Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

RODRIGO ARAUJO PEREIRA LIMA

CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA DA ALGAROBA COMO FÍLER ALTERNATIVO

Caruaru
2019

RODRIGO ARAUJO PEREIRA LIMA

CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA DA ALGAROBA COMO FÍLER ALTERNATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof[a] Dr[a] Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Caruaru

2019

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

L732c Lima, Rodrigo Araujo Pereira.
Concretos auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira algaroba com fíler alternativo. / Rodrigo Araujo Pereira Lima. – 2019.
79 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Concreto. 2. Algaroba (Pernambuco). 3. Resíduos como material de construção (Pernambuco). 4. Materiais de construção – Testes (Pernambuco). I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-054)

RODRIGO ARAUJO PEREIRA LIMA

CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA DA ALGAROBA COMO FÍLER ALTERNATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 21/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof[a] Dr[a] Ana Cecília Vieira da Nóbrega (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof Dr Humberto Correia Lima Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof Dr Marcos Alyssandro Soares dos Anjos (Examinador Externo)
Instituto Federal da Paraíba

Aos meus pais, José Dário e Maria José, por me ensinarem a nunca desistir e ter coragem nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e por me dar a capacidade e a paciência para concluir esse trabalho;

Aos meus pais, José Dário e Maria José, pelos ensinamentos e apoio em todos os momentos da minha vida. Às minhas irmãs, Vitória e Maria Cecília, que me auxiliaram a todo instante. À Wellany Fernanda, minha namorada, que sempre esteve ao meu lado me apoiando;

À minha orientadora, Profª. Drª. Ana Cecília Vieira da Nóbrega, pelo seu incentivo, paciência e incansável dedicação em me guiar nessa pesquisa;

Ao Sr. Sérgio, do Grupo IMAP, pela doação dos fíleres calcários;

À concreteira Polimix e ao engenheiro Clóvis Freire, pela doação do cimento CPV-ARI utilizado para produção do CAA;

À empresa BASF, pela doação do superplastificante MasterGlenium 51;

Aos técnicos do Laboratório de Materiais Construtivos Fabíola Freire e Everton, pelos auxílios com os ensaios de laboratório;

Ao técnico do Laboratório de Química, Henrique Lira, pelo auxílio com o ensaio de FRX das amostras;

À professora Drª. Érika Pinto Marinho, pela disponibilização do Laboratório de Química para realização dos ensaios;

À Marcio Couceiro Saraiva de Melo, pelo apoio nos ensaios de reatividade álcali-agregado, dando contribuições pertinentes e emprestando seus equipamentos e recipientes;

À secretaria do Programa de Pós-Graduação, nas pessoas de Marcelo e Euclécia por sempre resolverem os problemas burocráticos com toda boa vontade e paciência;

À FACEPE, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa, com a bolsa de Pós-Graduação;

Aos colegas que estiveram nesta caminhada e que contribuíram direta ou indiretamente no auxílio desse trabalho, em especial ao amigo Jonatércio Florêncio pela colaboração nas pesquisas e na execução dos ensaios.

“Eu sou a videira; vós, os ramos. Quem permanecer em mim e eu nele, esse dá muito fruto; porque sem mim nada podeis fazer. “ (BÍBLIA, N. T., João 15: 5-6).

RESUMO

Devido ao considerável crescimento no Arranjo Produtivo Local (APL) de Pernambuco verifica-se um elevado aumento na geração de resíduos, provenientes principalmente da utilização da madeira de algaroba como fonte energética no aquecimento das caldeiras usadas nas lavanderias. A cinza de algaroba é constituída basicamente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que pode vir a atuar como fíler alternativo. Os fíleres são materiais amplamente utilizados como finos na composição de concretos autoadensáveis (CAA). Nesse trabalho buscou-se realizar um estudo desse concreto com substituição parcial (0, 25, 50, 75%) e total do fíler calcário convencional pelo fíler alternativo, a fim de verificar a viabilidade da incorporação das cinzas de algaroba no CAA de modo a garantir suas propriedades de coesão, fluidez e resistência à segregação. Foram analisadas as propriedades no estado fresco e endurecido do CAA. Os traços foram otimizados utilizando o método da compacidade experimental dos agregados. Com essa pesquisa foi possível confirmar que a cinza da lenha da algaroba é um material viável para incorporação no CAA em teores de até 50%, proporcionando ganhos de resistências nas primeiras idades, mantendo as características de um concreto com propriedades autoadensáveis, além de promover benefícios com relação a durabilidade do concreto.

Palavras-chave: Cinzas de algaroba. Concreto autoadensável. Fíler.

ABSTRACT

Algaroba wood is a usual energy source used in laundry-boilers in the Local Productive Arrangement (LPA) of Clothes, Pernambuco – Brazil. However, these algaroba wood ashes are constituted primarily by calcium carbonate ($CaCO_3$), which can act as an alternative filler. The limestone fillers are widely used as fines in self-compacting concretes (SCC), being a natural resource that can be extinguished in the future. In order to verify the feasibility of the incorporation of the algaroba ashes in the SCC, self-compacting concretes (SCC) were evaluated with partial (0, 25, 50, 75%) and total replacement of the conventional limestone by the alternative filler. Cohesion, fluidity, and resistance to segregation tests were carried out according to the Brazilian Standards. Also, other fresh and hardened SCC properties were analyzed as cohesion, fluidity and resistance to segregation. The mixes were optimized using raw-materials compactness experimentally measurements. With this research, it was possible to confirm that the algaroba wood ash is a viable material for incorporation in the SCC up to 50% (by cement weight), keeping the self-compactness ability, as well as providing compressive resistance gains in the early ages, besides promoting benefits with respect to the durability of the concrete.

Keywords: Algaroba ash. Self-compacting concrete. Filler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo das composições do concreto convencional e o CAA..... 23
Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza de algaroba 35
Figura 3 - Dispositivo para mensurar a compacidade máxima experimental..... 40
Figura 4 - Dimensões do pistão cilíndrico em milímetros..... 40
Figura 5 - Comportamento da amostra durante o ensaio 41
Figura 6 - Demonstração do procedimento de ensaio de espalhamento e T500 .. 44
Figura 7 - Dimensões do Funil-V..... 45
Figura 8 - Comportamento de cada classe do IEV 46
Figura 9 - Modelo da caixa-L..... 47
Figura 10 - Indicações das alturas H_1 e H_2 48
Figura 11 - Posicionamento do Cone de Abrams no centro do Anel-J 49

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 - Metodologia adotada no trabalho..... 31

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Madeira da algaroba utilizada para aquecimento dos fornos 28
Fotografia 2 - Descarte irregular das cinzas de algaroba 29
Fotografia 3 - Fíler calcário utilizado 33
Fotografia 4 - Cinzas de algaroba seca e peneirada 34
Fotografia 5 - Relógio comparador utilizado no ensaio 38
Fotografia 6 - Medição da barra de argamassa com o relógio comparador 39
Fotografia 7 - Execução do ensaio de compacidade máxima experimental 42
Fotografia 8 - Sistema adotado para o ensaio de resistividade elétrica 52
Fotografia 9 - Execução do ensaio para determinação da resistência elétrica 53
Fotografia 10 - Agitador rotatório de frascos 54
Fotografia 11 - Análise do IEV 66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas granulométricas dos agregados 56
Gráfico 2 - Difratograma de Raios-X do fíler calcário 58
Gráfico 3 - Difratograma de Raios-X da cinza de algaroba 59
Gráfico 4 - Resultado do ensaio de reatividade dos agregados 60
Gráfico 5 - Resultados referentes ao ensaio de Slump Flow Test 63
Gráfico 6 - Resultados referentes ao ensaio T500 63
Gráfico 7 - Resultados do Anel-J 64
Gráfico 8 - Resultado da Caixa-L 65
Gráfico 9 - Resultados do funil-V 66
Gráfico 10 - Resistência à compressão dos CAA`s avaliados 67
Gráfico 11 - Comparativo da resistência à compressão de cada traço avaliado 68
Gráfico 12 - Resultados da absorção capilar para os CAAs avaliados 69
Gráfico 13 - Resultados de absorção total para os CAAs avaliados 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do cimento 32
Tabela 2 - Especificações do aditivo superplastificante 35
Tabela 3 - Sequência de mistura do CAA 43
Tabela 4 - Classe de espalhamento do CAA e seus exemplos de aplicação 43
Tabela 5 - Classe de viscosidade plástica aparente T_{500} (sob fluxo livre) 44
Tabela 6 - Classe de viscosidade plástica aparente pelo funil-V 45
Tabela 7 - Descrição das classes do IEV 46
Tabela 8 - Classe de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado) 48
Tabela 9 - Classe de habilidade passante pelo Anel J (sob fluxo livre) 50
Tabela 10 - Probabilidade de corrosão da armadura em função da resistividade 53
Tabela 11 - Resultado das massas específicas 56
Tabela 12 - Resultado das análises por BET 57
Tabela 13 - Resultados da área superficial pelo método de Blaine 57
Tabela 14 - Análise química por FRX dos fíleres calcários e da cinza de algaroba. 57
Tabela 15 - Relação AG/AM e suas respectivas alturas de amostra compactada ... 61
Tabela 16 - Consumo dos materiais para cada traço de CAA 62
Tabela 17 - Resultados para o estado fresco dos CAA`s 62
Tabela 18 - Resultado da resistividade elétrica 70
Tabela 19 - Perda de massa do concreto pelo ataque de ácidos 71

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Agregado graúdo
AM	Agregado miúdo
APL	Arranjo produtivo local
ASTM	American Society for Testing Materials
BET	Brunauer, Emmett e Taller
CAA	Concreto Auto-Adensável
CETENE	Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste
DRX	Difratometria ao raio-X
EG	Esqueleto granular
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco
FRX	Fluorescência de raio-X
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA 19
1.2 OBJETIVOS 20
1.2.1 Objetivo Geral 20
1.2.2 Objetivos Específicos 20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL 22
2.2 FÍLERES CALCÁRIOS 24
2.3 EFEITO DO FÍLER CALCÁRIO NO CAA NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO 25
2.4 APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO 26
2.5 CINZAS DE ALGAROBA 28
3 MATERIAIS E MÉTODOS 31
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS 32
3.1.1 Cimento 32
3.1.2 Agregado Miúdo 32
3.1.3 Agregado Graúdo 33
3.1.4 Fíler Calcário 33
3.1.5 Cinzas da Algaroba 33
3.1.6 Aditivo Superplastificante 35
3.1.7 Água 35
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS 36
3.2.1 Massa Específica 36
3.2.2 Área Superficial Específica (BET) 36
3.2.3 Área Superficial pelo Método de Blaine 36
3.2.4 Fluorescência de Raios-X (FRX) 36
3.2.5 Difração de Raios-X (DRX) 37
3.3 AVALIAÇÃO DE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO 37
3.3.1 Determinação do Teor de Álcalis 37
3.3.2 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa 37
3.4 METODOLOGIA PARA DOSAGEM DO CAA 39
3.4.1 Formulação do Esqueleto Granular 39

3.4.2 Formulação dos Traços do CAA 42
3.4.3 Procedimento de Mistura do CAA 42
3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO 43
3.5.1 Slump Flow Test e Tempo de Escoamento (T_{500}) 43
3.5.2 Funil-V 44
3.5.3 Índice de Estabilidade Visual 45
3.5.4 Caixa-L 47
3.5.5 Anel-J 48
3.6 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA 50
3.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO 50
3.7.1 Resistência à Compressão 50
3.7.2 Absorção Capilar 50
3.7.3 Absorção Total 51
3.7.4 Resistividade Elétrica 51
3.7.5 Ataque Ácido 54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 56
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS 56
4.1.1 Massa Específica dos Materiais 56
4.1.2 Curva Granulometria dos Agregados 56
4.1.3 Área Superficial Específica (BET) 57
4.1.4 Área Superficial pelo Método de Blaine 57
4.1.5 Fluorescência de Raios-X 57
4.1.6 Difração de Raios-X 58
4.2 AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DOS AGREGADOS 59
4.2.1 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa 59
4.2.2 Determinação do Teor de Álcalis 60
4.3 METODOLOGIA PARA DOSAGEM DO CAA 61
4.3.1 Formulação do Esqueleto Granular 61
4.3.2 Composição dos Traços de CAA 61
4.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO 62
4.4.1 Slump Flow Test 62
4.4.2 T_{500} 63
4.4.3 Anel-J 64
4.4.4 Caixa-L 65

4.4.5 Funil-V 65
4.4.6 Índice de Estabilidade Visual (IEV) 66
4.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO 67
4.5.1 Resistência à Compressão 67
4.5.2 Absorção Capilar 69
4.5.3 Absorção Total 69
4.5.4 Resistividade Elétrica 70
4.5.5 Ataque Ácido 71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 72
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 73
REFERÊNCIAS 74

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

O concreto autoadensável (CAA) é projetado com um elevado teor de finos (EFNARC, 2002; DOMONE, 2006; DIEDERICH *et al.,* 2012), que proporciona melhorias significativas com relação às propriedades de resistência à segregação e exsudação. Com isso, para que essas propriedades sejam garantidas, a incorporação de adições com características de preenchimento de vazios é uma prática muito usada, pois além de gerar uma redução do custo final do produto, melhora a trabalhabilidade do concreto (DIEDERICH *et al.,* 2012). Estudos mostraram que adições de finos no concreto, como fíler calcário, pó de granito e pó de mármore, promovem maior eficiência na redução da segregação e da exsudação (DIEDERICH *et al.,* 2012; ELYAMANY *et al.,* 2014; AGEL; PANESAR, 2016).

Em virtude do CAA incorporar um alto consumo de cimento e um elevado teor de aditivos químicos em sua dosagem, sua utilização pode ser considerada um ponto prejudicial para o meio ambiente (ESQUINAS *et al.,* 2018). Com isso é necessário o estudo da aplicação de materiais alternativos que possam atuar como substituto dos insumos naturais, proporcionando não só benefícios ambientais, mas também benefícios econômicos.

No que se refere às cinzas agroindustriais, a madeira ainda é utilizada como fonte energética em várias indústrias, em virtude de possuir baixo custo se comparado as outras fontes, como a energia elétrica e o gás natural (MOTA, 2014). Tem-se, assim, consideráveis quantidades de cinzas, muitas vezes sem destinação adequada.

Nesse contexto, a madeira da algaroba é utilizada, em grande escala, como matriz energética por lavanderias de jeans na região de Pernambuco para o aquecimento da água utilizada para tingimento do jeans. A algaroba está entre as espécies liberadas para comercialização por não ser uma espécie nativa da flora brasileira. Além disso, possui um grande desempenho calorífico (MOTA, 2014).

De acordo com Melo (2012) e Moura (2017), o APL de confecções do agreste pernambucano produz cerca de 1560 ton/mês de cinzas de madeira da algaroba, considerando que há mais de 200 lavanderias cadastradas na região, o que muitas vezes resulta em um descarte indiscriminado desse resíduo. Mota (2014) e Moura (2017) alegam que uma pequena quantidade dessas cinzas é usada de modo informal para correção da acidez do solo, sendo a maior parte desse resíduo descartada sem

critério algum. O descarte irregular das cinzas de algaroba é considerado um problema para o meio ambiente.

Estudos realizados por Leloup (2013) e Nascimento (2014) mostraram que as cinzas da algaroba são constituídas basicamente de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) inerte, podendo ser considerado um fíler alternativo natural. Fonseca (2016) afirma que o fíler calcário possui o carbonato de cálcio como principal componente. Em título de caracterização, se acrescenta que a cinza de algaroba não apresenta atividade pozolânica, nem óxidos expansivos, tendo sido incorporada com sucesso em argamassas e concreto seco moldado sob pressão (MELO, 2012; LELOUP, 2013; NASCIMENTO, 2014; PIRES, 2016). Onde, foram observadas melhorias no empacotamento do sistema proporcionando ganhos de resistência e de trabalhabilidade.

Segundo Silva e Brito (2015), a utilização de fíler calcário em concretos autoadensáveis vem se tornando cada vez mais comum, devido a proporcionar uma melhoria na matriz cimentícia pela função de preenchimento, além de sua interação com o superplastificante no estado fresco garantir a reologia adequada para moldagem.

