



CÍCERO MARCIANO DA SILVA SANTOS

OBTENÇÃO DE PASTAS POR MEIO DO MÉTODO DO PSEUDO-SIMPLEX-DUPLO PARA DOSAGEM DO CAA

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azevedo

Co-orientador: Prof. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

JOÃO PESSOA - PB
OUTUBRO DE 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
PROGRAMA DE PÓS-GRAUDAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

OBTENÇÃO DE PASTAS POR MEIO DO MÉTODO DO PSEUDO-SIMPLEX-
DUPLO PARA DOSAGEM DO CAA

Tese apresentada por Cícero Marciano da Silva
Santos ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da
Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como
atividade final para a obtenção do título de
Doutor, conforme legislação vigente

JOÃO PESSOA – PB
OUTUBRO DE 2019

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

S237o Santos, Cícero Marciano da Silva.

Obtenção de pastas por meio do método do
pseudo-simplex duplo para dosagem do CAA / Cícero
Marciano da Silva Santos. - João Pessoa, 2019.
211 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves de Azevedo.

Coorientação: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. CAA - Concreto Auto Adensável. 2. Planejamento
experimental de mistura. 3. Pseudo simplex duplo. 4.
Pastas auto adensáveis. I. Azeredo, Givanildo Alves de.
II. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. III. Título.

UFPB/BC

CDU 691.32(043)

**“DOSAGEM DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM ADIÇÕES
MINERAIS POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE MISTURAS”**

CÍCERO MARCIANO DA SILVA SANTOS

Tese aprovada em 09 de Outubro de 2019

Período Letivo: 2019.2

[REDAÇÃO MANTIDA CONFIDENCIAL]

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – UFPB

Orientador

[REDAÇÃO MANTIDA CONFIDENCIAL]

Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo – UFPB

Examinador Interno

[REDAÇÃO MANTIDA CONFIDENCIAL]

Prof. Dr. Aline Figueiredo da Nóbrega Azeredo – UFCG

Examinadora Interna

[REDAÇÃO MANTIDA CONFIDENCIAL]

Ana Cecilia Vieira da Nóbrega – UFPE

Examinador Externa

[REDAÇÃO MANTIDA CONFIDENCIAL]

Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena

Examinadora Externa

João Pessoa/PB

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo precioso dom da vida e por sempre colocar as pessoas certas no meu caminho, além de me dar a luz para fazer as melhores escolhas. Aos meus familiares, irmãos e amigos mais próximos, em especial meus pais, por todo apoio moral que nunca faltou e toda compreensão nos momentos de ausência durante esses anos de pesquisa. O apoio de vocês sempre foi combustível de motivação para que eu nunca desistisse.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo e Marcos Alyssandro Soares dos Anjos, pela sua dedicação, críticas construtivas, e principalmente, pelos conteúdos transmitidos durante todo o período da tese, que foram decisivos para a sua elaboração e conclusão. A professora Aline Figueiredo e ao bolsista do Cnpq Weslley Victor, por seu grande apoio em todos os momentos da execução do experimento.

Aos demais membros do grupo de pesquisa de estruturas e materiais do LABEME, Danilo, Raimundo, Pedro, Thiago e Aron por contribuírem sempre que precisei durante os ensaios. Aos funcionários do LABEME Ricardo, Delby e Sebastião por todo suporte técnico sempre necessário. Ao professor Gibson Rocha Meira por ceder o laboratório do GMAT para realização do teste de ultrassom e Mariane Carvalho, Taíssa e Maria Laiz pelo apoio durante a execução do ensaio. Aos técnicos do laboratório de Materiais, Mayson, Larissa e Ricardo e Laís do LACON pela realização dos ensaios de miro estrutura, além de Daniela e o professor João Batista da UFCG.

Aos colegas do PPGECAM, Leovegildo, Paloma, Robson, Fabiana, Aretuza, Adriano e José Augusto, pelo companheirismo, apoio nos momentos difíceis e muitas vezes descontraídos, que me ajudaram a superar as provações dessa caminhada.

A todos vocês meu muito obrigado!

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo aprimorar e validar o método de obtenção de pastas para dosagem do CAA por meio do pseudo simplex duplo com três tipos de adição mineral (metacaulim, pozolana da casca de arroz e fíler calcário). Inicialmente, foram definidos limites de utilização para os componentes das 17 composições de pastas do planejamento experimental. Foram realizados testes de mini cone que geraram resultados de espalhamento e T_{115} . Estes foram submetidos ao teste R e F e à análise de variância para averiguar a confiabilidade dos resultados obtidos, e assim, representar esses dados em coordenadas simplex para obter a região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis. Foram realizados teste de viscosidade (cone Marsh) e exsudação (método de decantação na proveta), para verificar a resistência à segregação das pastas. Na sequência, a dosagem seguiu com a composição de argamassas auto adensáveis para obter o teor de agregado miúdo e compor três misturas de CAA, cada uma com sua respectiva adição mineral e teor de pasta (fraco, médio e forte). Além disso, foram produzidos diretamente da pasta constitutiva 7 misturas de CAA para cada adição mineral por meio de um planejamento fatorial 2^2 com três pontos centrais, no qual se configuraram como variáveis de entrada para o sistema, o volume de pasta e a relação B/A, sendo esses parâmetros definidos e comparados com a EFNARC (2005). As 30 misturas de CAA foram submetidas à testes de capacidade de preenchimento (*slump flow* e anel J), viscosidade (T_{500} e Funil V), habilidade de passagem (caixa L) e resistência à segregação pelo método da peneira. Em seguida, foram feitos ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias e velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 90 dias. Como resultados da pesquisa, foi possível representar o resultados do teste de mini cone (espalhamento e T_{115}) em coordenadas simplex e, por meio da intersecção entre essas variáveis, obter uma região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis. Além disso, a partir de pastas constitutivas escolhidas nessas regiões, foi possível obter argamassas e concreto auto adensáveis, de acordo com os parâmetros da EFNARC (2005). No tocante a resistência mecânica, todas as misturas de CAA alcançaram resistência superior a 40 Mpa aos 28 dias, conforme os objetivos estabelecidos inicialmente no projeto associados a ótima velocidade de pulso ultrassônico.

Palavras Chave: CAA, Planejamento experimental de mistura, simplex, pastas.

ABSTRACT

This research aims to improve and validate the method obtaining paste for dosage of SCC through the pseudo double simplex with three different types of mineral addition (metakaolin, rice husk pozzolan and limestone filler). First, content limits were defined for the paste components and then 17 paste compositions were produced. Mini cone tests were made, which generated spreading and T_{115} results. These were submitted to the R and F test and variance analysis to verify the reliability results obtained and represent these data in simplex coordinates to obtain the region with high probability occurrence of self-compacting pastes. Viscosity test (Marsh cone) and exudation (decanting method in a beaker) were used to verify the resistance to segregation of the pastes. Subsequently, the dosage followed with the composition of self-compacting mortars to obtain the fine aggregate content and to compose three SCC mixtures, each with their respective mineral addition and paste content (weak, medium and strong). In addition, 7 SCC mixtures were produced directly from the constitutive paste for each mineral addition through a 2^2 factorial design with three central points, in which the paste volume and B/A ratio were configured as input variables to the system and these parameters were defined and compared with EFNARC (2005) for enframe or at least to come close to what the standard determines. The 30 SCC mixtures were subjected to fill capacity (slump flow and J-ring), viscosity (T_{500} and V Funnel), passing ability (L box) and segregation resistance tests by the sieve method. Then, compression strength tests were performed at 3, 7, 28 and 90 days, and ultrasonic pulse velocity at 28 and 90 days. As a result of research, it was possible to represent the results of the mini cone test (spreading and T_{115}) in simplex coordinates and through the intersection between these variables to obtain a region with high probability occurrence of self-compacting pastes. In addition, from constituent pastes chosen in these regions, it was possible to obtain self-compacting mortars and concrete, according to the EFNARC (2005) parameters. Regarding mechanical strength, all CAA mixtures reached resistance greater than 40 MPa at 28 days, according to the objectives initially established in the project associated with the optimum ultrasonic pulse speed.

