



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ AILTON DA SILVA MACENA JÚNIOR

**CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM USO DO CIMENTO CP III E CINZA DE
ALGAROA COMO FÍLER ALTERNATIVO**

Caruaru

2019

JOSÉ AILTON DA SILVA MACENA JÚNIOR

**CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM USO DO CIMENTO CP III E CINZA DE
ALGAROA COMO FÍLER ALTERNATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia civil
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia civil.

Área de concentração: Materiais de
Construção Civil.

Orientador: Prof. Dra. Ana Cecilia Vieira da Nóbrega

Caruaru

2019

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

M141c Macena Júnior, José Ailton da Silva.
Concreto auto-adensável com uso do cimento CP III e cinza de algaroba como fíler alternativo. / José Ailton da Silva Macena Júnior. – 2019.
46 f. il. : 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Resíduos sólidos. 2. Cimento Portland. 3. Algaroba 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-003)

JOSÉ AILTON DA SILVA MACENA JÚNIOR

CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM USO DO CIMENTO CP III E CINZA DE ALGAROA COMO FÍLER ALTERNATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil do Centro Acadêmico do Agreste -
CAA, da Universidade Federal de
Pernambuco - UFPE, como requisito
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de concentração: **Materiais de
Construção Civil.**

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato
APROVADO com nota _____.

Caruaru, 18 de janeiro 2019.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof^a. Dr^a. Marília Neves Marinho
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Aos meus Pais, Mércia Medeiros e
José Ailton Macena!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o dom da vida.

Aos meus pais, por terem acreditado e financiado os meus sonhos. Por serem meus grandes incentivadores desde a infância, sem nunca terem me pressionado a seguir caminhos os quais eu não desejava.

A minha irmã, Alanna Medeiros, por ser minha grande parceira e defensora em toda e qualquer situação.

Aos meus tios, primos e avós pelos grandes momentos em família.

A minha orientadora, Ana Cecília Nóbrega, pela paciência e apoio durante a execução deste trabalho.

À banca julgadora, composta pelos professores Flávio Diniz e Marília Marinho, pela disponibilidade e contribuições.

Aos meus colegas de pesquisa, Rodrigo Araújo e Jonatércio Florêncio, pela generosidade e por terem colaborado para tornar este trabalho possível.

Aos meus amigos, que conquistei durante a faculdade e ao longo da vida, que dividiram comigo bons e ruins momentos durante esses últimos anos. Eles farão que as recordações dos árduos anos do curso se tornem boas lembranças.

RESUMO

A cinza de algaroba é um resíduo gerado em grandes quantidades pelas lavanderias de Caruaru-PE. As suas características físicas e composição química permitem a sua incorporação na produção de materiais de construção civil. Tais quesitos permitem que ela seja classificada como um fíler calcítico alternativo. O presente trabalho avalia a sua substituição ao fíler calcítico calcário em teores de 0%, 50% e 100%, utilizando Cimento Portland de Alto Forno (CP III) para produção de concreto auto adensável. O teor de substituição do fíler calcítico ao cimento é de 20%. Os finos foram caracterizados quimicamente, o que endossa as substituições realizadas. Os materiais foram tratados e conservados, de forma que a umidade não influenciasse nos resultados. Após a dosagem e produção do concreto, foram realizados os ensaios no estado fresco, a fim de garantir as propriedades auto adensáveis que o intitulam. Da mesma maneira, o concreto foi moldado e após o processo de cura teve suas propriedades no estado endurecido avaliadas. De acordo com os resultados obtidos, a cinza influenciou na necessidade do uso de altos teores de superplastificante, e a sua interação com o CP III e o superplastificante apresentou resultados não favoráveis em termos de manutenção da auto-adensabilidade.

Palavras-chave: Concreto auto adensável. Cinza de algaroba. Fíler calcítico.

Cimento Portland de Alto Forno.

ABSTRACT

The algaroba ash is a residue generated in large quantities by the Caruaru-PE laundries. Its physical characteristics and chemical composition allow its incorporation in the production of civil construction materials. Such items allow it to be classified as an alternative calcitic filler. The present work evaluates its substitution to calcitic limestone filler at 0%, 50% and 100%, using Portland cement of blast furnace slag (CP III) for the production of self-compacting concrete. The substitution content of the calcitic filler to the cement is 20%. The fines were chemically characterized, which endorsed the substitutions made. The materials were treated and preserved so that moisture did not influence the results. After the dosing and the production of the concrete, the tests were carried out in the fresh state, in order to guarantee the self-compacting properties that titrate it. In the same way, the concrete was molded and after the curing process had its properties in the hardened state evaluated. According to the results obtained, ashes influenced high levels of superplasticizer, and its interaction with the superplasticizer and with CP III presented unfavorable results for the auto-adensability skills.

Keywords: Self-compacting concrete. Algaroba ash. Calcitic filler.

Portland cement of blast furnace slag.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Tratamento da cinza da algaroba | 23 |
| Figura 2 – Cone de Abrams com complemento cônico..... | 28 |
| Figura 3 – Placa metálica com círculos concêntricos..... | 28 |
| Figura 4 – Anel J. | 30 |
| Figura 5 – Caixa L..... | 31 |
| Figura 6 – Funil V..... | 32 |
| Figura 7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade | 33 |
| Figura 8 – Vista do espalhamento com traço de fíler calcário (100F). | 35 |
| Figura 9 - Vista dos espalhamentos com substituição parcial por cinza da lenha de algaroba (50F50C)..... | 36 |
| Figura 10 - Vista dos espalhamentos com substituição total por cinza da lenha de algaroba (100C)..... | 37 |
| Figura 11 - Anel J para o traço 100F (100% de fíler calcário) | 39 |
| Figura 12 - Resistência do concreto com 100% de fíler calcário (100F). | 41 |
| Figura 13 – Absorção total do concreto com 100% fíler calcário (100F). | 42 |
| Figura 14 – Absorção de água por capilaridade para o concreto com 100% fíler calcário (100F). | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química do CP III. | 22 |
| Tabela 2 – Composição química do fíler calcário. | 23 |
| Tabela 3 – Composição química da cinza da algaroba, comparativamente ao fíler calcário. | 24 |
| Tabela 4 – Dosagem do concreto. | 26 |
| Tabela 5 – Classes de viscosidade quanto ao <i>slump flow</i> | 29 |
| Tabela 6 – Classes de espalhamento. | 29 |
| Tabela 7 – Classes de viscosidade quanto ao funil V | 32 |
| Tabela 8 – Massa de superplastificante (g), espalhamento (mm) e tempo de escoamento (s) para os traços avaliados, a partir do ensaio de <i>slump flow</i> | 34 |
| Tabela 9 – Massa de superplastificante (g) e Razão obtidos pelo ensaio da caixa L para os traços avaliados. | 38 |
| Tabela 10 – Massa de superplastificante (g) e espalhamento (mm) obtidos pelo ensaio do anel J para os traços avaliados. | 39 |
| Tabela 11 – Massa de superplastificante (g) e tempo de escoamento (s) obtidos pelo ensaio do funil V para os traços avaliados. | 40 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CAA | Concreto Auto-adensável |
| CaCO ₃ | Carbonato de Cálcio |
| CP II E-Z | Cimento Portland composto com Escória e Pozolana |
| CP III 40RS | Cimento Portland de Alto Forno com resistência de 40 Mpa aos 28 dias |
| CP IV | Cimento Portland Pozolânico |
| FRX | Espectrometria de fluorescência de raios-X |
| MgCO ₃ | Carbonato de Magnésio |
| NBR | Norma Brasileira |
| NR | Norma Regulamentadora |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 14 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL | 15 |
| 1.3 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 15 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 16 |
| 2.1 | CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL | 16 |
| 2.2 | USO DE CIMENTO CP III | 17 |
| 2.2.1 | Influência do uso do CP III em pastas, argamassas e concretos | 17 |
| 2.2.1.1 | <i>Trabalhabilidade</i> | 17 |
| 2.2.1.2 | <i>Resistência à compressão</i> | 18 |
| 2.2.1.3 | <i>Sensibilidade à presença de água</i> | 18 |
| 2.3 | FÍLERES CALCÁRIOS | 18 |
| 2.3.1 | Uso de fíleres calcários alternativos | 19 |
| 2.3.1.1 | <i>Cinza da lenha de algaroba</i> | 19 |
| 2.3.2 | Influência do uso de fíleres calcários alternativos em pastas, argamassas e concretos | 19 |
| 2.3.2.1 | <i>Trabalhabilidade</i> | 19 |
| 2.3.2.2 | <i>Resistência à compressão</i> | 20 |
| 2.3.2.3 | <i>Sensibilidade à presença de água</i> | 20 |
| 3 | METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 22 |
| 3.1 | MATERIAIS | 22 |
| 3.1.1 | Cimento | 22 |
| 3.1.2 | Fíler calcário | 22 |
| 3.1.3 | Cinza de lenha de algaroba | 23 |
| 3.1.4 | Agregado miúdo | 24 |
| 3.1.5 | Agregado graúdo | 24 |
| 3.1.6 | Água | 25 |
| 3.1.7 | Superplastificante | 25 |
| 3.2 | MÉTODOS | 25 |
| 3.2.1 | Dosagem do concreto auto-adensável | 25 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.2.2 | Mistura e condições de cura | 26 |
| 3.2.3 | Ensaio no estado fresco | 27 |
| 3.2.3.1 | <i>Slump flow</i> | 27 |
| 3.2.3.2 | <i>Anel J</i> | 29 |
| 3.2.3.3 | <i>Caixa L</i> | 30 |
| 3.2.3.4 | <i>Funil V</i> | 31 |
| 3.2.4 | Ensaio no estado endurecido | 32 |
| 3.2.4.1 | <i>Resistência à compressão</i> | 32 |
| 3.2.4.2 | <i>Absorção de água total</i> | 33 |
| 3.2.4.3 | <i>Absorção de água por capilaridade</i> | 33 |
| 4 | RESULTADOS | 34 |
| 4.1 | ENSAIOS NO ESTADO FRESCO | 34 |
| 4.1.1 | <i>Slump flow</i> | 34 |
| 4.1.2 | <i>Caixa L</i> | 38 |
| 4.1.3 | <i>Anel J</i> | 39 |
| 4.1.4 | <i>Funil V</i> | 40 |
| 4.2 | ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO | 40 |
| 4.2.1 | <i>Resistência à compressão</i> | 41 |
| 4.2.2 | <i>Absorção de água total</i> | 41 |
| 4.2.3 | <i>Absorção de água por capilaridade</i> | 42 |
| 5 | CONCLUSÕES | 43 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 44 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, tradicionalmente, as estruturas são moldadas em concreto armado. Apesar da introdução de diversos outros tipos de estrutura, como de madeira e aço, essas alternativas se desenvolvem no país de forma inibida, principalmente pela qualificação da mão de obra, adaptação do setor, entre outros fatores.

