



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

JONATÉRCIO FLORENCIO DE VASCONCELOS MARINHO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA EM CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE
ALGAROBA GERADAS NO APL DO AGRESTE PERNAMBUCO COMO FÍLER
CALCÁRIO ALTERNATIVO**

Caruaru
2019

JONATÉRCIO FLORENCIO DE VASCONCELOS MARINHO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA EM CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE
ALGAROA GERADAS NO APL DO AGRESTE PERNAMBUCO COMO FÍLER
CALCÁRIO ALTERNATIVO**

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

Área de Concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Caruaru

2019

M338a Marinho, Jonatércio Florencio de Vasconcelos.
Avaliação dos efeitos da temperatura em concretos auto-adensáveis com incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL do Agreste Pernambuco como filer calcário alternativo. / Jonatércio Florencio de Vasconcelos Marinho. – 2019.
87 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 – Efeito da temperatura (Pernambuco). 2. Algaroba (Pernambuco).
3. Materiais de construção - Testes (Pernambuco). 4. Resíduos como material de construção (Pernambuco). I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-056)

JONATÉRCIO FLORENCIO DE VASCONCELOS MARINHO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA EM CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE
ALGAROBA GERADAS NO APL DO AGRESTE PERNAMBUCO COMO FÍLER
CALCÁRIO ALTERNATIVO**

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

Aprovada em: 21/02/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. 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 (Orientadora)
Instituto Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças e inspiração para eu terminar esse trabalho.

A minha mãe, por tudo que ela fez e faz por mim.

Ao amigo Rodrigo Araújo na ajuda de todos os ensaios para a conclusão do presente estudo.

A minha orientadora, Professora Doutora Ana Cecília, pela confiança depositada, estímulo, ajuda, orientação e apoio durante toda pesquisa.

A todas as empresas que doaram os materiais utilizados: a concreteira Polimix e ao engenheiro Clóvis Freire pela doação do cimento CPV; a Imap pelo filer doados e a BASF pela doação do superplastificante utilizado.

A Márcio Couceiro pelo empréstimo de equipamentos e orientação para realização do ensaio de RAA.

Ao Cetene pela caracterização microestrutural dos materiais utilizados nesse estudo.

Aos técnicos Everton e Fabíola, pela ajuda nos ensaios realizados.

A professora Érika, pela disponibilidade do laboratório de química.

Aos técnicos do laboratório de química, em especial a Henrique, pela complementação e ajuda nos ensaios de caracterização.

RESUMO

Dentro do cenário industrial, verifica-se que a madeira ainda prevalece como matriz energética, gerando subprodutos descartados na natureza, muitas vezes, sem destinação adequada. No APL pernambucano destaca-se a madeira de algaroba como combustível industrial, gerando grandes quantidades de cinzas. Essa cinza é rica em carbonato de cálcio (CaCO_3), podendo ser utilizada em substituição ao fíler calcário. Fíleres são comumente utilizados como efeito de enchimento em materiais cimentícios, sendo um dos finos mais utilizados na dosagem de concretos auto-adensáveis (CAA) para garantir que suas propriedades no estado fresco sejam mantidas. Outro fator que pode vir a afetar o estado fresco é a mistura e moldagem de concretos em climas quentes, como em regiões tropicais, em função da evaporação da água de amassamento. Assim, a presente pesquisa objetivou analisar as propriedades no estado fresco e endurecido do CAA fabricado com incorporação de cinzas de algaroba produzido em condições de clima quente. Para isso, utilizou-se um traço padrão para potencializar o arranjo estrutural do traço, buscando um esqueleto granular compacto e a melhor acomodação entre os materiais constituintes. Para simular uma região de clima quente, no quesito temperatura, os materiais foram pré-aquecidos em estufa, para obter uma temperatura final de mistura de 50 °C, e os traços corrigidos com água ou superplastificante. Os resultados mostraram que a cinza de algaroba corrobora com um melhoramento na resistência à compressão e com a diminuição da permeabilidade do CAA, principalmente quando há elevação da temperatura de mistura, demonstrando que esse material é uma boa alternativa em substituição ao fíler calcário para produção do CAA em regiões de clima quente.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável. Cinzas de algaroba. Temperatura.

ABSTRACT

The use of wood as an energy matrix still prevails in industrial scenarios, generating by-products. The ashes sometimes are discarded in nature without an adequate destination. Algaroba trees are primarily used in the northeast part of Brazil, India and other places. Algaroba tree ashes are rich in calcium carbonate (CaCO_3) and can be used instead of limestone. Limestone fillers are commonly used as fines in cementitious materials. The use of fines is essential to ensure the maintenance of the fresh-state behavior in self-compacting concretes (SCC). Also, mixing and casting concretes in hot climates (for example, in tropical regions) can affect the fresh state conditions, due to the evaporation of the mixing water. Self-compacting concretes are even more susceptible due to their high-water demand. Thus, the present research aimed to analyze the properties in the fresh and hardened state of self-compacting concretes made incorporating the algaroba tree ashes produced in hot weather conditions. For this, an optimized compact granular skeleton was developed based on the constituent materials. The raw-materials were preheated simulating a hot climate region. The use of algaroba ashes improved the compressive strength and decreased the permeability of the SCC, especially in hot weather conditions. To sum up, this material can be an excellent alternative to replace the calcareous filler for SCC production.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - MEV da cinza do FA.	36
Figura 2 – Detalhes do equipamento para o ensaio de compacidade.	41
Figura 3 - <i>Slump flow</i> e T500	46
Figura 4 - Classes dos índices de estabilidade visual.....	48
Figura 5 - Anel-J	49
Figura 6 - Caixa-L.....	50
Figura 7 - Indicação das alturas H_1 e H_2	50
Figura 8 - Funil-V	51
Figura 9 - Execução do ensaio do funil-V	52

LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 - Etapas e ensaios realizados na pesquisa.....	32
---	----

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Fíler Natural	34
Fotografia 2 – Processo de queima da madeira de algaroba para obtenção das cinzas.....	35
Fotografia 3 – FA peneirado em malha #200.....	35
Fotografia 4 – Aferição da expansão das barras de argamassa.....	39
Fotografia 5 – Temperatura dos agregados aferida em condições externa de armazenamento.....	43
Fotografia 6 – Sistema adotado para o ensaio de resistência elétrica.....	54
Fotografia 7 – Agitador rotativo para não voláteis.....	56
Fotografia 8 – IEV	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise termogravimétrica do FA.....	36
Gráfico 2 – Curvas Granulométricas	42
Gráfico 3 – DRX do FC.	58
Gráfico 4 – DRX do FA.....	59
Gráfico 5 – Evolução da expansão com o tempo de cura.....	62
Gráfico 6 – Temperatura em função do tempo durante a mistura.	64
Gráfico 7 - Correções com água	65
Gráfico 8 - Correções com SP.	66
Gráfico 9 - Comparativo <i>Slump Flow</i>	68
Gráfico 10 - Comparativo T500	69
Gráfico 11 - Comparativo Funil-V.....	70
Gráfico 12 - Comparativo Anel-J	71
Gráfico 13 - Comparativo Caixa-L.....	71
Gráfico 14 - Resistência à compressão dividido por idades.	73
Gráfico 15 - Resistência à compressão dividido por traços	74
Gráfico 16 - Absorção total de água.....	75
Gráfico 17 - Absorção capilar.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais problemas e medidas mitigadoras para concretos misturados em altas temperaturas.....	29
Tabela 2 - Limites de temperaturas conforme normalizações.	30
Tabela 3 - Características físico-químicas do cimento.....	33
Tabela 4 - Dados técnicos do aditivo superplastificante	37
Tabela 5 - Combinações de temperaturas.	44
Tabela 6 - Sequência de mistura do CAA.	45
Tabela 7 - Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.....	47
Tabela 8 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo T500 em função de sua aplicação.....	47
Tabela 9 - Classes de IEV.....	48
Tabela 10 - Classes de habilidade passante pelo Anel-J em função de sua aplicação	49
Tabela 11 - Classes de habilidade passante pela Caixa-L em função de sua aplicação	51
Tabela 12 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil-V em função de sua aplicação	52
Tabela 13 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade	55
Tabela 15 - Massa específica dos materiais	57
Tabela 16 - Área superficial específica por Blaine.....	57
Tabela 17 - Área superficial específica por BET dos materiais.....	58
Tabela 18 - Resultados do FRX.	60
Tabela 19 - Variação dimensional média das barras de argamassas	61
Tabela 20 - Composição dos traços referenciais	63
Tabela 21 - Resultados no estado fresco.....	67

Tabela 22 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica	76
Tabela 23 - Resultados do ensaio de ataque ácido	77

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AG	Agregado graúdo
AM	Agregado miúdo
APL	Arranjo produtivo local
ASTM	American Society for Testing Materials
BET	Brunauer, Emmett e Taller
CA	Cinzas de algaroba
CAA	Concreto auto-adensável
CETENE	Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste
CP V ARI	Cimento Portland tipo V com alta resistência inicial
CP III	Cimento Portland tipo III
CP	Corpo-de-prova
Cps	Centipoise
DNIT	Departamento nacional de infraestrutura de transporte
DRX	Difratometria ao Raios-X
EG	Esqueleto granular
FA	Fíler alternativo
FC	Fíler calcário
FRX	Fluorescência de Raios-x
IEV	Índice de Estabilidade Visual

MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial hidrogeniônico
RAA	Reação álcali-agregado
RC	Resistência à compressão
RT	Resistência à tração
SP	Superplastificante
TR	Traço de referência
TQ	Traço em condições de clima quente
TG	Análise termogravimétrica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Problemática e Justificativa	18
1.2	Objetivos Geral e Específicos	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Concreto Auto-Adensável	21
2.2	Fíler Calcário	23
2.3	APL – Arranjo Produtivo Local	24
2.4	Algaroba (prosopis juliflora)	25
2.5	Clima Quente	27
2.6	Efeitos da Temperatura no Concreto	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais Utilizados	33
3.1.1	Cimento	33
3.1.2	Agregado Miúdo (AM)	33
3.1.3	Agregado Graúdo (AG)	34
3.1.4	Fíler Calcário (FC)	34
3.1.5	Cinzas de Algaroba (FA)	34
3.1.6	Aditivo Superplastificante (SP)	37
3.1.7	Água	37
3.2	Caracterização dos Materiais Utilizados	37
3.2.1	Massa Específica	37
3.2.2	Área Superficial Específica por BET	38
3.2.3	Área Superficial Específica pelo Permeabilímetro de Blaine	38

3.2.4	Difração de Raios-X (DRX)	38
3.2.5	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	39
3.2.6	Reatividade Álcali-Agregado	39
3.3	Metodologia para Dosagem do CAA	40
3.3.1	Traço Referencial	40
3.4	Tratamento Prévio dos Materiais para Simular as Condições de Clima Quente.....	42
3.5	Sequência de Mistura do CAA	44
3.6	Ensaio no Estado Fresco.....	45
3.6.1	Espalhamento (<i>slump flow test</i>) e Tempo de Escoamento (T500).....	46
3.6.2	Índice de Estabilidade Visual (IEV)	48
3.6.3	Anel-J	49
3.6.4	Caixa-L	50
3.6.5	Funil-V	51
3.7	Moldagem dos Corpos-de-Prova	53
3.8	Cura	53
3.9	Ensaio no Estado Endurecido.....	53
3.9.1	Resistência à Compressão.....	53
3.9.2	Absorção Total	53
3.9.3	Absorção Capilar	54
3.9.4	Resistividade Elétrica	54
3.9.5	Ensaio de Ataque Ácido	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Caracterização dos Materiais Utilizados	57
4.1.1	Massa Específica	57
4.1.2	Área Superficial Específica pelo Permeabilímetro de Blaine	57
4.1.3	Área Superficial Específica por BET	57

4.1.4	DRX.....	58
4.1.5	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	59
4.1.6	Reatividade Álcali-Agregado	60
4.2	Dosagem do CAA	63
4.2.1	Traço Referencial	63
4.3	Avaliação da Temperatura Durante a Mistura do CAA	64
4.4	Correções para Manter as Propriedades Auto-Adensáveis	65
4.5	Ensaio no Estado Fresco.....	67
4.6	Ensaio no Estado Endurecido.....	73
4.6.1	Resistência à Compressão.....	73
4.6.2	Absorção Total	74
4.6.3	Absorção Capilar	75
4.6.4	Resistividade Elétrica	76
4.6.5	Ensaio de Ataque Ácido	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática e Justificativa

Concretos auto-adensáveis (CAA) são promissores, dada sua facilidade de aplicação em campo, pois facilitam a moldagem se adequando tanto à concretagem em obra, como à confecção de artefatos pré-moldados (LE, 2014). Esses benefícios são oriundos da capacidade de auto-adensamento, viabilizadas através de propriedades reológicas adequadas e de não-segregação do sistema, garantida em função da presença de finos (fíleres) aliada ao uso de superplastificante (TUTIKIAN, 2007; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; BRADU e FLOREA, 2015).

O fíler é uma adição mineral finamente moída obtida a partir da cominuição de uma rocha calcária. Apresenta granulometria semelhante à do cimento Portland, podendo atuar tanto com um aspecto físico de empacotamento granulométrico, como também como agente de nucleação, acelerando a hidratação dos grãos do cimento (TUTIKIAN, 2007; DAL MOLIN, 2005; SILVA, 2007; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; DAL MOLIN, 2011; DE SCHUTTER, 2011; GHOMARI, HACENE e TALEB, 2011; MOON, OH, *et al.*, 2017; SHADKAM, DADSETAN, *et al.*, 2017; SCHÖLER, LOTHENBACH, *et al.*, 2017).

Pesquisas recentes indicam que os fíleres também possuem reatividade, com a formação de carboaluminatos e monocarboaluminatos, influenciando positivamente a microestruturas dos materiais cimentícios (MOON, OH, *et al.*, 2017; SCHÖLER, LOTHENBACH, *et al.*, 2017).

Nesse âmbito, tem-se as cinzas de Algaroba, ricas em cálcio, constituída basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3) (LELOUP, 2013; NASCIMENTO, 2014), cuja madeira é o combustível utilizado por cerca de 240 lavanderias no Agreste Pernambucano, conforme levantamento realizado por Moura (2017). Para apenas uma lavanderia de porte médio, o resíduo gerado pela queima da madeira de Algaroba é de cerca de 6.500 kg/mês de cinzas, que são descartadas de maneira inadequada no meio ambiente (MELO, 2012).

Assim, devido à semelhança dessa cinza com fíler calcário natural em relação a sua composição química e possível tratamento no aspecto físico, observa-se o

potencial do CAA de incorporar as cinzas leves de madeira ricas em cálcio como filer alternativo para garantir a fluidez no CAA.

Além disso, verifica-se, principalmente na região Nordeste do Brasil, a predominância de clima tropical e a influência da temperatura proveniente desse clima é praticamente ignorada no âmbito da construção.

Pineaud *et al.* (2016), de maneira geral, destacam que os efeitos da temperatura em CAA's têm sido pouco estudados e, através de ensaios, constatou que esse fator interfere nas propriedades mecânicas do CAA.

Estudos comprovam que as principais consequências da influência do clima quente no concreto são: alta temperatura durante a mistura e/ou cura, observando um valor máximo de 50 °C; perda de trabalhabilidade e aumento do consumo de água (PAUL, 1958; HAMPTON, 1981; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; SOROKA, 2003; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005), estendendo a perdas na resistência à compressão em idades de 28 dias ou mais (BURG, 1996; KIM, HAN e SONG, 2002; KANSTAD, HAMMER, *et al.*, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2005; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005), embora a resistência à compressão aumente em idades precoces (BURG, 1996; KANSTAD, HAMMER, *et al.*, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2005; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005).

Ainda, de acordo com Paul (1958) e da ACI 305.1:2014, para concretos produzidos com cimento Portland comum, o consumo de água aumenta significativamente quando a temperatura inicial da mistura está acima de 30 °C. Zhang *et al.* (1999) observaram que há decréscimo da resistência à compressão na idade de 28 dias, quando a temperatura do concreto durante as 24 primeiras horas é de 38 °C.

Nóbrega *et al.* (2018) analisaram a influência da temperatura em CAA's e constataram que concretos misturados a cerca de 50 °C necessitaram de correção de água para manter as propriedades auto-adensáveis, e que essa correção pode influenciar de maneira negativa, havendo decréscimo de resistência à compressão, durabilidade, na habilidade passante, fluidez, escoamento e viscosidade plástica.

Portanto, verificadas as condições ambientais da região, a presente pesquisa visa avaliar os efeitos da temperatura em CAA's produzidos com incorporação de cinza de Algaroba como fíler alternativo.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da temperatura de mistura nos concretos auto-adensáveis produzidos com incorporação de cinzas de Algaroba.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Simular, em ambiente de laboratório, condições de regiões de clima quente, no quesito de temperatura, e ajustar o traço de referência para atender às condições de auto-adensabilidade;
- b) Avaliar, no estado fresco e endurecido, os efeitos da temperatura de mistura nos concretos auto-adensáveis adicionados com cinzas de algaroba.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto Auto-Adensável

O concreto auto-adensável (CAA) utilizado hoje foi desenvolvido no Japão na década de 80, com aplicação prática em 1988. As primeiras pesquisas foram iniciadas no ano de 1983 pelo professor Hajime Okamura e tinham por objetivo resolver o problema de baixa durabilidade em construções em concreto armado. Foi visto que muitos desses problemas eram relacionados a falhas no processo de adensamento do concreto, principalmente em locais com grande taxa de armadura (SEDRAN, 1999; TUTIKIAN, 2007; GOMES e BARROS, 2009).

Para que o concreto seja considerado auto-adensável, três propriedades precisam ser alcançadas simultaneamente: fluidez; coesão durante o escoamento, também chamada de habilidade passante; e resistência à segregação (SEDRAN, 1999; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; GOMES e BARROS, 2009). Essa definição é bem semelhante a constante na ABNT NBR 15823-1:2017, que acrescenta como um concreto capaz de fluir e auto-adensar através de seu peso próprio, preenchendo a fôrma, passando através da armadura ou pequenos espaços, mantendo a homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento

De maneira sucinta, as propriedades mencionadas podem ser definidas: a fluidez como a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma, preenchendo todos os vazios; a habilidade passante como a capacidade da mistura de escoar pela fôrma, sem obstrução de fluxo devido à armadura; e resistência à segregação como a propriedade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, enquanto passa ou não por obstáculos (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008).

Após o desenvolvimento do CAA na década de 80, esse tipo de concreto tornou-se muito utilizado devido sua capacidade de penetrar entre as barras de aço estreitamente espaçadas sem qualquer procedimento de vibração (SEDRAN, 1999; MANSOOR *et al.*, 2018).