Keywords: SCC, Experimental mix planning, simplex, pastes.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA – Análise de Variância
ACI - American Concrete Institute
A/C - Relação Água/Cimento
A/F – Relação Água/Finos
API – Adições Predominantemente Inertes
APR - Adições Predominantemente Reativas
B/A – Brita/Areia
BET – Brunauer, Emmett e Teller
CA – Cinza de Arroz
CAA – Concreto Auto Adensável
CC – Concreto Convencional
CV – Concreto vibrado
CAD – Concreto de Alto Desempenho
CAR – Concreto de Alta Resistência
CADAR - Concreto Auto Adensável de Alta Resistência
CCA – Cinza da Casca de Arroz
CH – Hidróxido de Cálcio
CP V - ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSH – Silicato de Cálcio Hidratado
Ca/Si – Cálcio/Silica
DOE – Experimental of design
DRX - Difração de Raios-X
EFNARC –The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
FC – Fíler Calcário
FRX - Fluorescência de Raios – X
GMAT - Grupo de Pesquisa de Materiais e Resíduos de Construção Civil
IPT/EPUSP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
LABEME - Laboratório de Estruturas e Materiais
MEV - Microscopia Eletrônica por Varredura
MK – Metacaulim
NBR NM – Norma Brasileira
PCA – Pozolana da Casca de Arroz
SP - Superplastificante
SP/P - Relação Superplastificante / Pó em massa
SP/C - Relação Superplastificante /Cimento em massa
 V_W/V_P - Água /Pó em Volume

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 – Resultados do teste de sedimentação nas pastas com MK..... | 128 |
| Gráfico 2 – Teste de sedimentação das pastas com PCA | 128 |
| Gráfico 3 – Teste de sedimentação das pastas com FC | 128 |
| Gráfico 4 - Resultados do <i>Slump Flow</i> do CAA dosados a partir das pastas..... | 143 |
| Gráfico 5 - Resultados do ensaio de Anel J do CAA dosados a partir das pastas .. | 144 |
| Gráfico 6 - Resultados do ensaio de T500 do CAA (Planejamento Fatorial)..... | 146 |
| Gráfico 7 - Resultados do ensaio de Funil V do CAA (Planejamento Fatorial)..... | 148 |
| Gráfico 8 - Resultados do ensaio de caixa L do CAA (Planejamento Fatorial) | 150 |
| Gráfico 9 - Resultados do ensaio de resistência à segregação do CAA (Planejamento Fatorial) | 152 |
| Gráfico 10 - Resultados do Slump Flow e Anel J do CAA dosado por argamassa . | 156 |
| Gráfico 11 - Resultados dos testes de viscosidade do CAA a partir da argamassa | 157 |
| Gráfico 12 - Resultados do ensaio de caixa L do CAA a partir da argamassa | 158 |
| Gráfico 13 - Resultados do ensaio de Resistência à segregação do CAA (argamassa) | 160 |
| Gráfico 14 - Resistência à compressão do CAA produzido a partir da pasta..... | 164 |
| Gráfico 15 - Curvas de crescimento das resistências à compressão do CAA..... | 165 |
| Gráfico 16 - Resistência à compressão do CAA produzido a partir da argamassa. | 167 |
| Gráfico 17 - Resultados do ensaio de ultrassom para o CAA dosado por planejamento fatorial | 169 |
| Gráfico 18 - Resultados dos testes de ultrassom do CAA dosado por argamassas | 171 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas do cimento e adições minerais | 77 |
| Tabela 2- Propriedades físicas dos agregados | 82 |
| Tabela 3 – Matriz para o planejamento fatorial 2 ² com três pontos centrais | 95 |
| Tabela 4 - Variáveis e níveis do planejamento fatorial para o concreto | 95 |
| Tabela 5 – Composição do CAA a partir dos ensaios de argamassa. | 99 |
| Tabela 6 - Pseudocomponentes para misturas do simplex..... | 111 |
| Tabela 7 – Pontos experimentais para as misturas do simplex..... | 113 |
| Tabela 8 - Síntese da análise estatística das pastas produzidas por processo manual e mecânico | 116 |
| Tabela 9 – Respostas observadas para Flow (cm) e T115 (s) nas pastas..... | 117 |
| Tabela 10 – Síntese da análise estatística das pastas produzidas | 118 |
| Tabela 11 - Análise da viscosidade e resistência à segregação das pastas..... | 126 |
| Tabela 12 - Composição das pastas autoadensáveis | 130 |
| Tabela 13 – Composição das prováveis argamassas autoadensáveis | 132 |
| Tabela 14 – Componentes reais em peso das argamassas | 133 |
| Tabela 15 – Resultados dos testes de espalhamento e Funil V das argamassas... | 134 |
| Tabela 16 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias..... | 137 |
| Tabela 17 - Composição das misturas de CAA com dosagem a partir das pastas . | 138 |
| Tabela 18 – Resultados dos ensaios com CAA dosados a partir das pastas no estado fresco..... | 140 |
| Tabela 19 - Análise estatística dos resultados dos testes do CAA no estado fresco | 141 |
| Tabela 20 – Composição das misturas do CAA (dosagem a partir da argamassa) .. | 154 |
| Tabela 21 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco (Dosagem por Argamassa)..... | 155 |
| Tabela 22 - Resultados dos testes de Resistência à Compressão do CAA (Mpa) .. | 162 |
| Quadro 1 - Ações corretivas para corrigir não conformidades nos resultados dos ensaios no CAA..... | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo | 24 |
| Figura 2 – Equação de Bingham para um fluido | 25 |
| Figura 3 – Comparativo entre as curvas de fluxo e um CV, CAA e CAR | 26 |
| Figura 4 – Diagrama esquemático da espessura do filme de argamassa | 27 |
| Figura 5 – (a) partículas em contato; (b) partículas separadas por um fluido que as recobre as preenchendo os vazios do empacotamento dos sistemas de partículas (PILEGGI, 2001)..... | 33 |
| Figura 6 – Comparação entre as proporções de materiais utilizados no CAA e em concretos vibrados | 36 |
| Figura 7 - Interação entre o conhecimento do processo, a estatística e o bom senso na definição do planejamento experimental e na análise dos resultados..... | 62 |
| Figura 8 – Sistema de coordenadas “simplex” | 66 |
| Figura 9 – Representação de misturas em eixos cartesianos | 67 |
| Figura 10 – Representação da variação de uma propriedade em uma mistura de três componentes..... | 68 |
| Figura 11 – Esquema de simplex para misturas de três componentes (A,B e C) com restrições inferiores e superiores | 71 |
| Figura 12 – Pontos experimentais do pseudo simplex duplo | 72 |
| Figura 13 - Programa experimental (etapas do estudo) | 75 |
| Figura 14 - Difratogramas dos finos utilizados | 80 |
| Figura 15 - MEV do CP V ARI (a) e Metacaulim (b) | 81 |
| Figura 16 - MEV da PCA (a) e Fíler calcário (b)..... | 81 |
| Figura 17 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado | 82 |
| Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado..... | 83 |
| Figura 19 - Etapas da dosagem das pastas por meio do pseudo simplex duplo | 85 |
| Figura 20 - Ensaio de minicone (a) e aparato utilizado no ensaio de minicone (b) ... | 88 |
| Figura 21 - Procedimento para determinação do ponto de saturação..... | 92 |
| Figura 22 - Comportamento de sedimentação de (a) suspensões estáveis e (b) suspensões floculadas/coaguladas..... | 93 |
| Figura 23 - Teste de auto adensabilidade das argamassas: (a) Slump Flow e (b) Funil em V | 97 |
| Figura 24 - Ensaio de espalhamento do concreto (slump flow test) | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figura 25 - Slump Flow Test | 102 |
| Figura 26 - Anel J (a) e ensaio com o Anel J (b) | 103 |
| Figura 27 - Molde para ensaio de Funil V | 104 |
| Figura 28 - Molde utilizado para ensaio de caixa L | 105 |
| Figura 29 - Teste de segregação pelo método da Peneira | 107 |
| Figura 30 - Moldagem dos corpos de prova (a) e Desmoldagem dos corpos de prova (b) | 108 |
| Figura 31 - Processo de cura úmida | 108 |
| Figura 32 - Ensaio de resistência compressão..... | 109 |
| Figura 33 - Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico | 110 |
| Figura 34 – Superfície de resposta da variável <i>flow</i> das pastas..... | 119 |
| Figura 35 - Superfície de resposta da variável T_{115} mm das pastas..... | 121 |
| Figura 36 - Região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis | 123 |
| Figura 37 - Diagrama de termogravimetria de pastas com MK aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)..... | 131 |
| Figura 38 – Diagrama de temogravimetria de pastas com PCA aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)..... | 131 |
| Figura 39 - Diagrama de termogravimetria de pastas com FC aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)..... | 131 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2. OBJETIVOS..... | 20 |
| 2.1.1. Objetivo Geral..... | 20 |
| 2.1.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 3. ESTRUTURA TEÓRICA..... | 20 |
| 3.1 Reologia: Conceitos Básicos..... | 58 |
| 3.1.1 Reologia da Argamassa e do CAA..... | 61 |
| 3.1.2 Reologia das Pastas..... | 66 |
| 3.2 O CAA e suas Propriedades..... | 32 |
| 3.2.1 Influência dos aditivos químicos e minerais nas propriedades do CAA no estado fresco..... | 33 |
| 3.2.2 Influência dos aditivos químicos e minerais nas propriedades do CAA no estado endurecido..... | 37 |
| 3.2.3 Influência dos agregados nas propriedades do CAA no estado fresco..... | 38 |
| 3.2.4 Influência dos agregados nas propriedades do CAA no estado endurecido..... | 40 |
| 3.3 CAA com adições minerais..... | 41 |
| 3.3.1 CAA com Metacaulim..... | 41 |
| 3.3.2 CAA com Pozolana da Casca de Arroz..... | 44 |
| 3.3.5 CAA com Fíler..... | 49 |
| 3.4 Metodologias de dosagem de CAA..... | 52 |
| 3.5 Planejamento Experimental de Misturas..... | 56 |
| 3.5.1 Modelos estatísticos..... | 58 |
| 3.5.1. 1 Planejamento Fatorial..... | 58 |
| 3.5.1. 2 Planejamento de Misturas..... | 61 |
| 3.5.1. 3 Método do pseudo-simplex duplo (LEITE, 2018)..... | 66 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 69 |
| 4.1 Caracterização dos Materiais..... | 71 |
| 4.1.1 Materiais Finos..... | 72 |
| 4.1.2 Agregados..... | 76 |
| 4.1.3 Aditivo superplastificante..... | 78 |
| 4.2 Dosagem das pastas utilizando o método do pseudo simplex duplo..... | 78 |
| 4.2.1 Planejamento experimental das misturas..... | 79 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.2 Ensaio do mini cone..... | 81 |
| 4.2.3 Análise estatística..... | 83 |
| 4.2.4 Ensaio de funil Marsh..... | 84 |
| 4.2.5 Ensaio de sedimentação de pastas com provetas graduadas..... | 86 |
| 4.2.6 Análise termogravimétrica das pastas..... | 86 |
| 4.3 Dosagem do CAA..... | 87 |
| 4.3.1 Método do planejamento fatorial do concreto..... | 87 |
| 4.3.2 Método do binário de argamassa..... | 88 |
| 4.4 Ensaios do CAA no estado fresco..... | 92 |
| 4.4.1 <i>Slump Flow</i> | 92 |
| 4.4.2 Anel J..... | 94 |
| 4.4.3 Teste do Funil V..... | 96 |
| 4.4.4 Ensaio de Caixa L..... | 97 |
| 4.4.5 Ensaio de resistência à segregação com peneira..... | 98 |
| 4.5 Ensaios do CAA no estado endurecido..... | 99 |
| 4.5.1 Moldagem dos corpos de prova..... | 99 |
| 4.5.2 Cura..... | 100 |
| 4.5.3 Resistência à compressão..... | 101 |
| 4.5.4 Velocidade do pulso ultrassônico..... | 101 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 102 |
| 5.1 Análises das pastas..... | 102 |
| 5.1.1 Análise da viscosidade e sedimentação das pastas..... | 117 |
| 5.1.2 Análise da termogravimétrica das pastas auto adensáveis..... | 121 |
| 5.2 Dosagem das Argamassas..... | 123 |
| 5.2.1 Dosagem do concreto a partir das pastas (Planejamento Fatorial) | 129 |
| 5.2.2 Dosagem do CAA a partir da argamassa..... | 144 |
| 5.3 Análise das propriedades do CAA no estado endurecido..... | 152 |
| 5.3. 1 Resistência à compressão..... | 152 |
| 5.3.2 Velocidade de pulso ultrassônico..... | 159 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 161 |