Dessa forma, sendo o fíler calcário um insumo natural que pode se extinguir futuramente, buscou-se estudar o CAA utilizando uma solução alternativa, substituindo o fíler convencional por cinza da lenha da madeira de algaroba de modo que o concreto mantenha suas propriedades autoadensáveis, além de atribuir um destino para esse resíduo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da substituição parcial e total do fíler convencional por cinza de madeira de algaroba (fíler alternativo) em concretos autoadensáveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Produzir um esqueleto granular com elevada compacidade, através da otimização dos agregados de modo a potencializar o arranjo estrutural;
b) Verificar a viabilidade da substituição parcial e total do fíler calcário pelo fíler alternativo de modo a obter um concreto com propriedades auto adensáveis;

c) Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido do CAA produzido com substituição parcial e total do fíler convencional pelo fíler alternativo;
d) Analisar parâmetros indicativos da durabilidade do CAA, com relação ao processo de resistência ao ataque de ácidos e resistividade elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

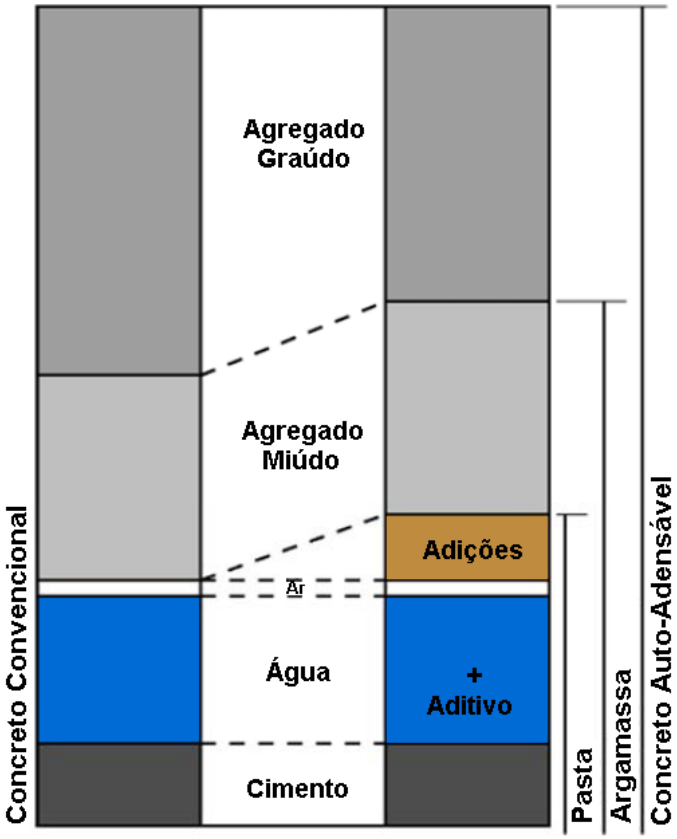
A criação de estruturas concretas duráveis requer um grau de compactação adequada das estruturas e mão de obra qualificada. Nos anos 80, a redução gradual do número de trabalhadores qualificados na indústria da construção civil do Japão levou a uma redução similar na qualidade dos trabalhos em obra (OKAMURA; OUCHI, 2003). Uma solução encontrada para a realização de estruturas de concreto duráveis, independentemente da qualidade do trabalho de construção, foi o emprego de concreto autoadensável, onde viram que o material poderia ser compactado apenas sob ação do seu peso próprio, sem necessidade de vibração (OKAMURA; OUCHI, 2003; ELYAMANY *et al.*, 2014; SILVA; BRITO, 2015; GRANATA, 2015).

O concreto auto adensável foi proposto por Okamura no ano de 1986, com a primeira utilização em 1988 utilizando materiais existentes no mercado. O concreto apresentou resultados satisfatórios com relação a secagem, endurecimento, calor de hidratação, densidade e seguiu as propriedades estabelecidas para seu estado fresco, como a auto compactação. (OKAMURA *et al.,* 2000).

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), a adição de finos no CAA proporciona uma melhoria nos estados fresco e endurecido, atuando como pontos de nucleação quebrando a inércia do sistema, fazendo com que os grãos de cimento reajam mais rapidamente com a água. Isso favorece ao concreto ganhos de resistência nas primeiras idades, pelo fato do aumento do empacotamento gerado pelas partículas finas, que elevam a compacidade da pasta, inibindo a entrada de agentes agressivos externos e melhorando a zona de transição.

O comparativo entre as composições de um concreto convencional e um concreto auto adensável pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Comparativo das composições do concreto convencional e o CAA



Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

Para o concreto ser classificado como autoadensável é necessário atender a três propriedades simultâneas como: resistência à segregação, fluidez e coesão necessária para que a mistura escoe entre barras de aço, também chamada de habilidade passante (EFNARC, 2002).

Em comparação ao concreto convencional, o CAA apresenta diversas vantagens como: redução de mão de obra no canteiro em virtude da eliminação da vibração; possui um fácil espalhamento e nivelamento; construções mais rápidas; melhores superfícies de acabamento; pode gerar uma melhoria na durabilidade das estruturas, pelo fato de possuir um melhor adensamento, reduzindo a ocorrência de falhas de concretagem resultantes da má vibração; possibilidade de concretagem de peças com alta concentração de armadura; canteiros de obra mais seguros, devido a redução do número de trabalhadores; permite grandes benefícios ambientais, pois utiliza em sua composição elevados teores de resíduos industriais como cinzas volantes, escória de alto forno ou cinza de casca de arroz (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Para obtenção do CAA, geralmente, é utilizado um consumo de cimento entre 350 kg/m³ e 450 kg/m³, pois valores acima desse intervalo podem causar retração excessiva no concreto e valores abaixo só podem ser utilizados com a adição de outros materiais cimentícios, tal como as pozolanas (EFNARC, 2002; LISBOA, 2004).

Com relação aos custos, o CAA apresenta um preço maior por metro cúbico, porém é observado ganhos econômicos com relação a redução no consumo de energia, menor utilização de mão de obra e maior velocidade de execução de concretagens (MORAES, 2010).

2.2 FÍLERES CALCÁRIOS

Fíler é definido como um pó fino originado da rocha calcária, produzido como subproduto dos trituradores de pedras. Esse material é formado pela pulverização do calcário cuja composição principal é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), geralmente possui uma estrutura porosa e superfície rugosa (NEVILLE, 1997; GHOMARI *et al.*, 2011; DE SCHUTTER, 2011; UYSAL *et al.*, 2012; MOHAMMED *et al.*, 2014).

De acordo com Neville (1997), os fíleres podem ser classificados como calcítico ou dolomítico, dependendo da sua composição química. Onde o fíler calcítico é composto predominantemente por carbonato de cálcio. Já o calcário dolomítico, é formado a partir da substituição parcial do cálcio existente na calcita pelo magnésio, dando origem a dolomita. Os autores Primavesi e Primavesi (2004) classificam os fíleres calcários com relação ao teor de óxido de magnésio da seguinte forma: a) calcítico, com teor entre 1% e 5% de MgO e 45% a 55% de CaO; b) magnesianos, de 5% a 12% de MgO e de 40% a 42% de CaO; c) dolomíticos, de 12% a 21% de MgO e de 25% a 35% de CaO.

Em geral, o fíler dolomítico é utilizado para correção da acidez do solo, devido possuir um elevado teor de oxido de magnésio (superior a 12%). No entanto, existe um problema com relação a utilização desse tipo de fíler no concreto, que pode comprometer a durabilidade das estruturas gerando reações expansivas, como a álcali-carbonato, devido ao elevado teor de magnésio que é encontrado na dolomita. Dessa forma, para produção do concreto é empregado o fíler calcítico, cujo teor do óxido expansivo é menor (NEVILLE, 1997; EFNARC; 2002).

Durante muito tempo, o fíler calcário foi considerado um material totalmente inerte (MORAES, 2010). Porém, o fíler calcário também atua no processo de hidratação do cimento através da interação entre o silicato tricálcico (C_3S) e o

carbonato de cálcio ($CaCO_3$), funcionando como agente de nucleação acelerando a hidratação dos grãos do cimento (PÉRA *et al.*, 1999; BOSILJKOV, 2003; DAL MOLIN, 2005; SILVA, 2007; MORAES, 2010). Pesquisas recentes indicam que os fíleres também possuem reatividade, com a formação de carboaluminatos e monocarboaluminatos, influenciando positivamente a microestruturas dos materiais cimentícios (MOON *et al.*, 2017; SCHÖLER *et al.*, 2017).

Segundo Sua-Iam *et al.* (2016), o uso do fíler calcário na produção do concreto auxilia no melhoramento da distribuição das partículas do esqueleto granular da mistura, garantindo um melhor arranjo do sistema e gerando uma redução da fricção entre os grãos.

2.3 EFEITO DO FÍLER CALCÁRIO NO CAA NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

A incorporação do fíler calcário no CAA é uma prática que vem sendo muito estudada, em razão desse material proporcionar uma melhoria na matriz cimentícia do concreto devido ao maior preenchimento dos vazios, que possibilita uma redução no consumo do cimento e uma melhoria das propriedades nos estados fresco e endurecido do CAA (DE SCHUTTER, 2011; GESOGLU *et al.*, 2012; UYSAL *et al.*, 2012; MOHAMMED *et al.*, 2014; SILVA; BRITO, 2015).

Além disso, a incorporação do fíler calcário no CAA proporciona maior capacidade de preenchimento da mistura, que gera impactos nas propriedades do estado fresco. Quando o fíler apresenta área superficial específica menor que a do cimento é observado melhorias na habilidade passante verificada através do ensaio da caixa L e do Anel J (UYSAL *et al.,* 2012). Para Tutikian e Dal Molin (2008), a presença do fíler no CAA auxilia no aumento da coesão, proporciona redução da exsudação e evita a segregação da mistura, permitindo melhores condições de fluidez.

De acordo Bosiljkov (2003), a adição do fíler calcário no CAA proporciona melhorias nas propriedades do estado fresco, atuando como pontos de nucleação, ou seja, quebrando a inércia do sistema fazendo com que a reação dos grãos do cimento com a água aconteça mais rapidamente.

Com relação ao estado endurecido, Domone (2006) afirma que a resistência mecânica do concreto é diretamente relacionada à composição dos finos empregados (cimento e adições minerais) e não pela relação água/finos.

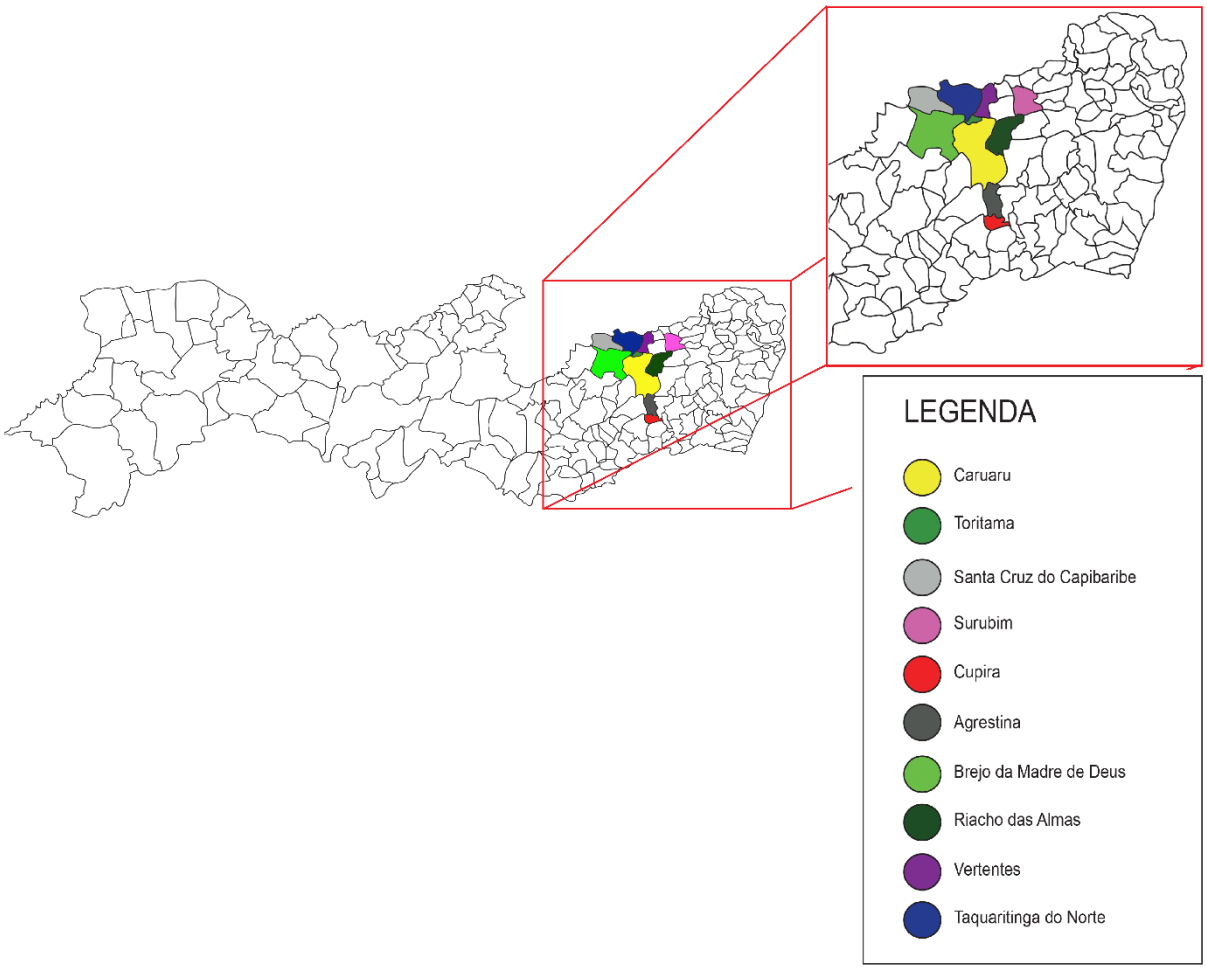
O efeito físico, proporcionado pelo fíler calcário no CAA, provoca um aumento de densidade da mistura decorrente do empacotamento entre as partículas, reduzindo a porosidade e, consequentemente, elevando a compacidade, resultando em um ganho de resistência do concreto, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (BOSILJKOV, 2003; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A atuação do fíler como ponto de nucleação faz com que o cimento reaja mais rapidamente com a água, ocasionando ganhos de resistência nas primeiras idades (BOSILJKOV, 2003).

2.4 APL DE CONFECÇÕES DE PERNAMBUCO

O Arranjo Produtivo Local (APL) é definido como um aglomerado de empresas que se estabelecem em determinado local principalmente devido às vantagens competitivas proporcionadas pela região (CARDOSO *et al.*, 2014).

O APL de confecções é caracterizado pela alta quantidade de empresas que desenvolve a mesma atividade produtiva na mesma localidade e é composto por 10 municípios: Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Brejo da Madre de Deus, Agrestina, Cupira, Vertentes, Riacho das Almas e Taquaritinga do Norte (SEBRAE, 2013). As cidades que compõem o APL de confecções pernambucano são apresentadas no Mapa 1.

Mapa 1 - Cidades que formam o APL de confecções de Pernambuco



Fonte: Sebrae (2013).

No setor da indústria têxtil local, as lavanderias são as principais responsáveis pela poluição do meio ambiente devido à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos frutos de suas atividades responsáveis pela lavagem e beneficiamento do jeans. Os principais processos realizados nas lavanderias são: recepção das peças, desengomagem (retirada da goma), lavagem, tingimento, amaciamento, secagem, acabamento e expedição (MOURA, 2017).

Leloup (2013) lista os principais resíduos gerados pelas lavanderias:

a) argila expandida desgastada;
b) fibra do material têxtil (restos de fios e tecidos);
c) cinzas;
d) lodo têxtil.

2.5 CINZAS DE ALGAROBA

No APL de confecções do agreste pernambucano uma das principais fontes energéticas para utilização no processo de aquecimento da água para o tingimento do jeans é a lenha da algaroba (*Prosopis julifora*), por ser uma das espécies liberadas para comercialização devido não ser nativa da flora brasileira.

Além de possuir um alto desempenho calorífico (MOTA, 2014) e ser facilidade adquirida por um baixo custo em relação as outras fontes de combustíveis (MELO, 2012). Com a queima da madeira é estimado uma produção de cerca de 1560 ton/mês de cinzas da algaroba, considerando que há mais de 200 lavanderias cadastradas na região, o que muitas vezes resulta em um descarte indiscriminado desse resíduo no meio ambiente (MELO, 2012; MOURA, 2017). Na Fotografia 1 observa-se a madeira da algaroba utilizada na lavanderia.

Fotografia 1 - Madeira da algaroba utilizada para aquecimento dos fornos

Fonte: O Autor (2019).

Uma pequena parte desta cinza tem sido utilizada informalmente para correção de pH de solo, sendo a maior parte do resíduo descartada sem critério algum (MOTA, 2014; MOURA, 2017). Na Fotografia 2 é observado o descarte irregular das cinzas retirada dos fornos de aquecimento na lavanderia.

Fotografia 2 - Descarte irregular das cinzas de algaroba

Fonte: O Autor (2019).

A possibilidade do uso dessas cinzas nos materiais cimentícios contribui para o desenvolvimento sustentável do setor da construção, de modo a reduzir impactos ambientais produzidos pelo descarte inadequado desse resíduo sólido e, ainda, podendo gerar oportunidades de emprego e renda, pelo fato de agregar valor comercial a um resíduo e proporcionar estudos tecnológicos para o emprego do material na construção civil (MOTA, 2014; PIRES, 2016).