Sem dúvidas, o maior desafio do emprego de novas tecnologias na construção civil é o rompimento de barreiras culturais. Nos últimos anos, houveram poucos avanços nesse sentido em âmbito nacional. Consequentemente, a construção civil no Brasil continua sendo realizada de maneira arcaica na maioria das situações. Mesmo que nas regiões mais desenvolvidas e em situações isoladas, algumas dessas tecnologias sejam absorvidas mais rapidamente.

Paralelamente, o concreto auto-adensável é uma alternativa criada em 1988 no Japão. Ainda que a prática seja antiga, o seu uso no Brasil não é popular. A sua utilização otimiza a concretagem quanto ao tempo e custo, além de benefícios ao resultado final das estruturas concretadas.

Para Tutikian *et al.*(2004), o custo global do CAA pode ser cerca de 3% mais econômico comparado ao concreto vibrado, analisando as variáveis: composição, mistura, transporte, aplicação do desmoldante, adensamento, acabamento e reparos. O concreto auto-adensável, além de economia, proporciona qualidade e segurança, facilmente explicadas pelo completo preenchimento das peças moldadas, mais rapidamente executadas.

Na dosagem de concreto auto-adensável, por outro lado, a presença de finos se faz essencial para garantir suas condições de auto-adensabilidade, trabalhando em conjunto com o superplastificante. Os finos mais usuais são os fíleres calcários; no entanto, os mesmos, envolvem custos de moagem para aplicação e vêm de fontes de recursos naturais não-renováveis.

Nesse sentido, esse trabalho de conclusão de curso, verifica a possibilidade do emprego das cinzas de lenha de algaroba, ricas em cálcio, mais precisamente carbonato de cálcio, como fontes alternativas de atuação como filer calcário. A algaroba é uma fonte de matriz energética fortemente utilizada no APL de Confecções

Pernambucano para o aquecimento das caldeiras de lavagem e tingimento do jeans. Por ser considerada uma praga ao desenvolvimento de outras vegetações, a algaroba tem seu corte e uso como matriz energética legalizado. É também utilizada na Índia e outros países com o mesmo fim.

A oportunidade de avaliação das cinzas de lenha de algaroba em atuação com o cimento CP-III vem do fato desse ser um cimento que vem cada vez mais sendo utilizado no mercado. Além disso, apresenta uma alta porcentagem de adição de escória de alto forno, que o faz mais sustentável que o tradicional CP II. Apesar do cimento CP III ter uma resistência inicial menor do que o cimento Portland CP II (NAZARI e RIHAHI, 2011; TAYLOR, 2015), mas tende a ganhar uma resistência maior durante um período mais extenso (TAYLOR, 2015), semelhante ao CP II para 28 dias de idade e maior que o CP II para força de longo prazo (NAZARI e RIHAHI, 2011).

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho objetiva o estudo da incorporação da cinza da algaroba como um fíler calcário alternativo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter traços de concretos auto-adensáveis adequados aos materiais de partida;
- Determinar os teores de superplastificante ideais para cada traço com base nas propriedades dos concretos auto-adensáveis em termos de auto-adensabilidade; e,
- Estudar a influência do CP III no concreto auto-adensável nos estados fresco e endurecido.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O concreto auto-adensável (CAA) é simplesmente um tipo de concreto que não precisa de vibração durante a sua execução, pois tem a capacidade de se auto-adensar (TUTIKIAN, 2007); é portanto uma excelente alternativa para quando há alta densidade de armaduras.

Segundo Skarendahl e Petersson(2000), Gomes(2002), Rooney (2002); Efnarc (2005), para que ele seja considerado autoadensável, é preciso que preencha todos os espaços da fôrma, somente pela ação do seu peso próprio; passe pelos obstáculos sem sofrer bloqueio e mantenha a estabilidade da mistura, sem que haja a ocorrência de segregação e/ou exsudação dos seus componentes.

A principal característica do CAA é o resultado da sua fluidez aliada à sua moderada viscosidade. A alta fluidez é consequência da incorporação de aditivos químicos, como superplastificantes; e a viscosidade, do incremento mineral, em um percentual adequado, com granulometria muito fina (Gomes e Barros, 2009), assim como o fíler calcário. Dessa forma, o concreto ganha a propriedade de fluir dentro da fôrma.

O comportamento reológico desse material permite que ele preencha toda a fôrma, mesmo quando se tratem de fôrmas com formas diferentes do comum, que contenham cantos de difícil acesso e com grande quantidade de armaduras. Isso soluciona as descontinuidades das peças causadas por problemas de adensamento na concretagem. Com a tendência do mercado de estruturas cada vez mais arrojadas, elas cresceriam com a utilização de concreto vibrado.

De acordo com a NR-15, o ruído contínuo da vibração do concreto torna o ambiente de trabalho insalubre. Com a ausência de vibração, consequentemente os ruídos são eliminados, não criando danos à saúde dos operários. Há ainda aumento da trabalhabilidade, que significa redução no tempo de execução implicando em uma possível redução nos custos, devido à diminuição da mão de obra, além de outros fatores.

Outro benefício dos concretos auto-adensáveis é a resistência à segregação dos materiais, que aliada à ausência de grandes vazios, justificada pelo completo

preenchimento da forma, imprime às peças finais um melhor acabamento. Além disso, elas têm uma durabilidade maior se comparadas às de concreto comum, que segundo Okamura e Ouchi (2003), era uma das questões de maior interesse, levando à criação de uma nova tecnologia.

2.2 USO DE CIMENTO CP III

Segundo a NBR 5735/1991, o cimento CP III é um aglomerante hidráulico composto de clínquer Portland e escória granulada de alto forno. As porcentagens desses componentes podem variar de 25 a 65% e de 35 a 70%, respectivamente; a mistura pode ser acrescida de até 5% de material carbonático, desde que este material possua no mínimo 85% de CaCO_3 .