Pode-se elencar como vantagens (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; DIEDERICH, 2010; SEDRAN, 1999; GOMES e BARROS, 2009; LISBÔA, 2004; FILHO, BARRAGÁN, *et al.*, 2008):

- a) aumento da produtividade, acelerando a construção;
- b) maiores possibilidades arquitetônicas, com geometrias complexas;
- c) pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar, evitando grandes vazios e falhas decorrentes de má vibração;
- d) superfícies com acabamento melhor;
- e) eliminar a etapa de adensamento e a interferência humana, reduzindo o risco de acidentes de trabalho e custo com pessoal;
- f) permite concretagens em espaços reduzidos;
- g) elimina o barulho de vibração, ajudando na saúde do trabalhador da construção civil, possibilitando também concretagens noturnas e em locais próximos a escolas e hospitais;
- h) pode reduzir o custo final da obra caso seja considerado os ganhos acima citados.

Entre as desvantagens do CAA, pode-se destacar (LISBÔA, 2004; FILHO, BARRAGÁN, *et al.*, 2008):

- a) o custo de fabricação, dado que sua formulação requer, geralmente, um alto consumo de cimento, além de adições e aditivos;
- b) precisa de mão-de-obra especializada, com controle tecnológico e aplicação;
- c) necessita de cuidados especiais com o transporte, a fim de evitar segregação;
- d) apresenta menor tempo disponível para aplicação quando comparado ao concreto convencional.

Atualmente, o CAA é amplamente utilizado em muitos países para aplicações versáteis, arranha-céus de alta elevação, infraestrutura urbana e configurações estruturais (MANSOOR *et al.*, 2018). No entanto, a utilização do CAA, apesar de estar aumentando consideravelmente, ainda é pequena, quando se analisa que suas vantagens vão além da sua capacidade de vencer obstáculos sem vibração (TUTIKIAN, 2007).

2.2 Fíler Calcário

No Brasil não há uma norma padronizando o uso de fíleres para mistura de concretos, com definições de característica físico-química, conceito e especificações. Existe a DNER-EM 367:1997, que caracteriza e normaliza o fíler a ser utilizado para misturas betuminosas, definindo-o como um material finamente dividido, passante, no mínimo, em 65% na peneira de 0,075 mm e inerte em relação aos demais componentes da mistura.

Para Tutikian (2004); Tutikian e Dal Molin (2008) e Dal Molin (2011), o fíler pode ser definido com um material finamente dividido, com diâmetro de partículas próximos ao do cimento, provocando uma ação física, melhorando algumas características de concretos e argamassas. Pode ser um material natural ou inorgânico. O importante é que o fíler possua uniformidade e, principalmente, seja fino. Dentre as propriedades melhoradas, pode-se citar a trabalhabilidade, a permeabilidade e a tendência a fissuração.

Os fíleres calcários podem ser classificados conforme sua composição química, sendo considerados como calcíticos, magnesianos ou dolomíticos. A diferença entre eles está relacionada ao teor de óxido de magnésio (MgO) e óxido de cálcio (CaO), onde: o fíler calcário calcítico possui de 1% a 5% de MgO e 45% a 55% de CaO; o fíler calcário magnesiano possui de 5% a 12% de MgO e 40% a 42% de CaO; e o fíler calcário dolomítico que possui de 12% a 21% de MgO e 25% a 35% de CaO (PRIMAVESI e PRIMAVESI, 2004).

O óxido de magnésio não é bem avaliado em misturas cimentícias, dado que esse composto reage com água formando, lentamente, $Mg(OH)_2$, que causa expansão de volume que pode chegar a 118% (LINGLING e MIN, 2005; AOKI, 2007).

Além do problema com expansão, o MgO, pode comprometer a durabilidade do concreto em função do risco de ocorrer reação álcali-carbonato (LEITE, 2007; ARRAIS, 2011). Por isso, as normas brasileiras (ABNT NBR 11578:1991; ABNT NBR 5736:1991; ABNT NBR 5733:1991) fixam os valores de MgO contidos nos cimentos em até 6,5%, exceto para cimentos CPIII, conforme disposto na ABNT NBR 5735:1991, que são adicionados com escória de alto forno (AOKI, 2007). A exceção ligada ao cimento CPIII justifica-se pela redução da permeabilidade ocasionada pela

escória de alto forno, que pode inibir a reação álcali-carbonato (FONTOURA, 1999 *apud* ARRAIS, 2011).

Ainda, misturas aditivadas com superplastificante à base de policarboxilato (poliacrilato) podem ter os efeitos benéficos desse aditivo inibidos pelo MgO, causando uma elevação acentuada da viscosidade da pasta (NEDHI, 2000).

Embora existam os fíleres calcários naturais, existem alguns resíduos que podem ser citados que funcionam como filer calcário alternativo quando adicionados a materiais cimentícios, são eles: pó de corte de mármore, pó granítico, pó de pedra, pó de cálcio, calcário, casca de ovo, casca de ostra, que não possuem atividade química, auxiliando no empacotamento granulométrico da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Aproximadamente 3% do filer calcário adicionado no cimento reage quimicamente na hidratação desse material, acelerando a hidratação do C_3S (TAYLOR, 1997; DAL MOLIN, 2005). Ainda, Moon *et al.* (2017) e Schöler *et al.* (2017) relatam que a reatividade do filer se estende à formação de carboaluminatos e monocarboaluminatos, influenciando positivamente a microestruturas dos materiais cimentícios.

A incorporação de filer no CAA, ajuda a melhorar diversas propriedades, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Esse material pode agir como pontos de nucleação, quebrando a inércia do sistema e fazendo com que os grãos de cimento reajam mais rapidamente com a água, obtendo, assim, ganhos de resistência nas primeiras idades. Ainda, a compacidade do sistema aumenta, o que dificulta a penetração de agentes agressivos externos, melhorando a zona de transição e aumentando a durabilidade (TUTIKIAN, 2007; DAL MOLIN, 2005; SILVA, 2007; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; DAL MOLIN, 2011; DE SCHUTTER, 2011; GHOMARI, HACENE e TALEB, 2011; MOON, OH, *et al.*, 2017; SHADKAM, DADSETAN, *et al.*, 2017; SCHÖLER, LOTHENBACH, *et al.*, 2017).

2.3 APL – Arranjo Produtivo Local

O Brasil é o quinto maior produtor têxtil do mundo, atrás da China, Índia, Estados Unidos e Paquistão. O agreste Pernambucano concentra o segundo maior pólo de confecções do Brasil, perdendo apenas para São Paulo e, até 2020, tem

potencial de ser o maior produtor de malha do país (LACERDA, 2013; PIMENTEL, 2017).

Nesse cenário, tem-se os Arranjos Produtivos Locais (APL), que são aglomerações de empresas situadas num território em comum, apresentando especialização produtiva e que mantêm algum vínculo de cooperação, articulação, interação e aprendizagem entre si e com outros, tais como governo, associações empresariais, além de instituições de crédito, ensino e pesquisa. O APL tem como principal objetivo dinamizar as estruturas empresariais, gerando emprego e renda (CASTRO, 2009; ITEP, 2018).

O APL de confecções Pernambucano, é praticamente composto pela região agreste, concentrado principalmente nos municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama. Somente esses três municípios são responsáveis por 77% da produção têxtil do estado, gerando cerca de 100 mil empregos, distribuídos em mais de 32 mil unidades produtivas. Estima-se, ainda, que gere cerca R\$ 9 bilhões por ano (LACERDA, 2013; PIMENTEL, 2017).

No APL de confecções de Pernambuco existem cerca de 240 lavanderias, sendo a maior parte delas localizadas em Caruaru e Toritama (FILHO, 2016; MOURA, 2017). Essas indústrias geram diversos resíduos sólidos, que são descartados no meio-ambiente sem tratamento adequado (LELOUP, 2013).

A queima de madeira ainda é muito utilizada no APL de confecções de Pernambuco, por causa do custo e adaptação de infraestrutura para emprego de energia elétrica e do gás natural. Por isso, o aquecimento da água e a geração do vapor utilizados pelas lavanderias são realizados, exclusivamente, pela queima de madeira de algaroba (*Prosopis juliflora*) extraída nas regiões circunvizinhas às indústrias (LELOUP, 2013; MOTA, 2014).

Destaca-se, ainda, que os aspectos legais proíbem o corte de madeiras nativas, sendo liberada a queima das demais espécies como a algaroba (MOTA, 2014).

2.4 Algaroba (*prosopis juliflora*)

A algarobeira, ou simplesmente algaroba, é uma árvore da família das leguminosas (*Leguminosae*, subfamília *Mimosoideae*) pertencente ao gênero

Prosopis, do qual são conhecidas mais de 40 espécies, distribuídas em três continentes: América, Ásia e África (RIBASKI, DRUMOND, *et al.*, 2009).

A *Prosopis juliflora* ocorre naturalmente no norte da América do Sul, América Central e México. No Brasil, a algaroba é cultivada principalmente na região Nordeste. Seu surgimento foi a partir de 1942, no município de Serra Talhada/PE, com sementes oriundas do Peru. Essa espécie de madeira tem como característica resistir a longos períodos de estiagem, sendo propícia a se desenvolver em Pernambuco (RIBASKI, DRUMOND, *et al.*, 2009).

Sua madeira é durável, com aplicação para estacas para cercas, mourões, dormentes, taboas, lenha e carvão, além de seus frutos serem importantes fontes de proteínas e carboidratos, que podem ser aproveitados para alimentação animal e fabricação de melados e farinhas. Seu plantio também pode ser realizado para finalidades múltiplas, como proteção do solo contra erosão, arborização de ruas, sombreamento, conservação e melhoramento de pastagens e suporte à apicultura (RIBASKI, DRUMOND, *et al.*, 2009).

As cinzas de algaroba são consideradas um passivo ambiental típico do APL de Pernambuco (MOTA, 2014). Possuem, em sua composição química, principalmente, composto de calcário, conforme avaliações através de FRX e carbonato de cálcio (CaCO_3), constatados por DRX (MELO, 2012; LELOUP, 2013; NASCIMENTO, 2014; FILHO, 2016).

Informalmente, essas cinzas são usadas para correção de pH de solo, mas a maior parte do resíduo ainda é descartada sem controle ou critério no meio-ambiente (MOTA, 2014). Dentre as aplicações na indústria da construção civil, pode-se citar as pesquisas:

- a) argamassas com adição de cinzas de algaroba (MELO, 2012);
- b) a adição de cinzas de algaroba e lodo têxtil em argamassas (LELOUP, 2013);
- c) a adição de cinzas de algaroba em blocos de gesso (LEITE, 2014);
- d) a substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba (NASCIMENTO, 2014);
- e) a substituição parcial do cimento por cinza de algaroba em tijolos de solo-cimento (FILHO, 2016);
- f) a incorporação de cinza de algaroba em concreto seco (MOTA, 2014);

- g) a substituição do cimento por cinza de algaroba em argamassas (PIRES, 2016);
- h) a utilização de cinzas de algaroba e lodo de papel em concretos (PACKIALAKSHMI e JYOTHI, 2016);
- i) a incorporação de cinzas de algaroba em concreto betuminoso usinado a quente (MOURA, 2017);
- j) a substituição parcial do cimento por cinzas de algaroba em concreto convencional (MURUGAN e MUTHURAJA, 2017; RAGHU, SHARATH, *et al.*, 2017);
- k) a produção de cal hidratada a partir da cinza de algaroba (MELO, NEVES, *et al.*, 2018).

Essas pesquisas demonstraram que esse rejeito pode ser utilizado na indústria da construção civil como material que pode ser aplicado a diversos usos, desde concretos, argamassas, fabricação de blocos, revestimentos asfálticos e produção de cal hidratada.

2.5 Clima Quente

Clima quente é definido como qualquer combinação de temperatura elevada e baixa umidade relativa (ACI 305R:2010; MAILAR *et al.*, 2016). Esses fatores, combinados com a intensidade da radiação solar e a velocidade do vento, tendem a afetar negativamente a qualidade do concreto fresco ou endurecido, acelerando a evaporação de água e a hidratação do cimento (LE, 2014).

Berhane (1992) dividiu clima quente em três grupos, com base na magnitude da umidade relativa média da região:

- a) Clima quente e úmido: umidade relativa igual ou acima de 85%;
- b) Clima quente e moderado: umidade relativa entre 50% e 65%;
- c) Clima quente e seco: umidade relativa abaixo de 40%.

O clima quente e úmido, também considerado tropical, típico da África, Ásia e América do Sul e é caracterizado por alta temperatura, entre 30 °C e 40 °C, alta umidade relativa, precipitação constante e a variação de temperatura entre dia e noite é em torno de 8 °C a 10 °C. Clima quente e seco é encontrado em parte da África,

América do Norte, parte sul da Austrália e Oriente Médio, com temperatura em torno de 50 °C, umidade relativa baixa, intensa radiação solar e variação de temperatura entre dia e noite em torno de 15 °C a 20 °C. (BERHANE, 1992).

No Brasil, com destaque para a região Nordeste, o clima tropical prevalece. No estado de Pernambuco, o município Caruaru/PE tem temperaturas que podem chegar, durante o verão, a 35 °C; o município de Água Belas já chegou a 41,8 °C em 2015 e Recife valores maiores que 35 °C, porém com sensação térmica superior (APAC, 2018).

Ressalta-se ainda que no Brasil ainda há regiões mais quentes, como Bom Jesus/PI, que é considerada a cidade mais quente do país, onde a máxima temperatura já registrada foi de 44,7 °C e o Rio de Janeiro/RJ que alcançou, em 2012, a temperatura máxima de 43,2 °C, com sensação térmica de quase 50 °C (ESTADOSECAPITAISDOBASIL, 2018). Em dezembro de 2018, no município de Antonina, litoral do Paraná, a temperatura chegou a 43,0 °C, com sensação térmica de 64,0 °C (SIMEPAR, 2018).

2.6 Efeitos da Temperatura no Concreto

A temperatura decorrente de climas quentes tende a deteriorar o concreto, provocando alterações no estado fresco, diminuindo a trabalhabilidade (PAUL, 1958; HAMPTON, 1981; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 1997; SCHINDLER e MCCULLOUGH, 2002; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; SOROKA, 2003; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005; AIT-AIDER, HANNACHI e MOURET, 2006; AREL e YAZICI, 2014); e no estado endurecido, afetando a durabilidade e provocando uma perda da resistência em idades de 28 dias ou mais (BURG, 1996; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 1997; SCHINDLER e MCCULLOUGH, 2002; KIM, HAN e SONG, 2002; KANSTAD, HAMMER, *et al.*, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2005; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005; AIT-AIDER, HANNACHI e MOURET, 2006; AREL e YAZICI, 2014), embora a resistência à compressão aumente em idades precoces (BURG, 1996; KANSTAD, HAMMER, *et al.*, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2003; MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 2005; ORTIZ, AGUADO, *et al.*, 2005).

De acordo com ACI 305.1:2014 e dados obtidos de Paul (1958), em concretos incorporados com cimento Portland comum, a necessidade de água aumenta significativamente a partir de uma temperatura inicial de 30 °C; e a resistência à compressão aos 28 dias pode ser 10 a 15% menor quando a temperatura do concreto durante as 24 primeiras horas é de 38 °C (ZHANG, LI e LI, 1999).

Conforme pode ser observado na Tabela 1, o ACI 305.1:2014 detalha os principais problemas que a temperatura elevada pode causar ao concreto, bem como, medidas para minimizar esses problemas, durante a etapa de mistura:

Tabela 1 - Principais problemas e medidas mitigadoras para concretos misturados em altas temperaturas.

Problemas que podem ocorrer no concreto devido a mistura em elevadas temperaturas	Práticas que podem minimizar o efeito da elevada temperatura no concreto
Aumento no consumo de água;	Reduzir e controlar a temperatura dos materiais e do concreto no estado fresco;
Elevada taxa de enrijecimento;	Minimizar o tempo de transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto;
Elevada tendência à fissuração;	Programar concretagens para horários onde as condições climáticas sejam favoráveis;
Dificuldade de controle da quantidade de ar incorporado;	Proteger o concreto da perda de umidade durante a concretagem e o período de cura;
Perda de abatimento e consequente tendência a adicionar água.	Programar reuniões com o pessoal envolvido para discutir os requisitos a serem respeitados durante concretagens em dias quentes; Selecionar os materiais e suas respectivas proporções com especificações satisfatórias para condições de clima quente.

Fonte: O autor

Nota: Adaptado de ACI 305.1:2014

Todas as fases do concreto são afetadas devido as elevadas temperaturas de regiões de clima quente, interferindo na pasta de cimento, zona de transição agregada e interfacial e no processo de hidratação das partículas formadas (AREL e YAZICI, 2014).

Devido a esses problemas, as normas brasileiras e internacionais, especificam os valores de temperaturas do ambiente e do concreto admissíveis para uso. As especificações das principais normas são detalhadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Limites de temperaturas conforme normalizações.

Normas	NBR	Temperatura do ambiente (°C)	Temperatura do concreto (°C)
Brasileiras	ABNT NBR 14931:2004	5 a 35	Não definida
	ABNT NBR 7212:2012	5 a 30	Não definida
	ABNT NBR 6118:2014	0 a 40	Não definida
Internacionais	INN NCh 170:2016	≥ 5	5 a 35
	ACI 305.1:2014	≤ 35	24 a 38
	ACI 306R:2016	≤ 30	≥ 7
	ACI 318:2014	4 a 35	≤ 32

Fonte: O Autor (2019)

Observa-se que as normas brasileiras não estipulam uma temperatura aceitável para o concreto, porém fazem algumas ressalvas: a ABNT NBR 14931:2004 ressalta que a concretagem deve ser suspensa caso a temperatura ambiente seja maior que 40 °C ou menor que 0 °C e a ABNT NBR 6118:2014 afirmam apenas que a variação de temperatura dentro de uma mesma peça não pode exceder 5 °C quando medidas nas faces mais distantes e a temperatura do concreto não pode diferir mais de 15 °C em relação a temperatura ambiente (NETO, 2015).

Nesse âmbito, ainda há a ASTM C94: 2017, descrevendo que nas etapas de produção e transporte em condições de clima quente, o concreto deve ser mantido na menor temperatura possível, sem exceder 32 °C (NETO, 2015).

A temperatura causa um aumento na taxa de evaporação da água do concreto fresco, resultando em uma menor efetividade da água da mistura, reduzindo a trabalhabilidade, resistência e durabilidade (ACI 305.1:2014).