De acordo com Neville (1997), muitas propriedades do concreto, referentes à durabilidade, podem ser aprimoradas através do incremento de subprodutos industriais e resíduos agroindustriais como adições minerais.

As cinzas de algaroba são ricas em carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (LELOUP, 2013; NASCIMENTO, 2014), possuindo uma coloração similar à do cimento Portland; além disso, seus grãos apresentam formato esférico e superfície irregular, com baixo módulo de finura e baixo teor de óxido de magnésio, fato que explica sua utilização como fíler no concreto (MOTA, 2014).

Em título de caracterização, se acrescenta que a cinza de algaroba não apresenta atividade pozolânica, nem óxidos expansivos, tendo sido incorporada com sucesso em argamassas (MELO, 2012; LELOUP, 2013; NASCIMENTO, 2014; PIRES, 2016), concreto betuminoso usinado a quente (MOURA, 2017) e em concreto seco moldado sob pressão (MOTA, 2014).

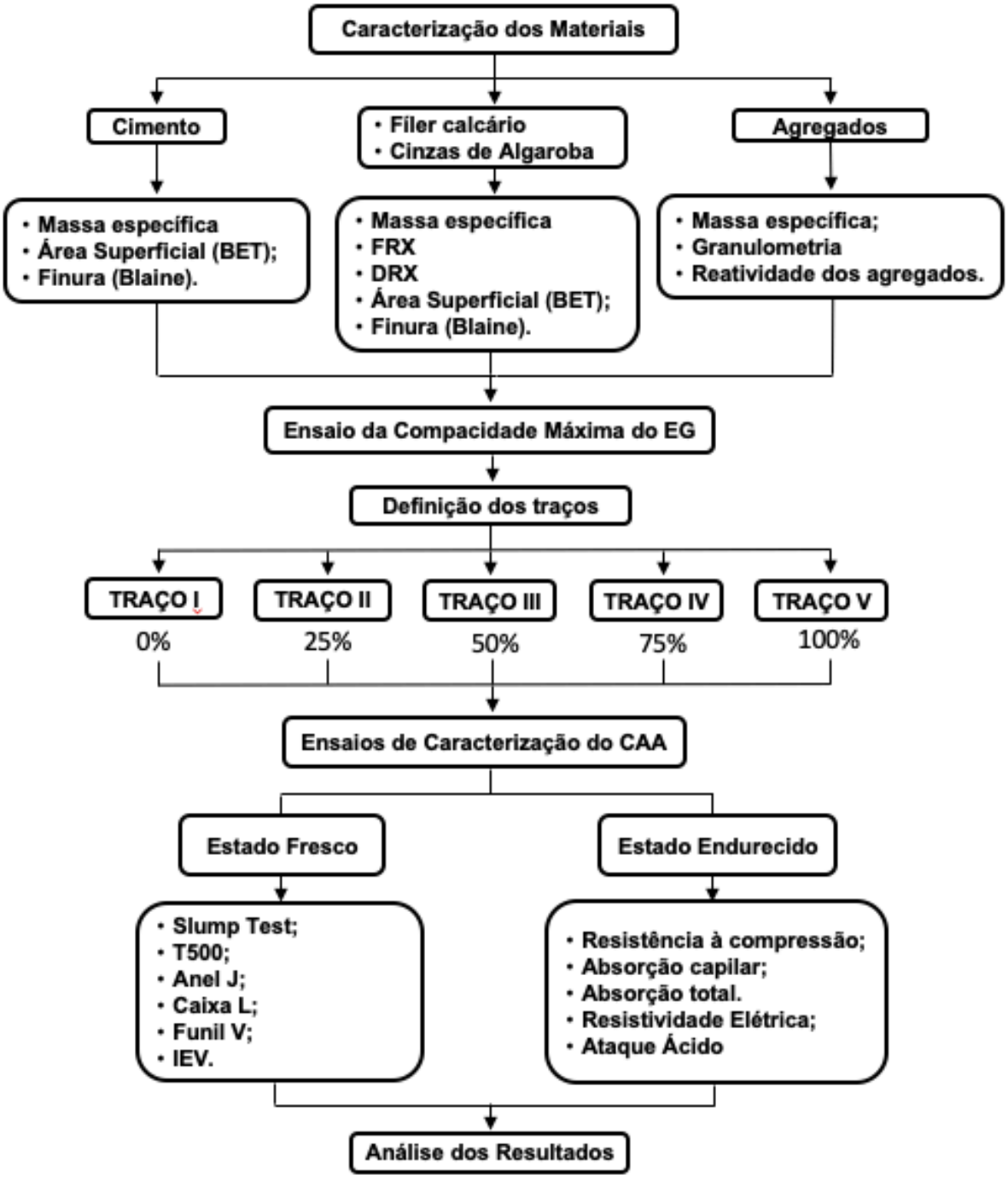
Estudos mostraram que a incorporação de adições alternativas, como a cinza de madeira, pode ser usada adequadamente como material constituinte na produção do concreto estrutural (WANG *et al.,* 2008; UMAMAHESWARAN; BATRA, 2008; BAN;

RAMLI, 2011; GARCIA; COUTINHO, 2013) e até mesmo em concreto autoadensável (ELINWA *et al.,* 2008;), promovendo resultados promissores com relação à trabalhabilidade, resistências mecânicas e durabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesse trabalho está descrita no Fluxograma 1, onde são esquematizados todas as etapas e ensaios adotados na pesquisa.

Fluxograma 1 – Metodologia adotada no trabalho



Fonte: O Autor (2019).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Cimento

Foi utilizado nessa pesquisa o cimento CPV-ARI, cujas propriedades físico-químicas se encontram expostas na Tabela 1. A escolha em trabalhar com esse tipo de cimento é devido a ser o mais utilizado na produção do CAA, devido à sua elevada resistência nas primeiras idades.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do cimento

Determinação			CPV-ARI
Caracterização Física	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
	Resistência à compressão	1 dia (MPa)	≥ 17,48
		3 dias (MPa)	≥ 27,00
		7 dias (MPa)	≥ 36,00
Caracterização Química	Resíduo insolúvel (%)		≤ 1,00
	Perda ao fogo (%)		≤ 4,37
	SiO_2 (%)		20,43
	Al_2O_3 (%)		4,90
	Fe_2O_3 (%)		1,83
	CaO (%)		65,40
	SO_3 (%)		3,60
	MgO (%)		1,06
	K_2O (%)		0,27

Fonte: Fabricante (2018).

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia passante na peneira de abertura 4,75 mm, adquirida no comércio da local de Caruaru – PE. Com massa unitária de 1,47 g/cm³ e massa específica de 2,58 g/cm³. Para utilização nesse estudo, o agregado miúdo passou pelo processo de secagem em estufa à 105 ºC durante 24 horas para retirada da umidade.

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0, com diâmetro máximo de 9,5 mm, adquirido no comércio local de Caruaru – PE. Com massa unitária de 1,36 g/cm³ e massa específica de 2,63 g/cm³. Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo também passou pelo procedimento de secagem em estufa à 105 ºC durante 24 horas, para retirada da umidade.

3.1.4 Fíler Calcário

O fíler calcário utilizado neste trabalho foi cedidos pelo Grupo IMAP, que produz esse material no município de João Câmara - RN, cuja origem é sedimentar calcítica, com granulometria passante na malha de 200 mesh (0,075 mm). Na Fotografia 3 é apresento o fíler utilizado. O diâmetro do cadinho é de aproximadamente 10 cm.

Fotografia 3 - Fíler calcário utilizado

Fonte: O Autor (2019).

3.1.5 Cinzas da Algaroba

As cinzas de algaroba foram coletadas em uma lavanderia situada na cidade de Caruaru-PE e foram preparadas no Laboratório de Sistemas Construtivos da UFPE – Campus Agreste, onde passou pelo processo de secagem em estufa à 105 ºC durante 24 horas, em seguida foram peneiradas na malha 200 mesh (0,075 mm). Na Fotografia 4 é observada a cinza após o tratamento. O diâmetro do cadinho é de aproximadamente 10 cm.

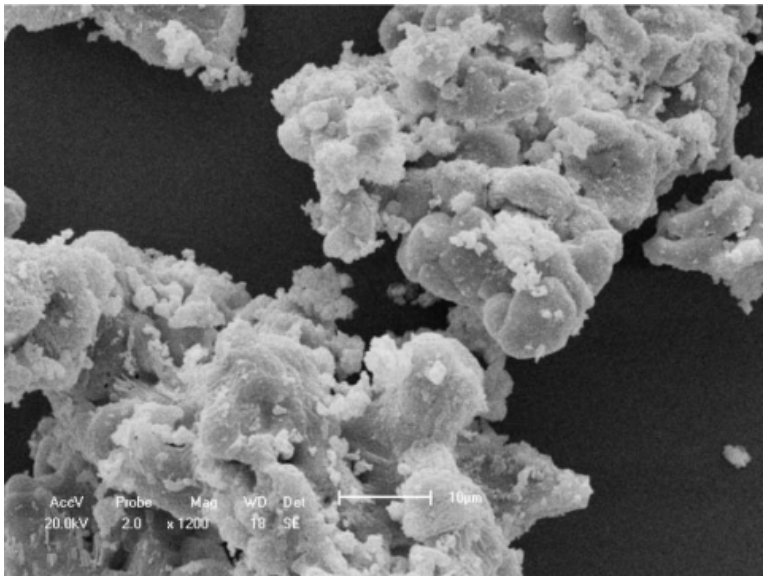
Fotografia 4 - Cinzas de algaroba seca e peneirada

Fonte: O Autor (2019).

O estudo de microscopia das cinzas de algaroba foi realizado em microscópio eletrônico de varredura SSX – 500 da marca Shimadzu. As amostras foram fixadas em um porta-amostra com fita de carbono depois de passarem por um processo de metalização em metalizador de ouro IC-50, da Shimadzu, por 5 minutos, com uma variação de potencial de 1.8 kV (LELOUP, 2013).

Na Figura 2 é apresentada a micrografia eletrônica referentes às partículas de cinza inferiores a 75 μm. Verifica-se que a cinza possui aspecto irregular e poroso, sendo formada por aglomerados com uma forma predominantemente arredondada resultante da aglomeração de partículas. Ou seja, a cinza não se apresenta como partículas separadas, mas sim, como um produto sintetizado e bastante poroso em sua estrutura. O aspecto irregular pode ser visto, bem como a tendência das partículas em se aglomerar.

Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza de algaroba



Fonte: Leloup (2013).

3.1.6 Aditivo Superplastificante

O aditivo químico superplastificante utilizado foi o MasterGlenium 51 da marca BASF, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado, cuja especificação técnica é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do aditivo superplastificante

Especificações Técnicas	
Aparência (visual)	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade (g/cm³)	1,067 – 1,107
Sólidos (%)	28,5 – 31,5
Viscosidade (cps)	<150

Fonte: Fabricante (2017).

3.1.7 Água

A água utilizada nessa pesquisa foi a água destilada (pH = 6,55), devido ao campus Agreste da UFPE possuir abastecimento de água através de carros pipa à época da realização das atividades experimentais da presente pesquisa, não apresentando um controle de qualidade adequado. Para esse procedimento foi utilizado o destilador do Laboratório de Química da UFPE.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Massa Específica

Para determinar a massa específica do cimento, do fíler calcário e da cinza de algaroba foram adotados os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16605:2017, que atribui o método para determinação da massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó. Já para determinação da massa unitária e da massa específica dos agregados miúdo e graúdo foram realizados os ensaios conforme os procedimentos indicados pelas normas ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 53:2009.

3.2.2 Área Superficial Específica (BET)

A determinação das áreas superficiais dos materiais finos (cimento, fíler e cinza de algaroba) foi realizada utilizando o método do BET. Esse procedimento é um dos mais adotados para determinação da área superficial específica. Para esse procedimento foi utilizado o equipamento Micromeritics modelo ASAP 2420, do Laboratório de Nanotecnologia do CETENE.

3.2.3 Área Superficial pelo Método de Blaine

Esse ensaio tem o objetivo de determinar a finura do cimento, do fíler calcário e da cinza de algaroba. Esse método é proposto pela ABNT NBR 16372:2015, e consiste na medição do tempo que um determinado volume de ar leva para atravessar uma camada compactada do material com porosidade conhecida, com resultado expressado em cm^2/g.

3.2.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

As análises de fluorescência de Raios-X foram realizadas para os materiais finos (cimento, fíler e cinza de algaroba) com o objetivo de determinar as composições químicas sob atmosfera de vácuo. O equipamento utilizado foi o espectrômetro da marca Rigaku, modelo Promini, com tensão no tubo de 50W (Na a U), essas análises foram realizadas no Laboratório de Química da UFPE - Campus Agreste.

3.2.5 Difração de Raios-X (DRX)

As análises de difração de Raios-X foram feitas para o fíler e a cinza de algaroba. O procedimento foi realizado no Laboratório de Microscopia do CETENE, utilizando o difratômetro de Raios-x da marca Bruker D8 Advanced Davinci. Onde foram utilizados os seguintes dados de entrada: radiação de CuKα (40 kV/40 mA), passo de 0,02º a cada 0,5 segundo, no intervalo de 5º<2θ<70º.

3.3 AVALIAÇÃO DE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO

Para a ocorrência da reação álcali-agregado é necessário a presença dos seguintes fatores: concentração suficiente de hidróxidos alcalinos nos poros do concreto para reagir com o agregado; presença de agregado reativo e umidade suficiente. Caso haja a inexistência de um desses três fatores a reação não ocorrerá.

Dessa forma, foi realizado o ensaio para verificação da reatividade dos agregados e o cálculo para determinar a concentração de álcalis presente na mistura do concreto.

3.3.1 Determinação do Teor de Álcalis

Para determinação do teor de álcalis dos materiais da mistura é utilizado a Equação 1 para o cálculo da concentração de sódio equivalente ($Na_2O_{eq.}$), apresentada pela ABNT NBR 15577-1:2008.

$$Na_2O_{eq.}(\%) = Na_2O + 0{,}658(K_2O) \quad (1)$$

Com o objetivo de se evitar a reação entre os álcalis (presentes no cimento e nas adições) e os agregados reativos, o teor de sódio equivalente foi limitado em 0,60%, conforme estabelece a ASTM C 150: 2017 e a ASTM C 227:2010.

3.3.2 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa

Foi realizada a avaliação da reatividade dos agregados através do ensaio da determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado conforme apresentado pela ABNT NBR 15577-4:2009, baseado na norma americana ASTM C 1260:2014 e na canadense CSA A23.2-25A:2014. A metodologia desse ensaio consiste na confecção de barras de argamassa no formato prismático com seção quadrada 25 mm de lado e comprimento de 285 mm.

Foi utilizada a dosagem da argamassa estabelecida pela ABNT NBR 15577-4:2009, que determina para agregados com massa específica igual ou superior a 2,45 g/cm³ a seguinte proporção: 440 gramas de cimento, 990 gramas de agregado e uma relação água/cimento de 0,47 em massa. Para essa dosagem a ABNT NBR 15577-4:2009 determina a utilização de um cimento padrão, mas por ser um produto de difícil acesso, foi adotado o cimento CPV- ARI.

Nesse procedimento é exigido a moldagem de pelo menos 3 barras de argamassa por ensaio. As barras devem permanecer no molde durante 24 ± 2h, após esse tempo as barras são removidas dos moldes e são colocadas em um recipiente com água, de modo que fiquem totalmente submersas. O recipiente deve ser selado e colocado em estufa a 80 ± 2 °C durante um tempo de 24h. Em seguida é realizada a leitura do comprimento inicial de cada barra utilizando um relógio comparador, conforme Fotografia 5.

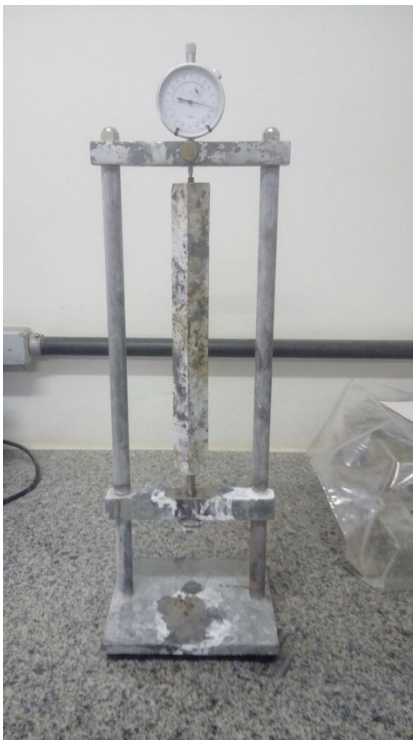
Fotografia 5 - Relógio comparador utilizado no ensaio

Fonte: O Autor (2019).