Quanto a sua granulometria, a peneira 75 mm retém até 8% de resíduo e possui até 1,5% de resíduo insolúvel. Pode ser expandido até 5 mm, seja à frio ou à quente; até 4,5% pode ser perdido ao fogo.

2.2.1 Influência do uso do CP III em pastas, argamassas e concretos

2.2.1.1 *Trabalhabilidade*

Santos (2010) afirma que o CP III, na sua classe de resistência de 40 MPa, é bastante sensível à variação de temperatura. Fato que pode influenciar a trabalhabilidade de concretos e argamassas que utilizam o cimento no seu traço.

Para Tutikian e Molin (2008), a influência da escória de alto forno em concretos auto adensáveis pouco altera o consumo de superplastificante, não contribui para a fluidez em função da forma e reduz a exsudação e a segregação de materiais. Porém, Santos (2010) acredita que a pasta segrega com o excesso de tempo de repouso.

Santos (2010) estudou o comportamento de concretos auto-adensáveis compostos pelo cimento de alto forno e afirma que o espalhamento diminui em função do tempo de hidratação, mais acentuado com o aumento do teor de superplastificante acima de 1% do consumo de cimento. Para o traço de concretos auto-adensáveis com este cimento é necessário um maior teor do aditivo do que concretos com CP II E-Z. Já para argamassa, o teor é menor.

2.2.1.2 *Resistência à compressão*

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento de alto forno influencia uma menor resistência nas primeiras idades e uma maior no fim da cura. Gonçalves *et al.* (2015) reafirma a boa resistência aos 28 dias e acrescenta uma ótima reserva de resistência após os 28 dias de cura.

Santos (2010) encontrou uma resistência à compressão menor com o CP III 40RS do que com o CP II E-32. Para a Associação Brasileira de Cimento Portland, as influências do CP III e demais cimentos são relativas, podendo ampliar ou reduzir o seu efeito através do aumento ou redução da quantidade de seus componentes, sobretudo a água e o cimento.

2.2.1.3 *Sensibilidade à presença de água*

A permeabilidade de materiais que têm o cimento como componente está relacionada com a durabilidade deles. Ela controla a entrada de agentes agressivos à vida útil de variados tipos de peças (FERREIRA JÚNIOR, 2003).

Segundo a Associação brasileira de cimento Portland, o preenchimento de vazios proporcionado pela escória de alto forno aumenta a impermeabilidade das peças de concreto preparadas com o CP III, melhorando o seu desempenho ante a reação de sulfatos e da reação álcali-agregado.

Pereira *et al.* (2008) afirma que amostras preparadas com este cimento apresentam menor grau de permeabilidade do que as preparadas com CP II E, principalmente com idades avançadas. Ferreira Júnior (2003) reafirma a redução da permeabilidade com a cura térmica.

2.3 FÍLERES CALCÁRIOS

O fíler calcário se caracteriza por um pó fino, que tem como origem a rocha calcário. Ele pode ser encontrado em diversas formas, com diferentes granulometrias e diferentes composições químicas. O emprego do fíler calcário na construção civil é muito comum e vários estudiosos têm pesquisado ao longo dos anos substituições parciais do cimento pelo material.

2.3.1 Uso de fíleres calcários alternativos

Além do desafio de substituir o uso do cimento pelo fíler, pesquisadores estudam materiais que possam substituí-lo de forma alternativa e reforçam o compromisso de reutilizar na produção de materiais, resíduos das mais variadas áreas da sociedade. Como exemplos desses resíduos estão o pó de mármore, pó de granito e a cinza da algaroba, objeto de estudo de Melo (2012), Mota (2014), Nascimento (2014), Pires (2016) e Moura (2017).

A substituição alternativa do fíler requer muita atenção, pois não se trata de uma simples incorporação. É necessário que o material substituinte tenha propriedades semelhantes ao do substituído e se comporte em concretos e argamassas de maneira que a sua atividade não seja negativamente alterada.

2.3.1.1 *Cinza da lenha de algaroba*

Caruaru abriga um grande polo têxtil, que é arrimo de milhares de famílias. Devido à grande movimentação no setor, há na cidade inúmeras lavanderias que utilizam a queima da lenha de algaroba como fonte de energia. A atividade gera uma enorme quantidade de resíduo, que é descartado de maneira inadequada.

O grande volume descartado gera a necessidade da reincorporação do resíduo. Este trabalho tem como função estudar a influência da cinza na produção de concreto auto adensável nas condições do item 3.

2.3.2 Influência do uso de fíleres calcários alternativos em pastas, argamassas e concretos

2.3.2.1 *Trabalhabilidade*

A trabalhabilidade é um fator bastante contraditório quando se trata da incrementação de fíler alternativo, já que eles têm origens diferentes e influenciam resultados de maneiras variadas.

Lisboa (2004) acredita que o resíduo de beneficiamento do mármore e granito traz baixa coesão ao concreto auto adensável, provocando altas velocidades de fluxo para pequenos aumentos de dosagem de superplastificante. Porém, para a mesma dosagem do superplastificante, o tempo de fluxo aumenta com o maior percentual do pó de mármore.

Gonçalves e Moura (2002) percebeu um aumento da coesão e consistência, consequentemente diminuição da exsudação na produção de concreto ao incrementar o resíduo da serragem do granito.

De maneira geral, Lisboa (2004) encontrou resultados satisfatórios em relação a fluidez e segregação dos materiais.

2.3.2.2 *Resistência à compressão*

O fíler calcário não tem atividade pozolânica, por isso ele atua como carga inerte. Dessa forma, ele pode vir a ocasionar incremento ou redução da resistência à compressão, a depender de sua granulometria e-ou capacidade de aglomeração. Atuando como fíler e, consequente, efeito-empacotamento, tem-se a redução da porosidade e refinamento dos poros, incrementando as propriedades de resistência (FONSECA, 2016).

Assim, apesar do fíler ter propriedade apenas de enchimento, Gonçalves (2002), Lisboa (2004) e Melo (2012) obtiveram resultados positivos em relação à resistência das peças utilizando os fíleres alternativos dos seus estudos.

2.3.2.3 *Sensibilidade à presença de água*

Silva e Brito (2015) afirmam que o coeficiente de absorção capilar aumenta com o teor de adição mineral em substituição ao cimento. Fonseca (2016) corrobora da afirmativa que há colaboração do fíler calcário para o aumento da absorção por capilaridade. Em contrapartida, Melo (2012) diz que o coeficiente de capilaridade de argamassas sofre redução com adição da cinza de algaroba.

Determinados resíduos podem apresentar comportamentos não esperados na produção de concreto. Gonçalves e Moura (2002) encontrou uma redução na

absorção por capilaridade com a adição de 10% do resíduo de beneficiamento ao granito; porém ao adicionar 20%, a taxa aumentou.

Para Gonçalves e Moura (2002), uma adição mineral em excesso pode causar um refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais. Porém, o fíler, em geral, se caracteriza pelo efeito físico que ocorre com um bom preenchimento dos vazios. Isso justifica-se pela sua granulometria, que o torna capaz de promover esse efeito. A exemplo disso, a cinza de lenha de algaroba aumenta a porosidade das argamassas proporcionalmente à porcentagem da substituição (PIRES, 2016).

A permeabilidade está diretamente relacionada à porosidade. A quantidade de vazios é um dos fatores a determinar se elementos são capazes de penetrar na superfície e, conseqüentemente, alterar a sua durabilidade. Segundo Gonçalves e Moura (2002), a oxidação da mistura com o pó de granito é capaz de alterar o volume do concreto, devido ao fechamento dos poros. Dessa forma, ele torna-se mais impermeável a íons cloreto.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP III-40RS da marca Cimento Forte, cuja massa específica é 2,93 g/cm³. A sua composição química foi cedida pela empresa e está informada abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química do CP III.

| Ensaio | Resultados em massa (%) | | | | Limites da NBR 5735/91 |
|--|-------------------------|-----------|-----------|-------|------------------------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média | |
| Perda ao fogo – PF | 3,49 | 4,31 | 4,23 | 4,01 | ≤ 4,50% |
| Dióxido de silício total – SiO ₂ | 25,54 | 23,08 | 24,26 | 24,29 | *** |
| Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ | 6,81 | 7,81 | 6,52 | 7,05 | *** |
| Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ | 2,1 | 1,79 | 1,88 | 1,92 | *** |
| Óxido de cálcio total – CaO | 54,31 | 52,77 | 53,53 | 53,54 | *** |
| Óxido de magnésio – MgO | 4,11 | 5,02 | 4,66 | 4,60 | *** |
| Anidrido sulfúrico – SO ₃ | 1,51 | 2,71 | 2,02 | 2,08 | ≤ 4,00% |
| Óxido de sódio – Na ₂ O | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | *** |
| Óxido de potássio – K ₂ O | 0,59 | 0,59 | 0,61 | 0,60 | *** |
| Enxofre – S | 0,26 | 0,36 | 0,46 | 0,36 | ≤ 1,00% |
| Anidrido carbônico – CO ₂ | 2,86 | 2,86 | 2,98 | 2,90 | ≤ 3,00% |
| Resíduo insolúvel – RI | 1,69 | 1,39 | 0,86 | 1,31 | ≤ 1,50% |
| Óxido de cálcio livre – CaO (livre) | 1,51 | 1,56 | 1,58 | 1,55 | *** |

Fonte: Boletim Técnico da Empresa, Associação Brasileira de Cimento Portland (2017).