Devido esses fatores, observa-se que a solução mais utilizada no mundo para manter as propriedades do concreto no estado fresco, quando produzido em condições de clima quente, é a introdução de mais água no sistema. Porém, a literatura discorda desse tipo de solução, dado que esse aumento de água pode afetar o funcionamento do sistema (AIT-AIDER, HANNACHI e MOURET, 2006).

Estudos para verificar os impactos da introdução de água no concreto moldado em condições de clima quente verificaram que a introdução de água, até certo ponto, não tem grandes influências na resistência do concreto, dado que parte da água incorporada serve para recompor a água perdida pela evaporação (SOUDKI, EL-SALAKAWY e ELKUM, 2001; AIT-AIDER, HANNACHI e MOURET, 2006).

Esse fato ocorre porque parte da água introduzida no sistema serve para compensar a perda por evaporação e manter a trabalhabilidade, oferecendo umidade suficiente para os processos de hidratação do cimento (MOURET, BASCOUL e ESCADEILLAS, 1997; AIT-AIDER, HANNACHI e MOURET, 2006).

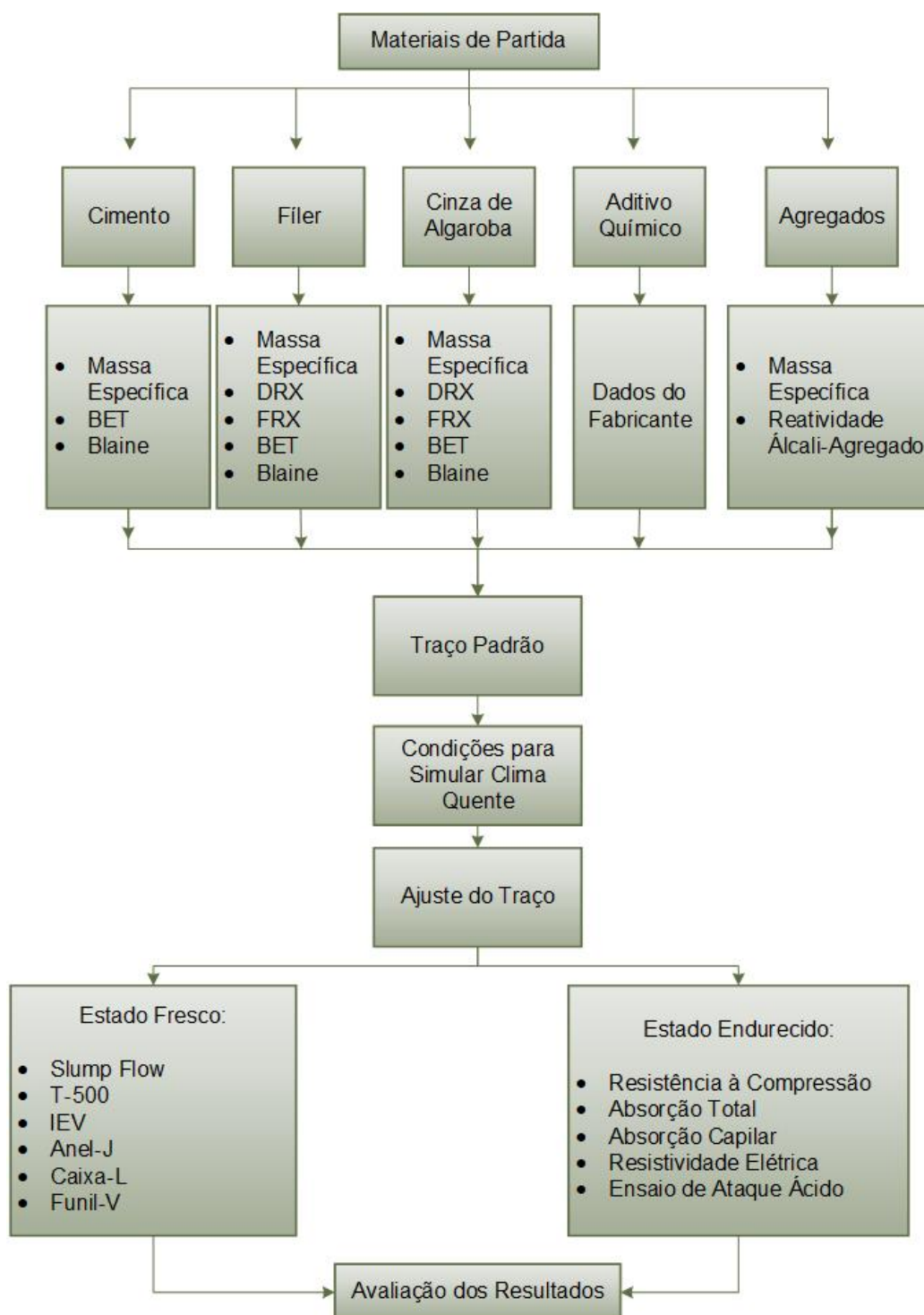
No âmbito de concretos auto-adensáveis, Pineaud *et al.* (2016), de maneira geral, destacam que os efeitos da temperatura em CAA's têm sido pouco estudados e, através de ensaios, constatou que esse fator interfere nas propriedades mecânicas do CAA,

Nóbrega *et al.* (2018) analisou a influência da temperatura (50 °C) nesse tipo de concreto e constatou que para manter as propriedades auto-adensáveis do concreto, a mistura necessitou da introdução de cerca de 7% de água para a correção durante a dosagem. Quando essa correção é feita apenas com superplastificante, há um acréscimo no consumo desse aditivo entre 30 e 34% aproximadamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização dos materiais e os métodos empregados estão esquematizados no diagrama de bloco a seguir, seguindo o fluxo indicado no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Etapas e ensaios realizados na pesquisa.



Fonte: O Autor (2019).

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Cimento

Para o presente trabalho foi utilizado o cimento CP V ARI, de marca Mizú, doado pela concreteira Polimix. A Tabela 3 apresenta as características químicas e físicas dos cimentos utilizados, fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 3 - Características físico-químicas do cimento.

Determinação			
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 ₂ O ₃ (%)		4,90
	Fe ₂ O ₃ (%)		1,83
	CaO (%)		65,40
	SO ₃ (%)		3,60
	MgO (%)		1,06
	K ₂ O (%)		0,27

Fonte: Fabricante (2018).

3.1.2 Agregado Miúdo (AM)

O agregado miúdo (AM) utilizado foi oriundo do município de Caruaru/PE, de origem mineral sílica, com dimensão máxima de 4,75 mm, massa específica de 2,58 g/cm³ e massa unitária de 1,47 g/cm³.

3.1.3 Agregado Graúdo (AG)

O agregado graúdo (AG) utilizado foi o pedrisco (brita 0), de massa específica $2,63 \text{ g/cm}^3$, massa unitária de $1,36 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro máximo de 9,5 mm, de origem granítica, encontrado na região de Caruaru/PE.

3.1.4 Fíler Calcário (FC)

O fíler calcário (FC) utilizado possui dimensão máxima de 200 mesh e foi doado pela empresa Calcário Imap, localizada no município de João Câmara/RN.

Na Fotografia 1, pode-se observar o fíler calcário calcítico, onde observa-se a coloração alaranjada.

Fotografia 1- Fíler Natural



Fonte: O Autor (2019).

3.1.5 Cinzas de Algaroba (FA)

As cinzas de madeira de algaroba (*Prosopis Juliflora*) foram coletados em uma lavanderia local, que utiliza a madeira de algaroba como único combustível em seus fornos. Na Fotografia 2.a pode-se ver a madeira de algaroba; a câmara de combustão da caldeira, Fotografia 2.b; as cinzas geradas pela combustão, Fotografia 2.c e o processo de estocagem para posterior descarte pela lavanderia, Fotografia 2.d.

Fotografia 2 - Processo de queima da madeira de algaroba para obtenção das cinzas.



Fonte: Moura (2017).

Foi realizado um pré-tratamento antes do uso: após a captação, as cinzas foram secas em estufa a uma temperatura de 105 °C, peneiradas em malha de 4,75 mm para retirada de partículas maiores e, novamente, peneiradas na malha 200 mesh. Para o presente trabalho, a cinza de algaroba será tratada como filer alternativo e denominada de FA. Na Fotografia 3 observa-se o FA após o fim do peneiramento. Destaca-se a coloração clara, levemente acinzentada.

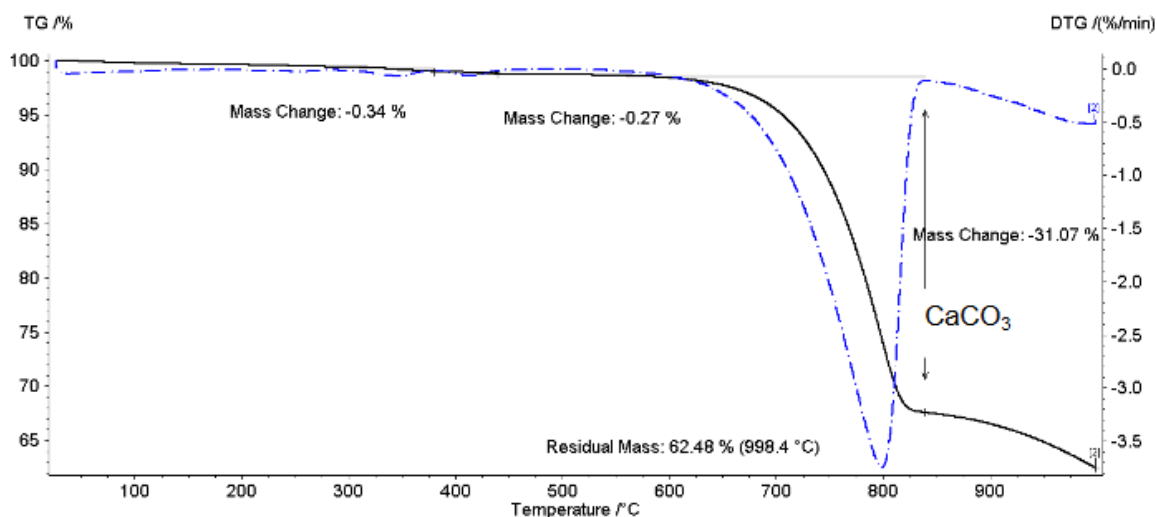
Fotografia 3 - FA peneirado em malha #200



Fonte: O Autor (2019).

Uma análise termogravimétrica (TG) do FA encontra-se exposto no Gráfico 1, destacando a presença de CaCO_3 em sua composição química e uma perda de massa (31,07%) no pico de 800 °C, causado pela decomposição do CaCO_3 .

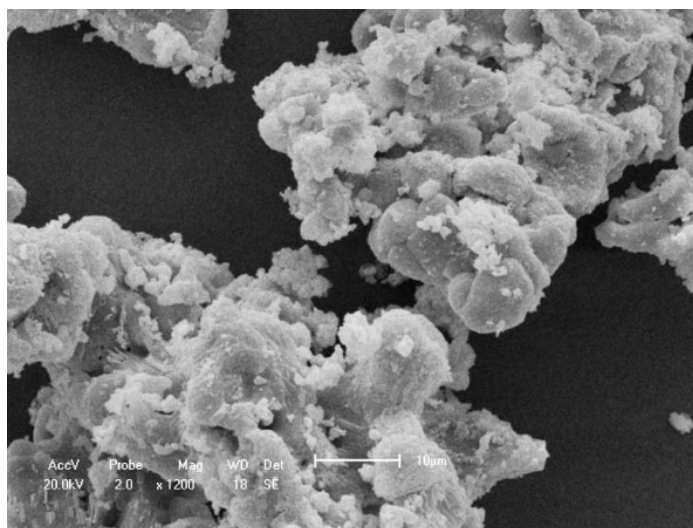
Gráfico 1 – Análise termogravimétrica do FA.



Fonte: Nascimento (2014).

Com a imagem feita através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) aumentada em 1200 vezes, exibida na Figura 1, destaca-se a estrutura arredondada do FA, com partículas da ordem de 10 µm e alguns aglomerados menores.

Figura 1 - MEV da cinza do FA.



Fonte: Leloup (2013).

3.1.6 Aditivo Superplastificante (SP)

O aditivo químico superplastificante (SP) utilizado foi o Glenium 51 da marca BASF, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado, doado pela empresa fabricante.

A Tabela 4, apresenta os dados técnicos do aditivo disponibilizados, através de ficha técnica, pela empresa fabricante.

Tabela 4 - Dados técnicos do aditivo superplastificante

Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido branco turvo	Visual
pH	05 – 07	-
Densidade	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	< 150	Cps

Fonte: O Fabricante (2018).

3.1.7 Água

Foi utilizada água destilada, proveniente do laboratório de química da UFPE – Campus Caruaru, possuindo densidade de 1 g/cm³ e pH 6,55.

3.2 Caracterização dos Materiais Utilizados

3.2.1 Massa Específica

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16605:2017. Com o auxílio de um funil é introduzido uma massa conhecida do material ensaiado no frasco de Le Chatelier, que está preenchido com um líquido, que não reaja quimicamente com o material ensaiado, até a marca corresponde a 0 cm³. A massa do material ensaiado provoca um deslocamento do líquido (entre 18 cm³ e 24 cm³) presente no frasco.

O frasco é posto para descanso e estabilização da amostra por cerca de 30 minutos e, em seguida, é feita a leitura da medida. O resultado é dado pela Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Onde:

ρ : massa específica do material (g/cm³)

m : massa seca do material (g)

v : volume deslocado pela massa do material (cm³)

3.2.2 Área Superficial Específica por BET

A área específica foi determinada através do método de Brunauer, Emmett e Taller (BET), que se baseia na adsorção física e dessorção de gás na superfície da amostra sólida.

Os ensaios de BET foram realizados no Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (Cetene), no laboratório de Nanotecnologia.

3.2.3 Área Superficial Específica pelo Permeabilímetro de Blaine

Os ensaios de área específica pelo método Blaine foram realizados no Laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste, conforme a ABNT NBR 16372:2015. O equipamento utilizado foi o permeabilímetro de Blaine e o procedimento utilizado consiste no tempo necessário para que determinada quantidade de ar atravessasse uma camada compactada do material analisado. A área específica é proporcional ao tempo necessário para que o ar atravessasse a camada compactada do material.

3.2.4 Difração de Raios-X (DRX)

Os ensaios foram realizados no laboratório de Nanotecnologia do Cetene, utilizando o Difratorômetro de Raios-X Bruker D8 Advance Davinci, com parâmetros de entrada: radiação de CuK α (40 kV/40 mA), leitura de 2θ , variando de 5° a 80°, com passo de 0,02 a cada 0,5 segundo.

3.2.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Para análise da composição química dos finos (CPV-ARI e cinzas de algaroba), foi realizado o ensaio de FRX, no laboratório de química da UFPE, Campus Caruaru, em um equipamento da marca Rigaku, modelo Promini, com tensão no tubo de 50 W (Na a U).

3.2.6 Reatividade Álcali-Agregado

O ensaio de reatividade álcali-agregado foi realizado para avaliar se os agregados utilizados são potencialmente reativos. Para isso, utilizou o método acelerado, descrito na ABNT NBR 15577-4:2008, onde utiliza-se uma solução alcalina de hidróxido de sódio a 80 °C, monitorando as expansões dimensionais de barras de argamassa.

São realizadas medições nas idades de 14 e 28 dias, contados a partir da imersão na solução agressiva e pelo menos três leituras intermediárias em cada período. As leituras são realizadas através de um relógio comparador com precisão de 0,001 mm, conforme é observado na Fotografia 4.

Fotografia 4 – Aferição da expansão das barras de argamassa



Fonte: O Autor (2019).

Ainda a ASTM C227:2010 e a ASTM C150:2017, determina que, caso os agregados sejam potencialmente reativos, a quantidade de álcalis equivalentes ou sódio equivalente, determinada pela Equação 2, deve ser igual ou inferior a 0,60% dos componentes analisados (cimento, filer natural e filer alternativo), a fim de evitar problemas de expansão por RAA.

$$Na_{equivalente} = Na_2O + 0,658 K_2O \quad (2)$$

3.3 Metodologia para Dosagem do CAA

3.3.1 Traço Referencial

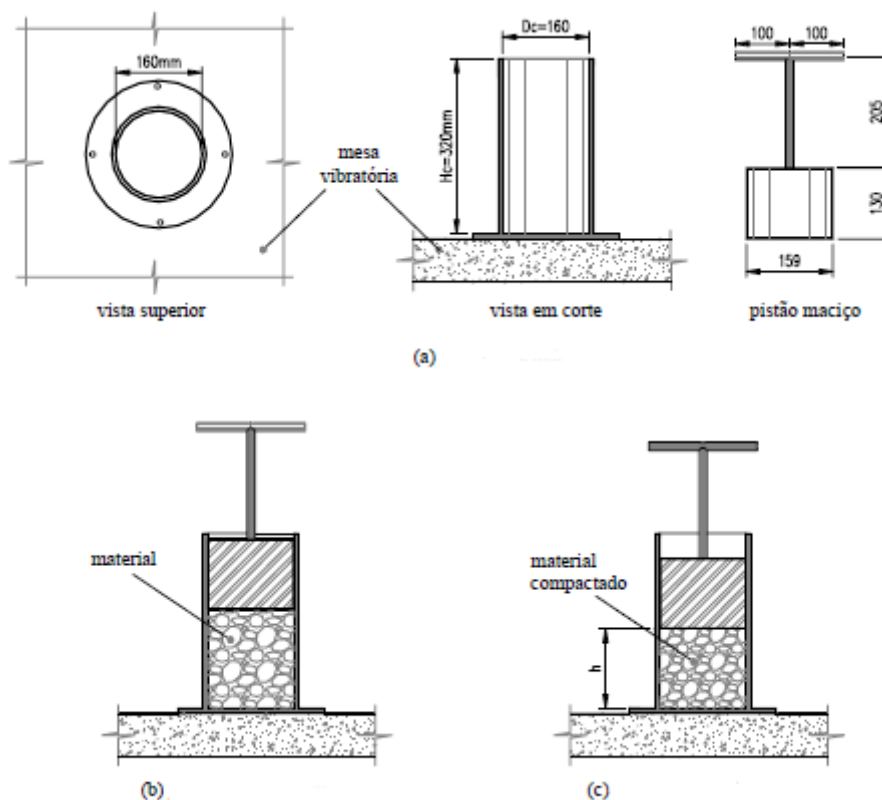
Os traços propostos tiveram consumo de finos de 450 kg/m³, sendo 360 kg/m³ de cimento e 90 kg/m³ de filer calcário natural e/ou alternativo e relação água/finos de 0,5. O teor de superplastificante foi o necessário para atender um espalhamento de 660 a 750 mm, aferido conforme ABNT NBR 15823-1:2017. Os agregados foram dosados através da formulação de um esqueleto granular. Sua elaboração deu-se através do método da compacidade máxima experimental, detalhada por Sedran (1999) e De Larrard (2000), buscando encontrar a proporção adequada de agregado graúdo (AG) e agregado miúdo (AM) para a formação do esqueleto granular (EG) compacto e com baixo índice de vazios.