Após a medição, todas as barras são colocadas nos recipientes selados, em estufa, com solução de NaOH a concentração de 1 N a 80 ± 2 °C de forma que fiquem totalmente submersas. Posteriormente são efetuadas as leituras nas idades de 16 e 30 dias após a moldagem adicionando pelo menos três leituras intermediárias em

cada período. O esquema da medição da barra de argamassa pode ser visto na Fotografia 6.

Fotografia 6 - Medição da barra de argamassa com o relógio comparador



Fonte: O Autor (2019).

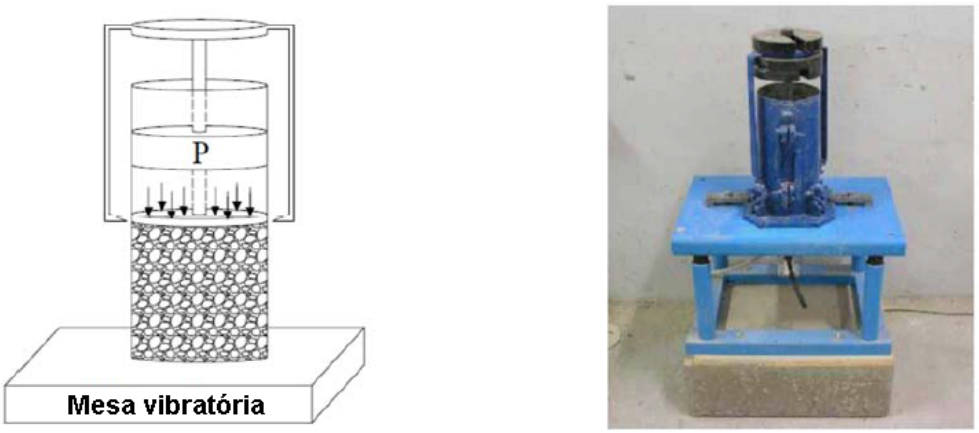
Ao final do ensaio são analisados os resultados de modo que para expansões inferiores a 0,19% o agregado é considerado potencialmente inócuo para uso em concreto, caso os resultados das expansões apresentem medidas superiores a 0,19% o agregado é considerado potencialmente reativo, segundo descrito pela ABNT NBR 15577-1:2008.

3.4 METODOLOGIA PARA DOSAGEM DO CAA

3.4.1 Formulação do Esqueleto Granular

A definição do esqueleto granular foi baseada no método da compacidade experimental apresentado por De Larrard (2000) e adotado por Diederich (2010). Esse método consiste na aplicação de uma carga de P igual a 10 KPa sobre uma quantidade de 7,5 kg de agregados colocados em um recipiente cilíndrico, com dimensões de 160 x 320 mm (diâmetro x altura), sobre uma mesa vibratória, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

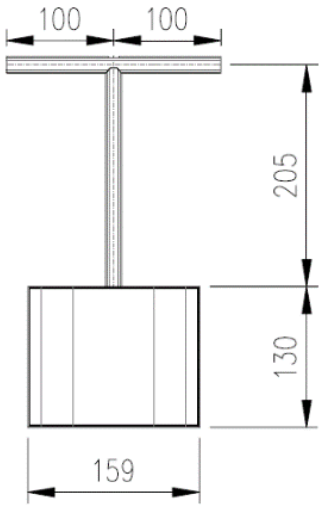
Figura 3 - Dispositivo para mensurar a compacidade máxima experimental



Fonte: El Barrak (2005).

Para aplicação da carga P na amostra foi utilizado um pistão cilíndrico em aço maciço, com dimensões conforme apresentado na Figura 4.

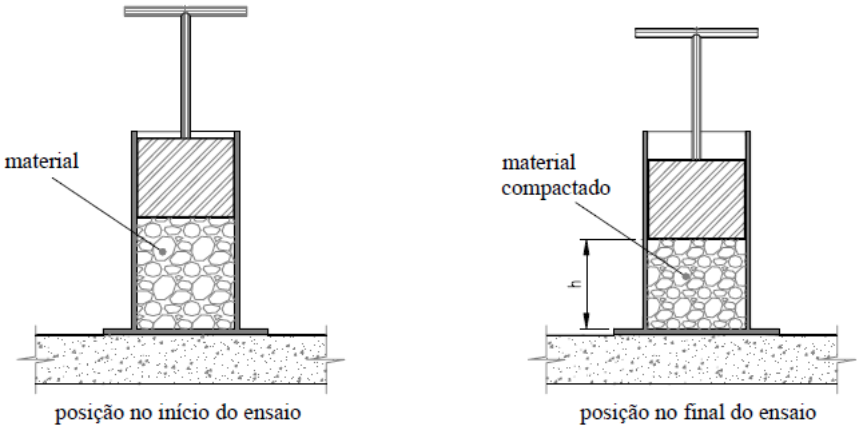
Figura 4 - Dimensões do pistão cilíndrico em milímetros



Fonte: Silva (2004).

O dispositivo com 7,5 kg de material com uma determinada relação agregado graúdo/agregado miúdo (AG/AM) passa por uma vibração constante durante 3 minutos e 40 segundos, em seguida, é verificado a altura final da amostra compactada. Na Figura 5 é apresentado o comportamento da amostra durante o ensaio.

Figura 5 - Comportamento da amostra durante o ensaio



Fonte: Silva (2004).

Esse ensaio foi realizado por meio de tentativas a fim de obter a relação AG/AM que possua uma maior compactação, ou seja, um menor valor para h (altura da amostra compactada). O cálculo da compacidade experimental C é feito através da Equação 2.

$$C = \frac{4\,M_s}{\pi\,D_c^2\,h\,\rho_s} \tag{2}$$

Onde:

M_s = massa seca do material;

D_c = diâmetro interno do cilindro;

h = altura final da camada do material compactado;

ρ_s = densidade do material.

Na Fotografia 7 é observado a amostra sendo colocada no molde cilíndrico (a) e o pistão colocado sobre a amostra com a realização da marcação inicial (b). Dessa forma, através desse ensaio da compacidade máxima experimental, é possível estabelecer a relação AG/AM ideal, para utilização nos traços de CAA.

Fotografia 7 - Execução do ensaio de compacidade máxima experimental

a) b)

Fonte: O Autor (2019).

3.4.2 Formulação dos Traços do CAA

Para determinação dos traços do CAA foi definido um consumo de cimento de 360 kg/m³ com um teor de adição de finos de 25%. A quantidade de agregados para cada traço foi determinada utilizando a massa específica dos materiais e adotando a proporção obtida no ensaio descrito no tópico 3.4.1, onde foi calculado o consumo da massa da areia e da brita. A relação água/finos foi fixada em 0,5, variando apenas o teor de superplastificante, de modo a obter um CAA com classe de espalhamento SF2; ou seja, variando o espalhamento entre 660 a 750 mm conforme ABNT NBR 15823-1:2017.

3.4.3 Procedimento de Mistura do CAA

Para a etapa de mistura do CAA foi adotado a metodologia apresentada por Le (2014), que determina a sequência apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Sequência de mistura do CAA

Etapa	Tempo de mistura
1 - Introdução dos materiais sólidos no misturador na sequência (brita, fíler, cimento e areia)	1 min
2 - Adição da água	1 min e 30 s
3 - Adição do superplastificante	1 min e 30 s

Fonte: Le (2014) (Adaptado pelo autor).

Para esse procedimento foi utilizada a betoneira do Laboratório de Sistemas Construtivos da UFPE, campus Agreste. Onde foram produzidos 40 litros de concreto por traço, divididos em 2 betonadas: uma com 20 litros (*slump test*, T_{500}, índice de estabilidade visual - IEV e caixa-L) e o outra com 20 litros (anel-J e funil-V).

3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

3.5.1 Slump Flow Test e Tempo de Escoamento (T_{500})

O ensaio de *Slump Flow Test* consiste na avaliação da fluidez do concreto auto adensável sob fluxo livre, sofrendo apenas a ação do seu peso próprio. Esse método mede espalhamento e o tempo de escoamento do CAA, utilizando o cone de Abrams, de modo que não ocorra segregação. Para isso, os ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 15823-2:2017 e os resultados foram analisados conforme ABNT NBR 15823-1:2017, que estabelece as classes de espalhamento como apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Classe de espalhamento do CAA e seus exemplos de aplicação

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Exemplo de aplicações
SF_1	550 a 650	Lajes; estacas e certas fundações profundas.
SF_2	660 a 750	Paredes; vigas; pilares e outras.
SF_3	760 a 850	Pilares-parede; paredes-diafragma e pilares.

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017. (Adaptado pelo autor).

Com relação ao tempo de escoamento, a parte 1 da NBR 15823:2017 atribui as classes apresentadas na Tabela 5.

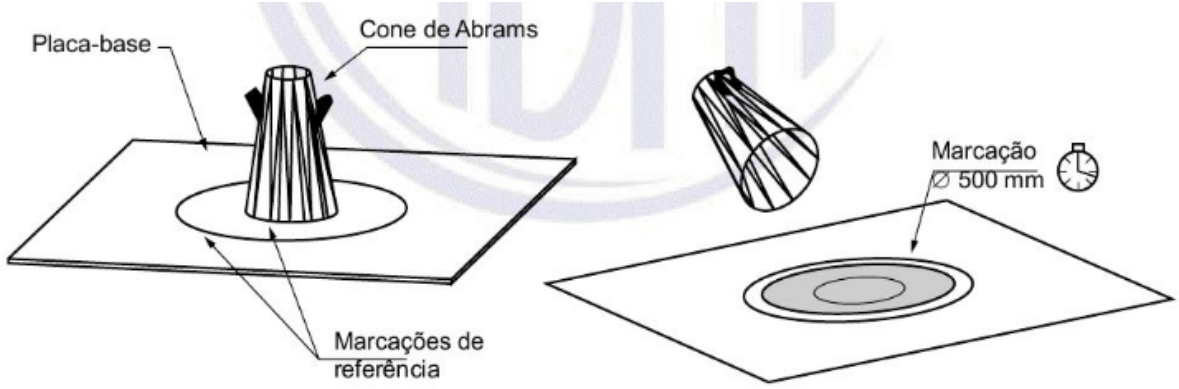
Tabela 5 - Classe de viscosidade plástica aparente T_{500} (sob fluxo livre)

Classe	t_{500} (segundos)
VS_1	≤ 2
VS_2	> 2

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017. (Adaptado pelo autor).

O ensaio para determinação do tempo de escoamento é realizado através da medição do tempo (em segundos) que o concreto leva para alcançar o diâmetro de 500 mm da placa-base, conforme estabelecido pela ABNT NBR 15823-2:2017 e demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Demonstração do procedimento de ensaio de espalhamento e T500



Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017.

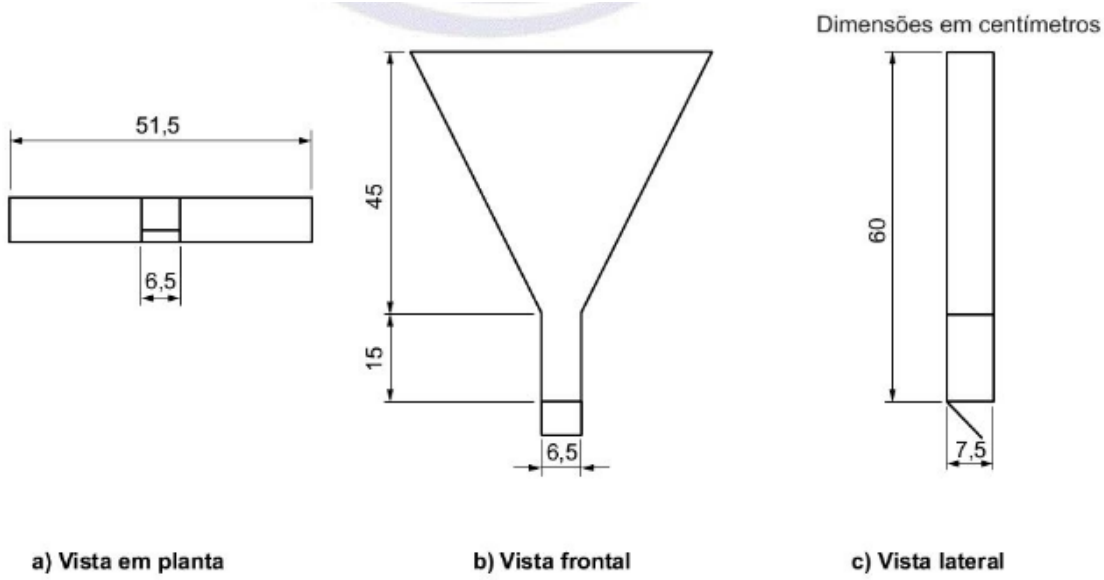
Como pode ser visto na Figura 6, a placa-base possui uma marcação com a indicação do diâmetro de 500 mm, para auxiliar na medição.

3.5.2 Funil-V

Esse ensaio tem como objetivo determinar a viscosidade do CAA através do tempo de escoamento que, aproximadamente, 10 litros de concreto levam para passar completamente pelo funil-V. O ensaio foi executado de acordo com a ABNT NBR 15823-5:2017. Que consiste no preenchimento total do funil com o CAA, de maneira uniforme e atentando para que não haja interrupções e adensamentos. Um recipiente é posicionado sob o funil para realizar a coleta do material após a abertura da comporta. Essa abertura deve ocorrer em um tempo de 10 ± 2 segundos após o fim

do seu preenchimento. Utilizando um cronômetro, é feito o registro do tempo de escoamento total do concreto. O fluxo de concreto pelo funil deve ser contínuo, sem ocorrências de obstruções. Na Figura 7 é apresentado o modelo do funil utilizado nesse ensaio.

Figura 7 - Dimensões do Funil-V



Fonte: ABNT NBR 15823-5:2017.

O resultado desse procedimento deve ser analisado utilizando como referência os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1:2017, que designa as classes apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classe de viscosidade plástica aparente pelo funil-V

Classe	Funil V (segundos)
VF_1	< 9
VF_2	9 a 25

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017. (Adaptado pelo autor).

3.5.3 Índice de Estabilidade Visual

O ensaio de índice de estabilidade visual (IEV) é representado pela análise visual do concreto realizada imediatamente após o fim do ensaio de escoamento. Para isso é necessário observar e fazer um registro fotográfico de modo a capturar a distribuição dos agregados na mistura, se houve a ocorrência de exsudação e a

distribuição da argamassa em torno do perímetro. A ABNT NBR 15823-2:2017 apresenta as classes de ocorrência do IEV, conforme Tabela 7.

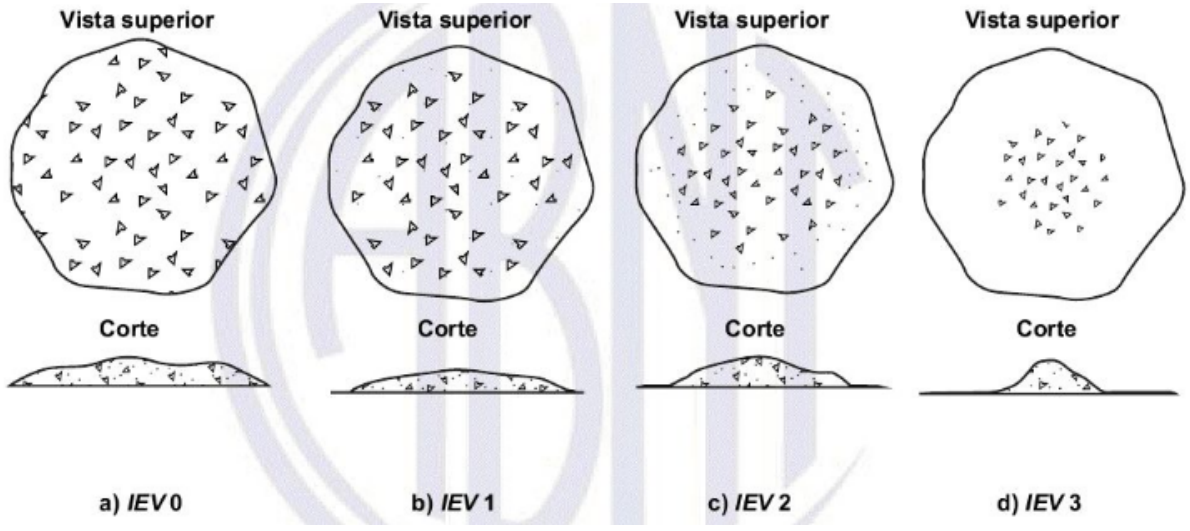
Tabela 7 - Descrição das classes do IEV

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)	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 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 (auréola de argamassa >10 mm)

Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017.

