIUM%2051.pdf> > Acesso em: 05 abril 2018.

Google imagens. **Imagens de ensaio de coluna de segregação**. Disponível em: < <https://www.google.com/imghp?hl=pt-pt> > Acesso em: 16 maio 2018.

APÊNDICE A: TEOR DE ÁLCALIS PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE FINOS

Com o auxílio da Equação (19) e da Tabela 22, já apresentados no neste trabalho, a Tabela A1 expõe as diferentes porcentagens de substituição do fíler por cinza com relação à quantidade de adição, definida como sendo o equivalente a 35% da massa de cimento, e seus respectivos teores de álcali.

Tabela A 1 - Teor de álcalis para diferentes porcentagens de substituição

Substituição	Cimento	Cinza Alg.	Fíler	Soma	Teor de álcalis
100%	0.741	0.259	0.000	1	1.529
80%	0.741	0.207	0.052	1	1.256
70%	0.741	0.181	0.078	1	1.120
60%	0.741	0.156	0.104	1	0.984
50%	0.741	0.130	0.130	1	0.848
40%	0.741	0.104	0.156	1	0.711
35%	0.741	0.091	0.169	1	0.643
30%	0.741	0.078	0.181	1	0.575
25%	0.741	0.065	0.194	1	0.507
20%	0.741	0.052	0.207	1	0.439
15%	0.741	0.039	0.220	1	0.371
10%	0.741	0.026	0.233	1	0.303
5%	0.741	0.013	0.246	1	0.235
0%	0.741	0.000	0.259	1	0.166

FONTE: O autor (2018)

APÊNDICE B: DETERMINAÇÃO DA ÁGUA COMPACTA DAS PASTAS

Diferentemente dos agregados, que podem ter sua compacidade determinada no estado seco, os materiais finos, cujas dimensões são inferiores a 100 μm , tem sua compacidade aferida através desse método, devido às forças entre as partículas (conhecidas como forças de Van der Waals) que se tornam relevantes frente à força da gravidade para essas dimensões.

O método objetiva determinar a máxima compacidade das pastas baseado na medição da densidade de massa para diferentes relações água/finos. Na prática, está se procurando a quantidade água com relação aos finos para a qual se obtém a maior densidade, isto é, o menor índices de vazios, consequentemente. Então, por analogia, esse índice de vazios mínimo encontrado é comensurado com uma quantidade de água mínima necessária para preencher os espaços entre os grãos em suspensão de máxima compacidade. Essa quantidade mínima é a água compacta. A seguir é apresentada a Figura 45, com o cálculo completo da água compacta da pasta de referência e da pasta alternativa.

Tabela 81: PASTA DE REFERÊNCIA																																						
Por Pao															Por Wong																							
Pasta experimental			Massa dos Materiais (g)			Amostra I			Amostra II			(H)/2			Massa Específica (g/cm³)			Volume dos Materiais (cm³)			Razão de Volume			Dados Calculados			Densidade Pasta			Volume de Sólido			Razão Vazios			Compacidade		
Pasta	Rel. A/F	Cimento	Água	Tara	Massa	M _{med}	Tara	Massa	M _{med}	Média	Cimento	Adição	SP	Água	VC	V _{Adição}	V _{SP}	V _{Água}	RC	R _{Adição}	R _{SP}	R _{Água}	Σ(p x R)	Massa (g)	V _{Calado}	D (g/cm³)	V _S	R _{min}	φ	U	φ							
1	0.14	600	20	8.1	113.4	112.9	422.2	303.3	309.9	309.3	3.15	2.700	1.1	1	190.4762	77.49077	7.36356	113.4	0.691809	0.281446	0.057645	0.419883	3.33205	309.30	137.41	2.25	91.422	0.593	0.665	0.593	0.665							
2	0.15	600	20	8.1	121.5	112.9	434	321.1	314.9	314.9	3.15	2.700	1.1	1	190.4762	77.49077	7.36356	121.5	0.691809	0.281446	0.057645	0.440288	3.41265	321.10	137.41	2.34	94.092	0.460	0.685	0.460	0.685							
3	0.16	600	20	8.1	129.6	112.9	444.5	321.6	316.1	316.1	3.15	2.700	1.1	1	190.4762	77.49077	7.36356	129.6	0.70472	0.286599	0.072944	0.479491	3.59279	321.60	137.41	2.34	91.721	0.498	0.667	0.498	0.667							
																							0.685			Máximo			0.685									

Tabela 82: PASTA ALTERNATIVA																																						
Por Pao															Por Wong																							
Pasta experimental			Massa dos Materiais (g)			Amostra I			Amostra II			(H)/2			Massa Específica (g/cm³)			Volume dos Materiais (cm³)			Razão de Volume			Dados Calculados			Densidade Pasta			Volume de Sólido			Razão Vazios			Compacidade		
Pasta	Rel. A/F	Cimento	Água	Tara	Massa	M _{med}	Tara	Massa	M _{med}	Média	Cimento	Adição	SP	Água	VC	V _{Adição}	V _{SP}	V _{Água}	R _c	R _{Adição}	R _{SP}	R _{Água}	Σ(p x R)	Massa (g)	V _{Calado}	D (g/cm³)	V _S	R _{min}	φ	U	φ							
1	0.15	600	20	8.1	121.5	112.5	409.6	137.1	111.8	249.9	138.1	249.9	138.1	137.6	137.6	137.6	121.5	0.65354	0.277764	0.058802	0.465549	3.49314	137.6	137.41	1.00	40.115	2.425	0.292	2.425	0.292	0.292							
2	0.20	600	20	8.1	162	112.5	323.5	211	111.8	316.7	206.9	316.7	206.9	208.95	208.95	208.95	162	0.708399	0.282975	0.072936	0.620493	3.64504	208.95	137.41	1.52	57.324	1.397	0.417	1.397	0.417	0.417							
3	0.23	600	20	8.1	186.3	112.5	387.5	275	111.8	380.5	268.7	380.5	268.7	271.85	271.85	271.85	186.3	0.708399	0.282975	0.072936	0.620493	3.73549	271.85	137.41	1.98	72.776	0.888	0.530	0.888	0.530	0.530							
4	0.24	600	20	8.1	194.4	112.5	403.6	291.1	111.8	400.1	288.3	400.1	288.3	289.7	289.7	289.7	194.4	0.65354	0.277764	0.058802	0.70679	3.69243	289.7	137.41	2.11	78.377	0.753	0.570	0.753	0.570	0.570							
5	0.25	600	20	8.1	202.5	112.5	391.6	280.1	111.8	392.4	280.6	392.4	280.6	280.35	280.35	280.35	202.5	0.65354	0.277764	0.058802	0.729249	3.72813	280.35	137.41	2.04	75.245	0.826	0.548	0.826	0.548	0.548							
6	0.26	600	20	8.1	210.6	112.5	388.5	276	111.8	390.2	278.4	390.2	278.4	277.2	277.2	277.2	210.6	0.65354	0.277764	0.058802	0.708879	3.75333	277.2	137.41	2.02	73.814	0.862	0.537	0.862	0.537	0.537							
7	0.28	600	20	8.1	226.8	112.5	397.1	284.6	111.8	386.1	274.3	386.1	274.3	274.45	274.45	274.45	226.8	0.708399	0.282975	0.072936	0.649491	3.86061	279.45	137.41	2.03	71.910	0.911	0.523	0.911	0.523	0.523							
																							0.570			Máximo			0.570									

Figura 45 - Determinação da água compacta das pastas
 FONTE: O autor (2018)