Os autores detalham que a aferição compacidade máxima experimental é feita em um recipiente cilíndrico de 16 x 32 mm (diâmetro x altura), onde os agregados são postos maneira lenta e uniforme para evitar dispersão. Em seguida, é disposto um pistão de aço de 20 kg de massa, a fim de aplicar uma pressão constante de 10 KPa na parte superior da amostra e, logo depois, o conjunto é posto em uma mesa vibratória e submetido a vibrações de 2 minutos a uma amplitude de 0,4 milímetro, 40 segundos a 0,2 milímetro e 1 minuto a 0,08 milímetro. Após, é realizada uma leitura da altura final do volume do esqueleto granular, por um telémetro de ultrassom com precisão de 0,001 mm.

A Figura 2 apresenta detalhes de um equipamento utilizado para mensurar a compacidade dos agregados, onde observa-se os detalhes do cilindro, do pistão e o

apoio na mesa vibratória (Figura 2.a), da posição inicial do ensaio (Figura 2.b) e da posição final do ensaio (Figura 2.c).

Figura 2 – Detalhes do equipamento para o ensaio de compacidade.



Fonte: Silva (2004).

Para ambos os autores é realizado um ensaio com o AM com 3 Kg de massa e outro ensaio com o AG com 7,5 Kg de massa. A compacidade máxima experimental é encontrada através da Equação 3:

$$C = \frac{M_s}{\rho v} \quad (3)$$

Onde:

C: compacidade máxima experimental;

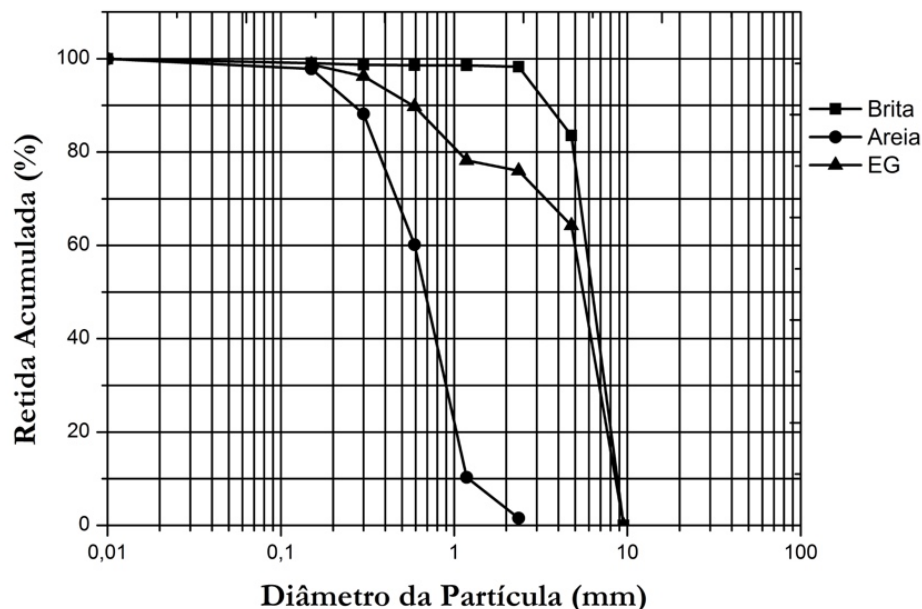
M_s : massa seca da amostra analisada;

ρ : densidade média da amostra;

v: volume final da amostra.

Ainda, na Gráfico 2 é possível observar as curvas granulométrica dos agregados e do esqueleto granular (EG).

Gráfico 2 - Curvas Granulométricas



Fonte: O Autor (2019).

Com isso, e através da massa específica dos outros materiais, o traço foi calculado.

3.4 Tratamento Prévio dos Materiais para Simular as Condições de Clima Quente

A fim de verificar as propriedades do CAA em condições de clima quente, no quesito de temperatura, buscou-se estudar um valor que estivesse próximo da realidade. Verificando as temperaturas dos materiais, têm-se: que os agregados quando expostos a incidência solar, em uma região de clima tropical no verão, podem atingir facilmente temperaturas superiores a 70 °C (conforme pode ser observado na Fotografia 5); que o cimento também pode atingir essa temperatura durante a saída do local de produção até o local de entrega; a água e o superplastificante a 20 °C, um valor aceitável para as condições de distribuição e armazenagem.

Fotografia 5 - Temperatura dos agregados aferida em condições externa de armazenamento.



Fonte: O Autor (2019).

Ressalta-se que embora a temperatura aferida dos agregados, conforme exemplificado na Fotografia 5, apresente esses valores em sua camada superficial, o presente estudo buscou avaliar a pior situação, por isso, esse valor não foi corrigido.

Então, a temperatura de final de mistura do concreto pode ser calculada através do calor específico e massa de cada material, obtendo-se a temperatura de aproximadamente 50 °C, independente do calor gerado pelas reações químicas geradas pelo cimento em contato com a água (NÓBREGA, MOURET, *et al.*, 2018). Por fim, em contexto de laboratório, os valores de temperaturas do cimento, fíler e agregados são elevados para 80 °C para manter a temperatura ao final da mistura em 50 ± 2 °C (NÓBREGA, MOURET, *et al.*, 2018).

A metodologia empregada na mistura e tratamento dos materiais do CAA para simular condições de clima quente foi a seguida por Nóbrega *et al.* (2018): os materiais sólidos (cimento, cinzas de algaroba e agregados) passaram por um tratamento térmico que consiste em, primeiramente, secar o material em estufa a 105 °C por, no mínimo, 24 horas, depois deixar esfriar por 24 horas a temperatura ambiente e, após, aquecê-los em estufa a 80 °C durante, no mínimo, 24h. O material sai da estufa diretamente para a etapa de mistura do CAA, em um tempo máximo de 2 minutos. A

água e o superplastificante são incorporados ao CAA a 20 °C, garantidos através de sua armazenagem em sala climatizada com temperatura de 20 ± 2 °C por cerca de 4 horas antes do uso.

Para os traços de referência, os agregados foram secos em estufa à 105 °C por, no mínimo, 24 horas; e, depois, resfriados por no mínimo 24 horas à temperatura ambiente de laboratório. Esse procedimento visou a retirada de umidade, garantindo que a água utilizada na mistura fosse a proposta no traço. Após, todos os materiais foram pesados e dispostos em recipientes que impedissem a entrada de umidade e deixado em sala climatizada com temperatura de 20 ± 2 °C, aferidos através de um termo-higrômetro digital, por cerca de 4 horas.

Os equipamentos utilizados para os dois tipos de traços propostos também foram armazenados em sala climatizada com temperatura de 20 ± 2 °C por cerca de 4 horas antes do uso.

Na Tabela 5 pode-se ver as combinações de temperaturas, de forma resumida, do traço de referência (TR) e do traço em condições de clima quente (TQ).

Tabela 5 - Combinações de temperaturas.

Traço	Temperatura inicial para a mistura (Cimento – FC/FA – EG – Água – SP)
TR	20 °C - 20 °C - 20 °C – 20 °C – 20 °C
TQ	80 °C - 80 °C - 80 °C – 20 °C – 20 °C

Fonte: O Autor (2019).

O estudo avaliou dois diferentes tipos de correção para manter as propriedades auto-adensáveis: por incremento de água e por incremento de superplastificante. O indicativo da adição de água ou superplastificante é feita através do ensaio de espalhamento (*slump flow*), mantendo as características de espalhamento entre 660 a 750 mm.

3.5 Sequência de Mistura do CAA

A mistura foi realizada com o auxílio de uma betoneira de eixo estacionário com volume total de 120 litros, em sala climatizada com temperatura de 20 ± 2 °C.

A produção segue as etapas descritas na Tabela 6:

Tabela 6 - Sequência de mistura do CAA.

Ação	Tempo de Mistura
1 – Introdução e homogeneização dos componentes sólidos: agregado graúdo, fíler, cimento e agregado miúdo.	1 minuto
2 – Adição da água	1,5 minutos
3 – Adição do superplastificante	1,5 minutos
4 – Adição de água ou superplastificante para manutenção das propriedades auto-adensáveis do concreto com temperatura de 50 ± 2 °C.	Misturas de 30s

Fonte: Le (2014).

Ressalta-se que o tempo de mistura do CAA nunca é superior a 5 minutos, havendo um intervalo de 1 minutos para inserção de água ou superplastificante a fim de manter as características auto-adensáveis com base no traço referência (TR). Caso o tempo fosse ultrapassado, o material era descartado.

Ainda, após a mistura, a temperatura foi aferida através de um termômetro de infra-vermelho, a fim de confirmar o valor de 50 ± 2 °C.

Os ensaios foram divididos em dois lotes de fabricação CAA, sendo 20 litros para os ensaios de *slump flow*, T500, Caixa-L e IEV; e 20 litros para os ensaios de Funil-V e Anel-J. Esse procedimento permitiu realizar os ensaios propostos num tempo hábil, diminuindo a perda de temperatura no processo.

3.6 Ensaios no Estado Fresco

Os ensaios no estado fresco visaram atender a norma técnica Brasileira. Conforme a ABNT NBR 15823-1:2017, foram analisadas as seguintes propriedades:

- a) a fluidez e o escoamento: propriedade avaliada através do ensaio *slump flow*;
- b) a viscosidade plástica aparente: propriedade relacionada à coesão do CAA e que influencia na resistência ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior sua resistência ao escoamento. Essa propriedade é analisada através do ensaio T500 ou Funil-V;

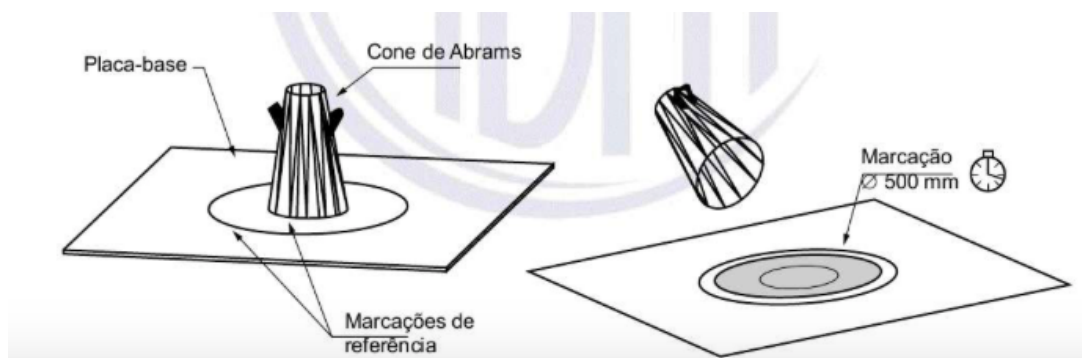
- c) a habilidade passante: capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma, passando entre os embutidos, sem obstrução do fluxo ou segregação. O ensaio de Caixa-L ou Anel-J avaliam essa propriedade;
- d) a resistência à segregação: capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento. Essa propriedade foi analisada através do IEV.

3.6.1 Espalhamento (*slump flow test*) e Tempo de Escoamento (T500)

Os ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 15823-2:2017, no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste. O *slump flow test* e o T500 são utilizados para mensurar a capacidade do CAA de fluir livremente sem segregar.

Na Figura 3 é possível observar os equipamentos utilizados para o ensaio. O procedimento para as duas análises é feito de uma só vez. O cone de Abrams é preenchido sem adensamento e de forma contínua e, em seguida, é erguido verticalmente com velocidade constante e uniforme.

Figura 3 - *Slump flow* e T500



Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017.

O resultado do *slump flow* é medido pelo espalhamento do concreto, obtido pela média de duas medidas perpendiculares do diâmetro. O T500 é obtido através do tempo que o concreto leva, do momento da desmoldagem até atingir a marcação de 500 mm da placa-base.

Na Tabela 7 é possível observar as classes, aplicação e exemplo de aplicação para o ensaio de *slump flow*, conforme predispõe normalização ABNT NBR 15823-1:2017.

Tabela 7 - Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

Classe: Resultado	Aplicação	Exemplo
SF1: 550 a 650 mm	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre	Lajes, estacas e certas fundações profundas
SF2: 660 a 750 mm	Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto-adensável	
	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF3: 760 a 850 mm	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-paredes, paredes-diafragmas, pilares

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017.

De maneira semelhante, pode-se apresentar os valores, conforme normalização para o ensaio T500, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo T500 em função de sua aplicação

Classe: Resultado	Aplicação	Exemplo
VS1: ≤ 2 segundos	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação	Paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
	Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	
VS2: > 2 segundos	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação	
	Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade e interrupções ou demora entre sucessivas camadas	Vigas, lajes e outras

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017.

3.6.2 Índice de Estabilidade Visual (IEV)

O IEV avalia a ocorrência de exsudação e a distribuição da argamassa com o agregado graúdo na mistura. O IEV é determinado visualmente após o término do escoamento do concreto. O ensaio foi realizado de acordo com ABNT NBR 15823-2:2017, no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste.

Os valores do IEV e seus respectivos critérios para avaliar qualitativamente a estabilidade do CAA encontram-se expostos na Tabela 9, conforme ABNT NBR 15823-2:2017.

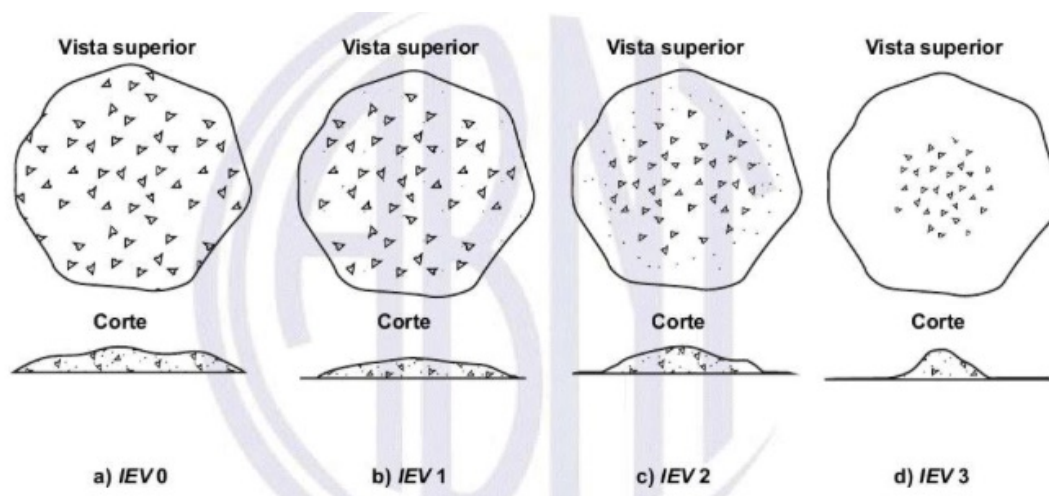
Tabela 9 - Classes de IEV

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 argamassas nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)

Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017

Já na Figura 4 pode-se observar as classes de IEV descritas na Tabela 9, conforme ABNT NBR 15823-2:2017.

Figura 4 - Classes dos índices de estabilidade visual

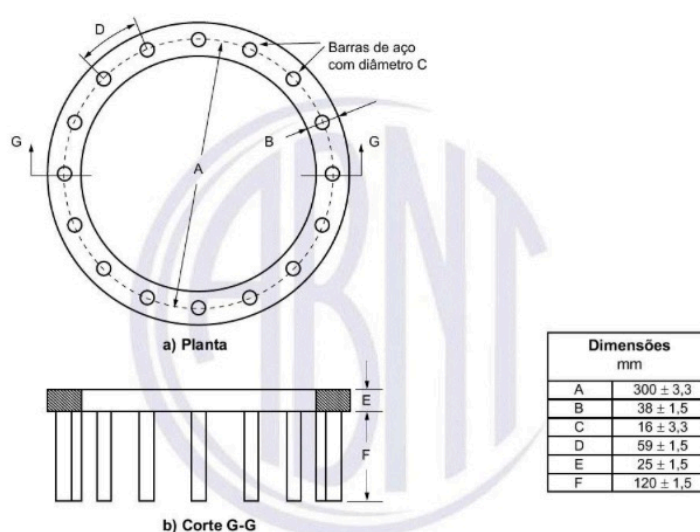


Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017

3.6.3 Anel-J

Para esse ensaio é utilizado um anel, que pode ser observado na Figura 5 , também conhecido como anel japonês, com diâmetro de 30 cm e disposto por 16 barras verticais espalhadas uniformemente, que simulam a armadura, utilizado em conjunto com o *slump flow test*, acrescentando a avaliação da resistência desse bloqueio. O ensaio foi realizado no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste, seguindo o descrito na ABNT NBR 15823-3:2017.

Figura 5 - Anel-J



Fonte: ABNT NBR 15823-3:2017.

Os valores das classes para o ensaio de Anel-J e exemplos de aplicações são expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes de habilidade passante pelo Anel-J em função de sua aplicação

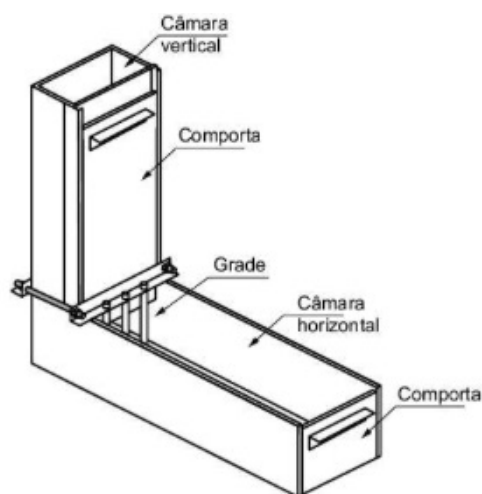
Classe: Resultado	Aplicação	Exemplo
PJ1: 0 a 25 mm com 16 barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 a 80mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-fabricados
PJ2: 25 a 50 mm com 16 barras de aço	Adequado para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017.

3.6.4 Caixa-L

Para o ensaio da caixa-L, visto na Figura 6, foram utilizados os parâmetros descritos na ABNT NBR 15823-4:2017. O ensaio foi realizado no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste e consiste na capacidade do CAA passar por obstáculos sob ação do seu peso próprio, mantendo a coesão.