O comportamento visual de cada classe apresentada na Tabela 7 é observado na Figura 8.

Figura 8 - Comportamento de cada classe do IEV

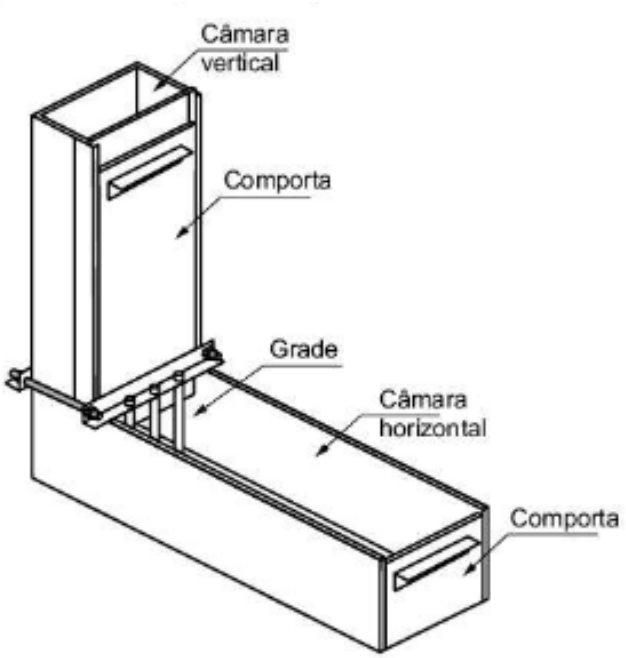


Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017.

3.5.4 Caixa-L

O ensaio da utilizando a caixa-L tem o objetivo de determinar se o concreto possui a capacidade de passar por obstáculos apenas sob a ação do seu peso próprio, de modo a permanecer coeso. Esse ensaio seguiu os parâmetros propostos pela ABNT NBR 15823-4:2017. Na Figura 9, é apresentado o modelo da caixa-L e seus componentes.

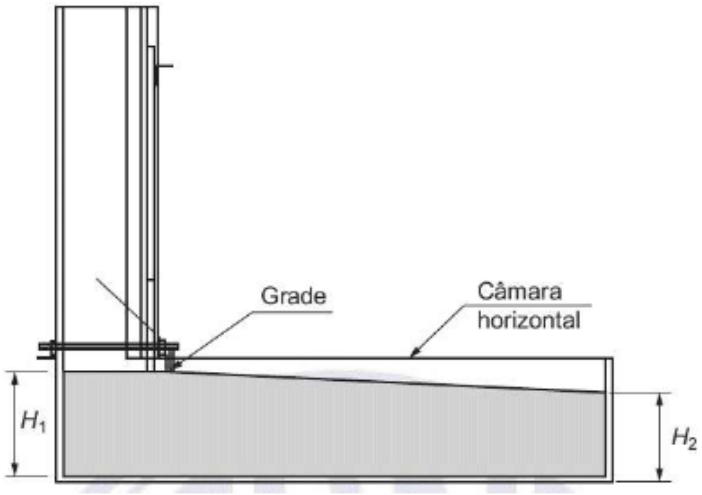
Figura 9 - Modelo da caixa-L



Fonte: ABNT NBR 15823-4:2017.

Para o procedimento de execução desse ensaio é colocada a amostra de concreto na câmara vertical da caixa L, atentando para o total preenchimento do compartimento de maneira uniforme e sem adensamento, após o tempo de 60 ± 10s do fim do preenchimento é feita a abertura da comporta de modo rápido, constante e uniforme. Dessa forma, o concreto escoa para a câmara horizontal, onde é feita a leitura das alturas H_1 e H_2, conforme representado na Figura 10.

Figura 10 – Indicações das alturas H_1 e H_2



Fonte: ABNT NBR 15823-4:2017.

O resultado desse ensaio é obtido através da Equação 3.

$$HP = \frac{H_2}{H_1} \tag{3}$$

A ABNT NBR 15823-1:2017 divide em duas classes de habilidade passante pela caixa L, apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Classe de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado)

Classe	Caixa L (H_1/H_2)
PL1	≥ 0,80 com duas barras de aço
PL2	≥ 0,80 com três barras de aço

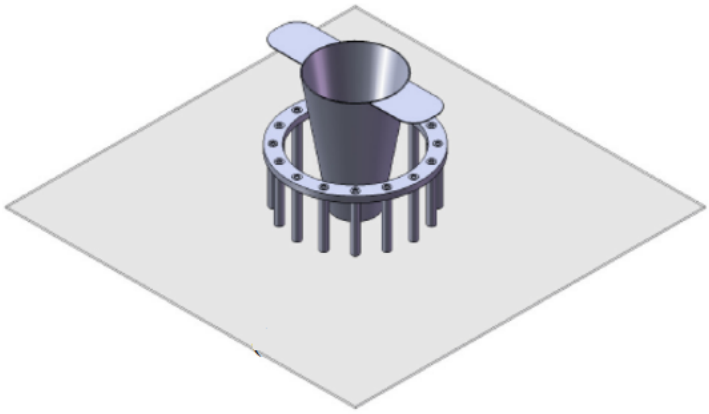
Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017. (Adaptado pelo autor).

3.5.5 Anel-J

O ensaio do Anel-J, chamado também de Anel Japonês, é realizado com o objetivo de determinar a habilidade passante do CAA. Esse procedimento também é executado associado com o ensaio de espalhamento, utilizando o cone de Abrams e a placa base. O Anel-J possui um diâmetro de 300 mm, com 16 barras verticais espaçadas igualmente entre si.

O Anel-J deve ser colocado no centro da placa e o cone de Abrams deverá ser posicionado no eixo central, no interior do Anel, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Posicionamento do Cone de Abrams no centro do Anel-J



Fonte: Sua-Iam *et al.* (2016).

Em seguida, o cone é preenchido totalmente com concreto de modo uniforme e contínuo, atentando para que não haja nenhum tipo de adensamento. Após o preenchimento o cone é erguido de forma vertical, com velocidade constante e uniforme, conforme apresentado pela ABNT NBR 15823-3:2017.

Os resultados desse ensaio são calculados conforme a Equação 4.

$$j_F = \left(\frac{j_1 + j_2}{2}\right) \tag{4}$$

Onde:

j_1 = diâmetro maior obtido no ensaio do Anel J (em milímetros);
j_2 = diâmetro menor obtido no ensaio do Anel J (em milímetros).

Para determinação da classe de habilidade passante pelo Anel J (*PJ*), é utilizada a Equação 5.

$$PJ = SF - j_F \tag{5}$$

Onde:

SF = é a média aritmética das medidas do diâmetro obtidas no ensaio de espalhamento, em milímetros.
j_F = é a média aritmética das medidas do diâmetro obtidas no ensaio do Anel J, em milímetros.

Na ABNT NBR 15823-1:2017 é apresenta a Tabela 9 com as classes de habilidade passante pelo Anel J.

Tabela 9 - Classe de habilidade passante pelo Anel J (sob fluxo livre)

Classe	Anel J (mm)
PJ_1	0 a 25 com 16 barras de aço
PJ_2	25 a 50 com 16 barras de aço

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017. (Adaptado pelo autor).

3.6 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

O procedimento de moldagem dos corpos de prova seguiu os parâmetros atribuídos pela ABNT NBR 5738:2016, onde foram utilizados os moldes cilíndricos de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura). A moldagem e o armazenamento dos CP's ocorreram no Laboratório de Sistemas Construtivos da UFPE Campus Agreste. Todos os CP's permaneceram nos moldes durante as primeiras 24 horas, sobre uma superfície plana e rígida, protegidos com papel filme com o objetivo de evitar a perda de água. Foi adotado o procedimento de cura por imersão em água, realizada em tanques com água a temperatura ambiente.

3.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.7.1 Resistência à Compressão

Para o ensaio de resistência a compressão do concreto auto adensável foram utilizados os parâmetros na ABNT NBR 5739:2007, com 5 corpos-de-prova cilíndricos para cada uma das seguintes idades: 1, 7 e 28 dias. Para ruptura dos CP's foi utilizada a prensa hidráulica da marca Shimadzu, com capacidade de célula de 2000 kN, do Laboratório de Sistemas Construtivos da UFPE, Campus Agreste.

3.7.2 Absorção Capilar

A determinação da absorção por capilaridade do CAA foi realizada com três corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de idade, adotando as instruções da ABNT NBR 9779:2012. O ensaio foi realizado no Laboratório de Sistemas Construtivos da UFPE Campus Agreste.

O resultado desse ensaio é calculado através da Equação 6.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (6)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

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;

B = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2ºC, em g;

S = área da seção transversal do corpo-de-prova, em cm².

3.7.3 Absorção Total

Para execução do ensaio de absorção total de água através do método de imersão total, foi utilizada a metodologia prescrita pela ABNT NBR 9778:2009. É exigida uma amostra de no mínimo três corpos de prova, que devem passar pelo processo de secagem em estufa à temperatura de 105 °C durante um período de 72h, para em seguida ser feita a determinação da massa seca da amostra. Posteriormente, a amostra é resfriada em temperatura de 23 ºC, em seguida é imergida em tanque com água à temperatura de 23 ºC durante 72h; após esse período, os CP's são retirados do tanque para ser feita a secagem superficial com o auxílio de toalha absorvente para verificação da massa saturada. Com esses dados é feito o cálculo da absorção total através da Equação 7.

$$\frac{M_{Sat} - M_S}{M_S} * 100 \quad (7)$$

Onde:

M_{Sat} = massa do corpo de prova saturado;

M_S = massa do corpo de prova seco em estufa.

3.7.4 Resistividade Elétrica

A avaliação da resistividade elétrica do concreto é importante, pois está diretamente ligada ao processo de corrosão da armadura, sendo um fator determinante a vida útil da estrutura. Assim, valores elevados de resistividade representam baixa mobilidade iônica, enquanto valores baixos significam fácil

mobilidade iônica e, consequentemente, uma maior probabilidade de ocorrência corrosão da armadura.

Para determinação da resistividade elétrica foi utilizado o método adotado por Lavagna *et al.* (2018), onde para cada traço é utilizado um corpo-de-prova cilíndrico. Os CP`s passam pelo processo de secagem em estufa à 80 ºC durante 24 horas para retirada da umidade.

O sistema adotado para execução do ensaio é apresentado na Fotografia 8, que é composto por uma morsa com placas de cobre nas extremidades isoladas por discos de borracha. Para melhorar o contato elétrico foi utilizado uma esponja saturada com água entre a amostra de concreto e a placa de cobre. A resistência elétrica foi medida aplicando uma corrente alternada de 300 mV a 200 kHz. Nesse ensaio foram adotados corpos-de-prova com dimensões de 10 cm x 10 cm (diâmetro x altura).

Fotografia 8 - Sistema adotado para o ensaio de resistividade elétrica

Fonte: O Autor (2019).

A medição da resistência elétrica foi realizada no Laboratório de Física da UFPE – Campus Agreste, através de um medidor LCR de precisão, modelo E4980AL, utilizado para determinar a impedância elétrica. Na Fotografia 9 é apresenta a execução do ensaio.

Fotografia 9 - Execução do ensaio para determinação da resistência elétrica

Fonte: O Autor (2019).

Após a análise da resistência elétrica é feita a determinação da resistividade elétrica através da Equação 8.

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{8}$$

Onde:

$R =$ resistência elétrica (Ω);

$\rho =$ resistividade elétrica (Ω.m);

$l =$ comprimento da amostra (m);

$A =$ área da seção transversal da amostra (m^2).

Para a análise dos valores de resistividade, Polder (2001) apresenta a interpretação dos valores de resistividade em relação ao provável risco de corrosão de armadura nas estruturas de concreto armado, que pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10 - Probabilidade de corrosão da armadura em função da resistividade

Resistividade do Concreto	Indicação da probabilidade de corrosão
> 200 Ω.m	Desprezível
100 a 200 Ω.m	Baixa
50 a 100 Ω.m	Alta
< 50 Ω.m	Muito alta

Fonte: Polder (2001).

3.7.5 Ataque Ácido

O ataque de diferentes ácidos pode reduzir a durabilidade de estruturas de concreto, principalmente em superfícies de concreto sem proteção (BEDDOE; DORNER, 2005). As soluções ácidas afetam a microestrutura do concreto e também aumenta a facilidade de penetração de agentes agressivos, resultando na redução da vida útil da estrutura (ALANI; FARAMARZI, 2014).

Com isso foi feita a verificação da resistência do CAA ao ataque de três diferentes tipos de ácidos. O ácido sulfúrico, acético e clorídrico, com concentração molar de 0,1 N cada um, a fim de verificar a influência da adição da cinza de algaroba na resistência ao ataque de ácidos, analisando sua atuação na durabilidade do concreto.

Para esse ensaio foram extraídas três amostras em formato de cubo, com dimensão de 2 cm, da parte central dos corpos de prova cilíndricos, que passou pelo processo de secagem em estufa à 65 ± 5 °C durante 24 horas para retirada da umidade. Após a secagem foi feita a aferição da massa seca dos cubos. Cada uma das três amostras foi colocada em um frasco contendo 500 ml do ácido. Em seguida os frascos foram submetidos a uma rotação constante durante 24 horas em um agitador rotatório de frascos como apresentado na Fotografia 10.

Fotografia 10 - Agitador rotatório de frascos

Fonte: O Autor (2019).

Após as 24 horas de rotação, as amostras foram retiradas do ácido e lavadas com água destilada, em seguida passam novamente pelo procedimento de secagem em estufa à 65 ± 5 °C durante 24 horas. Por fim, foi feita a pesagem das amostras secas e verificada a diferença de massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Massa Específica dos Materiais

As massas específicas dos materiais utilizados nessa pesquisa são apresentadas na Tabela 11. Esses valores são utilizados para o cálculo do consumo dos materiais constituintes do concreto.

Tabela 11 - Resultado das massas específicas

Material	Massa Específica (g/cm³)
CPV	3,15
Cinzas de algaroba	2,76
Fíler calcário	2,71
Agregado graúdo	2,63
Agregado miúdo	2,58

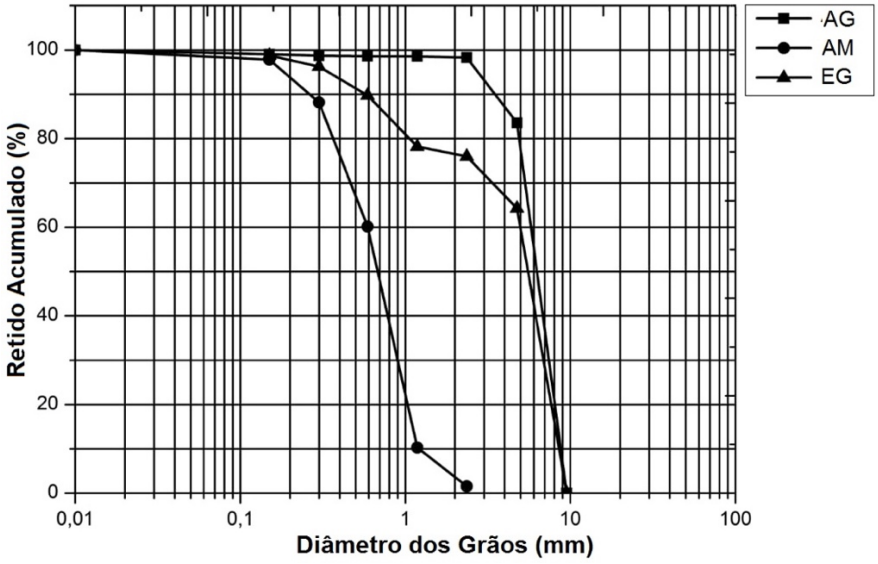
Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que o fíler calcário e a cinza da algaroba apresentam massa específica semelhantes.

4.1.2 Curva Granulometria dos Agregados

As granulometrias do agregado graúdo (AG), agregado miúdo (AM) e do esqueleto granular (EG) foram realizadas por peneiramento conforme ABNT NBR NM 248:2003, as curvas granulométricas são apresentadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: O Autor (2019).

4.1.3 Área Superficial Específica (BET)

Os resultados, obtidos nas análises da área superficial por BET do cimento, do fíler calcário e do fíler alternativo, são apresentados pela Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado das análises por BET

Material	Área Superficial (BET) (cm²/g)
Cimento CPV	20956,0
Cinzas de algaroba	47142,0
Fíler calcário	30045,0

Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que a cinza de algaroba apresenta uma área superficial específica muito maior que a área do fíler calcário, isso explica a maior demanda de aditivo superplastificante nos traços com adição de cinza.

4.1.4 Área Superficial pelo Método de Blaine

Com a determinação da finura dos materiais pelo método da permeabilidade ao ar foram obtidos os resultados da Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da área superficial pelo método de Blaine

Material	Área Superficial (Blaine) (cm²/g)
Cimento CPV	4179,0
Cinza da algaroba	6857,0
Fíler calcário	5096,0

Fonte: O Autor (2019).