3.1.2 Fíler calcário

O fíler calcário utilizado é o calcítico, doado pela IMAP- empresa de João Câmara/RN. A massa específica é 2,71g/cm³ e a composição química, obtida através do ensaio de FRX, é descrita na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do fíler calcário.

| Óxidos | Percentual em massa (%) |
|--|-------------------------|
| MgO - Óxido de Magnésio | 5,11 |
| Al ₂ O ₃ - Óxido de Alumínio | 1,49 |
| SiO ₂ - Dióxido de Silício | 3,23 |
| P ₂ O ₅ - Pentóxido de Fósforo | 0,22 |
| Fe ₂ O ₃ - Óxido Férrico | 1,9 |
| SO ₃ - Trióxido de Enxofre | 0,12 |
| K ₂ O - Óxido de Potássio | 0,28 |
| CaO - Óxido de Cálcio | 87,65 |

Fonte: Autor (2019).

3.1.3 Cinza de lenha de algaroba

A cinza da algaroba foi coletada em uma lavanderia emblemática do Arranjo Produtivo Local (APL) de Confecções Pernambucano, após devida certificação de que a mesma utilizava apenas lenha de algaroba como matriz energética. O aspecto das cinzas de lenha de algaroba tal qual coletadas pode ser visto na Figura 1.a. Em laboratório, o material foi levado à estufa, permanecendo por 24 horas. Após a sua retirada, o material foi peneirado na peneira 200, cujo aspecto final pode ser visto na Figura 1.b. Após o tratamento completo, era necessário que a cinza permanecesse em repouso por mais 24h, para que a temperatura não influenciasse no resultado final em termos de propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco.

Figura 1- Tratamento da cinza da algaroba



Fonte: Autor (2019)

A massa específica encontrada para a cinza de linha de algaroba após peneiramento foi de 2,76 g/cm³ e a sua composição química está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química da cinza da algaroba, comparativamente ao fíler calcário.

| Óxidos | Percentual em massa (%) | |
|--|-------------------------|----------------|
| | Cinzas de algaroba | Fíler calcário |
| MgO - Óxido de Magnésio | 2,44 | 5,11 |
| Al ₂ O ₃ - Óxido de Alumínio | 0,37 | 1,49 |
| SiO ₂ - Dióxido de Silício | 0,83 | 3,23 |
| P ₂ O ₅ - Pentóxido de Fósforo | 1,99 | 0,22 |
| Fe ₂ O ₃ - Óxido Férnico | 0,35 | 1,90 |
| SO ₃ - Trióxido de Enxofre | 1,33 | 0,12 |
| Cl - Cloro | 2,12 | - |
| K ₂ O - Óxido de Potássio | 12,3 | 0,28 |
| SrO - Óxido de Estrôncio | 0,75 | - |
| CaO - Óxido de Cálcio | 77,52 | 87,65 |

Fonte: Autor (2019).

3.1.4 Agregado miúdo

A areia utilizada foi a passante pela peneira 4,75 mm e tem massa específica 2,58 g/cm³. Após o peneiramento, a areia foi seca em estufa à 105 °C por 24h e permaneceu em repouso por mais 24h para a produção de concreto.

3.1.5 Agregado graúdo

Foi utilizada a brita 0 (zero) durante a pesquisa. Para que o excesso de pó fosse eliminado, a brita foi peneirada na peneira 4,75 mm, sendo o resíduo seco em estufa por 24h e permanecendo em repouso por mais 24h antes da produção de concreto. A massa específica foi de 2,63 g/cm³.

3.1.6 Água

Como o Centro Acadêmico do Agreste atualmente é abastecido por carro-pipa, com água de diferentes origens, optou-se, para gerar resultados mais precisos, por utilizar água destilada, produzida no Laboratório de Química dessa universidade.

3.1.7 Superplastificante

O superplastificante utilizado foi o Glenium 51 – BASF. Trata-se de um superplastificante de 3ª geração, com base química de policarboxilatos e aspecto bege.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Dosagem do concreto auto-adensável

Foram dosados três traços de concreto diferentes para testes em laboratório. Para todos foi considerado o mesmo consumo de finos de 450 kg/m³ (tabela 4), um índice de vazios de 25 l/m³ e substituição do cimento pelo fíler no teor de 20%. As proporções de areia e brita são iguais, de acordo com o esqueleto granular, e foram obtidas com a Equação 1.

$$a = b = \frac{(1 - 0,001 * (C * ((\frac{1-P}{\rho_c}) + \frac{P}{\rho_f} + X) - V_v))}{0,001 * C * (\frac{1}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_b})} \quad (1)$$

Onde:

a - fator de areia;

b - fator de brita;

C - consumo de finos (Kg/m³);

P - porcentagem de substituição (%);

X - fator água/cimento;

Vv - volume de vazios (l/m³);

pa - massa específica da areia (g/cm³);

pb - massa específica da brita (g/cm³);

pc - massa específica do cimento (g/cm³); e,

pf - massa específica do fíler (g/cm^3).

O primeiro traço dosado teve substituição ao cimento apenas pelo fíler calcário, sendo tomado como referência.

No segundo, houve a substituição parcial do fíler calcário pelo fíler alternativo de cinza da lenha de algaroba em 50%; para que a sua influência já pudesse ser percebida e avaliada.

No terceiro, foi feita a substituição completa do fíler calcário pelo fíler alternativo de cinza da lenha de algaroba. As proporções encontradas para os traços estão relacionadas na Tabela 4. Os traços foram assim denominados: 100% de fíler calcário – 100F, 50% de fíler calcário+50% de cinzas de lenha de algaroba – 50F50C, e 100% de cinzas de algaroba – 100C. A dosagem dos concretos avaliados encontra-se devidamente exposta na Tabela 4.

Tabela 4 – Dosagem do concreto.

| Fator | Proporção | | |
|--------------|-----------|--------|--------|
| | 100F | 50F50C | 100C |
| Cimento | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| Areia | 1,7189 | 1,7207 | 1,7198 |
| Brita | 1,7189 | 1,7207 | 1,7198 |
| Água/Cimento | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |

Fonte: Autor (2019).

O teor de superplastificante foi dosado experimentalmente e em proporção ao consumo de finos. De modo que era observado o comportamento da mistura à medida que era adicionado o aditivo. O teor utilizado para todos os ensaios era determinado pelo que obtinha melhor espalhamento e tempo de escoamento sem segregação de materiais.

3.2.2 Mistura e condições de cura

Foram produzidos 20 litros de concreto por ensaio em uma betoneira de eixo horizontal, de 400 litros de capacidade, da marca CSM.

Inicialmente, brita, cimento, fíler e areia foram misturados, exatamente nessa ordem. Após cronometrado 1 minuto para mistura, era adicionada a água de

amassamento e a betoneira permaneceu ligada por mais 1 minuto e 30 segundos até que era desligada e, com o auxílio de uma colher de pedreiro, era retirado o excesso do concreto que ficava aderido à superfície da betoneira, devido ao pouco volume de concreto para sua grande capacidade. Era, então, adicionado o superplastificante, e, após 1 minuto e 30 segundos de mistura no equipamento, realizavam-se os ensaios no estado fresco.