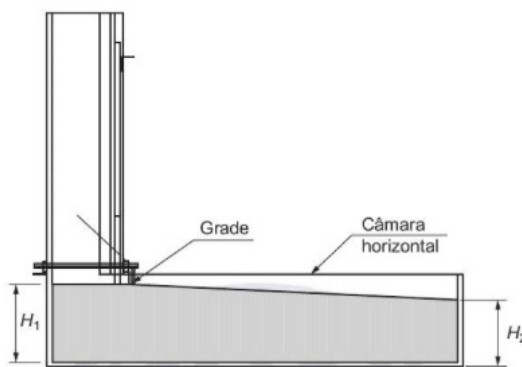
Figura 6 - Caixa-L



Fonte: ABNT NBR 15823-4:2017.

A câmara vertical da caixa-L é preenchida com concreto e a comporta é aberta. O resultado do ensaio é obtido através da razão de altura entre os extremos laterais ($\frac{H_2}{H_1}$), observados na Figura 7, do equipamento.

Figura 7 - Indicação das alturas H_1 e H_2



Fonte: ABNT NBR 15823-4:2017.

Os valores de classificação para o ensaio de Caixa-L e seus exemplos de aplicações, conforme normalização, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Classes de habilidade passante pelo Caixa-L em função de sua aplicação

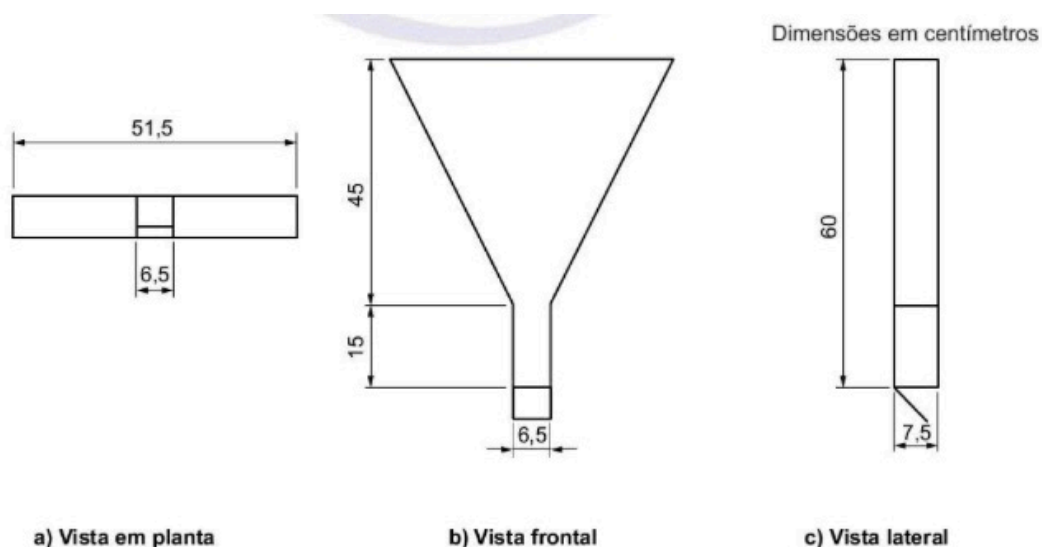
Classe: Resultado	Aplicação	Exemplo
PL1: $\geq 0,80$ com duas barras de aço	Adequado para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação
PL2: $\geq 0,80$ com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 a 80mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-fabricados

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017.

3.6.5 Funil-V

O ensaio de funil-V foi realizado no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste, conforme o descrito na ABNT NBR 15823-5:2017. Os detalhes do equipamento utilizado para o ensaio podem ser vistos na Figura 8.

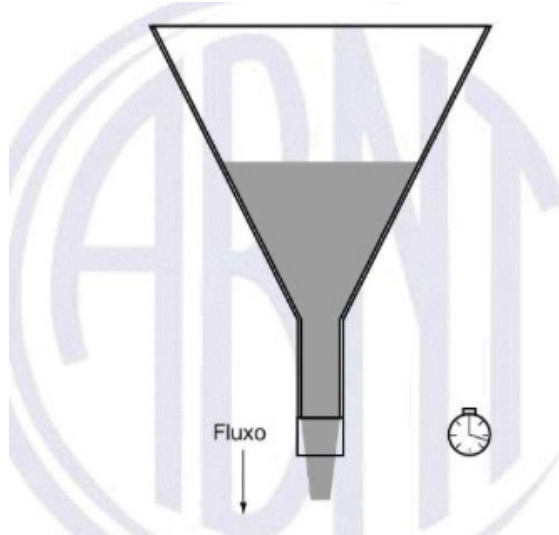
Figura 8 - Funil-V



Fonte: ABNT NBR 15823-5:2017

Esse ensaio consiste em medir o tempo necessário para uma amostra de 10 litros de concreto atravessar a cavidade inferior do funil-V, conforme a demonstração da Figura 9, utilizando apenas seu peso próprio.

Figura 9 - Execução do ensaio do funil-V



Fonte: ABNT NBR 15823-5:2017

As classes, valores e exemplos de aplicações para o ensaio de Funil-V, conforme normalização, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil-V em função de sua aplicação

Classe: Resultado	Aplicação	Exemplo
VF1: ≤ 9 segundos	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação	Paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
	Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	
VF2: > 9 segundos	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação	Vigas, lajes e outras
	Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas	

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017.

3.7 Moldagem dos Corpos-de-Prova

Foram moldados 22 corpos-de-prova, realizados após a execução de cada ensaio, seguindo o recomendado pela ABNT NBR 5738:2015, porém excluindo a etapa de adensamento manual/mecânico em camadas. Os corpos-de-prova eram apenas preenchidos e realizado acabamento na face superior do molde cilíndrico de 10 x 20 cm.

3.8 Cura

A cura foi realizada em ambiente de laboratório durante as 24 primeiras horas e em seguida por imersão em água.

3.9 Ensaios no Estado Endurecido

Os ensaios no estado endurecido visaram avaliar as propriedades de resistência e durabilidade do CAA e são estudados através dos ensaios descritos na sequência.

3.9.1 Resistência à Compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram utilizadas cinco amostras cilíndricas de 10 x 20 cm nas idades de 1, 7 e 28 dias. O ensaio foi realizado seguindo o que preconiza a ABNT NBR 5739:2007, no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste, através de uma prensa da marca Shimadzu, modelo UH-2000KN, com capacidade de célula de carga de 200 toneladas.

3.9.2 Absorção Total

Foram utilizadas três amostras curadas por imersão em água, com idade de 28 dias para o ensaio de absorção total, normalizado pela ABNT NBR 9778:2005 e realizado no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste. Para o ensaio, os corpos-de-prova foram secos em estufa por 72 horas a 105 °C. Após o resfriamento natural, as amostras são imersas em água por mais 72 horas. Findo o tempo, as amostras são novamente pesadas e pode ser calculada a absorção total.

3.9.3 Absorção Capilar

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado para três corpos-de-prova cilíndricos curados por imersão em água, na idade de 28 dias, seguindo as orientações da ABNT NBR 9779:2012, no laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste. As amostras foram secas em estufa por um período mínimo de 24 horas e pesadas até que não houvesse variação de massa. Após as amostras resfriarem em temperatura ambiente, foram pesadas secas e após a exposição por uma lâmina de água de 5 mm nos períodos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Assim, conseguiu-se calcular a absorção para cada amostra em cada período.

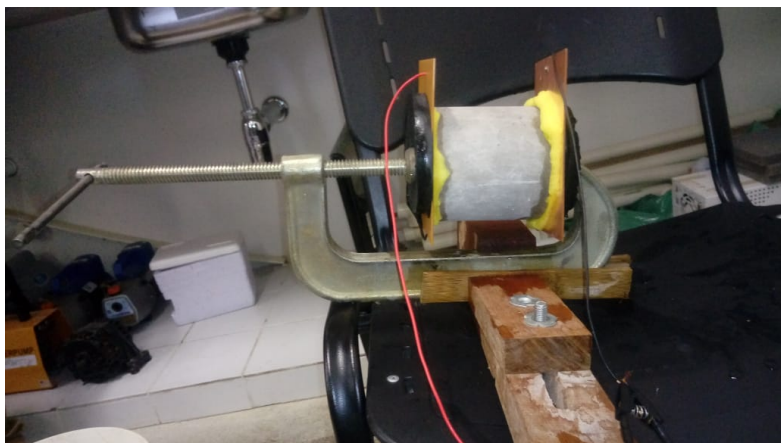
3.9.4 Resistividade Elétrica

O ensaio de resistividade elétrica pode ser utilizado como parâmetro para a previsão das fases principais da vida útil de uma estrutura por estar associada ao processo de transporte dos agentes agressivos no interior do concreto.

Para realização deste ensaio, inicialmente, o CP é cortado ao meio horizontalmente e seco em estufa por 24 horas a 105 °C. O ensaio consiste na aplicação de 300 mV em uma corrente alternada de 200 KHz. O teste é realizado fixando dois eletrodos em placas de cobre nas extremidades das amostras cilíndricas. Para melhorar o contato elétrico entre os eletrodos e a amostra, uma esponja umedecida com água foi utilizada como condutor (LAVAGNA, MUSSO, *et al.*, 2018).

O sistema utilizado para realização do ensaio de resistência elétrica pode ser observado na Fotografia 6.

Fotografia 6 – Sistema adotado para o ensaio de resistência elétrica.



Fonte: O Autor (2019).

Através do ensaio é possível obter a resistência elétrica do material, que é adicionada a Equação 4 para se encontrar a resistividade elétrica do material (p).

$$p = \frac{A \cdot R}{L} \quad (4)$$

Onde:

p : Resistividade elétrica do material ($\Omega \cdot m$);

A: Área da seção transversal do condutor (m^2);

R: Resistência elétrica obtida através da medição (Ω);

L: Comprimento da amostra (m).

Com os resultados calculados, pode-se analisar a possibilidade de corrosão, conforme Tabela 13:

Tabela 13 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade

Resistividade do Concreto	Indicação da probabilidade de corrosão
> 200 $\Omega \cdot m$	Desprezível
100 a 200 $\Omega \cdot m$	Baixa
50 a 100 $\Omega \cdot m$	Alta
< 50 $\Omega \cdot m$	Muito alta

Fonte: Polder (2000).

3.9.5 Ensaio de Ataque Ácido

O ensaio visou avaliar a influência de 3 tipos de ácidos em amostras dos traços produzidos. Para isso, foi utilizado os ácidos: clorídrico, acético e sulfúricos, todos em concentração molar de 0,1.

Foram confeccionadas amostras de concreto dos traços propostos de aproximadamente 2 x 2 x 2 cm (C x L x A), que foram secas em estufa e pesadas antes de serem dispostas em garrafas que continham 500 ml dos ácidos propostos. Após, as garrafas foram vedadas e postas em agitador rotativo para não voláteis, conforme pode ser visto na Fotografia 7, e deixadas por um período de 24 horas.

Fotografia 7 - Agitador rotativo para não voláteis



Fonte: O Autor (2019).

Em seguida amostras são coletadas, novamente secas em estufa e pesadas. O resultado do ensaio é avaliado através da perda de massa das amostras antes e após a conclusão do ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Materiais Utilizados

4.1.1 Massa Específica

Em relação a massa específica dos materiais, pode-se observar, conforme Tabela 14, que o filer alternativo possui valor aproximadamente 2% maior que o filer natural.

Tabela 14 - Massa específica dos materiais

Materiais	CPV	FC	FA
Massa específica (g/cm ³)	3,15	2,71	2,76

Fonte: O Autor (2019).

4.1.2 Área Superficial Específica pelo Permeabilímetro de Blaine

Os resultados encontrados para área superficial específica por Blaine encontram-se expostos na Tabela 15. Destaca-se que a FC possui o maior valor e o FA está próximo ao resultado do CPV.

Tabela 15 - Área superficial específica por Blaine.

Materiais	CPV	FC	FA
Área superficial específica por Blaine (cm ² /g)	4.179	5.096	6.857

Fonte: O Autor (2019).

Constata-se ainda que, dentre os dois fileres, apesar de todos serem com diâmetro máximo de 200 mesh, há diferença entre eles. Os valores obtidos são atrelados a fatores característicos próprios de cada material, como composição química, controle de qualidade, condições de fabricação e moagem, etc...

4.1.3 Área Superficial Específica por BET

Os valores para da área superficial específica pelo método BET encontram-se expostos na Tabela 16. Em consonância com os valores obtidos por Blaine, os

resultados mostraram que o FC possui a maior área superficial, enquanto que o cimento e o FA em possuem valores semelhantes.

Tabela 16 – Área superficial específica por BET dos materiais

Materiais	CPV	FC	FA
Área superficial específica por BET (cm ² /g)	20.956	30.045	47.142

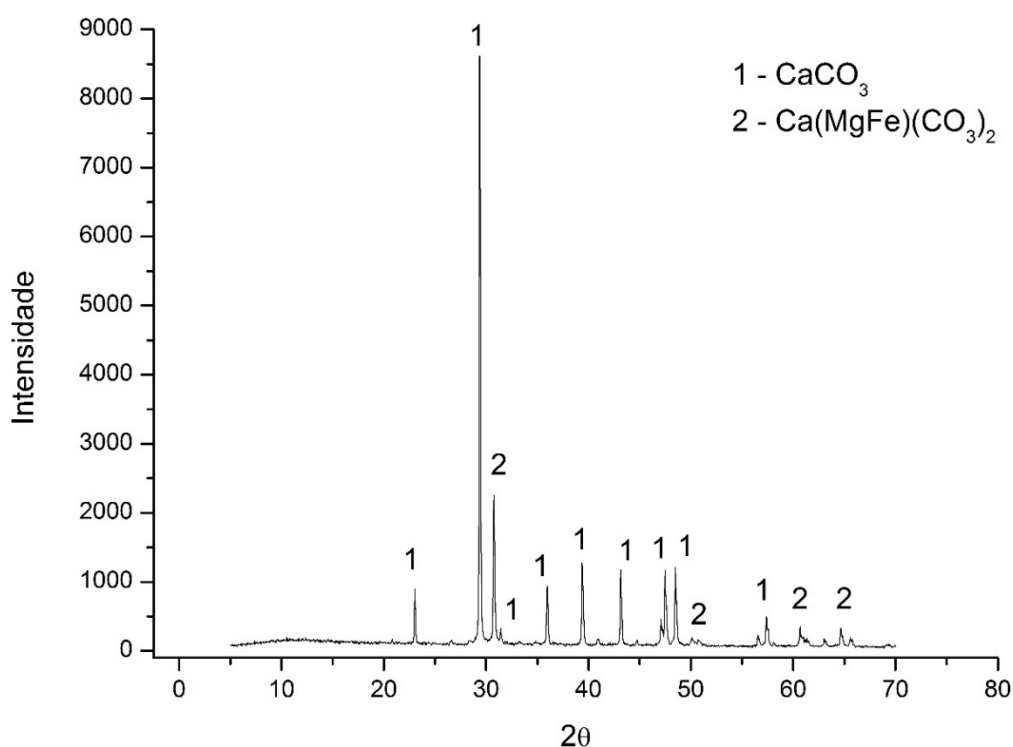
Fonte: O Autor (2019).

A maior área específica do FA pode ser justificada por sua origem, vegetal, provavelmente com maior porosidade em sua microestrutura, o que acarreta em área maior.

4.1.4 DRX

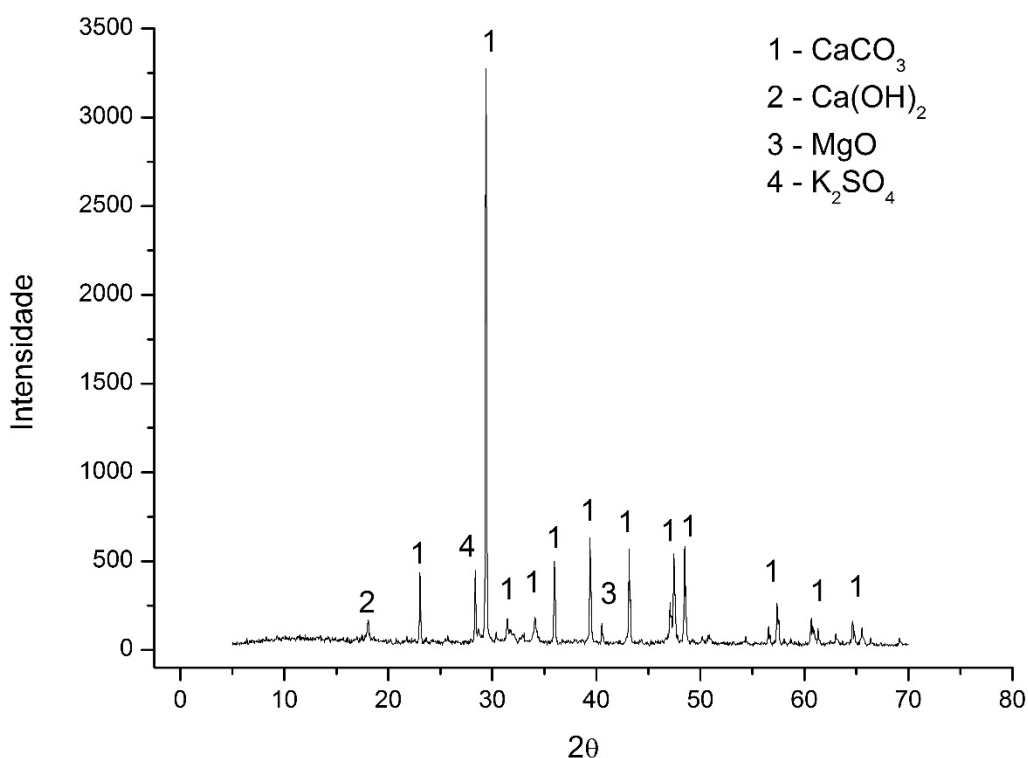
Os difratogramas de Raios-X (DRX) dos fileres encontram-se apresentados nos Gráfico 3 e Gráfico 4. Constata-se a cristalinidade dos dois fileres analisados, apresentando pico de maior intensidade de carbonato de cálcio (CaCO₃), característicos de fileres calcários calcíticos.

Gráfico 3 - DRX do FC.



Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 4 - DRX do FA.



Fonte: O Autor (2019).

Pela análise, comprova-se a semelhança entre os dois fíleres, com picos predominantes de CaCO₃ e pequenos diferenciais entre cada um. Para o FC observa-se a presença de outro elemento que contém magnésio e ferro. Para o FA, picos pequenos de portlandita, óxido de magnésio e compostos com potássio.