Assim como observado nos resultados da área superficial específica por BET, é possível verificar o mesmo comportamento pelos resultados do Blaine, onde a cinza de algaroba apresentou um resultado superior ao fíler calcário.

4.1.5 Fluorescência de Raios-X

A composição química do fíler calcário e da cinza de algaroba foi determinada pelo ensaio de fluorescência de Raios-X (FRX), cujo resultados são apresentados na Tabela 14, onde os dois materiais se destacam pela quantidade de óxido de cálcio.

Tabela 14 - Análise química por FRX dos fíleres calcários e da cinza de algaroba.

	Óxidos (%)									
Material	CaO	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	K_2O	P_2O_5	Cl	SrO
C. Alg.	77,52	0,83	2,44	0,35	0,37	1,33	12,30	1,99	2,12	0,75
Fíler C.	87,65	3,23	5,11	1,90	1,49	0,12	0,28	0,22	0,0	0,0

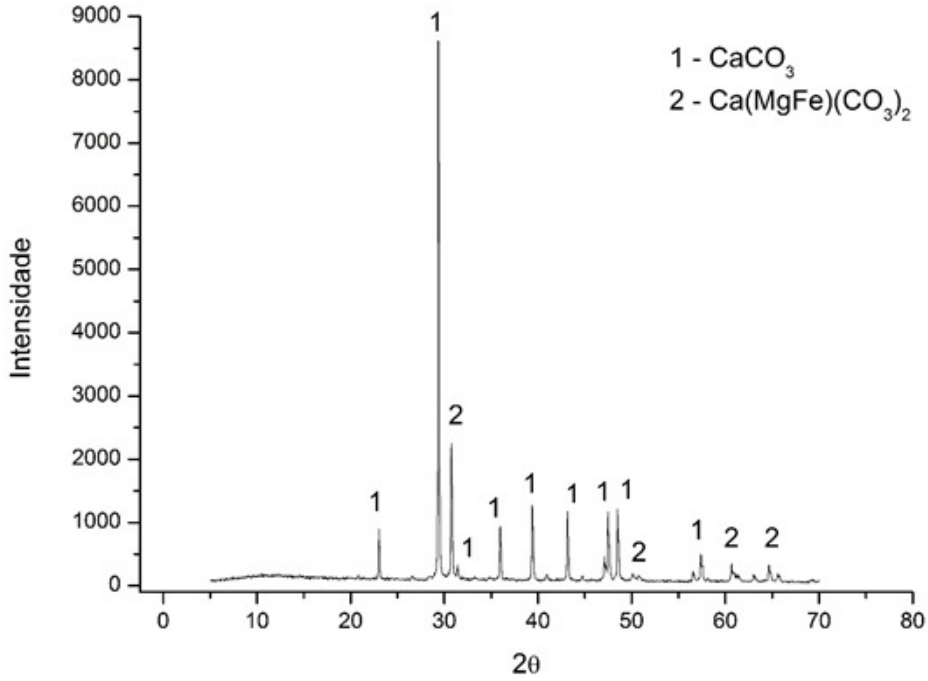
Fonte: O Autor (2019).

Devido ao teor elevado de óxido de potássio presente na cinza de algaroba (acima de 12%), foi necessário realizar o ensaio de reatividade dos agregados, para verificar se a areia e a brita são reativas de modo a gerar uma reação álcali-agregado.

4.1.6 Difração de Raios-X

As análises de difração de Raios-X indicaram que o fíler alternativo apresentou no pico de maior intensidade o carbonato de cálcio, se assemelhando ao fíler calcário; ainda é possível observar pequenos picos de compostos de potássio e magnésio, como pode ser visto no Gráfico 2. Assim como no ensaio de fluorescência de Raios-X, o fíler calcário apresentou alguns picos de ferro, podendo justificar sua coloração alaranjada.

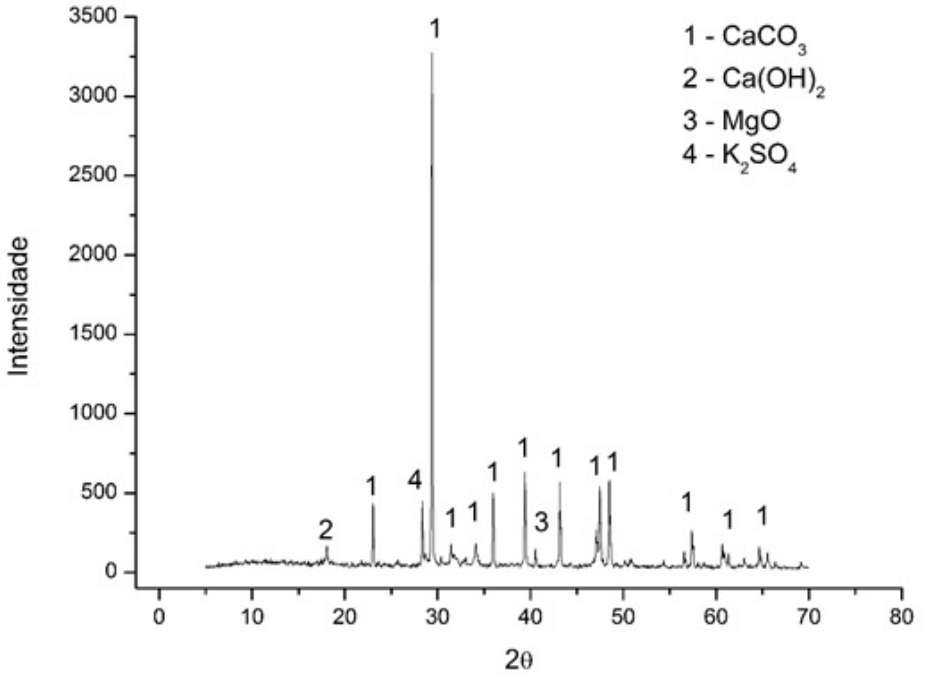
Gráfico 2 - Difratograma de Raios-X do fíler calcário



Fonte: O Autor (2019).

A análise de difração de Raios-X realizada para a cinza de algaroba é apresentada no Gráfico 3. Pela verificação dos difratogramas é possível observar a semelhança entre o fíler e a cinza de algaroba, destacando a presença da calcita (carbonato de cálcio) no pico de maior intensidade (próximo aos 30º em ambos os materiais). Ainda foi possível constatar a presença de outros compostos, como óxidos de magnésio e potássio.

Gráfico 3 - Difratograma de Raios-X da cinza de algaroba



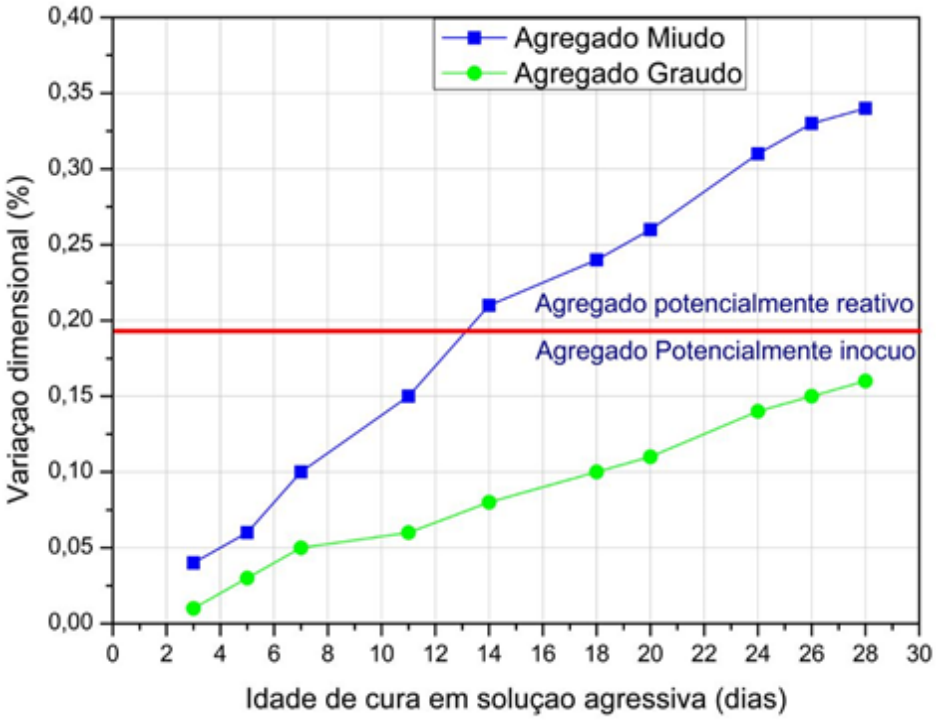
Fonte: O Autor (2019).

4.2 AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DOS AGREGADOS

4.2.1 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa

Com a realização do ensaio de reatividade dos agregados através do método de ensaio da determinação da expansão em barras de argamassa seguindo o apresentado pela ABNT NBR 15577-4:2009. No Gráfico 4 são apresentados os resultados encontrados durante o ensaio, exibindo a variação dimensional em relação aos 28 dias.

Gráfico 4 - Resultado do ensaio de reatividade dos agregados



Fonte: O Autor (2019).

Pela análise do gráfico foi observado que o agregado miúdo se apresentou como sendo um agregado potencialmente reativo, diferentemente do agregado graúdo, que se mostrou potencialmente inócuo. Esse ensaio poderá ser replicado com a utilização do cimento padrão exigido pela ABNT NBR 15577-4:2009, para uma verificação mais precisa. Provavelmente o agregado graúdo também seria classificado como sendo potencialmente reativo, devido o cimento padrão possuir um teor de álcalis superior ao cimento CPV-ARI.

4.2.2 Determinação do Teor de Álcalis

Sabendo que o agregado miúdo se apresentou como sendo potencialmente reativo, foi necessário realizar a avaliação do teor de álcalis no sistema, a fim de inibir a ocorrência da reação álcali-agregado. Utilizando os teores de álcalis presentes no cimento, no fíler calcário convencional e no fíler alternativo (cinza de algaroba), foi realizado o cálculo utilizando a Equação 1, onde foi verificado que o teor máximo de substituição do fíler calcário pela cinza é de 26%, obedecendo a tolerância de 0,60% de equivalente alcalino, atribuída pela ASTM C 150:2017 e pela ASTM C 227:2010.

Dessa forma, caso haja o interesse em inibir a provável ocorrência da reação álcali-agregado, seria necessário aplicar práticas como a utilização de agregados

agregado não reativo, ou a incorporação de adições mitigadoras, ou limitar o teor da adição calcária na produção do CAA. Nesse último caso, considerando um percentual de 25% de adição com relação a massa do cimento só seria admissível a utilização de até 6,5% de adição da cinza de algaroba, a fim de inibir tal reação.

No entanto, devido ao foco desse estudo ser a verificação do teor da incorporação da cinza de algaroba que proporcione melhor resultado ao CAA, essa limitação não foi considerada. Essa verificação foi realizada apenas para alertar e registar o possível risco dessa ocorrência.

4.3 METODOLOGIA PARA DOSAGEM DO CAA

4.3.1 Formulação do Esqueleto Granular

A determinação do esqueleto granular foi realizada conforme apresentado na metodologia, onde foram preparadas amostras de 7,5 quilos e através de tentativas foi analisada a relação AG/AM que apresentasse maior compacidade.

As tentativas foram realizadas para determinar o menor valor de *h* possível, conforme visto na Figura 5. A partir disso, é calculado a compacidade *C,* como apresentado na Equação 2. A Tabela 15 compila as tentativas realizadas e os resultados obtidos para a compacidade experimental.

Tabela 15 - Relação AG/AM e suas respectivas alturas de amostra compactada

Relação AG/AM	*C*
0,9	0,7027
1,0	0,7697
1,1	0,6996
1,2	0,6971

Fonte: O Autor (2019).

A partir dos dados obtidos na Tabela 15, é possível observar que a relação AG/AM = 1,0 apresentou uma maior compactação dos agregados.

4.3.2 Composição dos Traços de CAA

Na Tabela 16 é apresento os consumos de cada traço produzido com a substituição do fíler calcário pelo fíler alternativo nos seguintes teores: 0% (traço I), 25% (traço II), 50% (traço III), 75% (traço IV) e 100% (traço V). A fim de determinar a influência da incorporação do fíler calcário alternativo no concreto autoadensável.

Tabela 16 - Consumo dos materiais para cada traço de CAA

Materiais / Nomenclatura	I	II	III	IV	V
Cimento (kg/m³)	360	360	360	360	360
Fíler calcário (kg/m³)	90	67,5	45	22,5	-
Fíler alternativo (kg/m³)	-	22,5	45	67,5	90
Agregado miúdo (kg/m³)	784,85	785,01	785,16	785,32	785,47
Agregado graúdo (kg/m³)	784,85	785,01	785,16	785,32	785,47
Superplastificante (kg/m³)	1,575	2,5425	3,375	3,825	4,05
Água (kg/m³)	225	225	225	225	225

Fonte: O Autor (2019).

Pela analise da Tabela 16, é observado que há uma demanda maior de superplastificante a medida que o teor de cinza aumenta, isso ocorre devido os grãos da cinza serem menores que os grãos do fíler calcário, demandando uma maior quantidade de água que foi compensada com superplastificante.

4.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Foram realizados os ensaios no estado fresco do CAA, para verificação das propriedades de fluidez, coesão e resistência a segregação. Na Tabela 17 é observado os resultados para cada ensaio dos traços realizados.

Tabela 17 - Resultados para o estado fresco dos CAA`s

Ensaio \ Traço		I	II	III	IV	V
Slump Test	mm	700	705	665	680	695
T_{500}	s	1,6	1,1	1,28	2,9	2,3
Anel-J	mm	15	10	22	23	15
Caixa-L	H_2/H_1	0,92	0,90	0,81	0,75	0,76
Funil-V	s	4,5	3,9	5,2	7,1	6,8
IEV	visual	IEV 1	IEV 0	IEV 0	IEV 0	IEV 1

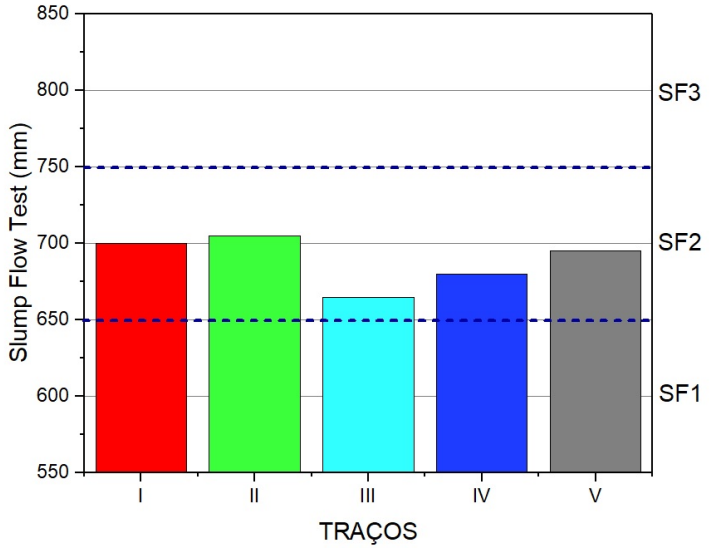
Fonte: O Autor (2019).

Com base nos resultados registrados na Tabela 17 foram realizadas as classificações de cada traço, conforme ABNT NBR 15823-1:2017.

4.4.1 Slump Flow Test

Os resultados expostos na Tabela 17 estão representados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Resultados referentes ao ensaio de Slump Flow Test



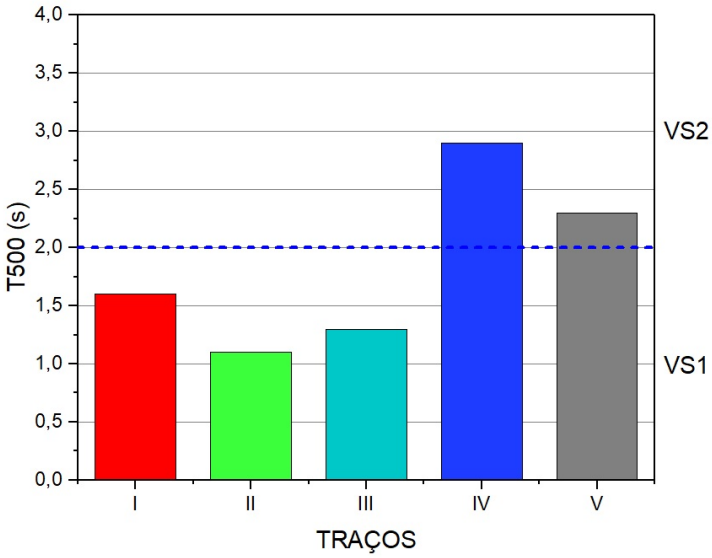
Fonte: O Autor (2019).