| | |
|--|------------|
| REFERÊNCIAS..... | 165 |
| ANEXO 1 - Classificação adotada pelas especificações da EFNARC para o CAA..... | 182 |
| APÊNDICE 1- Resumo dos métodos de dosagem existentes na literatura internacional..... | 183 |
| APÊNDICE 2 – Empacotamento das Partículas..... | 188 |
| APÊNDICE 3 – Tabela com os pontos experimentais e seus componentes reais..... | 189 |
| APÊNDICE 4 – Tabelas para definição dos limites de proporção dos pseudocomponentes e relação A/F..... | 190 |
| APÊNDICE 5 – Resultados do <i>Flow</i> e T115 para as pastas com variação de relação A/F..... | 191 |
| APÊNDICE 6 – Análise comparativa entre as pastas produzidas por processo manual e mecânico..... | 192 |
| APÊNDICE 7 (a) – Análise estatística das pastas com PCA (variável flow)..... | 193 |
| APÊNDICE 7 (b) – Análise estatística das pastas com PCA (variável T115)..... | 197 |
| APÊNDICE 8 (a) – Resultados da estatística do CAA no estado fresco MK..... | 201 |
| APÊNDICE 8 (b) – Resultado da estatística do CAA no estado fresco PCA..... | 202 |
| APÊNDICE 8 (c) – Resultado da estatística do CAA no estado fresco FC | 203 |
| APÊNDICE 9 (a) – Diagrama de Pareto para o CAA (MK) no estado fresco..... | 204 |
| APÊNDICE 9 (b) – Diagrama de Pareto para o CAA (PCA) no estado fresco..... | 206 |
| APÊNDICE 9 (c)– Diagrama de Pareto para o CAA (FC) no estado fresco..... | 208 |
| APÊNDICE 10 – Resultado da Análise Estatística da Resistência à Compressão do CAA..... | 211 |
| APÊNDICE 11 – Resultado da Análise Estatística da Velocidade de Pulso Ultrassônico do CAA..... | 212 |

1. INTRODUÇÃO

Na indústria da construção civil, encontramos um dos materiais mais consumido no mundo, o concreto. Atualmente, existem inúmeros tipos de concreto: CAD (concreto de alto desempenho), concreto leve, reforçado com fibras ou contendo polímeros, concreto pesado com barita (blindado), concreto protendido, sustentável com adições de pozolanas naturais, projetado, além de outros, dos quais o concreto auto adensável vem ganhando espaço nas últimas décadas, por ser considerado como “o desenvolvimento mais revolucionário” nas últimas décadas (EFNARC, 2002; TUTIKIAN, *et al.*, 2012).

O CAA se caracteriza pela alta fluidez, capacidade de preencher a fôrma onde é aplicado, compactando-se pela ação única de seu peso próprio, sem necessitar de qualquer tipo de vibração interna ou externa (OKAMURA e OUCHI, 2003; ACI, 2007; WU e AN, 2014). Este concreto deve ainda, ser capaz de sustentar os grãos do agregado graúdo, mantendo-os homogeneamente distribuídos no interior da mistura, quando o concreto flui através de obstáculos, por exemplo, as barras de armaduras, e também, quando o concreto encontra-se em repouso (GOMES, *et al.*, 2003; EFNARC, 2005).

Comparado ao concreto convencional, o CAA apresenta excelentes vantagens, incluindo: eliminar a necessidade de vibração; reduzir a poluição sonora; diminuir o tempo de construção e o custo de mão-de-obra etc. (DOMONE, 2006; Li *et al.*, 2017). A indústria adotou o CAA para superar as deficiências relacionadas à consolidação, melhorar a produtividade, e aumentar a segurança e qualidade nas obras (WU, *et al.*, 2016).

Dessa forma, o CAA proporciona vários ganhos diretos e indiretos, além dos supracitados, entre os quais: acelera a construção; reduz a mão de obra no canteiro; melhora o acabamento final de superfície; pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar; permite grande liberdade de formas e dimensões; permite a concretagem em peças de seções reduzidas; elimina o barulho de vibração; torna o local de trabalho mais seguro, em função da diminuição do número de trabalhadores; pode obter um ganho ecológico; pode reduzir o custo final do concreto e/ou de uma estrutura; (EFNARC, 2005; TUTIKIAN, 2004; GOMES, *et al.*, 2003).

A fim de garantir essas vantagens, a produção de CAA com excelente trabalhabilidade, exige que proporções adequadas dos componentes da mistura sejam concebidas (WU e AN, 2014). Além disso, a dosagem da mistura e as propriedades do concreto fresco são os pontos mais críticos, em relação às características do CAA endurecido (DOMONE, 2006). Dessa forma, as propriedades frescas e endurecidas do concreto, são altamente dependentes do método de dosagem da mistura (ALYMAC, *et al.*, 2016).