Destaca-se que, durante a produção do concreto, foi percebida a forte influência do clima característico da região. As altas temperaturas nos meses de setembro, outubro e novembro influenciaram na trabalhabilidade do concreto. Portanto, os horários de sol à pino foram evitados para realização dos ensaios. Os traços de concreto foram rodados em horários mais favoráveis, posteriores às 16 horas.

3.2.3 Ensaios no estado fresco

3.2.3.1 *Slump flow*

O ensaio utilizado para medir o espalhamento do concreto foi o *slump flow*. Ele foi iniciado ao se apoiar no centro de uma placa de metal quadrada, um cone de Abrams (Figura 2). Anteriormente, os equipamentos foram umedecidos com água. A placa possui 90 cm de lado e está sobre um molde apoiado, que possui formato de tronco de cone com 30 cm de altura, base inferior de 20 cm de diâmetro e superior de 10 cm. A placa, que deve estar apoiada em um local plano, possui círculos concêntricos de 10, 20 e 50 cm de diâmetro, que auxiliaram a medir o espalhamento (Figura 3).

Figura 2 – Cone de Abrams com complemento cônico.



Fonte: Autor (2019).

Figura 3 – Placa metálica com círculos concêntricos.



Fonte: Autor (2019).

O cone foi preenchido com a amostra de concreto obtida (imediatamente após a mistura) até a sua base superior com auxílio do completo cônico (Figura 2), sem nenhum adensamento. Após esse procedimento, o cone foi levantado verticalmente e foi observado o espalhamento do concreto.

Frequentemente, obteve-se um espalhamento não uniforme e para medir essa diferença, uma régua graduada foi usada para trazer resultados mais exatos. Deve ser medido em duas direções perpendiculares e a diferença entre as duas não pode ultrapassar 2 cm, devendo ser apresentada a média como resultado. As classes de viscosidade quanto ao *slump flow* encontram-se expostas na Tabela 5.

Além do espalhamento, o tempo de escoamento é essencial para classificar esse concreto. O tempo foi cronometrado do início da desmoldagem até atingir a marca de 50 cm de placa. O tempo total não deve ultrapassar 5s e foi usado para classificar a viscosidade de acordo com a Tabela 6.

Tabela 5 – Classes de viscosidade quanto ao *slump flow*.

| Classes de viscosidade | Tempo de escoamento (s) |
|------------------------|-------------------------|
| 1 | ≤ 2 |
| 2 | > 2 |

Fonte: NBR 15823-1/2010.

A classificação do concreto auto adensável quanto ao espalhamento é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Classes de espalhamento.

| Classe de espalhamento | Espalhamento (mm) |
|------------------------|-------------------|
| 1 | 550 a 650 |
| 2 | 660 a 750 |
| 3 | 760 a 850 |

Fonte: NBR 15823-1.

3.2.3.2 Anel J

O anel J foi obtido de maneira similar ao *slump flow*. Tem a função de se obter a habilidade passante do concreto. Primeiramente, o cone de Abrams foi posicionado invertido no centro da placa, no círculo de 10 cm. Em volta ao cone posicionou-se um anel com 16 armaduras de aço lisas de 10 mm de diâmetro, 12 cm de altura e 5,8 cm de espaçamento (Figura 4).

Figura 4 – Anel J.



Fonte: Autor (2019).

Da mesma maneira ao *slump flow*, o molde foi retirado verticalmente e a habilidade do concreto de passar pelas armaduras do anel observada. O espalhamento foi comparado ao realizado sem as armaduras. A diferença entre ambos e o tempo de escoamento não deve ser superior a 5 cm e 5s, respectivamente.

3.2.3.3 Caixa L

A caixa L é uma estrutura retangular que tem como função simular a capacidade do concreto de preencher a forma (Figura 5). Trata-se de uma estrutura retangular dividida em duas etapas, uma vertical e outra horizontal. A primeira tem 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 90 cm de altura; a segunda tem 20 cm de largura, 60cm de comprimento e 16 cm de altura. Entre as duas, há três barras de aço lisas de 12,5 mm de diâmetro com 4 cm de espaçamento, por onde o concreto deve passar após a retirada da comporta, que separa as duas etapas.

Figura 5 – Caixa L.



Fonte: Autor (2019).

A estrutura deve ter sua superfície interna umedecida com água, a exemplo dos ensaios anteriores; e, após preencher a primeira etapa completamente, deve ser retirada a comporta, de forma rápida. Devido à força gerada na comporta pelo concreto, foi aplicada uma lâmina de óleo desmoldante nas bordas dela para facilitar o seu levante. Com o preenchimento da parte horizontal da caixa, foi medida com a régua graduada a altura nas duas extremidades, horizontal e vertical, e feita a razão entre elas, de modo que ela seja inferior a 1. Para que o critério para concreto auto adensável seja atendido, a razão deve ser superior a 0,8.

3.2.3.4 *Funil V*

O ensaio do funil V foi realizado para medir a viscosidade do concreto. Para realização deste ensaio foi necessário utilizar um funil em formato V de 12 litros de capacidade, com uma comporta, apoiado sobre uma mesa (Figura 6). O funil foi completamente preenchido com concreto, após a sua superfície ser umedecida com água. A comporta foi, então, aberta, de modo que o material escoasse, e o tempo fosse cronometrado entre o instante da abertura da comporta e o fim escoamento. Os critérios para classificação de viscosidade do concreto são baseados na Tabela 7.

Figura 6 – Funil V.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 7 – Classes de viscosidade quanto ao funil V

| Classes de viscosidade | Tempo de escoamento (s) |
|------------------------|-------------------------|
| 1 | ≤ 8 |
| 2 | 9 a 25 |

Fonte: NBR 15823-1/2010.

3.2.4 Ensaios no estado endurecido

3.2.4.1 Resistência à compressão

Após as verificações no estado fresco, o concreto foi moldado em corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm, de forma que não houvesse adensamento. Os corpos de prova passaram pelo processo de cura em imersão em água até o seu rompimento, realizado de acordo com os critérios da NBR 5739/2007. Foram rompidos quatro corpos de prova por idade com 1, 7 e 28 dias.

3.2.4.2 *Absorção de água total*

Encerrado o processo de cura dos corpos de prova com 28 dias, quatro deles foram secos em estufa à temperatura de 105 °C por 24h. A massa seca dos corpos de prova foi aferida e eles permaneceram totalmente imersos em água, por 72h. Ao final, foram secos com papel absorvente para retirar o excesso de água, e sua massa foi novamente aferida, a fim de determinar a quantidade de água absorvida por eles durante a imersão.

3.2.4.3 *Absorção de água por capilaridade*

Para determinação da água absorvida por capilaridade, quatro corpos de prova, previamente secos em estufa à temperatura de 105 °C por 24h, foram colocados em um recipiente de base plana com 5 mm de lâmina d'água (Figura 7). Os corpos de prova foram colocados sobre suportes de arame, de modo que a suas superfícies não estavam em contato direto com a superfície do recipiente. Após 3, 6, 24, 48 e 72h, eles foram pesados novamente para verificar o quanto de água absorveram.

Figura 7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor (2019)

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Slump flow

Os espalhamentos (mm) e os tempos de escoamento (s) obtidos em função dos ensaios de *slump flow* para os traços assim denominados (100% de fíler calcário – 100F, 50% de fíler calcário+50% de cinzas de lenha de algaroba – 50F50C, e 100% de cinzas de algaroba – 100C) encontram-se expostos na Tabela 8. As massas de superplastificantes necessárias para se obter o melhor espalhamento e tempo de escoamento sem segregação de materiais também estão expostas na Tabela 8 para cada traço avaliado. Lembra-se que, conforme Tabela 6, para o concreto atingir sua classificação mínima como auto-adensável deve apresentar um espalhamento mínimo em milímetros de 550 mm (NBR 15823-1). E, atingir abertura mínima de 500 mm em termos da medida do tempo de escoamento em segundos, conforme a mesma norma.

Tabela 8 – Massa de superplastificante (g), espalhamento (mm) e tempo de escoamento (s) para os traços avaliados, a partir do ensaio de *slump flow*.

| Traço | Massa de superplastificante (g) | Espalhamento (mm) | Tempo de escoamento (s) |
|--------|---------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 100F | 36,1 | 665 | 1,5 |
| 50F50C | 72 | 480 | *** |
| | 76,5 | 620 | 2 |
| 100C | 99 | * | *** |
| | 103,5 | 420 | *** |
| | 108 | ** | *** |

* Concreto não apresentou fluidez necessária.