4.1.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química dos fíleres naturais e do fíler alternativo, obtidos por FRX, encontram-se compilados na Tabela 17. Observa-se composição química semelhante entre os fíleres naturais e o fíler alternativo, com presença predominante de CaO, além de pequenas quantidades de MgO, Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃. Pelos três últimos componentes, também pode-se afirmar que nenhum dos fíleres poderia ser caracterizado como pozolana conforme a ABNT NBR 12653:2014, dado que não a soma desses componentes não totaliza um valor maior que 50%. Ainda, há a presença um pouco maior de Fe₂O₃ no FC, o que pode justificar a coloração alaranjada desse fíler.

Tabela 17 - Resultados do FRX.

Óxidos (%)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO
FC	5,11	1,49	3,23	0,22	0,12	-	0,28	87,65	1,90	-
FA	2,44	0,37	0,83	1,99	1,33	2,12	12,30	77,52	0,35	0,75

Fonte: O Autor (2019).

Acrescenta-se que devido a quantidade de K₂O acima de 12%, o FA pode trazer problemas de expansão devido a reação álcali-agregado, caso os agregados utilizados sejam potencialmente reativos. Por isso, o ensaio de expansão para detectar essa patologia foi realizado nos agregados.

4.1.6 Reatividade Álcali-Agregado

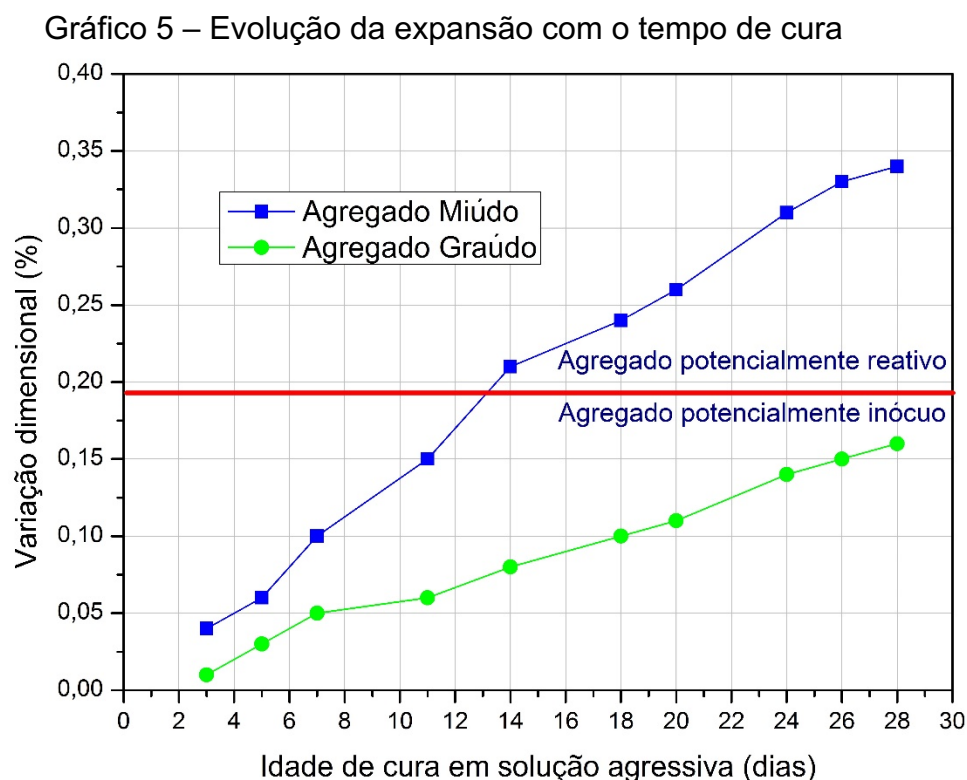
Na Tabela 18 são apresentados os resultados do ensaio de reatividade álcali-agregado pelo método acelerado feito com os agregados. Destaca-se a expansão alcançada pelo agregado miúdo, na ordem de 0,34%, e do agregado graúdo, na ordem de 0,16%.

Tabela 18 - Variação dimensional média das barras de argamassas

Idade de cura Agressiva (dias)	Variações dimensionais médias (%)	
	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
1	-	-
2	-	-
3	0,04	0,01
4	-	-
5	0,06	0,03
6	-	-
7	0,10	0,05
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	0,15	0,06
12	-	-
13	-	-
14	0,21	0,08
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	0,24	0,10
19	-	-
20	0,26	0,11
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	0,31	0,14
25	-	-
26	0,33	0,15
27	-	-
28	0,34	0,16

Fonte: O Autor (2019).

Ainda, no Gráfico 5, pode-se observar o gráfico da evolução da expansão pelo tempo dos resultados do ensaio de reatividade álcali-agregado. Constata-se o resultado potencialmente reativo do agregado miúdo, dado que a ABNT NBR 15577-1:2008 define com expansões iguais ou superiores a 0,19%. Já o agregado graúdo mostrou-se, através do ensaio, potencialmente inócuo, tendo expansão inferior a 0,19%.



Fonte: O Autor (2019).

Destaca-se que devido à potencialidade reativa a expansões por RAA do agregado miúdo e levando em conta a quantidade de álcalis de potássio (K_2O) constante no fíler alternativo, a quantidade de adição deveria ser limitada a 26% de adição proposto. Porém, a presente pesquisa não levou esse quesito em consideração, entendendo que o estudo pode ser replicado com agregados não-reativos ou com medidas mitigadoras.

4.2 Dosagem do CAA

4.2.1 Traço Referencial

A seguir, na Tabela 19, são apresentados os traços. Ratifica-se que foi estabelecido um consumo de finos de 450 kg/m^3 , sendo 360 kg/m^3 de cimento e 90 kg/m^3 de fíler calcário natural e/ou alternativo e relação água/finos de 0,5. O teor de superplastificante foi o necessário para atender um espalhamento de 660 a 750 mm, aferido conforme ABNT NBR 15823-1:2017. O esqueleto granular, ou seja, a relação agregado graúdo/agregado miúdo (AG/AM), encontrado foi de 1. Para o cálculo dos consumos de materiais considerou-se um volume de vazios/ar no concreto de 25 l/m^3 (NÓBREGA, MOURET, *et al.*, 2018). Através disso e conhecendo a massa específica dos materiais, os consumos foram calculados.

Tabela 19 - Composição dos traços referenciais

Materiais	TFC	TFCFA
Cimento (kg/m^3)	360	360
Fíler calcário (kg/m^3)	90	45
Fíler alternativo (kg/m^3)	0	45
Superplastificante (kg/m^3)	1,58	3,38
Agregado miúdo (kg/m^3)	784,7	785,1
Agregado graúdo (kg/m^3)	784,7	785,1
Água (litros/ m^3)	225	225
Volume de pasta (litros)	372,5	372,2
Teor de argamassa (%)	60,9	60,9

Fonte: O Autor (2019).

TFC representa o traço com 100% de fíler calcário e TFCFA representa o traço com 50% de fíler calcário e 50% de fíler alternativo de cinza de algaroba. Ressalta, ainda, que o objetivo inicial era produzir um CAA com 100% de FA, porém, na prática, não foi possível elaborar devido a problemas com segregação e a com a interação FA/SP. Por isso, utilizou-se a maior quantidade de adição de FA que garantisse propriedades auto-adensáveis ao concreto, 50% de substituição para os parâmetros adotados na presente pesquisa em condições de clima normal (20°C).

Ainda, há de se notar que o TFCFA requereu mais SP que o TFC, que pode ser justificado pelo resultado do BET. O FA possui área superficial específica maior que o FC, e, conseqüentemente, demandará maior consumo de aditivo, já que o valor de água é fixo para ambos os traços referenciais.

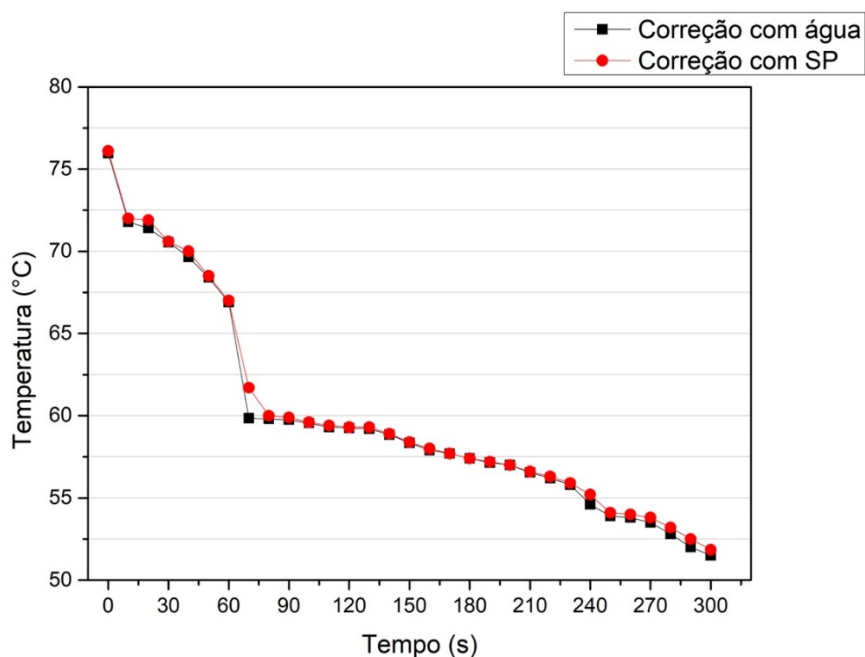
As correções realizadas com água ou com superplastificante, para manter as propriedades auto-adensáveis dos traços produzidos em condições de clima quente, adotaram a nomenclatura com base na descrição da Tabela 19, seguidos da letra W para correção com água ou da letra S para correção com superplastificante, conforme exemplo que segue:

- a) TFC-W: TFC conforme descrito na Tabela 19 moldado em condições de clima quente, corrigido com água;
- b) TFCFA-S: TFCFA conforme descrito na Tabela 19 moldado em condições de clima quente, corrigido com superplastificante.

4.3 Avaliação da Temperatura Durante a Mistura do CAA

O comportamento médio da temperatura para os CAA moldados simulando condições de clima quente é apresentado no Gráfico 6. Destaca-se a temperatura em torno de 50 °C no final da mistura.

Gráfico 6 - Temperatura em função do tempo durante a mistura.

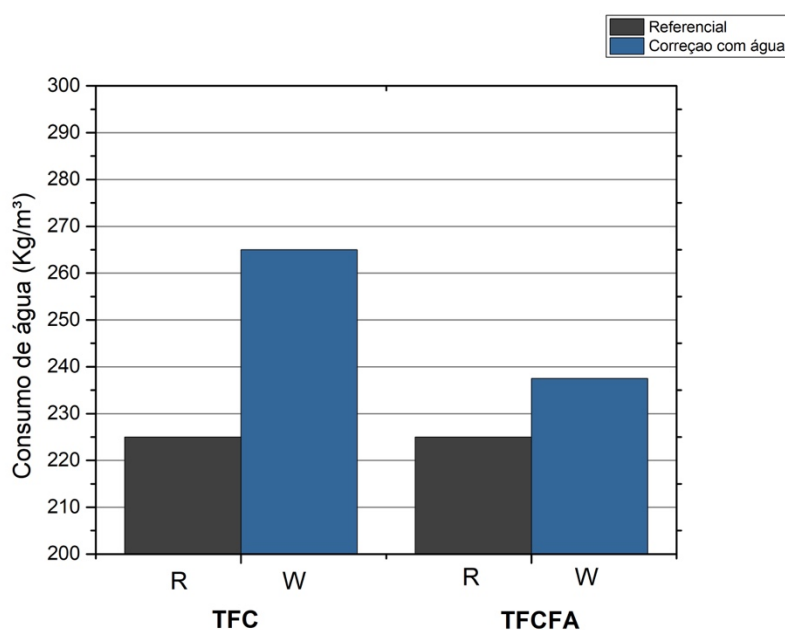


Fonte: O Autor (2019).

4.4 Correções para Manter as Propriedades Auto-Adensáveis

Os volumes de água necessários para manter as propriedades auto-adensáveis no concreto produzido em condições de clima quente, para os traços propostos, encontram-se expostos no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Correções com água



Fonte: O Autor (2019).

Destaca-se o aumento esperado do consumo de água para os traços. Enquanto o traço com o TFC-W demanda quase 18% a mais de água, o traço com TFCFA-W demanda aproximadamente 5,5% a mais de água, ambos comparados com seus respectivos referenciais (TFC e TFCFA), que possuíam relação água/finos fixas em 0,50.

Seria de se esperar que o FA demandasse mais água em sua correção, por possuir maior área específica; porém, verifica-se que isso não ocorreu, provavelmente, devido as características físicas do FA, que tem sua partícula arredondada.

O resultado de 18% encontrado para o traço TFC-W é superior ao encontrado por Nóbrega *et al.* (2018), que foi de aproximadamente 7% e utilizou a mesma

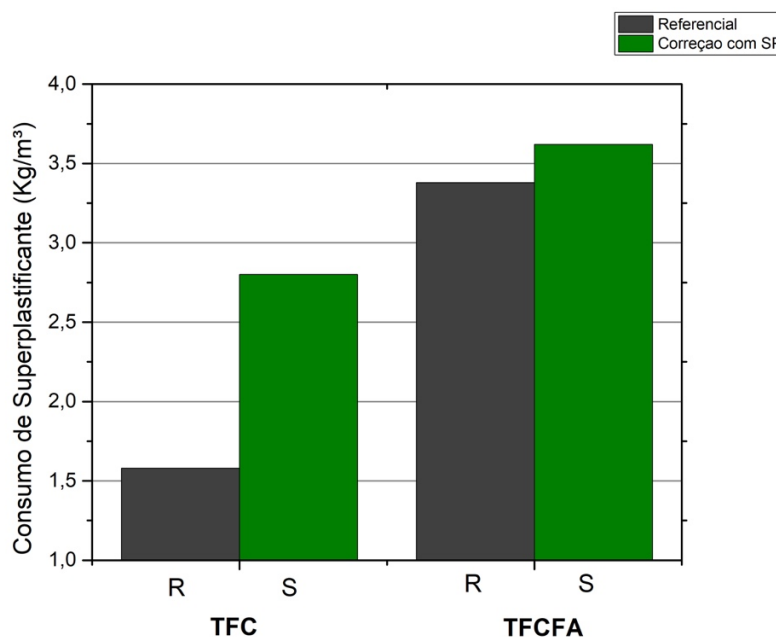
metodologia empregada e filer calcário natural. Esse aumento pode ser justificado pelas diferenças características entre os materiais franceses e brasileiros. Porém, observa-se uma redução acentuada de água para o TFCFA-W, observando-se que o FA reduz a demanda de água em temperaturas maiores que a ambiente.

Além disso, a acomodação entre os materiais e suas características físico-químicas pode facilitar ou dificultar a dissipação da temperatura, influenciando na evaporação de água durante o processo de mistura.

Outro fator a se considerar é o tempo entre a retirada dos materiais aquecidos da estufa até o efetivo processo de mistura, além da distância entre esses dois equipamentos.

Em relação a correção realizada com SP, o Gráfico 8 detalha os consumos obtidos.

Gráfico 8 - Correções com SP.



Fonte: O Autor (2019).

Observa-se, de maneira semelhante ao que ocorreu com a correção realizada com água, a redução do consumo de SP para o traço contendo o FA. Enquanto o TFC-S demandou um aumento de 77,8% de SP quando comparado com o TFC, o TFCFA-S demandou apenas um aumento de 7,3% de SP quando comparado com o

TFCFA. Esses resultados ratificam que o FA reduz a demanda de água ou SP em temperaturas maiores que a ambiente.

Ainda, a correção de 77,8% para o TFC-S também se constata superior aos cerca de 34% encontrados por Nóbrega *et al.* (2018), que, conforme justificado para o TFC-W, provavelmente é ocasionado pelas diferenças características entre os materiais franceses e brasileiros.

4.5 Ensaios no Estado Fresco

A seguir (Tabela 20) são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco dos traços propostos. Lembrando que TFC (traço com fíler calcário referência moldado em condições de clima normal); TFC-W (traço com fíler calcário moldado em condições de clima quente e corrigido com o uso de água); TFC-S (traço com fíler calcário moldado em condições de clima quente e corrigido com o uso de superplastificante); TFCFA (traço com 50% de fíler calcário e 50% de fíler alternativo, referência, moldado em condições de clima normal); TFCFA-W (traço com 50% de fíler calcário e 50% de fíler alternativo, moldado em condições de clima quente e corrigido com o uso de água); TFCFA-S (traço com 50% de fíler calcário e 50% de fíler alternativo, moldado em condições de clima quente e corrigido com o uso de superplastificante).

Tabela 20 - Resultados no estado fresco

Ensaio	TFC	TFC-W	TFC-S	TFCFA	TFCFA-W	TFCFA-S
<i>Slump Flow</i> (mm)	700	660	700	665	685	665
T500 (s)	1,6	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
Anel-J (mm)	15	50	20	22	30	24
Caixa-L (mm/mm)	0,92	0,85	0,71	0,81	0,83	0,80
Funil-V (s)	4,5	4,3	5,1	5,2	3,0	6,0
IEV	IEV1	IEV0	IEV1	IEV0	IEV1	IEV0

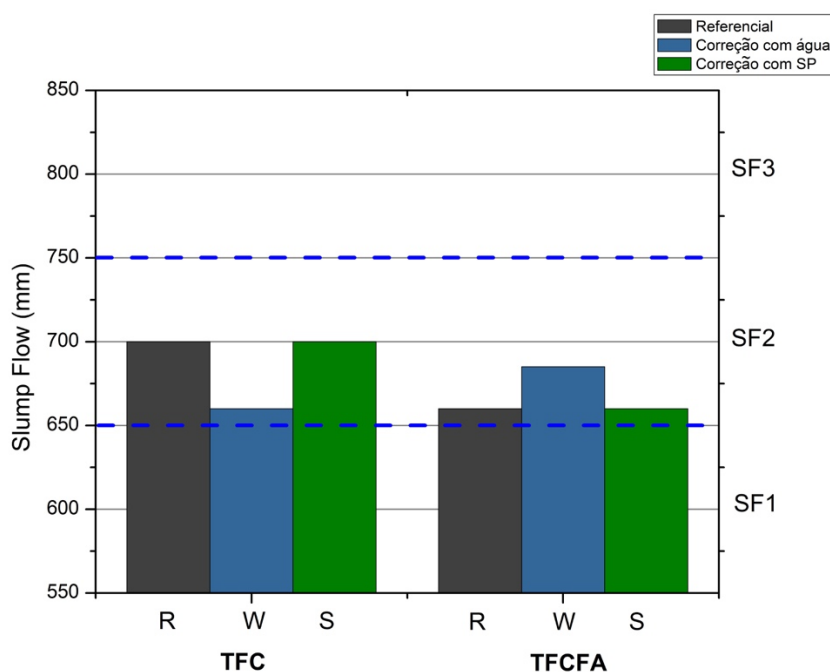
Fonte: O Autor (2019).