O método de dosagem do CAA é mais sensível que o do concreto convencional, devido ao maior número de constituintes, tais como aditivos minerais e químicos (ALYMAC, *et al.*, 2016), porém são empíricos e fundamentados em princípios que tem como meta, garantir o atendimento de propriedades que estabeleçam uma relação entre a fluidez e estabilidade das misturas, que garantam a ausência de segregação (GOMES e BARROS, 2009).

Um bom método de dosagem confere ao concreto, uma trabalhabilidade e propriedades endurecidas satisfatórias (MA, *et al.*, 2017). Para alcançar essas propriedades, muitas vezes ocorre aumento do uso de cimento, geralmente elevando os custos de produção que são desfavoráveis (HABIBI e GHOMASHI, 2018). Assim, o maior custo e a maior sensibilidade do CAA, para a dosagem da mistura, limitaram sua aplicação à construção geral (AKRAN *et al.*, 2009). Por isso, a dosagem da mistura é a primeira etapa importante, para a produção do concreto, e selecionar um método de dosagem robusto, é um passo crítico a fim de projetar as proporções ideais para o CAA (ALYMAC, *et al.* 2016; MA, *et al.*, 2017).

Muitos pesquisadores em todo o mundo estão procurando um método de dosagem apropriado, para o CAA, bem como suas propriedades mecânicas e de durabilidade (HABIBI e GHOMASHI, 2018). Para tal, um bom método de dosagem para o CAA deve incluir os seguintes aspectos: (1) amplamente aplicável; (2) forte robustez para matérias-primas variáveis; (3) requisitos técnicos; (4) sustentabilidade e (5) custo (SHI, *et al.*, 2015). A autora afirma, que até o momento de sua pesquisa, não havia método totalmente atendendo aos cinco requisitos.

Um dos grandes entraves consiste no fato de que a maioria dos métodos de dosagem, para o CAA, é totalmente experimental ou semi-analítico. Os poucos métodos totalmente analíticos existentes, têm como desvantagem menor precisão,

em função das distorções entre as características dos finos e dos agregados (OKAMURA e OZAWA, 1995; EDMATSU, *et al.*, 1999).

Para construir um modelo analítico, um método tradicional de estudar os efeitos de vários componentes, simultaneamente, é variar um componente de cada vez e manter os demais constantes. As respostas são então obtidas, para diferentes níveis desse componente. Este processo é repetido variando outros componentes, um por um, até que todos os componentes serem tratados. Entretanto, às interações entre os componentes requer um grande número de testes (devido ao grande número de parâmetros a serem investigados), o que pode tornar essa abordagem não atrativa.

Diante desse problema, é possível adotar um planejamento de experimentos (DOE), tentando minimizar o plano experimental, enquanto explora todo o domínio de concretos viáveis. Existem dois tipos de DOE: planejamento fatorial, que considera cada variável como fator independente, e planejamento de mistura, que considera cada variável como um componente dependente. Algumas aplicações recentes do planejamento fatorial (DOE), em materiais de construção civil, incluem essas referências; no entanto, há pouca literatura disponível sobre o planejamento de mistura e aplicação do DOE (WU e AN, 2014).

Para atender aos requisitos que um bom método de dosagem exige, e motivado pelas tendências de aplicação do DOE, Leite (2018) usou um planejamento experimental de mistura para mapear, em uma região experimental simplex, as proporções ideais entre os constituintes para se obter um CAA. Tal método pode ser extremamente útil para a dosagem de CAA em grande escala, permitindo prever características básicas da produção, assim como o planejamento do estoque das matérias primas.

No entanto, algumas lacunas precisam ser preenchidas para validar o método. A primeira lacuna consiste na análise reológica das pastas com base na granulometria e morfologia dos finos, e do controle da viscosidade e sedimentação das pastas, para verificar a coesão e resistência à segregação das misturas. Outro ponto importante na validação da metodologia é testar mais materiais e traços de concreto, para poder consolidar o método, haja vista que no trabalho de Leite (2018) o método foi testado apenas com o fíler calcário, submetendo-o, apenas a três traços de concreto.

A flexibilidade e universalidade do método proposto por Leite (2018) permitem que se cumpram os requisitos básicos, de um bom método de dosagem para o CAA,

requisitos discutidos no trabalho de (SHI, *et al.*, 2015). Devido à universalidade desse método, é possível ampliar seu campo de aplicação e usar materiais diversos, haja vista que cada região apresenta materiais com características distintas. Isso torna o método atrativo, em função de não apresentar restrições quanto aos constituintes da mistura, que se apresentam como os dados de entrada para o sistema.

Essa flexibilidade aumenta o escopo de propriedades que possam ser avaliadas com esse método, sendo possível modelar o sistema, escolhendo variáveis distintas, conforme os objetivos que se pretende alcançar sejam eles propriedades no estado fresco ou endurecido. A sustentabilidade é alcançada ao passo em que é possível utilizar vários tipos de materiais cimentícios, finos, agregados e aditivos químicos. Nesse sentido, pode-se fazer uso de diversos subprodutos da indústria ou agricultura, como adição mineral, reduzindo o consumo de cimento e os respectivos passivos ambientais.

Por fim, a otimização da mistura pode ser obtida facilmente, verificando dentre as n -misturas existentes na região simplex, as que gerem menor custo, conforme os requisitos técnicos propostos no sistema. Nesse sentido, a presente pesquisa, visa aprimorar e validar o método proposto por Leite (2018), realizando a dosagem de pastas para o CAA, por meio de coordenadas simplex, para analisar a reologia das pastas e sua influência nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Ademais, serão testados três diferentes tipos de adição mineral e produzido uma quantidade maior de misturas de concreto, para realizar ensaios tanto no estado fresco (escoamento, fluidez, habilidade de passagem e resistência à segregação), como no estado endurecido (resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico) e assim, ter parâmetros consistentes, com vistas a validação, desse método de dosagem de pastas.

Hipótese: É possível obter pastas com propriedades auto adensáveis por meio do método do pseudo simplex duplo, constitutivas para produzir argamassas e concretos com propriedades auto adensáveis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Aplicar, aprimorar e validar o método de dosagem do pseudo-simplex duplo, para obtenção de pastas para concretos auto adensáveis, utilizando três diferentes tipos de adição mineral.

2.2 Objetivos Específicos:

- ✓ Dosar pastas auto adensáveis com três diferentes tipos de adição mineral, por meio do método do pseudo-simplex duplo;
- ✓ Analisar o comportamento reológico das pastas, com base nas características de cada adição mineral;
- ✓ Dosar argamassas, a partir de uma pasta escolhida na região simplex, para dosagem do CAA, utilizando a teoria do traço fraco, médio e forte;
- ✓ Dosar o CAA, a partir de uma pasta escolhida na região simplex, utilizando planejamento fatorial;
- ✓ Analisar as propriedades do CAA, no estado fresco e no estado endurecido, para verificar se o método de Leite (2018) é eficiente para produção do CAA.

3. ESTRUTURA TEÓRICA

Nesta seção será apresentada a estrutura teórica do trabalho, com o objetivo auxiliar no desenvolvimento da metodologia e discussão dos resultados obtidos, a fim de alcançar os objetivos propostos no trabalho. Nesse sentido, foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca de: reologia da pasta e do CAA, Propriedades do CAA no estado fresco e endurecido, CAA produzido Com MK (metacaulim), PCA (Pozolana da Casca de Arroz) e FC (Fíler Calcário), métodos de dosagem e planejamento experimental de misturas.