** A adição do aditivo acelerou o tempo de pega.

*** O concreto não ultrapassou o círculo de 50 cm.

Para o traço utilizando apenas o fíler calcário (100F), foi encontrado um teor de superplastificante capaz de produzir um concreto com classe de escoamento 2 quanto ao espalhamento, Tabela 6 (Figura 8); e, classe de escoamento 1 quanto à viscosidade, verificada com o tempo de escoamento do *slump flow* (Tabela 5). Assim,

o concreto auto-adensável foi corretamente dosado quando da utilização do fíler calcário. Verifica-se visualmente, ainda, na Figura 8, que não houve exsudação e nem segregação para a mistura 100F, com distribuição uniforme e homogênea dos agregados.

Figura 8 – Vista do espalhamento com traço de fíler calcário (100F).



Fonte: Autor (2019).

Quanto ao traço com substituição parcial pela cinza da lenha de algaroba (50F50C), foram testados teores de superplastificante muito próximos, que durante o estudo preliminar, apresentaram o comportamento mais parecido ao de um concreto auto-adensável.

O primeiro, com massa de 72 g de superplastificante, não atendeu ao critério da NBR 15823-1/2010 de espalhamento mínimo de 550 mm (Figura 9a). O segundo, de massa 76,5 g, atendeu ao critério e foi avaliado em outros ensaios na sequência (Figura 9b). Apresentou classe de escoamento 1 e classe de viscosidade 1. Para ambos os consumos de superplastificante verifica-se, visualmente, nas Figuras 9 e 10, que não houve exsudação e nem segregação para a mistura 100C, com distribuição uniforme e homogênea dos agregados.

Salienta-se, no entanto, que ambos os traços apresentaram um comportamento relativo ao tempo de pega acelerado e aumento do teor superplastificante evidente, influenciando a trabalhabilidade do concreto.

Acredita-se que o tempo de pega acelerado tenha se dado em função da presença da cinza de lenha de algaroba, com a presença de alguma interação da mesma com o superplastificante ora em uso nesse estudo.

Adicionalmente, salienta-se que não houve segregação visual observada, apesar do aumento no quantitativo de superplastificante, praticamente o dobro do demandado no concreto com 100% de fíler calcário.

Figura 9 - Vista dos espalhamentos com substituição parcial por cinza da lenha de algaroba (50F50C).



Fonte: Autor (2019).

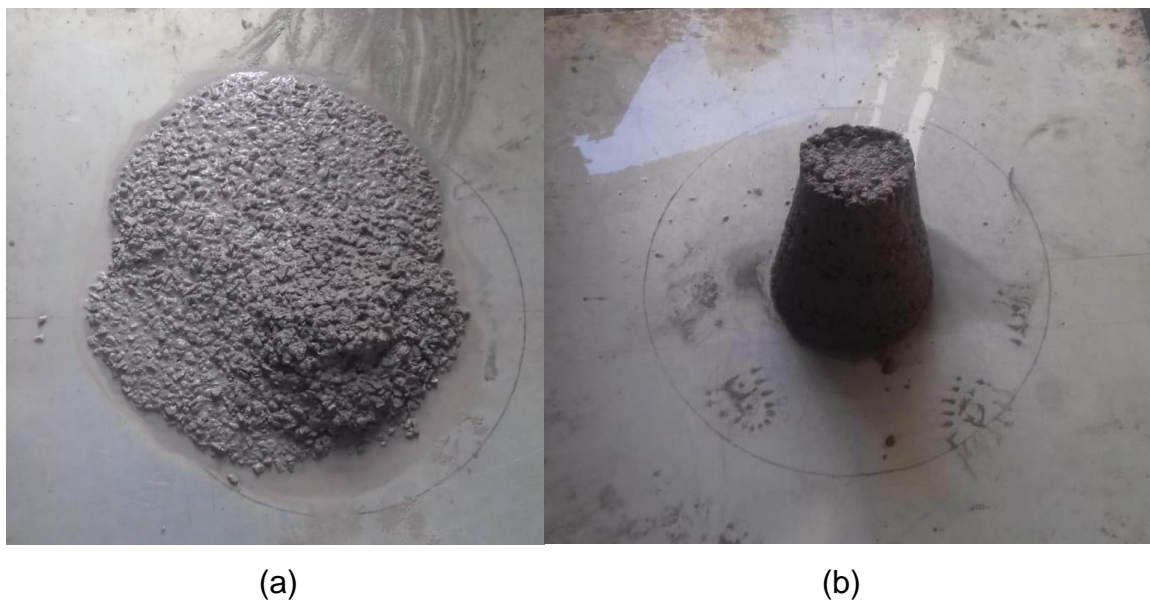
No terceiro caso, 100C, com a substituição total do fíler calcário pelo fíler alternativo de cinza de lenha de algaroba, o aumento do teor de superplastificante e o comportamento de aceleração do tempo de pega foram ainda mais intensificados. Portanto, foram verificados três teores de valores próximos de aditivo.

O primeiro testado, com massa de 99 g de superplastificante, não apresentou fluidez necessária, apesar do comportamento superior aos testados com teor inferior

a 99 g, não atendeu ao critério da NBR 15823-1/2010 de espalhamento mínimo de 550 mm. O segundo, com massa de 103,5 g, apresentou espalhamento ainda inferior ao estabelecido pela NBR 15823-1/2010 (Figura 10a).

Devido ao comportamento crescente da fluidez, foi testado um teor maior de 108 g. O resultado confirmou o comportamento de aceleração do tempo de pega com maior adição do superplastificante na substituição total pela cinza de lenha de algaroba (Figura 10b), não atendendo, obviamente, ao critério da NBR 15823-1/2010 de espalhamento mínimo de 550 mm.

Figura 10 - Vista dos espalhamentos com substituição total por cinza da lenha de algaroba (100C).



Fonte: Autor (2019).

Assim, com base nos testes de *slump flow*, dentre todos os traços e condições avaliadas, apenas o traço 50F50C com teor de superplastificante de 76,5 g apresentou espalhamento de 620 mm (superior ao mínimo de 550 mm estabelecido pela NBR 15823-1/2010) para ser classificado como um traço de concreto auto-adensável, classe 1 (Tabela 6). Lembra-se que o concreto com 100% de filer calcário apresentou abertura de 655 mm (classe 1, Tabela 6).

Ainda, destaca-se que ambos classificados na mesma classe 1 quanto ao tempo de escoamento, com tempo de escoamento de 2 s para o traço 50F50C, superior ao tempo de escoamento de 1,5 s do concreto do 100% de filer calcário (100F).

Na sequência, apenas serão realizados os ensaios da caixa L para os traços 100C e 50F50C com 76,5 g de superplastificantes, uma vez que os outros traços avaliados não atenderam aos critérios de auto-adensabilidade pelo *slump flow test*.

4.1.2 Caixa L

A razão em função do ensaio da caixa L, bem como os teores de superplastificante, para os traços assim denominados (100% de fíler calcário – 100F, 50% de fíler calcário+50% de cinzas de lenha de algaroba com 76,5 de de superplastificante – 50F50C76,5S) encontram-se expostas na Tabela 10.

Tabela 9 – Massa de superplastificante (g) e Razão obtidos pelo ensaio da caixa L para os traços avaliados.

| Traço | Massa de superplastificante (g) | Razão |
|--------|---------------------------------|-------|
| 100F | 36,1 | 0,85 |
| 50F50C | 76,5 | 0,50 |

O concreto produzido com fíler calcário obteve uma boa capacidade de preenchimento da caixa L. A razão encontrada é maior do que 0,8.

Com a substituição parcial (50F50C), para a massa de 76,5 g, o comportamento observado na mistura e no *slump flow*, atrapalhou a preenchimento da caixa L, apresentando um resultado muito abaixo do esperado (mínimo 0,8). O concreto visivelmente apresentou dificuldades em fluir, ultrapassar a barreira das três barras e preencher a caixa.

Assim, o concreto 50F50C76,5S foi reprovado no ensaio da caixa L. Nesse cenário, apenas o traço com 100% de fíler calcário foi capaz de obter a auto-adensabilidade, indicando a correta dosagem. A presença da cinza de lenha de algaroba, seja em substituição em 50% do fíler calcário, seja em 100% de substituição, não atuou positivamente na manutenção das capacidades auto-adensáveis dos concretos em avaliação; além de demandar altas quantidades de superplastificante.