Todos os cinco traços avaliados com a substituição do fíler calcário pelo fíler alternativo: 0% (traço I), 25% (traço II), 50% (traço III), 75% (traço IV) e 100% (traço V) estão classificados na classe de espalhamento SF2, que se caracteriza por ser a classe de concreto utilizada para produção de diferentes peças como paredes, vigas e pilares (ABNT NBR 15823-1:2017).

4.4.2 T_{500}

Os resultados para o ensaio T_{500} de todos os traços avaliados são apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Resultados referentes ao ensaio T500



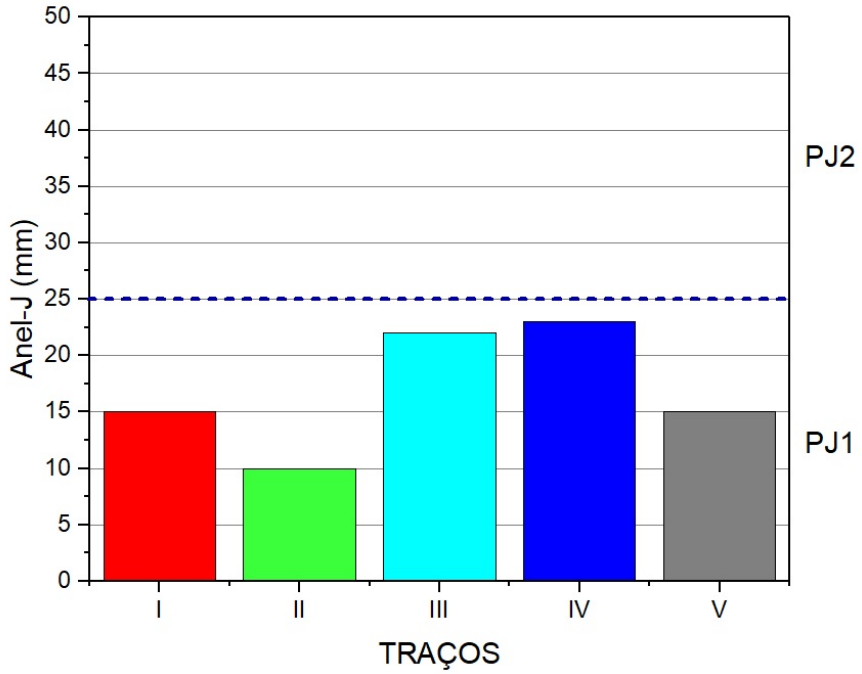
Fonte: O Autor (2019).

Pela análise do Gráfico 6, observa-se que os traços I (0%), II (25%) e III (50%) foram classificados como VS1, já os traços IV (75%) e V (100%) como VS2. Isso pode ser explicado pelo fato da área superficial específica da cinza de algaroba ser superior a área superficial do fíler calcário. Assim, o aumento do teor de cinza na mistura proporcionou um aumento de viscosidade no CAA, consequentemente, um maior tempo de escoamento. Salienta-se, no entanto, que a substituição total e parcial do fíler calcário pelo fíler alternativo manteve as propriedades de autoadensabilidade do concreto em termos do parâmetro T_{500}.

4.4.3 Anel-J

Os resultados do Anel-J são apresentados no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Resultados do Anel-J



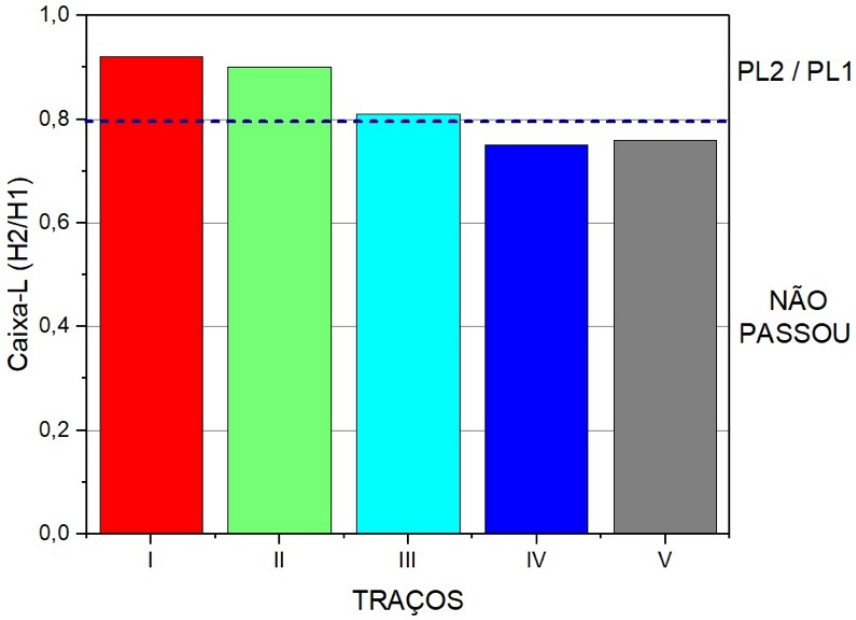
Fonte: O Autor (2019).

Pelo Gráfico 7, é verificado que todos os cinco traços avaliados com a substituição do fíler calcário pelo fíler alternativo: 0% (traço I), 25% (traço II), 50% (traço III), 75% (traço IV) e 100% (traço V) mantiveram a autoadensabilidade em termos do parâmetro do anel-J e se classificaram na classe de habilidade passante PJ1.

4.4.4 Caixa-L

No Gráfico 8, é observado os resultados encontrados no ensaio da caixa-L, que também analisa as propriedades de habilidade passante e autonivelamento do CAA.

Gráfico 8 - Resultado da Caixa-L



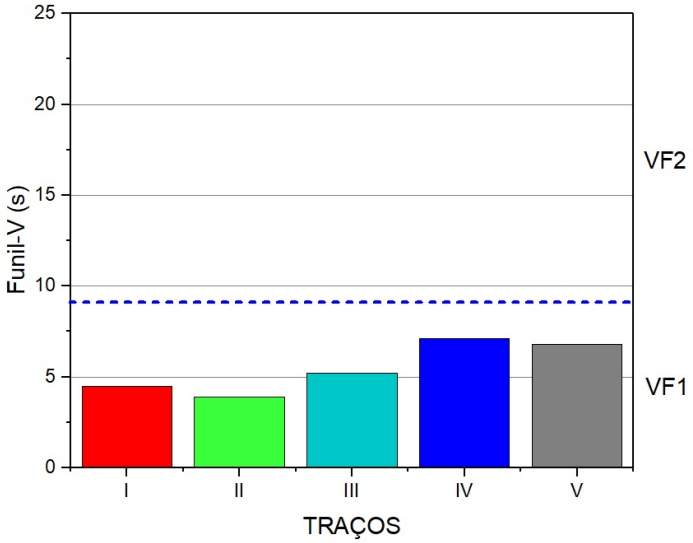
Fonte: O Autor (2019).

Pela análise do Gráfico 8, verifica-se que apenas os traços I (0%), II (25%) e III (50%) passaram no ensaio da caixa-L, os traços IV (75%) e V (100%) ficaram abaixo do limite admissível. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da viscosidade proporcionado pela incorporação da cinza. Assim, como observado no ensaio de T_{500}, também é verificado no ensaio da caixa-L que, quanto maior a substituição do fíler calcário pelo fíler alternativo, maior é o aumento na viscosidade do concreto, isso devido a cinza de algaroba possuir uma área superficial específica superior a área superficial do fíler calcário. Dessa forma, teores de substituição do fíler calcário pela cinza da algaroba acima de 50% não são recomendados.

4.4.5 Funil-V

No Gráfico 9 é apresentado os resultados encontrados para o ensaio do funil-V.

Gráfico 9 - Resultados do funil-V



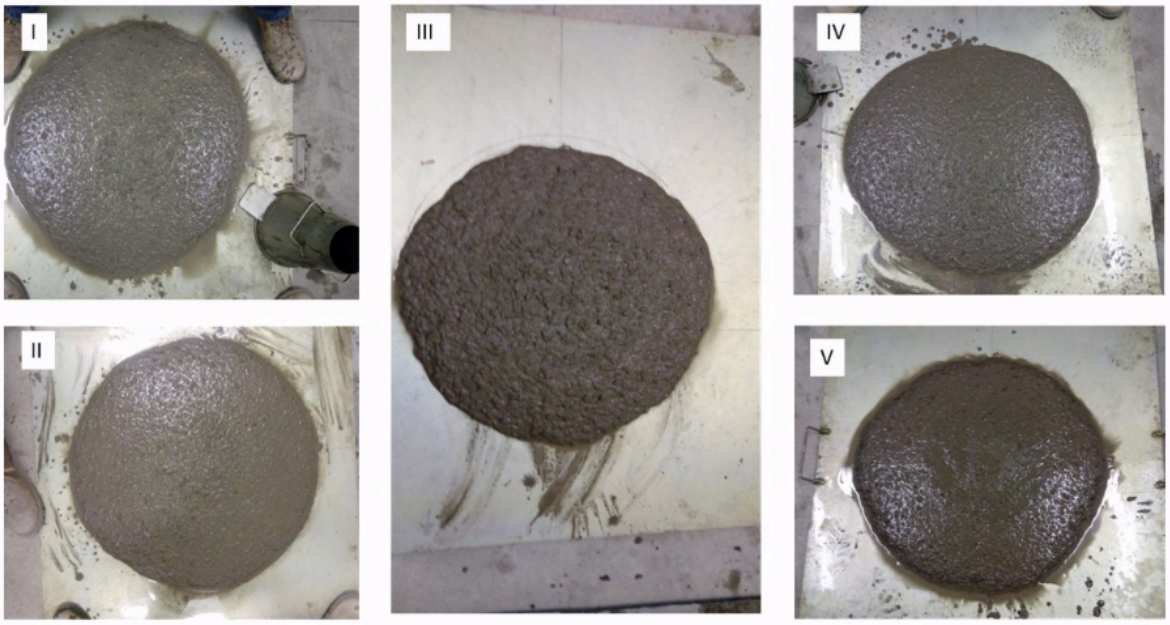
Fonte: O Autor (2019).

Verifica-se que todos os cinco traços: 0% (traço I), 25% (traço II), 50% (traço III), 75% (traço IV) e 100% (traço V) se classificaram como sendo VF1. Em comparação dos resultados do funil-V com os resultados do T_{500} é observado uma semelhança no comportamento das misturas. Com tempos de escoamento maiores para os traços IV e V.

4.4.6 Índice de Estabilidade Visual (IEV)

Na Fotografia 11 verifica-se a análise do índice de estabilidade visual.

Fotografia 11 - Análise do IEV



Fonte: O Autor (2019).

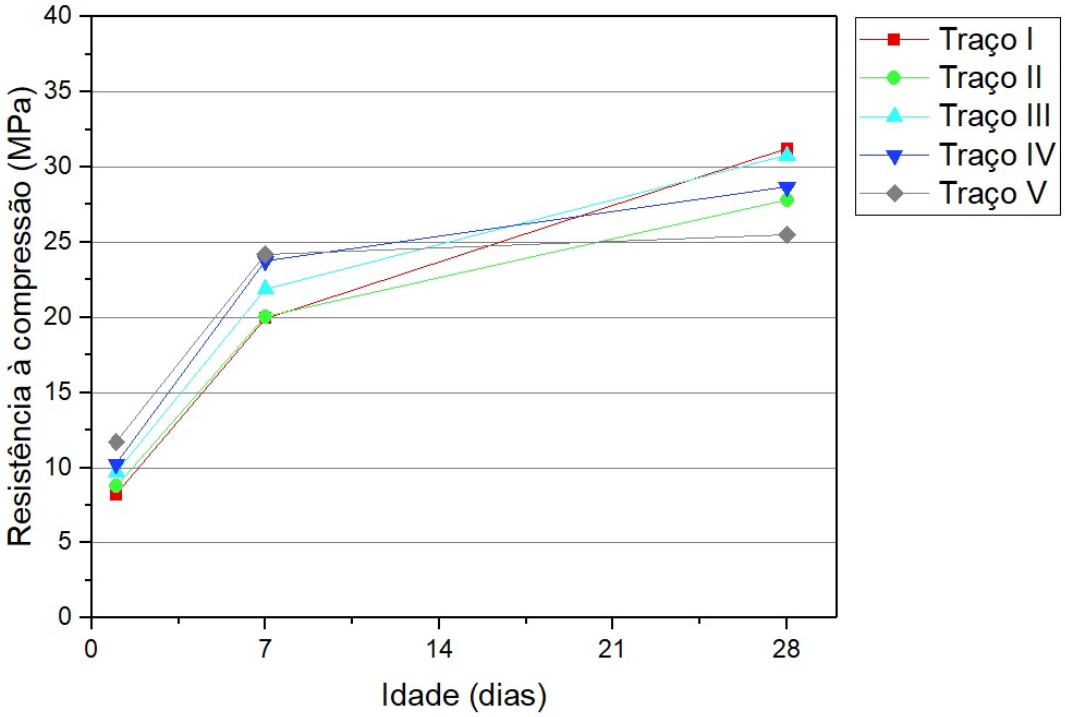
Pela análise da Fotografia 11, é possível observar que os traços I, com 100% de fíler calcário, e V, com 100% de cinza de algaroba, apresentaram IEV 1 (estável); enquanto, os traços II (25%), III (50%) e IV (75%) obtiveram classificação IEV 0 (altamente estável).

4.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.5.1 Resistência à Compressão

Os resultados da resistência à compressão (MPa) dos CAA`s avaliados são apresentados no Gráfico 10, onde é observado a evolução da resistência de cada traço nas três idades. Foi observado que o traço I (padrão) apresentou resultados de resistência aos 28 dias muito semelhante aos valores encontrados por Diederich (2010), que também produziu um CAA utilizando um consumo de cimento similar e adição de 25% de fíler calcário, atingindo resistências mecânicas de 33,8 MPa.

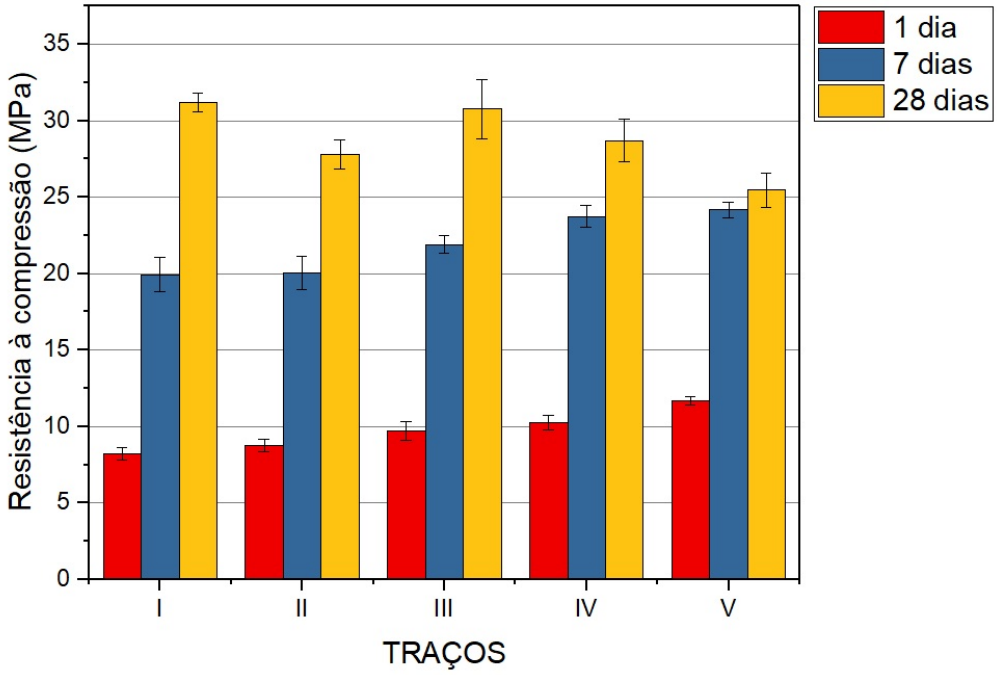
Gráfico 10 - Resistência à compressão dos CAA`s avaliados



Fonte: O Autor (2019).

No Gráfico 11 é apresentado o comparativo das resistências de cada idade por traço.

Gráfico 11 - Comparativo da resistência à compressão de cada traço avaliado



Fonte: O Autor (2019).