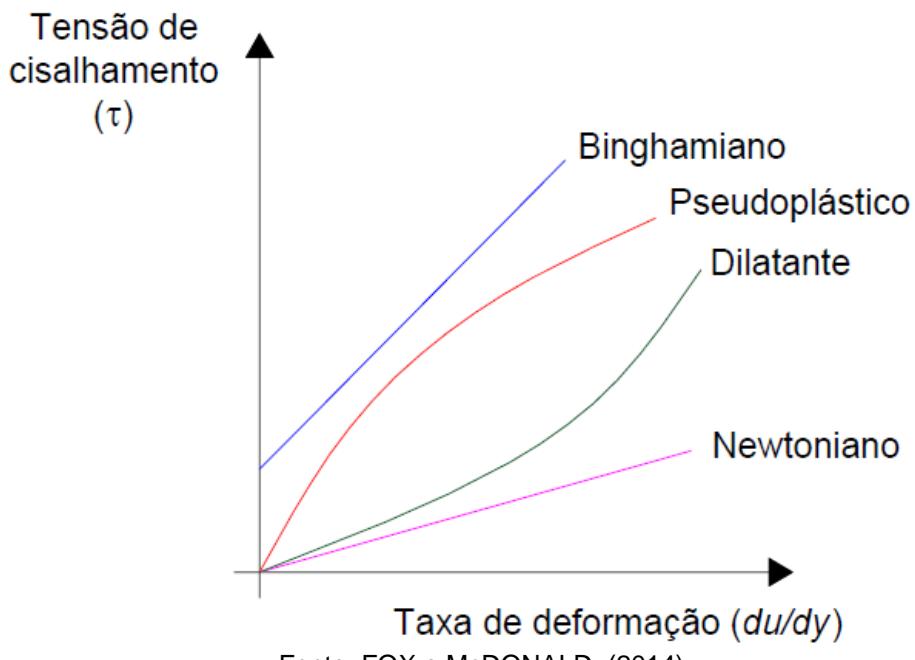
3.1 Reologia: conceitos básicos

A reologia é o ramo da física que estuda a mecânica de corpos deformáveis, no estado sólido, líquido ou gasoso (CASTRO, 2007). É a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos fluidos e suspensões, quando submetidos a um sistema de forças (FERRARIS *et al.*, 2001). Nesse contexto, os fluídos, em função das relações entre tensão e deformação, são caracterizados em *Newtonianos* e *não-Newtonianos*. São considerados *newtonianos*, os fluidos que apresentam uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, independente da deformação e do tempo, ao contrário dos *não Newtonianos*, que tem uma relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento não linear. Neste caso, uma viscosidade, denominada viscosidade aparente, é obtida para cada taxa de cisalhamento considerada (CASTRO, 2007).

Os fluidos não newtonianos são independentes do tempo, quando a taxa de cisalhamento é função apenas da tensão de cisalhamento, dependentes do tempo, quando a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento depende do tempo em que o fluido foi cisalhado, e viscoelásticos quando apresentam tanto características de sólidos quanto de líquidos e que exibem uma recuperação elástica parcial após a deformação (CASTRO, *et al.*, 2011).

A Figura 1 apresenta o comportamento dos fluidos newtonianos, e não newtonianos independentes do tempo, que são subdivididos em: **fluidos pseudoplásticos**, em que a curva de escoamento típica desses materiais indica que a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (viscosidade aparente), diminui progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento; **dilatantes** no qual a curva de escoamento típica desses materiais, indica que sua viscosidade aparente, aumenta progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento; **fluidos binghamianos ou plásticos** que se comportam como um sólido até que uma tensão mínima seja excedida, e em seguida, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, torna-se linear (FOX e McDONALD, 2014).

Figura 1 – Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo



Fonte: FOX e McDONALD, (2014)

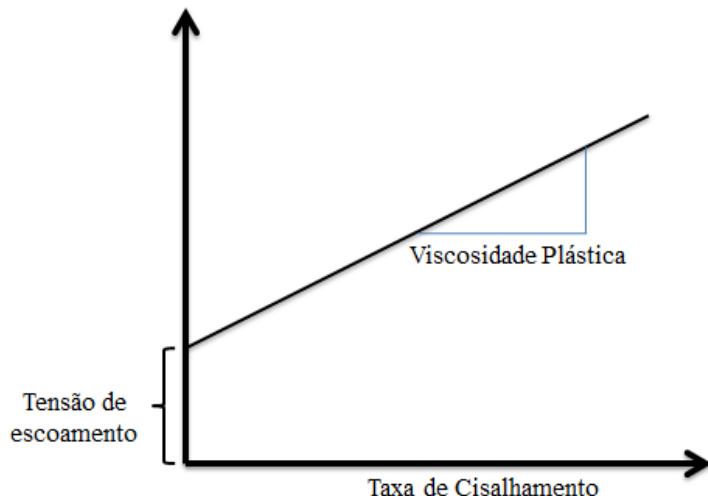
Já os fluidos dependentes do tempo são subdivididos em: **tixotrópicos**, quando a consistência depende tanto da duração do cisalhamento quanto da taxa de cisalhamento, além de uma redução da viscosidade aparente com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, porém, aumentam a fluidez com o aumento do tempo de escoamento sob condições de estado estacionário (comportamento reversível); e **reopéticos** que apresentam um aumento da viscosidade aparente com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, ou seja, há formação gradual da estrutura pelo cisalhamento, enquanto nos tixotrópicos ocorre uma quebra da estrutura por cisalhamento (CASTRO, 2007).

3.1.1 Reologia da argamassa e do CAA

A reologia do concreto fresco é complexa devido à sua composição e às recorrentes mudanças químicas. As propriedades do concreto no estado fresco estão associadas aos parâmetros reológicos, em que é possível quantificar a capacidade de escoamento desses materiais. Para uma ampla variação da consistência, o concreto fresco se comporta como um fluido plástico ou binghamiano, conforme mostra a Figura 2, em que o concreto precisa de uma tensão inicial diferente de zero para que o material mude do comportamento de um sólido para o comportamento de um líquido

e inicie o escoamento (GOMES, 2002; ZERBINO, *et al.*, 2006; BANFILL, 2006; DENGWU, *et al.*, 2017).

Figura 2 – Equação de Bingham para um fluido



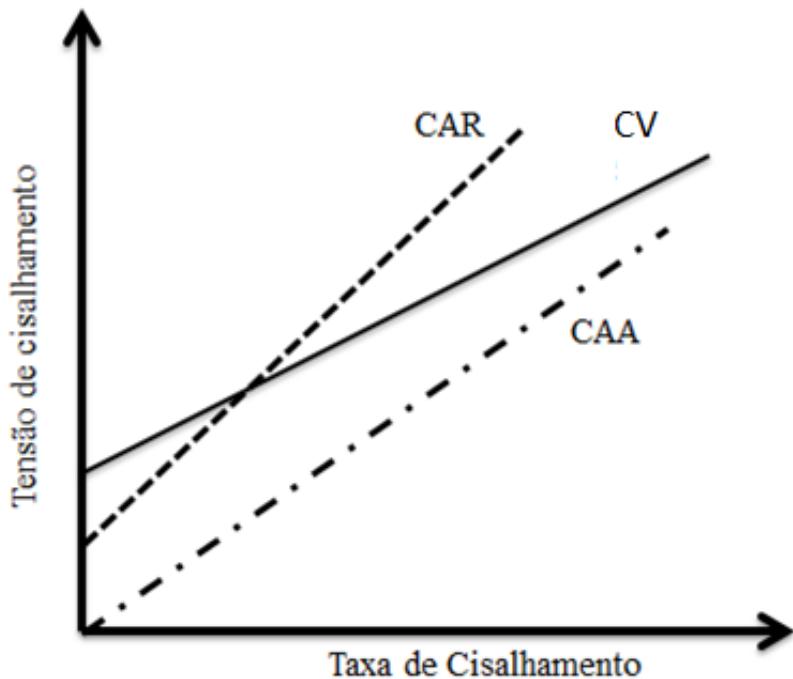
Fonte: FERRARIS, *et al.*, (1999)

De maneira geral, a tensão de escoamento corresponde à tensão necessária para iniciar seu escoamento. Quando a tensão de cisalhamento é maior que a tensão de escoamento, a mistura escoa e sua resistência ao escoamento depende da viscosidade plástica, sendo assim, a intersecção da reta com o eixo tensão de cisalhamento, corresponde à tensão de escoamento e a inclinação da reta, à viscosidade plástica. (GOLASZEWISKI e SZWABOWSKI, 2004; GOMES e BARROS, 2009).

A tensão de escoamento resulta do atrito inter granular durante o cisalhamento do concreto, enquanto a viscosidade plástica é uma assinatura macroscópica do escoamento da água nos poros de um sistema granular (agregados) (CASTRO, *et al.*, 2011). A tensão de escoamento tem relação com o abatimento do concreto, já a viscosidade plástica é ligada às capacidades de aplicação, acabamento, bombeamento e segregação do material e diferencia um concreto facilmente trabalhável de um que apresenta um comportamento “pegajoso”, difícil de ser bombeado e de se consolidar nas formas, surgindo cavidades na superfície do elemento estrutural quando a fôrma é removida (DE LARRARD, 2002; PARK *et al.*, 2005).