Na sequência, os demais ensaios (anel J, funil V, e estado endurecido) foram realizados apenas para confirmação da classificação e comportamento do traço com 100% de fíler calcário em termos de concretos auto-adensáveis aqui dosados.

4.1.3 Anel J

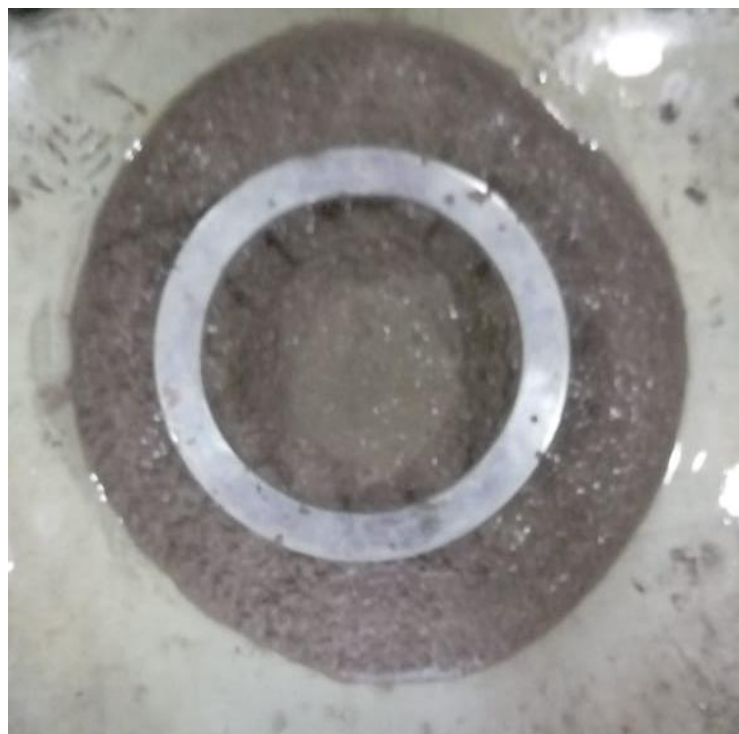
Os espalhamentos (mm) obtidos em função dos ensaios do anel J, bem como os teores de superplastificantes, para o traço com 100% de fíler calcário – 100F encontram-se expostos na Tabela 10. E o resultado obtido estava dentro do esperado, ratificando a correta dosagem do traço para concretos auto-adensáveis.

Tabela 10 – Massa de superplastificante (g) e espalhamento (mm) obtidos pelo ensaio do anel J para os traços avaliados.

| Traço | Massa de superplastificante (g) | Espalhamento (mm) |
|-------|---------------------------------|-------------------|
| 100F | 36,1 | 630 |

No caso do traço 100F, a diferença do seu espalhamento para o obtido via *slump flow* foi de 35 mm, inferior aos 50 mm estipulados pela NBR 15823-1/2010 (Figura 11).

Figura 11 - Anel J para o traço 100F (100% de fíler calcário)



Fonte: Autor (2019).

4.1.4 Funil V

O tempo de escoamento (s) em função do ensaio do funil V, bem como as massas de superplastificante (g), para o traço com 100% de fíler calcário – 100F, encontram-se expostas na Tabela 11.

Tabela 11 – Massa de superplastificante (g) e tempo de escoamento (s) obtidos pelo ensaio do funil V para os traços avaliados.

| Traço | Massa de superplastificante (g) | Tempo de escoamento (s) |
|-------|---------------------------------|-------------------------|
| 100F | 36,1 | 7 |

O ensaio do funil V foi necessário apenas para o traço de fíler calcário (100F). Para o primeiro caso, o tempo de escoamento encontrado permite classificar o concreto na classe de viscosidade 1, segundo a NBR 15823-1/2010.

Apenas em título de confirmação, foi realizado o ensaio para o concreto 50F50C com massa 76,5 g de massa de superplastificante. O comportamento encontrado confirmou o que já havia sido observado nos ensaios anteriores. O concreto não foi capaz de fluir completamente pelo funil, não se desprendendo totalmente do equipamento, o que levou a não conclusão do ensaio e obtenção de um tempo total.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

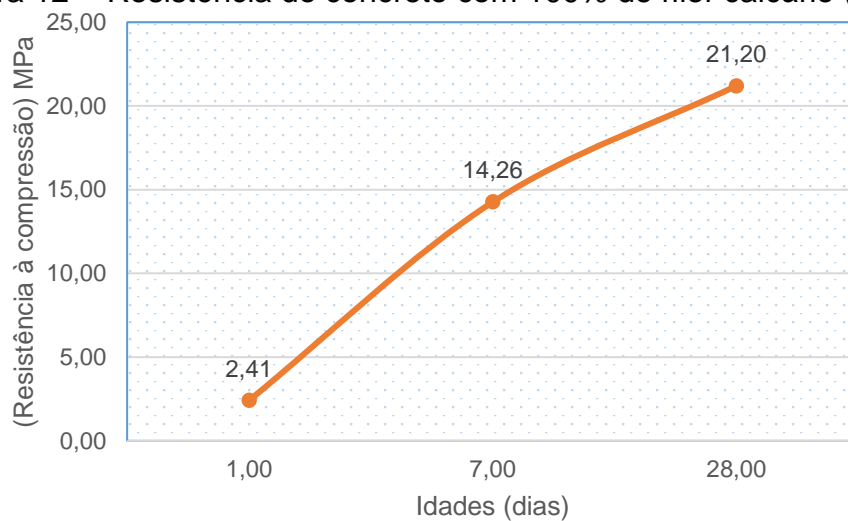
Com os resultados obtidos no estado fresco, não foi preciso moldar os traços que testam a substituição do fíler pela cinza da lenha de algaroba, uma vez que nem o traço 50F50C, nem o traço 100C se mostraram capazes de serem classificados como auto-adensáveis.

Portanto, apenas o traço com 100% de fíler calcário (100F) foi analisado nos ensaios para o estado endurecido. Não tornando possível a comparação entre os traços quanto à resistência à compressão, absorção de água total e absorção de água por capilaridade.

4.2.1 Resistência à compressão

O concreto apresentou um comportamento dentro do esperado quanto à resistência, tendo em vista a utilização do CP III. A resistência nas primeiras idades é baixa, porém o ganho durante os dias é alto, se considerado que aos 28 dias, o valor encontrado é maior 780% (NAZARI e RIHAHI, 2011; TAYLOR, 2015), como pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Resistência do concreto com 100% de fíler calcário (100F).

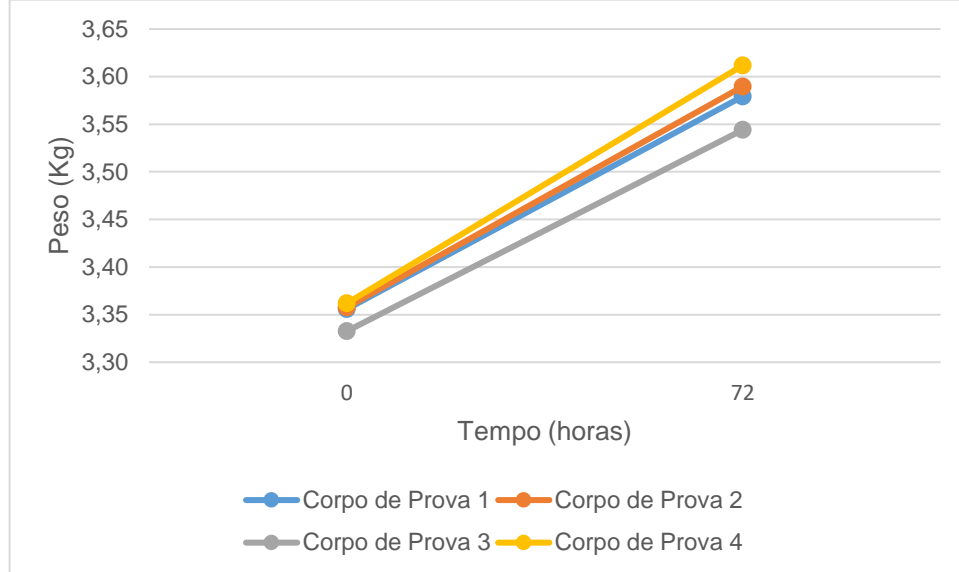


Fonte: Autor (2019).