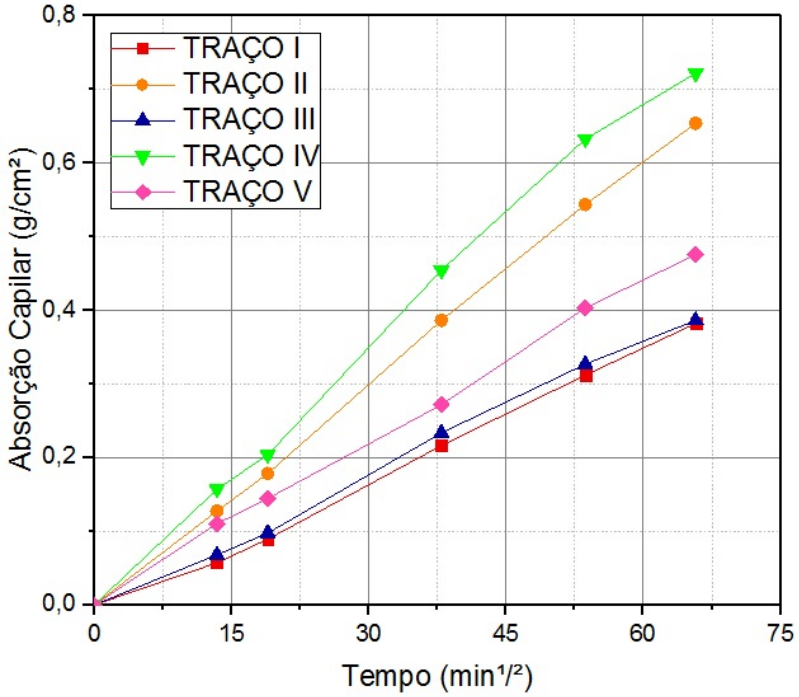
Pela análise do Gráfico 10 é possível observar um crescimento da resistência mecânica à compressão nas idades de 1 e 7 dias, a medida que o teor da incorporação de cinza da algaroba é aumentado. São indícios de que a presença da cinza de algaroba no sistema pode acelerar as reações iniciais de hidratação dos compostos cimentícios. Esse comportamento pode ser explicado devido a atuação da cinza como fíler alternativo aumentando o empacotamento, agindo no CAA como pontos de nucleação quebrando a inércia do sistema, acelerando o processo de hidratação do cimento, consequentemente, proporcionando ganhos de resistência nas primeiras idades. Estudos microestruturais e envolvendo acompanhamento da hidratação do sistema poderão *à posteriori* confirmar tal tendência.

Aos 28 dias, no entanto, não houve incremento na resistência à compressão quando do aumento da substituição do fíler calcário pela cinza de algaroba. Aos 28 dias o traço que mais se aproximou no padrão foi o traço III (50% de substituição). Salienta-se, no entanto, que as perdas percentuais, em termos de valores médios de resistência à compressão foram em torno de 18% (30 MPa para 25 MPa), ainda mantendo valor médio para concretos de 25 MPa quando da substituição de 100% de fíler calcário pelo fíler alternativo.

4.5.2 Absorção Capilar

Os resultados obtidos no ensaio de absorção capilar são apresentados no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Resultados da absorção capilar para os CAAs avaliados



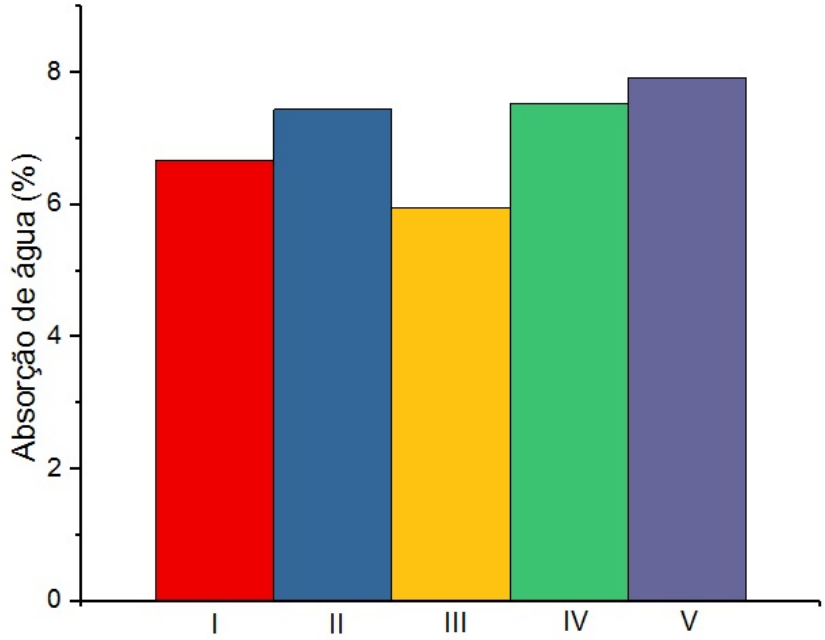
Fonte: O Autor (2019).

Pela análise do Gráfico 12, observa-se que os traços IV (75%) e II (25%) apresentaram maiores graus de absorção capilar. Verifica-se ainda que o traço I (100% de fíler calcário) se mostrou muito semelhante ao traço III (50% de substituição de fíler calcário pelo fíler alternativo), o que corrobora a idealidade da substituição de 50% do fíler calcário pela cinza da algaroba em termos de absorção capilar. Salienta-se que há uma série de fenômenos que regem as respostas de um ensaio de absorção capilar, desde a granulometria dos fíleres, tamanho e diâmetro dos capilares, efeitos de tortuosidade, falhas na moldagem, entre outros. Sendo, assim, difícil preconizar uma explicação única para os comportamentos observados.

4.5.3 Absorção Total

Os resultados obtidos para absorção total são apresentados no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Resultados de absorção total para os CAAs avaliados



Fonte: O Autor (2019).

Pela análise do Gráfico 13 é observado que o traço III (50%) apresentou a menor absorção de água total, muito similar ao traço padrão I. Esse comportamento indica menores porosidades, corroboradas pela menor absorção capilar (Gráfico 12) e maiores resistências à compressão aos 28 dias alcançada pelo traço III (50% de substituição do fíler calcário pela cinza de algaroba) (Gráfico 10).

4.5.4 Resistividade Elétrica

Nesse procedimento decidiu-se verificar apenas os traços I (100% de fíler calcário), III (50% da substituição de fíler calcário por cinza de algaroba) e V (100% de cinza de algaroba), a fim de analisar a influência do teor da cinza na resistividade elétrica do CAA. O comparativo dos resultados da resistividade verificada nos três traços está mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado da resistividade elétrica

Traço	Resultado (Ω.m)
I	320,84
III	361,28
V	292,95

Fonte: O Autor (2019).

Analisando os resultados da resistividade, com relação aos parâmetros apresentados na Tabela 10, observa-se que todos os traços analisados possuem uma desprezível probabilidade de ocorrência de corrosão de armadura nas estruturas de concreto armado (POLDER, 2001).

É verificado ainda, que o traço com 50% de substituição do fíler calcário pela cinza (traço III) apresentou maior resistividade elétrica em relação aos demais traços. Proporcionando, assim, menor mobilidade iônica; dessa forma, pode ser mais resistente ao processo de corrosão de armadura, beneficiando a durabilidade.

4.5.5 Ataque Ácido

Foram verificadas as resistências ao ataque ácido apenas nos traços I (100% de fíler calcário), III (50% da substituição de fíler calcário por cinza de algaroba) e V (100% de cinza de algaroba). Os resultados encontrados no ensaio de ataque ácido do concreto encontram-se compilados na Tabela 19.

Tabela 19 - Perda de massa do concreto pelo ataque de ácidos

Traço	Ácidos / Perda de massa (%)		
	Acético	Sulfúrico	Clorídrico
I	9,97	6,13	28,76
III	19,91	4,49	25,04
V	21,64	6,04	29,82

Fonte: O Autor (2019).

Verifica-se que dentre os três tipos de ácidos o mais agressivo ao concreto é o ácido clorídrico e o menos agressivo é o ácido sulfúrico. O concreto exposto ao ácido acético apresentou maior perda de massa à medida que o teor de cinza era aumentado. É observado também que dentre os traços analisados o traço III se apresentou como sendo o mais resistente ao ataque dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao teor elevado de óxido de potássio presente na cinza de algaroba (acima de 12%), se faz necessário realizar o ensaio de reatividade álcali-agregado dos agregados, e limitar a porcentagem de cinza de algaroba na dosagem ou adotar outras medidas mitigadoras da reação.

Todas as propriedades de fluidez, habilidade passante e resistência à segregação foram atingidas quando da substituição parcial do fíler calcário por cinza de algaroba em teores de até 50%, sendo obtidos concretos autoadensáveis com classes semelhantes ao padrão: SF2, VS1, PJ1, VF1. A estabilidade visual foi melhorada quando da substituição parcial do fíler calcário em 25% e 50%, passando da classificação IEV 1 (estável) para IEV 0 (altamente estável).

No estado endurecido, observou-se que a presença da cinza de algaroba acelerou o desenvolvimento das resistências nas primeiras idades (1 e 7 dias). Aos 28 dias o traço que mais se aproximou no padrão foi o traço III (50% de substituição), com resistências à compressão médias de 31,19 MPa para 30,77 MPa. Foi verificado ainda que o traço III (50%) apresentou melhores resultados com relação a durabilidade do concreto, proporcionando melhorias na resistividade elétrica e na resistência ao ataque de ácidos.

Assim, é possível afirmar que a substituição do fíler pela cinza da algaroba é viável em teores até 50%, para que o CAA não perca suas propriedades de autoadensabilidade. A cinza se mostrou uma adição que pode ser incorporada com sucesso, proporcionando ganhos de resistência nas primeiras idades.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao decorrer da pesquisa foram observados alguns pontos que podem ser sugeridos em futuros trabalhos, como:

- adotar outra metodologia de dosagem do CAA e confrontar com os resultados encontrados no presente trabalho;
- estudar a incorporação das cinzas da algaroba com fíleres em outras granulometrias (325, 400 e 500 mesh);
- avaliar a influência de diferentes percentuais de adição calcária e substituição pela cinza de algaroba;
- realizar estudos microestruturais, acompanhando o processo de hidratação da pasta do CAA com incorporação da cinza de algaroba;
- verificar a influência de diferentes tipos de curas na resistência mecânica do CAA.

REFERÊNCIAS

AGEL, M.; PANESAR, D. K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials,** v. 113, p. 359-368. 2016.

ALANI, A. M.; FARAMARZI, A. **An evolutionary approach to modelling concrete degradation due to sulphuric acid attack.** Applied Soft Computing, **v. 24, p. 985-993, 2014.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 150**: Specification for Portland Cement. Philadelphia, 2017.

_____**. ASTM C 227**: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). Philadelphia, 2010.

_____**. ASTM C 1260**: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). Philadelphia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

_____**. NBR 15577-4:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009.

_____**. NBR 15823-1:** Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

_____**. NBR 15823-2:** Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

_____**. NBR 15823-3:** Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017.

_____**. NBR 15823-4:** Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

_____**. NBR 15823-5:** Concreto autoadensável – Parte 5: determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.

_____**. NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____**. NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice 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 NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

BAN, C. C.; RAMLI, M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 55, p. 669-685. 2011.

BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. **Cement and Concrete Research,** v. 35, p. 2333-2339, 2005.

BÍBLIA, Novo Testamento, Evangelho de João. In BÍBLIA SAGRADA. Português. **Bíblia Sagrada Ave Maria**, Tradução dos Monges Beneditinos de Maredsous. 205 ed. São Paulo: Ave Maria, 2014.

BOSILJKOV, V. B.. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research,** v. 33, n. 9, p. 1279-1286, Setembro, 2003.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA): **CSA A23.2-25A** - Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Mississauga, 2014.

CARDOSO, U. C.; CARNEIRO, V. L. N.; RODRIGUES, E. R. Q.. **APL: arranjo produtivo local.** 48 p. Série Empreendimentos Coletivos - Sebrae. Brasília, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C.. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Isaia, G C. (ed.), vol. 1. p. 345-379. São Paulo: IBRACON, 2005.

DE LARRARD, François.. **Structures granulaires et formulation des bétons**. Paris: LCPC, 2000.

DE SCHUTTER, G.. **Effect of limestine filler as mineral addition in self-compacting concrete.** In: 36º Conference on Our World in Concrete & Structures. Singapore, 2011.

DIEDERICH, P.. **Contribution à l'étude de l'influence des proprieties des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton.** 2010. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Tolouse, Laboratório de Materiais e Durabilidade das Construções, Tolouse, 2010.

DIEDERICH, P.; MOURET, M.; RYCK, A.; PONCHON, F.; ESCADEILLAS, G. The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility - Relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension. **Powder Technology,** v. 218, p. 90-101. 2012.

DOMONE, P.L. Self-Compacting Concrete: An Analysis of 11 Years of Case Studies. **Cement and Concrete Composites,** v. 28, p. 197-208. 2006.

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

EL BARRAK, Maher. **Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais.** 2005. 228f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Toulouse, Toulouse. 2005.

ELINWA, A. U.; EJEH, S. P.; MAMUDA, A. M. Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash. **Construction and Building Materials,** v. 22, p. 1178-1182. 2008.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal,** v. 53, p. 295-307, 2014.

ESQUINAS, A. R.; PÉREZ, D. M.; JIMÉNEZ, M. E.; RAMOS, C.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ, J. M. Mechanical and durability behavior of self-compacting concretes for application in the manufacture of hazardous waste containers. **Construction and Building Materials,** v. 168, p. 442-458. 2018.

FONSECA, T. V.. **Avaliação de concretos auto-adensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada.** 2016, 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Tecnologia, Natal/RN, 2016.

GARCIA, M. L.; COUTINHO, J. S. Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. **Construction and Building Materials,** v. 41, p. 897-910. 2013.

GESOGLU, M.; GUNEYISI, E.; KOCABAG, M. E.; BAYRAM, V.; MERMEDAS, K.. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use marble powder, limestone filler, and fly ash. **Construction and Buildings Materials**, v. 37, p. 160-170, 2012.

GHOMARI, F.; HACENE, B. S.M.A.; TALEB, O.. Study of limestone addition on the mechanical and rheologica characteristics in the SCC. **Jordan Journal of Civil Engineering,** Vol. 5, Nº 3, p. 412-423, 2011.

GRANATA, M. F. Pumice powder as filler of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 581-590, 2015.

LAVAGNA, L.; MUSSO, S.; FERRO, G.; PAVESE, M. Cement-based composites containing functionalized carbon fibers. **Cement and Concrete Composites,** v. 88, p. 165-171, 2018.

LE, M. V. A.. **Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud.** 2014. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Tolouse, Laboratório de Materiais e Durabilidade das Construções, Tolouse, 2014.

LELOUP, W. A.. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento portland.** 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2013.

LISBOA, E. M.. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió, 2004.

MELO, M.C.S de. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2012.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H.. Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. **Construction and Buildings Materials,** v. 72, p. 83-93, 2014.

MOON, G. D.; OH, S.; JUNG, S. H.; CHOI, Y. C. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 129-136, 2017.

MORAES, K. A. de M.. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável.** 2010. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010

MOTA, M. H. A.. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (prosopis juliflora) moldado sob pressão.** 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2014.

MOURA, L. S.. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.** 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2017.

NASCIMENTO, J. E. M. F. do. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento.** 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2014.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto.** 2 ed. 738p. São Paulo: PINI, 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M.. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**. Japan Concrete Institute, v.1, p. 5-15, 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M.. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, v.1, p. 3-17, 2000.

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

PIRES, D. R.. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções pernambucano.** 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru/PE. 2016.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 125-131, 2001.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.. **Características de corretivos agrícolas.** 28 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documento 37). São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004.

SCHÖLER, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; HAHA, M. B.; ZAJAC, M.; LUDWIG, H.-M. **Early hydration of SCM-blended Portland cements: A pore solution and isothermal calorimetry study**. Cement and Concrete Research, v. 93, p. 71-82, 2017.

SEBRAE. **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano, 2012.** Relatório final. Serviço de Apoio às Micro e Pequena Empresa do Estado de Pernambuco. Recife, 2013.

SILVA, A. S. M Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury modificado. 2004. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2004.

SILVA, M. G.. **Cimentos portland com adições minerais.** In: Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. Isaia, G. C. (ed.), vol. 1. p. 761-793. São Paulo: IBRACON, 2007.

SILVA, P. R; BRITO, J. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 101-112, 2015.

SUA-IAM, G.; SOKRAI, P.; MAKUL, N.. Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone poder to improve the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1028-1034, 2016.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C.. **Concreto Auto-Adensável.** 1 ed. São Paulo: PINI, 2008.

UMAMAHESWARAN, K.; BATRA, V. S. Physico-chemical characterization of Indian biomass ashes. **Fuel,** v. 87, p. 628-638. 2008.

UYSAL, M.; YILMAZ, K.; IPEK, M.. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 263-270, 2012.

WANG, S.; MILLER, A.; LLAMAZOS, E.; FONSECA, F.; BAXTER, L. Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties, **Fuel,** v. 87, p. 365-371. 2008.