Apesar do consenso entre vários autores, o modelo de Bingham só deve ser usado para a descrição do comportamento de fluxo no interior da região da taxa de cisalhamento testado durante a medição reológica. (LU *et al.*, 2015). Além disso, ao atingir o estado estacionário, o comportamento reológico do concreto, também pode ser descrito pelos modelos de Herschel-Bulkley e o de Bingham modificado (DENG WU, *et al.*, 2017). Os estudos reológicos permitiram compreender o comportamento do concreto auto adensável e assim, contribuíram para um desenho mais racional desse novo concreto. Na Figura 3, as curvas de fluxo de um CAA e de um CV (concreto vibrado), são comparadas de forma esquemática com a curva de um CAR (concreto de alta resistência) (ZERBINO, *et al.*, 2006).

Figura 3 – Comparativo entre as curvas de fluxo e um CV, CAA e CAR



Fonte: ZERBINO *et al* (2006)

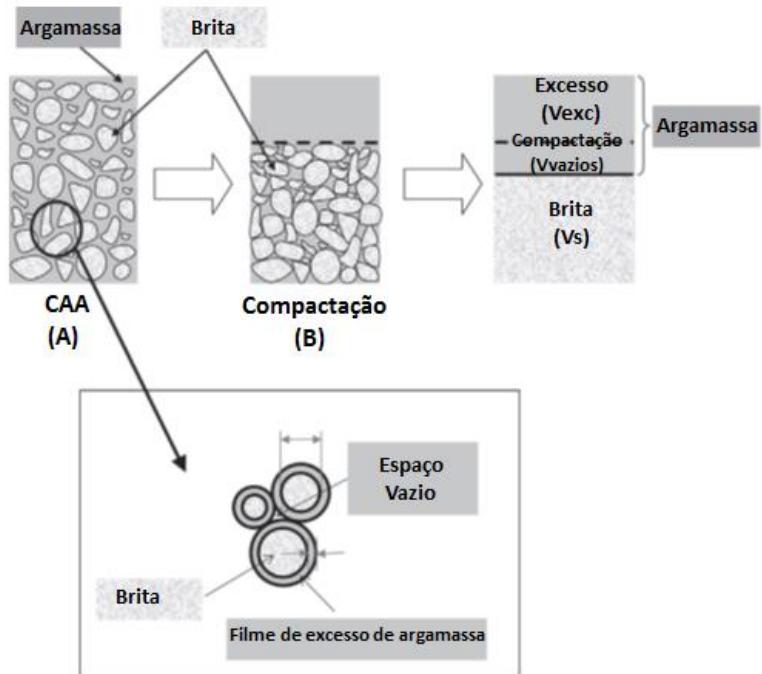
Um CAR geralmente tem uma viscosidade plástica mais alta que o CV, em grande parte devido à sua menor relação A/C, e também possui um menor limite de cisalhamento. Já o CAA tem tensão limite quase zero e viscosidade suficiente para garantir o transporte, enchimento e consolidação do concreto sem segregação (ZERBINO, *et al.*, 2006). De acordo com Ferraris (1999), o concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados)

em um líquido viscoso (pasta de cimento). Já Hu e Wang (2011) entendem por CAA um material de duas fases composto de agregado graúdo e da argamassa de suspensão.

Da mesma forma, a argamassa pode ser dividida em duas fases, areia e pasta e para uma determinada quantidade de areia, quaisquer mudanças reológicas nas características da argamassa estão diretamente relacionadas às da matriz da pasta, (BANFIL, 2006). O efeito das características reológicas da argamassa ou da pasta, mantendo constante o conteúdo dos agregados, impacta a trabalhabilidade e nas propriedades do CAA (GELKER, 2002; HU e WANG, 2011). No entanto, Banfill (2006) afirma que nas argamassas, a tensão de escoamento ou viscosidade pode não ser proporcional ao seu fluido de suspensão (pasta constitutiva).

De acordo com Wu e An (2014), as características reológicas da argamassa determinaram a força de rolamento e condição de movimento das partículas dos agregados (Figura 4), que impactam na fluidez do CAA. Para determinados teores de agregados, a trabalhabilidade e propriedades físicas do CAA, podem estar diretamente relacionadas às características reológicas da pasta.

Figura 4 – Diagrama esquemático da espessura do filme de argamassa



Fonte: Wu e An (2014)

O filme de excesso de argamassa é responsável pela fluidez e trabalhabilidade do CAA, conforme ilustrado na Figura 4. A argamassa envolve os

agregados e comanda o fluxo da mistura e governa as propriedades reológicas como a viscosidade. O excesso de espessura da película de argamassa (d_{mortar}) pode então ser calculado quando o conteúdo, distribuição de tamanho de partícula e a taxa de vazios das partículas de agregado são conhecidos (WU e AN, 2014).

O comportamento do concreto no escoamento pode ser considerado dependente principalmente da viscosidade da matriz (pasta de cimento) e da porcentagem volumétrica de agregado. Como a pasta de cimento envolve os agregados em um concreto, ao se manter constante a dimensão máxima característica e a quantidade de agregados presentes na mistura, as propriedades reológicas do concreto podem ser relacionadas com aquelas da pasta de cimento (YEN *et al.*, 2009).

No entanto, as propriedades reológicas do concreto e da pasta de cimento no estado fresco, são complexas em diferentes maneiras e suas medidas, nas pastas, nem sempre predizem as determinações nos concretos correspondentes. Com isso, mecanismos fundamentais que governam o controle da trabalhabilidade por parâmetros reológicos são ainda mal compreendidos (WU e AN, 2014). Descrever e prever numericamente o fluxo e a deformação do concreto fresco é muito complicado, pois o concreto não contém apenas materiais particulados variando de nm a mm, mas também contém materiais orgânicos e inorgânicos. Além disso, o comportamento reológico do concreto evolui com o tempo, devido à hidratação do cimento (DENG WU, *et al.*, 2017).

Sabe-se que os valores dos parâmetros reológicos, medidos para a pasta de cimento, podem diferir daqueles obtidos para os parâmetros do concreto, devido à análise nas pastas de cimento, não considerarem a contribuição dos agregados, que agem como redutores de calor e cisalham a pasta de cimento durante o processo de mistura do concreto. A principal razão para isso é que a reologia da pasta de cimento é medida sob condições nunca experimentadas pela mesma no concreto (CASTRO, *et al.*, 2011).

A autora aponta outros fatores que influenciam nas propriedades reológicas do concreto: materiais constituintes, sequência e intensidade da mistura, temperatura, vibração, dispersão e empacotamento das partículas e a reologia das pastas de cimento (CASTRO, *et al.*, 2011). O comportamento reológico das argamassas é influenciado pelo tempo de mistura e pela presença de superplastificante. Quanto

maior o tempo de mistura, maior a tensão de cisalhamento, estabilidade e fluidez das argamassas devido ao rompimento dos aglomerados formados entre as partículas sólidas. Com isso, a energia envolvida do processo, também aumenta, e reduz a tensão inicial de escoamento e a viscosidade plástica (DE FRANÇA, *et al.*, 2012).

As propriedades reológicas do concreto são significativamente influenciadas pelo seu tipo, composição química, conteúdo, densidade de empacotamento, finura, textura da superfície, distribuição de tamanho de partículas no concreto, aditivos minerais, efeito de enchimento, efeito morfológico, efeito de dispersão e efeito de adsorção (DENG WU, *et al.*, 2017). Além disso, o tipo, a fração volumétrica, a graduação e o tamanho das partículas dos agregados influenciam fortemente as propriedades reológicas do concreto (DENG WU, *et al.*, 2017; ZUO, *et al.*, 2018), controlando a quantidade de pasta livre de cimento e a resistência à fricção inter-partículas (DENG WU, *et al.*, 2017).

Para medir os parâmetros reológicos do concreto fresco, não podemos tomar os testes reológicos usados em outras indústrias, temos que modificar os equipamentos de medição e modelos teóricos para que eles sejam ajustados ao concreto, que é um tipo especial de fluido. Diferentes pesquisadores desenvolveram uma variedade de testes reológicos diferentes para concreto. Os mais conhecidos são os reômetros de cilindros coaxiais, reômetros de placas paralelas e reômetros com impulsores, que podem ser separados por geometria (FERRARIS *et al.*, 2001).