Ratifica-se que foi necessário adicionar água ou superplastificante para manter as características de espalhamento entre 660 e 750 mm, conforme pode ser observado no Gráfico 9. Todos os traços de CAA avaliados, após as devidas

correções, foram classificados na mesma classe de espalhamento, SF2 (adequada para a maioria das aplicações correntes, como paredes, vigas, pilares e outras).

Ainda, analisando os resultados em conjunto, observa-se que há indícios na inabilidade do FC viscosificar a matriz de forma adequada, pois há bloqueio, observado pelo ensaio de Caixa-L e Anel-J, devido a leve exsudação constatado pelo IEV1. De maneira inversa, o FA, analisando os resultados em conjunto, observa-se que há indícios da habilidade do FA viscosificar a matriz de forma adequada, pois há bloqueio, observado pelo ensaio de Caixa-L e Anel-J, devido a classificação IEV1.

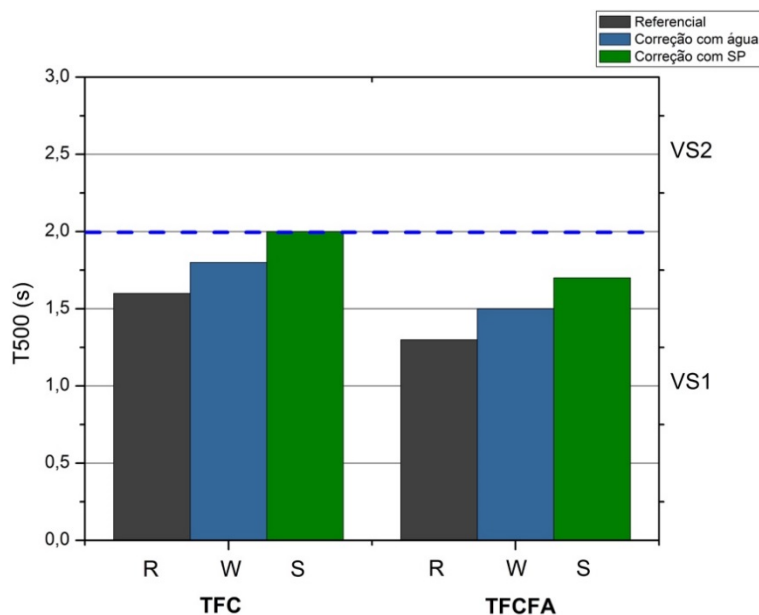
Gráfico 9 - Comparativo *Slump Flow*



Fonte: O Autor (2019).

Em relação a viscosidade plástica aparente, observa-se pelo T500 que as correções com água ou superplastificante aumentam o tempo de escoamento, conforme pode ser constatado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Comparativo T500

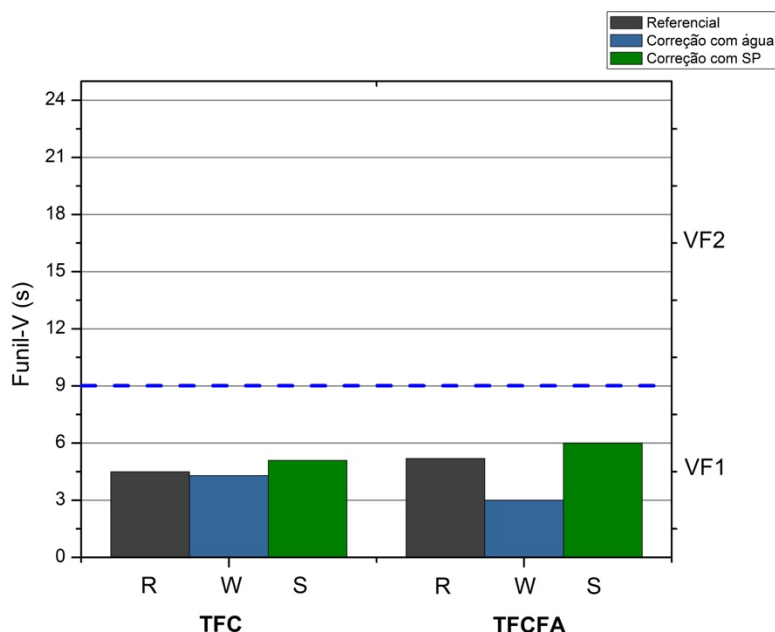


Fonte: O Autor (2019).

Ainda, através desse ensaio, constata-se que o TFCFA, TFCFA-W e TFCFA-S diminuem o tempo de escoamento, indicando um efeito positivo do fíler alternativo no CAA, tanto para o traço referencial, quanto para o traço em condições de clima quente. Salienta-se que todos os traços avaliados foram classificados na classe VS1.

Os resultados do Funil-V, demonstrados no Gráfico 11, que também analisa a viscosidade plástica aparente, apresentam comportamentos semelhantes para o TFC e suas correções com água (TFC-W) e com superplastificante (TFC-S). Para o traço TFCFA, nota-se pequenas diferenças, verificando que a correção com água (TFCFA-W) diminui a duração do ensaio e a correção com superplastificante (TFCFA-S) aumenta o tempo do ensaio, quando comparados ao traço de referência. Ainda assim, todos os traços avaliados foram classificados na mesma classe VF1.

Gráfico 11 - Comparativo Funil-V



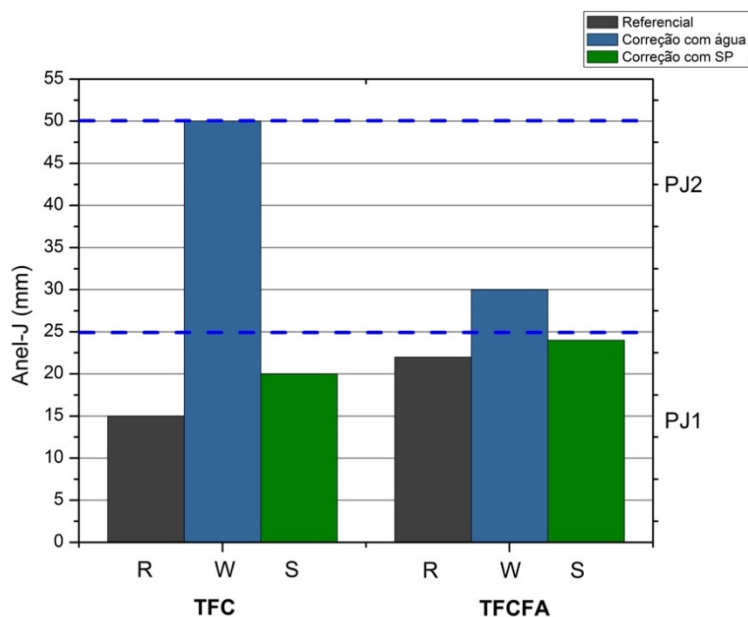
Fonte: O Autor (2019).

Comparando as diferenças entre os traços, constata-se que o TFCFA-W diminui o tempo de escoamento e apresenta o menor resultado entre os traços estudados, provavelmente proporcionado pela adição de água no sistema.

Embora os ensaios de T500 e Funil-V caracterizem a viscosidade plástica aparente do CAA, observa-se que os resultados do Funil-V não seguiram a ordem crescente de resultados apresentados pelo T500. Isso pode ser explicado devido aos diferentes meios de análise de uma propriedade, onde os parâmetros de aplicação para cada resultado podem ser verificados nas normas correspondentes, não havendo, obrigatoriamente, ligação direta entre cada ensaio.

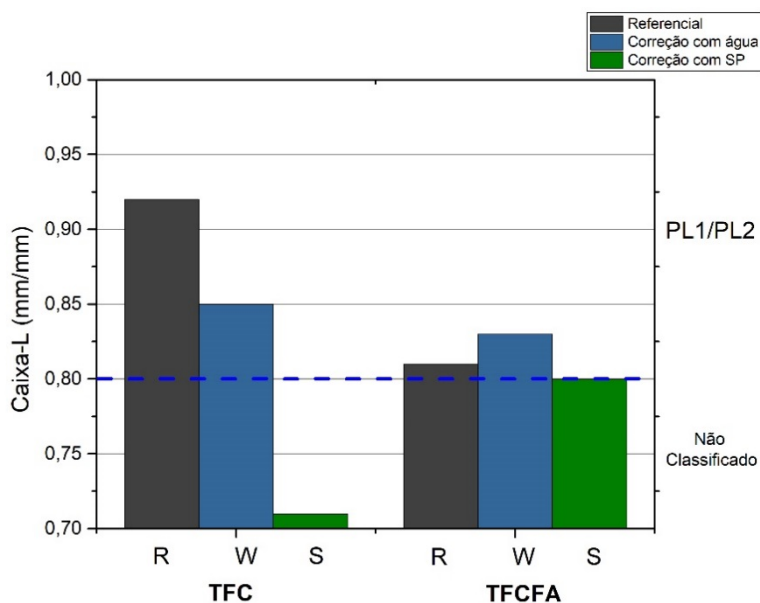
Nos Gráfico 12 e Gráfico 13, através dos ensaios de Anel-J e Caixa-L, respectivamente, é possível analisar a propriedade de habilidade passante, dos traços produzidos. Em destaque que as correções com água possuíram valores maiores para o ensaio e Anel-J e que o TFC-S não passou no ensaio da Caixa-L.

Gráfico 12 - Comparativo Anel-J



Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 13 - Comparativo Caixa-L



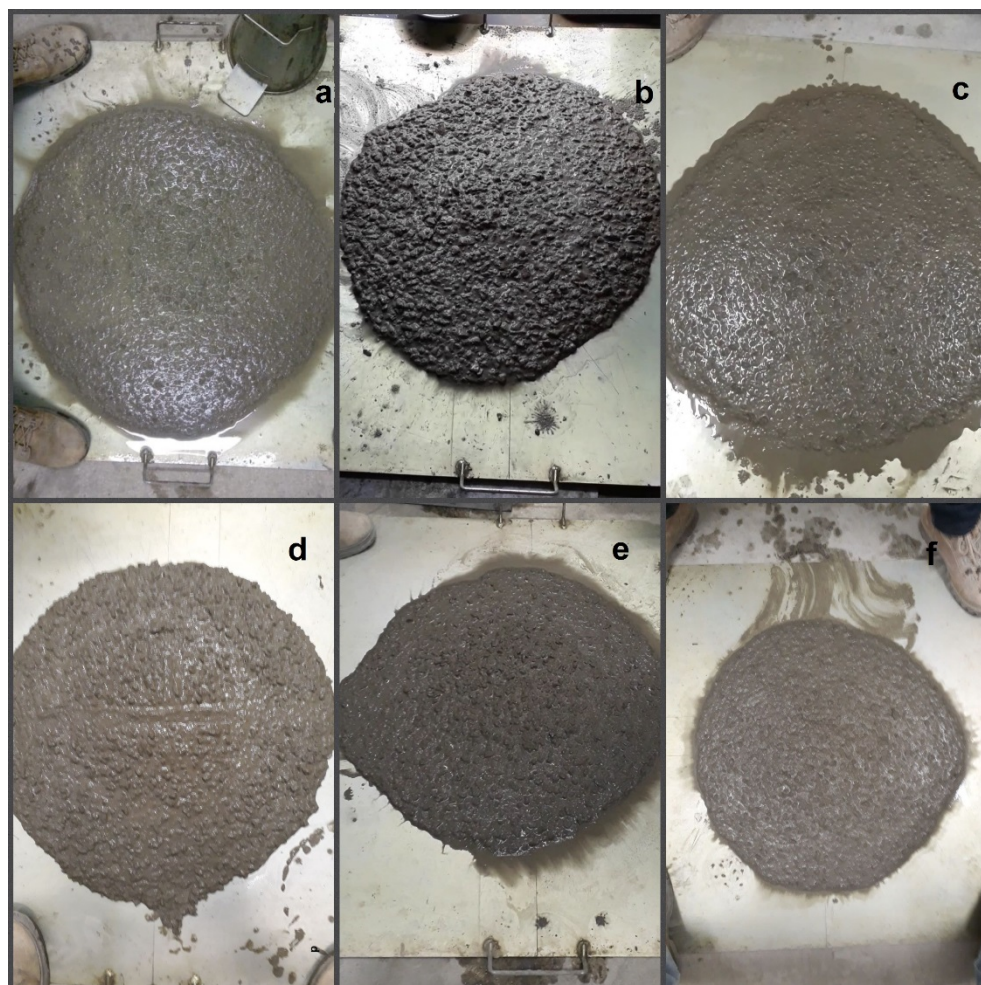
Fonte: O Autor (2019).

De maneira semelhante ao ocorrido com a análise da viscosidade plástica, os resultados da análise da habilidade passante não seguiram a mesma ordem de resultados através dos dois ensaios propostos, fato que também pode ser justificado

devido aos diferentes meios de análise de uma propriedade, onde os parâmetros de aplicação para cada resultado podem ser verificados nas normas correspondentes, não havendo, obrigatoriamente, ligação direta entre cada ensaio.

Ainda, no quesito de índice de estabilidade visual, pode-se observar o TFC na Fotografia 8.a, o TFC-W na Fotografia 8.b, o TFC-S na Fotografia 8.c, o TFCFA na Fotografia 8.d, o TFCFA-W na Fotografia 8.e e o TFCFA-W na Fotografia 8.f.

Fotografia 8 - IEV



Fonte: O Autor (2019).

Constata-se que os traços TFC-W, TFCFA e TFCFA-S atingiram o IEV de classe 0, ou seja, sem a presença de segregação ou exsudação. Enquanto os TFC, TFC-S e TFCFA-W apresentaram uma leve exsudação, mas sem a presença de segregação, caracterizando-se como classe 1.

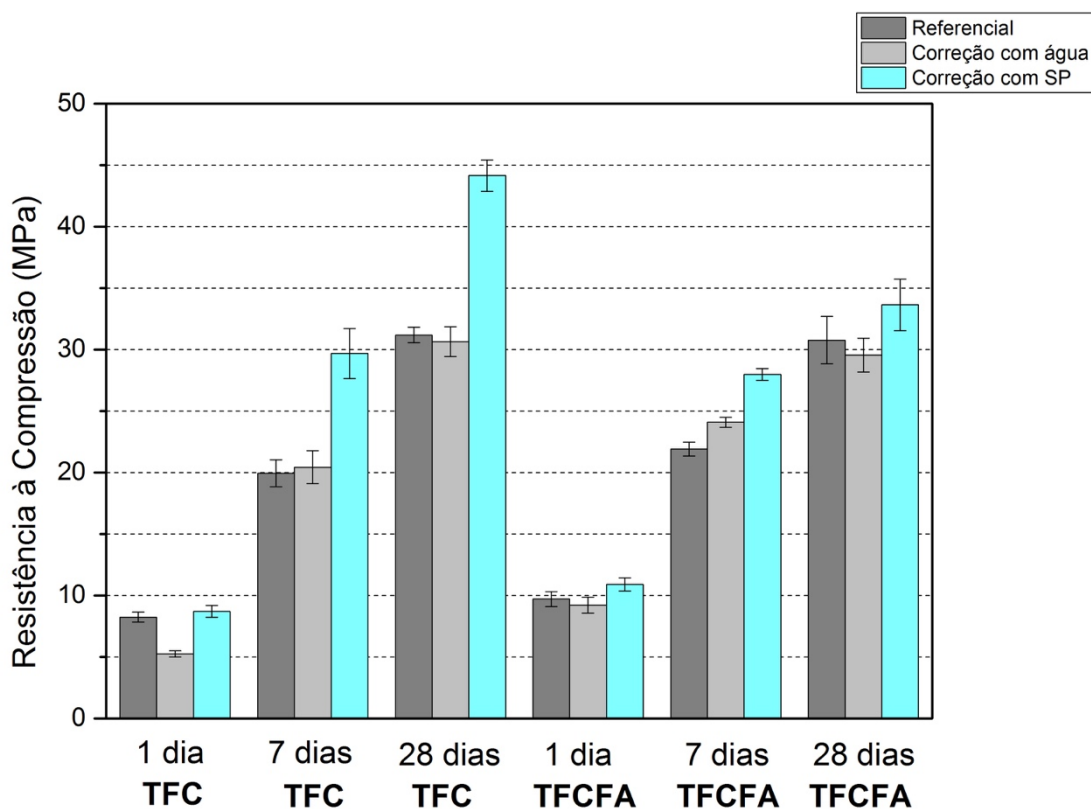
Observa-se que o FA favoreceu os traços TFCFA e TFCFA-S, evitando a leve exsudação. De maneira contrária observa-se que o FC no TFC teve uma leve presença de exsudação, repetindo o resultado em TFC-S e TFCFA-W.

4.6 Ensaios no Estado Endurecido

4.6.1 Resistência à Compressão

A seguir, no Gráfico 14, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão, comparados por idade para os traços propostos.

Gráfico 14 - Resistência à compressão dividido por idades.

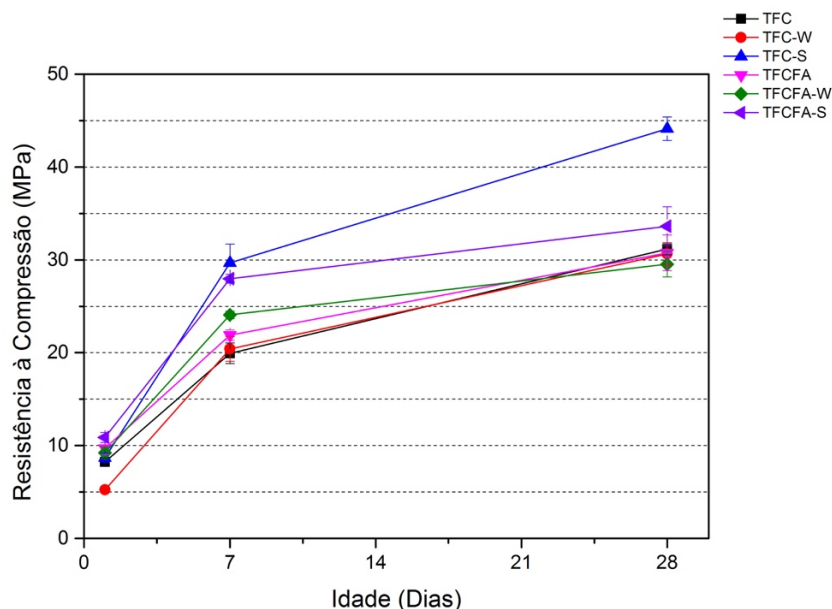


Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que para 1 dia de idade, os valores de resistência são semelhantes e as diferenças de valores são melhor observadas a partir da idade de 7 dias, com conclusão aos 28 dias. Destaque para o TFC-S, que conseguiu patamares de resistência aos 28 dias de quase 45 MPa, provavelmente justificado pela diminuição da relação a/c ocasionada pela evaporação da água de amassamento, o que melhorou o arranjo granular e favoreceu a compacidade.