4.2.2 Absorção de água total

Os corpos de prova referentes ao traço com 100% de fíler calcário absorveram em média 230 g de água. O valor corresponde a 6,4% da massa total absorvida pelo corpo de prova ao fim das 72 horas dos corpos de prova imersos, como pode ser visualizado no gráfico exposto na Figura 13.

Figura 13 – Absorção total do concreto com 100% fíler calcário (100F).

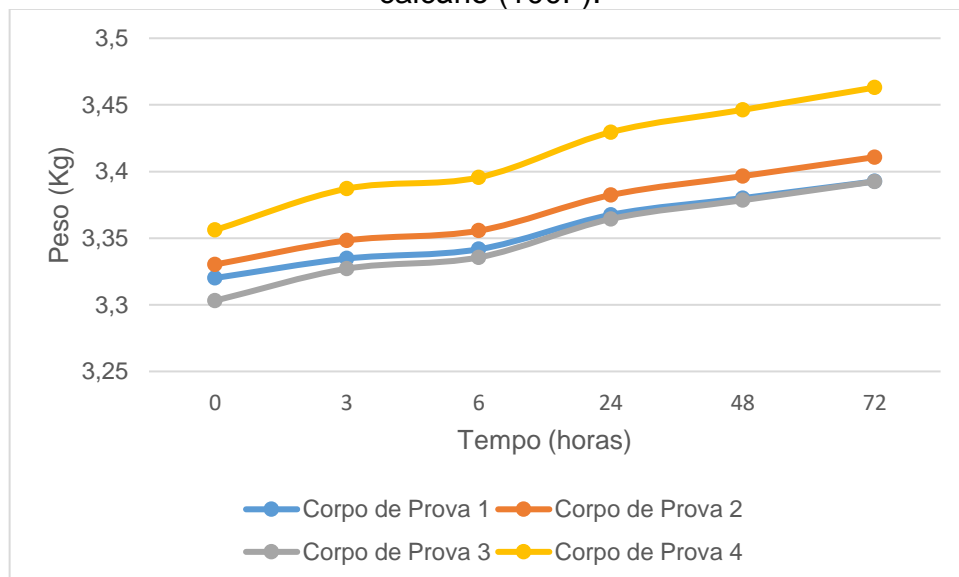


Fonte: Autor (2019).

4.2.3 Absorção de água por capilaridade

O valor médio encontrado para absorção capilar é de $1,11 \text{ g/cm}^3$, como pode ser visualizado na Figura 14. Pereira *et al.* (2012) encontraram valores parecidos para argamassas produzidas com CP III e com fatores água/cimento de 0,4 e 0,7.

Figura 14 – Absorção de água por capilaridade para o concreto com 100% fíler calcário (100F).



Fonte: Autor (2019).

5 CONCLUSÕES

De acordo com estudos realizados, foi concluído que não é possível a substituição do fíler calcário pela cinza da lenha de algaroba na produção de concreto auto-adensável nas condições especificadas no item 3. Nem parcialmente, em 50%, nem em 100%.

Quando houve a combinação da cinza da lenha de algaroba com o cimento CP-III e o Glenium 51 da BASF como superplastificante, o tempo de pega foi expressivamente acelerado, dificultando a manutenção das habilidades auto-adensáveis, apesar do uso exacerbado de superplastificante, atingidos a menos de 50% em massa, em relação à massa de cimento do traço.

Os teores que obtiveram melhores resultados foram de 36,1; 76,5; 108g de superplastificante para, respectivamente, os traços de fíler calcário (100F), substituição parcial (50F50C) e substituição total do fíler calcário pela alternativo adotado (100C). Mas, ainda assim, não sendo classificados como concretos auto-adensáveis.

O fato da cinza requisitar altos teores do aditivo, culminou em resultados negativos quanto à substituição do fíler calcário pela cinza da lenha de algaroba em termos de manutenção de auto-adensabilidade no estado fresco. Não sendo possível, assim, sua aplicação para esse fim quando combinada com o superplastificante Glenium 51 da Basf e o cimento CP-III.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a substituição do fíler calcário pela cinza da algaroba para consumos de cimento diferentes do utilizado;
- Analisar a substituição em teores diferentes ao testado, principalmente em teores inferiores para melhor avaliação da cinza da algaroba na produção do concreto;
- Estudar a fabricação do concreto com um fator água/cimento superior ao testado, devido ao comportamento seco do concreto observado ao substituir pela cinza.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de utilização do Cimento Portland**. Disponível em <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em dez. 18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável, Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto forno - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Método de compressão de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2007.
- EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete • Specification, Production and Use**. EFNARC, 2005.
- FERREIRA JÚNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. 2003. 158p. Dissertação (Mestrado). UNICAMP, Campinas – SP.
- FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporado metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada**. 119p. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. UFRN, Natal- RN.
- GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. Catalunya, Espanha: Tese de Doutorado, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- GOMES, P. C. C.; UCHOA, S. B. B.; BARROS, A. R. **Propriedades de durabilidade do Concreto auto-adensável - Self-compacting concrete durability properties**. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, CD-ROOM, Rio de Janeiro, 2006.
- GONÇALVES, A. L. L. ; SILVA, E. C.; SANTOS, J. W. V.; FARIAS, H. L. H. M. S. **Estudo técnico-financeiro de cimentos portland: Uma avaliação com diferentes marcas de Cimento Portland**. Vetor, Rio Grande, v. 25, n. 1, p. 111-127, 2015.
- GONÇALVES, J. P. ; MOURA, W. A. **Reciclagem do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil**. 2002. In: III SRONE. Recife – PE.
- LISBOA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. 121p. 2004. Tese (Mestrado). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. UFAL, Maceió – AL.

LOPES DA SILVA, S. H.; LONDERO, C.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, V. C. O.; MONTEIRO, E. C. B. **Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica.** p. 174-189. 2015. Revista ALCONPAT. Volume 5. Número 3.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano.** 120p. 2012. Tese (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. UFPE, Caruaru – PE.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 15 – Atividades e Operações insalubres.** Disponível em <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR15/NR-15.pdf>>. Acesso em dez. 18.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (prosopis juliflora) moldado sob pressão.** 122p. 2014. Tese (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. UFPE, Caruaru – PE.

MOURA, L. S. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.** 97p. 2017. Tese (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. UFPE, Caruaru – PE.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento.** 99p. 2014. Tese (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. UFPE, Caruaru – PE.

NAZARI, A., RIAHI, S. The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete, **Materials Science and Engineering: A** 528(4) (2011) 2149-2157.

OKAMURA, H.; OUCHI, M., **Self-compacting concrete**, Journal of Advanced Concrete Technology, v.1, n.1, 2003.

PEREIRA, V. C. O. **Estudo da influência do tipo de cimento em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloretos.** 2011. Dissertação (Mestrado). UPE, Recife – PE.

PEREIRA, V. M.; CARVALHO, E.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. **Análise fluido-dinâmica do escoamento em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com cimento Portland de alto-forno.** p. 160-166. 2008. UNICAMP. Campinas – SP.

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.** 96p. 2016. Tese (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. UFPE, Caruaru – PE.

ROONEY, M. J. **Assessment of the Properties of Fresh SelfCompacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation**. 2002. Tese (Doutorado). University of Paisley/USA.

SANTOS, L. F. **A influência do patamar de cura térmica sobre a resistência dos concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de cimento: avaliação pelo método da maturidade**. 280p. 2010. Tese (Mestrado). UNESP, Ilha Solteira – SP.

SILVA, P.; BRITO, J. **Propriedades mecânicas e retração de BAC produzido em misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e fíler calcário**. 2015. In: IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável. Porto.

SKARENDAHL, A; PETERSSON, Ö. (2000) **Self-compacting concrete Stateof-the-Art**. In: Report of RILEM Technical Committee 174-SCC Self-Compacting Concrete. RILEM Publications.

TAYLOR, M.G. **Modern cements (bulk)**, Fact Sheet 14b, MPA Cement (plus CSMA and UKQAA), London, 2015.

TUTIKIAN, B. F., **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 162p. 2007. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre – RS.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. C. D.; CREMONINI, R. A.; KUHN, R. O.; BRESCOVIT, S. J. (2004) **Comparação da curva de dosagem, resistência à tração, consumo de materiais e custo dos concretos auto-adensáveis com metacaulim e fíler calcário**. 2004. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, II 431-II 442. Florianópolis -SC.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **Concreto Auto-Adensável**. 2008. PINI. São Paulo – SP.