Argamassa e concreto fresco contêm partículas com tamanhos incompatíveis para viscosímetros e reômetros de laboratório convencionais. Dessa forma, é mais indicado realizar os ensaios reológicos nas pastas cimentícias, em virtude das dimensões das partículas não comprometerem os dispositivos dos viscosímetros e reômetros utilizados nesses estudos. A medição reológica pode ser simplificada ainda mais, pela substituição da medição de viscosidade pelo teste de fluxo de cone Marsh, e o escoamento pelo mini cone, a fim de aplicar o método em um contexto industrial (GOMES, 2002; NIE e AN, 2016).

Do ponto de vista estatístico, são obtidas correlações significativas entre espalhamento e tensão de escoamento, e entre o tempo de fluxo e viscosidade (SCHWARTZENTRUBER *et al.*, 2006). Porém, os testes empíricos informam sobre a fluidez, mas não como as pastas fluem (WALLEVIK, 2011). Esse é o caso do teste de mini cone, em que o espalhamento apresenta relação com a tensão de escoamento,

todavia, não se conseguiu ainda indentificar correlação entre o T_{115} e a viscosidade plástica (FLATT, *et al.*, 2005).

Ainda assim, se medidas corretamente, as propriedades no escoamento da pasta de cimento podem ser usadas para controlar as adições químicas e minerais incorporados à mistura de concreto e o conhecimento dessas propriedades reológicas pode fornecer informações importantes sobre o comportamento reológico dos concretos (CASTRO, *et al.*, 2011; WALLEVIK, 2011). É crucial para o desenvolvimento do CAA e deve ser usada em todas as fases, desde a seleção dos materiais até a determinação das proporções da mistura (WALLEVIK, 2011).

3.1.2 Reologia das pastas

Na determinação dos parâmetros reológicos da pasta de cimento, as condições experimentais, como: o tempo e a intensidade de mistura, a duração do ciclo de cisalhamento, o número de repetições e a geometria do equipamento de medida, mostra que diferenças grosseiras, ou até mesmo contraditórias, podem surgir nos resultados obtidos, o que mostra a necessidade de padronizar as condições de ensaio para a compreensão da reologia das pastas de cimento (FERRARIS, 1999, NEHDI e RAHMAN, 2004; SCHWARTZENTRUBER *et al.*, 2006; CAZACLIU e ROQUET, 2009 ; CASTRO, *et al.*, 2011).

Para Vance *et al* (2015) quanto maior a intensidade de mistura, maior a tensão de cisalhamento e menor viscosidade plástica, devido a eficácia da homogeneização e redução da tendência de aglomeração das partículas. Uma redução na taxa de cisalhamento em 0,1/s aumenta drasticamente a viscosidade aparente e provoca um pequeno aumento na tensão de escoamento. Um maior tempo de mistura aumenta a tensão de escoamento e reduz a viscosidade plástica, devido a mudanças na densidade de empacotamento das partículas e aumento de contato com a superfície de cisalhamento.

O método de ensaio e a abordagem utilizada no cálculo das características reológicas das pastas de cimento são necessários para poder comparar os resultados interlaboratoriais (NEHDI e RAHMAN, 2004). O erro padrão é resultante da adaptação de vários modelos reológicos à curvas de fluxos experimentais, que varia com a relação w/b (água/agregados), adições minerais, aditivos químicos, geometria de fluxo

e fricção e intervalo entre as superfícies de cisalhamento do acessório de teste (NEHDI e. RAHMAN, 2004). Dessa forma, recomenda-se que as pastas devem ser feitas com o mesmo misturador, o SP (superplasticante) deve ser adicionado no mesmo passo do procedimento de mistura, a duração do procedimento de mistura e o volume do lote não devem ser alterados (SCHWARTZENTRUBER *et al.*, 2006).

Além da relação A/F (agua/finos), que determina a concentração de sólidos da pasta de cimento, o tipo e a dosagem do superplasticante e o tipo e quantidade de adição mineral, também afetam a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta de cimento (CYR *et al* 2000). A distribuição granulométrica do sistema, a área superficial das partículas, a presença de aditivos, entre outros, alteram os perfis de curvas reométricas, devido a mudanças nas condições de mistura (CAZACLIU e ROQUET, 2009).

A adição de superplasticante melhora a dispersão das partículas de cimento, diminui a interação coloidal e repulsão entre as partículas e, portanto, tem grandes efeitos sobre as propriedades reológicas do concreto (DENG WU, *et al.*, 2017). Com isso, diminui a tensão de escoamento da pasta de cimento, devido à redução das forças interpartículas (BELLOTTO, 2013).

O comportamento reológico das pastas de cimento, em função do tempo e da dosagem de superplasticante, fornece informações relevantes sobre algumas propriedades chave (deformabilidade, viscosidade e resistência a segregação) que podem ser transferidas ao concreto. Dessa maneira, a compatibilidade de uma determinada combinação entre cimento e superplasticante, pode ser inicialmente estudada por meio da determinação da fluidez das pastas de cimento pelo ensaio de mini cone e de funil Marsh, e os resultados obtidos podem ser verificados no comportamento reológico dos concretos (JIANG, *et al.*, 1999; SCHWARTZENTRUBER *et al.*, 2006).

A composição química e as características físicas do cimento, influenciam significativamente as propriedades reológicas. Geralmente, o cimento com alto teor de C₃A, alto teor alcalino, alta perda na ignição, alta finura e área de superfície específica, e baixo teor de S₃O, diminui a trabalhabilidade (DENG WU, *et al.*, 2017).

As diferentes adições minerais têm efeitos diferentes, e alteram a densidade de empacotamento e a superfície sólida, ambas alterando as propriedades reológicas da pasta de cimento (FERRARIS *et al.*, 2001). Influenciam as propriedades reológicas

da pasta de cimento e do concreto, devido à: composição, conteúdo, densidade de empacotamento, finura, textura de superfície, distribuição de tamanho das partículas, provocando o efeito de enchimento, morfológico e de dispersão e adsorção (DENG WU, *et al.*, 2017).

Os efeitos da distribuição de tamanho de partícula de um sistema de cimento e a correta seleção dos diametros das partículas e de suas quantidades podem maximizar o empacotamento (OLIVEIRA, *et al.*, 2000). Entretanto, a área de superfície específica, provado por análises estatísticas, tem a maior influência na reologia da pasta de cimento (Claisse *et al.*, 2001). Sendo assim, é evidente que tanto a densidade de empacotamento como a área superficial sólida das partículas tem grande influência na reologia da pasta de cimento (WONG e KWAN, 2008).

Os efeitos dos vários parâmetros de mistura, nas propriedades reológicas das pastas de cimento, parecem ser bastante complexos, devido a muitas vezes, cada propriedade reológica ser uma função multivariada, dos parâmetros da mistura, e o efeito de um parâmetro da mistura depender dos outros. Mesmo assim, os efeitos combinados dos parâmetros da mistura, podem ser descritos em termos de concentração de sólidos, densidade de empacotamento e área superficial sólida dos materiais cimentícios na pasta de cimento (WONG e KWAN, 2008).

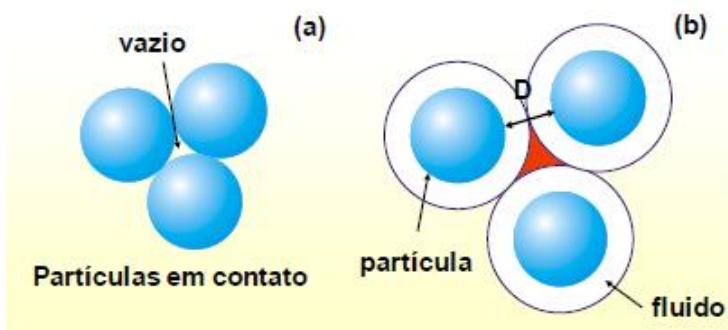
Quando as partículas sólidas são embaladas juntas, existe certo volume de vazios entre as partículas. Para formar uma pasta saturada de modo a remover qualquer vazio de ar não preenchido, a água adicionada deve ser pelo menos suficiente para preencher os vazios. A água que excede a quantidade suficiente para preencher os vazios é chamada de "excesso de água." Ela fornece uma fina película de água que reveste a superfície de cada partícula. Quanto mais excesso de água houver, maior será a espessura do filme de água, maior será a separação entre partículas adjacente e menor a interação física entre as partículas quando a pasta fluir. Portanto, a quantidade de excesso de água, deve ter um efeito direto na reologia da pasta de cimento (WONG e KWAN, 2008).