A seguir, no Gráfico 15, também pode-se notar os valores de resistências dispostos por traços.

Gráfico 15 - Resistência à compressão dividido por traços



Fonte: O Autor (2019).

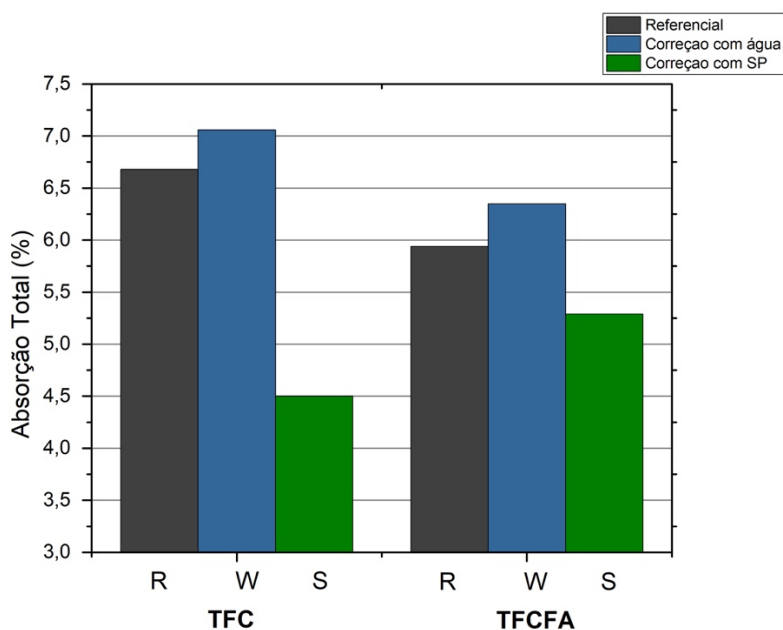
Conforme constata-se, aos 28 dias, o TFC e o TFC-W e o TFCFA e TFCFA-W possuem valores próximos, com leves diferenças. O incremento de água para manter as propriedades auto-adensáveis do traço pode não provocar apenas a recomposição da água evaporada pela temperatura, mas também um aumento do número de vazios, que influenciam no arranjo granular do sistema, podendo afetar negativamente o comportamento mecânico do CAA.

Observa-se também que os traços TFC-S e TFCFA-S possuem os maiores valores, justificado pela diminuição da relação água/finos ocasionada pela evaporação que promoveu uma redução do número de vazios do sistema, elevando a compacidade do CAA.

4.6.2 Absorção Total

O Gráfico 16 traz os resultados obtidos para o ensaio de absorção total.

Gráfico 16 - Absorção total de água



Fonte: O Autor (2019)

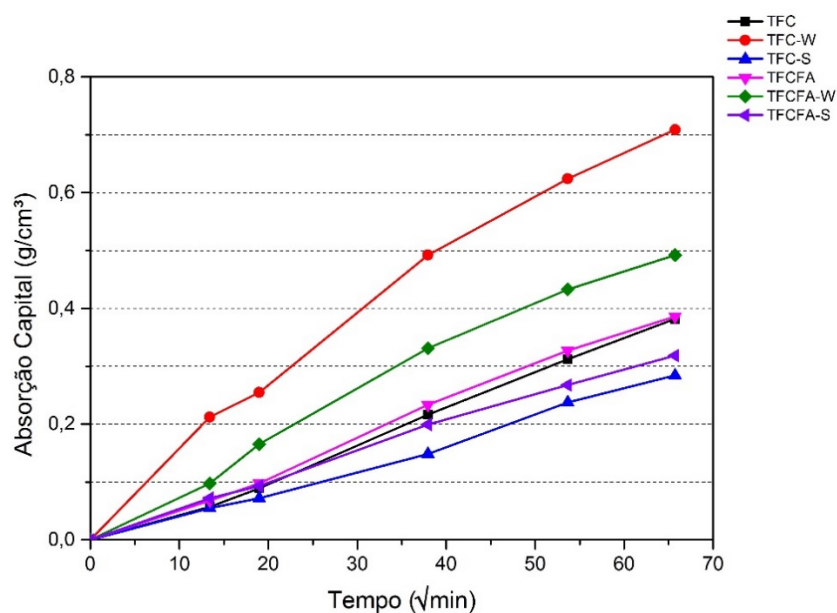
Nota-se, confirmando o explanado no tópico anterior, que a correção com água não provoca apenas a recomposição da água evaporada pela temperatura, mas influencia negativamente na capacidade do sistema, aumentando o número de vazios, deixando-o menos resistente e mais permeável.

Em direção contrária está a correção com SP, que melhora a disposição do arranjo granular e promove menor permeabilidade do sistema, ocasionada pela redução da relação água/finos.

4.6.3 Absorção Capilar

A seguir, no Gráfico 17, é demonstrado os resultados obtidos para o ensaio de absorção capilar, seguindo a mesma tendência do ensaio de absorção total.

Gráfico 17 - Absorção capilar



Fonte: O Autor (2019).

Em consonância com os ensaios de resistência à compressão e de absorção total, os resultados mostraram que o TFC-W e TFCFA-W são mais permeáveis e o TFC-S e TFCFA-S são os mais compactos.

4.6.4 Resistividade Elétrica

A seguir, na Tabela 21, são apresentados os valores obtidos com o ensaio de resistividade elétrica:

Tabela 21 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica

Traço	Resultado ($\Omega.m$)
TFC	315,7
TFC-W	314,2
TFC-S	375,0
TFCFA	361,3
TFCFA-W	341,2
TFCFA-S	365,2

Fonte: O Autor (2019).

O ensaio pode ser avaliado de maneira inversa ao de absorção total/capilar, avaliando a permeabilidade da amostra. No caso, quanto maior a resistividade elétrica, menos permeável é a amostra.

Então, conforme pode ser constatado pelos resultados, o TFC-W e TFCFA-W são mais permeáveis, enquanto o TFC-S e o TFCFA-S são os que possuem arranjo granular mais compacto.

Ainda, conforme Tabela 13, conclui-se que todos os traços analisados possuem probabilidade desprezível de corrosão, por possuir valores acima de 200 Ω .m.

4.6.5 Ensaio de Ataque Ácido

A seguir, na Tabela 22, são apresentados os resultados encontrados através do ensaio de ataque ácido:

Tabela 22 - Resultados do ensaio de ataque ácido

Traço	Ácido / Perda de massa		
	Acético	Sulfúrico	Clorídrico
TFC	9,97%	6,13%	28,76%
TFC-W	12,38%	6,09%	27,72%
TFC-S	11,01%	3,34%	20,08%
TFCFA	19,91%	4,49%	25,04%
TFCFA-W	13,62%	7,97%	37,44%
TFCFA-S	14,10%	6,90%	37,36%

Fonte: O Autor (2019).

Constata-se que o ácido clorídrico é o mais agressivo ao concreto, podendo haver perdas de massa próximas a 38% e o ácido sulfúrico é o menos agressivo ao concreto, com perdas máximas de aproximadamente 7%.

Ainda, em relação ao ácido clorídrico, observa-se que o TFCFA-W e o TFCFA-S obtiveram os maiores resultados, identificando que a produção em condições de clima quente aumenta a perda de massa do concreto quando submetido a esse tipo de ácido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há a potencialidade do FA em causar RAA quando dispostos em agregado potencialmente reativos.

O tratamento físico do FA, que consistiu no peneiramento em malha igual ao do filer calcário natural, foi eficaz para o presente estudo.

A metodologia utilizada para simular, em ambiente de laboratório, condições de regiões de clima quente, no quesito de temperatura, foi eficaz para conseguir um CAA após mistura com temperatura próxima a 50 °C, que é um valor que pode ser próximo a realidade.

Observou-se que o FA, por possuir área superficial maior que o FC, demanda mais aditivo superplastificante para o traço de referência. Notou-se que o FA diminui a necessidade de correção de água ou SP quando se eleva a 50 °C a temperatura de mistura do CAA.

No estado fresco, foi possível obter um CAA com incorporação de FA com resultados semelhantes ao CAA produzido apenas com FC, observando o potencial reaproveitamento desse rejeito para utilização em CAA em condições de clima quente.

No quesito de resistência e durabilidade, observou-se que o FA corrobora com um melhoramento na resistência à compressão e com diminuição da permeabilidade do CAA, principalmente quando há elevação da temperatura de mistura, ratificando que o FA é uma boa alternativa em substituição ao FC para produção do CAA.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) Avaliar outros parâmetros de temperatura e comparar os resultados com a presente pesquisa;
- b) Estudar outros percentuais de adição calcária;
- c) Verificar outra metodologia de dosagem de CAA e comparar com a presente pesquisa;
- d) Adotar o cimento CP III, que possui baixo calor de hidratação e poderia influenciar no CAA produzido em condições de clima quente;
- e) Adotar outros tipos de fileres alternativo, como por exemplo: pó calcário e casca de ovos e comparar com a presente pesquisa;
- f) Realizar misturas binárias, terciárias e quaternárias com filer natural e alternativos e produzir um CAA em condições de clima quente, verificando a interação entre esses materiais;
- g) Verificar como a temperatura influencia em CAA's produzidos com incorporação de fileres de diversas granulometrias, como por exemplo: 325 mesh, 400 mesh e 500 mesh.

REFERÊNCIAS

- AIT-AIDER, H.; HANNACHI, N. E.; MOURET, M. Importance of W/C ratio on compressive strength of concrete in hot climate conditions. **Building and Environment**, 2, 2006. 2461-2465.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 305 R: Guide to Hot Weather Concreting**. Farmington Hills. 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 305.1 - Specification for Hot Weather Concreting (Metric)**. Farmington Hills. 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills. 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 306 R - Guide to Cold Weather Concreting**. Farmington Hills. 2016.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **C94: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete**. Philadelphia. 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C227: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)**. Philadelphia. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150 - Standard Specification for Portland Cement**. Philadelphia. 2017.
- AOKI, J. Calcário para cimento. **Cimento Itambé**, 2007. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/calcario-para-cimento/>>. Acesso em: 30 julho 2017.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2018. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/>>. Acesso em: 05 fevereiro 2018.
- AREL, H. S.; YAZICI, S. Effect of different parameters on concrete-bar bond under high temperature. **ACI Materials Journal**, 111, n. 6, 2014. 633-639.
- ARRAIS, M. S. M. C. **Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da região metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal do Pernambuco. Recife. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578/1991 - Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733/1991 - Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735/1991 - Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736/1991 - Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931 - Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212 - Execução de concreto dosado em central — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3: Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J.** Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4: Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U.** Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V.** Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro. 2017.

BERHANE, Z. The Behaviour of Concrete in Hot Climates. **Materials and Structures**, v. 25, n. 147, p. 157-162, 1992.

BRADU, A.; FLOREA, N. Workability and compressive strength of self compacting concrete containing different levels of limestone powder. In: **Bulletin of the Transilvania University of Brasov**, Special Issue, Nº 1, v. 8, n. 57, 2015.

BURG, R. G. The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete. **R&D Bulletin RD 113. Portland Cement Association**, 1996.

CASTRO, L. H. **Arranjo Produtivo Local**. SEBRAE. Série Empreendimentos Coletivos. 2009.

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

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2011. Cap. 8.

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

DE SCHUTTER, G. Effect of limestone 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 propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Toulouse. Toulouse, p. 253. 2010.

ESTADOECAPITAISDOBRASIL. Estados e Capitais do Brasil. **Qual a cidade mais quente do Brasil?**, 2018. Disponível em:

<<https://www.estadosecapitaisdobrasil.com/duvidas/qual-a-cidade-mais-quente-do-brasil/>>. Acesso em: 05 fevereiro 2018.

FILHO, F. M. A. et al. Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, 1, n. 1, março 2008. 31-57.

FILHO, L. Z. C. **Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2016.

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**, v. 5, n. 3, p. 412-423, 2011.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. D. **Métodos de dosagem de concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2009.

HAMPTON, J. S. Extended Workability of Concrete Containing High-Range Water-Reducing Admixtures in Hot Weather. In: MALHOTRA, V. M. **Developments in the Use of Superplasticizers**. Detroit: American Concrete Institute, 1981. p. 409-422.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION. **NCh 170: Hormigón - Requisitos Generales**. Santiado de Chile. 2016.

ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Arranjos Produtivos Locais**, 2018. Disponível em: <<http://www.itep.br/arranjos-produtivos-locais>>. Acesso em: 19 fevereiro 2018.

KANSTAD, T. et al. Mechanical properties of young concrete: Part I: Experimental results related to test methods and temperature effects. **Materials and Structures**, 36, n. 4, maio 2003. 218-225.

KIM, J.-K.; HAN, S. H.; SONG, Y. C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. **Cement and Concrete Research**, 32, n. 7, jul. 2002. 1087-1094.

LACERDA, A. Estadão. **Agreste tem 2º maior polo têxtil do País**, 2013. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,agreste-tem-2-maior-polo-textil-do-pais-imp-,981078>>. Acesso em: 19 fevereiro 2018.

LAVAGNA, L. et al. Cement-based composites containing functionalized carbon fibers. **Cement and Concrete Composites**, 88, 2018. 165-171.

LE, V.-A. **Comportement des bétons autoplacants par temps chaud**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Toulouse. Toulouse, p. 178. 2014.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina. 2007.

LEITE, G. J. G. **Desenvolvimento de blocos de Gesso com adição de cinzas de Algaroba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2014.

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

LINGLING, X.; MIN, D. Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent. **Cement and concrete research**, 2005. 1480-1485.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, p. 120. 2004.

MAILAR, G. et al. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions. **Resource-Efficient Technologies**, 2016. 68-80.

MANSOOR, J. et al. Analysis of Mechanical Properties of Self Compacted Concrete by Partial Replacement of Cement with IndustrialWastes under Elevated Temperature. **Applied Sciences**, março 2018. 1-20.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 1994.

MELO, M. C. C. et al. Cal produzida a partir de cinza de biomassa rica em cálcio. **Cerâmica**, São Paulo, 64, n. 371, Julho/Setembro 2018.

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

MOON, G. D. et al. 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.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (proposis juliflora) moldado sob pressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2014.

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

MOURET, M.; BASCOUL, A.; ESCADEILLAS, G. DROPS IN CONCRETE STRENGTH IN SUMMER RELATED TO THE AGGREGATE TEMPERATURE. **Cement and Concrete Research**, 27, n. 3, 1997. 345-357.

MOURET, M.; BASCOUL, A.; ESCADEILLAS, G. Strength impairment of concrete mixed in hot weather: relation to porosity of bulk fresh concrete paste and maturity. **Magazine of Concrete Research**, 55, n. 3, 2003. 215-223.

MOURET, M.; BASCOUL, A.; ESCADEILLAS, G. Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete. **Magazine of Concrete Research**, 57, n. 5, jun. 2005. 301-308.

MURUGAN, A. D.; MUTHURAJA, M. Experimental Investigation on Prosopis Juliflora Ash as a Partial Replacement of Cement in Conventional Concrete. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 6, n. 5, maio 2017. 8295-8293.

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

NEDHI, M. Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. **Cement and concrete research**, 30, 2000. 1663-1669.

NETO, T. F. C. **Efeitos da temperatura do concreto fresco na sua trabalhabilidade**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Materiais da Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2015.

NÓBREGA, A. C. V. et al. Improved 28-day compressive strength of SCC mixed and cured in hot. **Construction and Building Materials**, 173, 2018. 650-661.

ORTIZ, J. et al. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. **Cement and Concrete Research**, 35, n. 10, out. 2005. 1970-1979.

PACKIALAKSHMI, P.; JYOTHI, R. A. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CONCRETE USING HYPO SLUDGE AND WOOD ASH. **International Journal of Advanced Research**, 4, n. 4, 2016. 1243-1250.

PAUL, K. Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strenght. **Journal Proccedings**, 54, n. 6, 06 jan. 1958. 1063-1081.

PIMENTEL, T. DIARIO DE PERNAMBUCO. **Santa Cruz é sinônimo de polo têxtil**, 2017. Disponível em:
<http://www.impresso.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/cadernos/economia/2017/01/14/interna_economia,161460/santa-cruz-e-sinonimo-de-polo-textil.shtml>.
Acesso em: 18 fevereiro 2018.

PINEAUD, A. et al. Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. **Construction and Building Materials**, n. 112, p. 747-755, março 2016.

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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2016.

POLDER, R. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structure**, 33, 2000. 603-611.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004.

RAGHU, K. et al. Experimental Investigation on Partial Replacement of Cement by Mesquite (Prosopis Juliflora) Wood Ash in Concrete. **International Journal for Scientific Research & Development**, 5, n. 06, jun. 2017. 284-287.

RIBASKI, J. et al. Algaroba (Prosopis juli ora): Árvore de Uso Múltiplo para a Região Semiárida Brasileira. **Embrapa: Comunicado Técnico 240**, Colombo, 2009.

SCHINDLER, A. K.; MCCULLOUGH, B. F. The importance of concrete temperature control during concrete pavement construction in hot weather conditions. **Transportation Research Board**, n. 1813, 2002. 3-10.

SCHÖLER, A. et al. Early hydration of SCM-blended Portland cements: A pore solution and isothermal calorimetry study. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p. 71-82, 2017.

SEDRAN, T. **Rheologie et rheometrie des betons. Application aux betons autonivelants**. Tese (Doutorado em Estruturas e Materiais) – Escola Nacional de Estradas e Pontes. França. 1999.

SHADKAM, H. R. et al. An investigation of the effects of limestone powder and viscosity-modifying agent in durability related parameters of self-compacting concrete (SCC). **Construction and Building Materials**, 156, 2017. 152-160.

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

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

SIMEPAR. Sistema Meteorológico do Paraná, 2018. Disponível em: <<http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/home>>. Acesso em: 15 dezembro 2018.

SOROKA, I. **Concrete in Hot Environments**. CRC Press. [S.l.]. 2003.

SOUDKI, K. A.; EL-SALAKAWY, E. F.; ELKUM, N. B. Full factorial optimization of concrete mix design for hot climates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2001. 427-433.

TAYLOR, H. F. W. **The chemitry of cement**. London: Thomas Telford, v. II, 1997.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 163. 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

ZHANG, X.; LI, J. H.; LI, X. F. Influence of slag powder on the water reducing effect of admixtures and its mechanism. **Concrete**, 6, 1999. 34-36.