A partir daí se faz necessário determinar a quantidade de água na pasta de cimento, a fim de alcançar propriedades reológicas que a torne adequada para o projeto de CAA. Essa quantidade de água se divide em duas parcelas: água mínima e água em excesso. O volume mínimo de água ($V_{Wmínimo}$) é volume de água no estado

máximo de empacotamento. O volume em excesso de água ($V_{Wexcess}$) é o volume suplementar de água, necessário para fluidizar a pasta (BUCHER, *et al.*, 2014).

Nesse contexto, Cardoso (2009) relata que numa suspensão o fluido (água), adicionado, primeiramente ocupa a superfície das partículas e em seguida preenche os vazios entre as mesmas, devido ao empacotamento e a partir daí, separa as partículas evitando o contato, conforme Figura 5, é denominado IPS esse distanciamento entre as partículas.

Figura 5 – (a) partículas em contato; (b) partículas separadas por um fluido que as recobre as preenchendo os vazios do empacotamento dos sistemas de partículas (PILEGGI, 2001)



FONTE: PILEGGI (2001)

A área superficial aumenta a demanda de água para o recobrimento das partículas resultando num menor IPS. O IPS refere-se à distância média entre partículas adjacentes na mistura, admitindo-se que todas estão desaglomeradas, quanto maior o IPS mais líquida é necessário para ocupar a distância entre as partículas do sistema, devido a relação direta com a fluidez (CARDOSO, 2009).

Li *et al* (2017) propuseram um método de dosagem que tinha como premissa básica a otimização da pasta e do esqueleto granular. Na etapa de otimização da pasta, foi levado em consideração o conceito de água mínima necessária descrita por (BUCHER *et al.*, 2014). Esse parâmetro foi definido de maneira subjetiva, observando-se a quantidade de água consumida para transformar o pó em pasta, homogeneizando a mistura durante 5 minutos em um misturador.

Quando partículas mais finas são adicionadas a partículas mais grosseiras em um mesmo sistema, as partículas mais finas preenchem os vazios das partículas mais grossas, o que é chamado de efeito de preenchimento. Por causa disso, aumenta-se a densidade de empacotamento, liberando mais excesso de água, melhorando a fluidez da pasta e ao mesmo tempo aumenta-se a área de superfície, afinando os filmes de água. Portanto, para avaliar exatamente como a espessura do filme de água

e a reologia da pasta de cimento são afetadas, tanto a densidade do empacotamento quanto a área de superfície sólida devem ser consideradas (WONG e KWAN, 2008).

Por fim, o excesso de água pode provocar a segregação dos constituintes da pasta cimentícia. Uma das formas de segregação é a exsudação, que consiste na sedimentação de partículas durante o ensaio reológico, pode resultar em um aumento da viscosidade e influenciar nos resultados reológicos, em função de variações na densidade do líquido, diâmetro, forma e densidade da partícula e da concentração volumétrica de partículas dispersas (NEDHI e RAHMAN, 2004).

3.2 O CAA e suas propriedades

O concreto auto adensável é uma mistura que flui sob seu próprio peso e não requer nenhuma vibração interna ou externa para compactação (OKAMURA e OUCHI, 2003; PRAKASH e SAMATHAN, 2006; KHALEEL, *et al.*, 2014, WU e AN, 2014, HABIBI e GHOMASHI, 2018). Além de fluir e se consolidar sob seu próprio peso, pode passar pelos espaços entre as barras de reforço para preencher a fôrma completamente e manter sua composição estável simultaneamente (KHALEEL, *et al.*, 2014, SHI *et al.*, 2015), e apresentam alta fluidez e resistência à segregação em ambas as condições estáticas e dinâmicas (PRAKASH e SAMATHAN, 2006).

O CAA é caracterizado em seu estado fresco por alta fluidez e estabilidade reológica e tem excelente aplicabilidade para elementos com formas complicadas e reforço congestionado. Essas propriedades são mais bem definidas como: capacidade de preenchimento (*filling ability*), capacidade de passagem (*passing ability*) e resistência à segregação (HO *et al.*, 2002, GOMES, *et al.*, 2003; OKAMURA e OUCHI, 2003; EFNARC, 2005).

A capacidade de preenchimento ou de fluxo (*flowability*) do CAA proporciona fluidez necessária para que o concreto escoe perfeitamente no interior da estrutura, preenchendo as fôrmas adequadamente e garantindo a cobertura total das barras de armadura, sob ação de seu próprio peso, sem qualquer vibração (GOMES, 2002; ARAUJO *et al.*, 2003; EFNARC, 2005). Essa propriedade é governada pela elevada fluidez e coesão da mistura e está diretamente ligada à habilidade de passagem (GOMES e BARROS, 2009).

A habilidade de passagem está relacionada à facilidade com que o CAA possa fluir livremente entre as barras de armadura, ou outros obstáculos, mantendo sua homogeneidade e, sem que haja obstrução do agregado graúdo na região das ferragens (GOMES, 2002; BARTOS, 2000; EFNARC, 2005, GOMES e BARROS, 2009). É a propriedade mais importante para o desempenho do concreto auto adensável, pois determina a capacidade final de preenchimento que irá influenciar na resistência e durabilidade da estrutura. (NOGUCHI *et al.* 1999). Os mecanismos que governam essa propriedade são: a viscosidade da pasta e da argamassa e as características dos agregados, além da ausência de segregação (GOMES e BARROS, 2009).

A resistência à segregação ou estabilidade é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de evitar a segregação de seus componentes que é fundamental para a manutenção da uniformidade e qualidade do CAA na obra. A coesão e viscosidade da mistura são os mecanismos que governam essa propriedade que deve ser suficiente para evitar a separação de seus componentes durante as operações de transporte, lançamento e consolidação (GOMES, 2002; EFNARC, 2005; GOMES e BARROS, 2009).

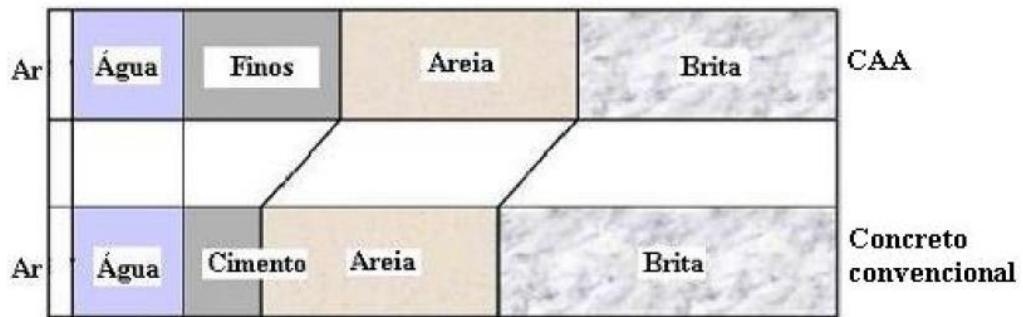
Outro aspecto importante diz respeito à exsudação, caracterizada como um tipo de segregação bastante comum em concretos altamente fluidos, tal como o auto adensável. Este fenômeno se manifesta pelo aparecimento de água na superfície do concreto, após sua consolidação, ou ainda quando há retenção de água sob os agregados maiores e nas barras horizontais da armadura. A exsudação no CAA deve ser controlada a fim de se evitar o enfraquecimento da aderência entre o concreto e a armadura e o surgimento de fissuração (METHA e MONTEIRO, 2014; KHAYAT *et al.*, 1999).

3.2.1 Influência dos aditivos químicos e minerais nas propriedades do CAA no estado fresco

Para atingir as propriedades de capacidade de preenchimento, fluidez, habilidade de passagem e resistência a segregação, misturas minerais e químicas são usadas no CAA. Além disso, a produção de CAA exige uma diminuição na quantidade

de agregado graúdo presente no concreto, e aumento da quantidade de finos (Figura 6), podendo ser estes cimento ou adições minerais.

Figura 6 – Comparação entre as proporções de materiais utilizados no CAA e em concretos vibrados



Fonte: adaptado de OKAMURA e OUCHI, 2003

Sugathan (2016) também relata a similaridade nos componentes do concreto auto adensável e vibrado, ou seja, cimento, agregados, barras de aço e água. Todavia, enfatiza a necessidade do uso de aditivos químicos e adições minerais em diferentes proporções. Normalmente, os aditivos químicos utilizados são superplastificantes e agentes modificadores da viscosidade, que alteram as propriedades reológicas do concreto. As adições minerais são utilizadas como material extrafino e, em alguns casos, substituem cimento.

Todas as adições minerais possuem dois recursos comuns; seus tamanhos de partícula são menores ou iguais aos do cimento Portland (CP) e exibem comportamento pozolânico envolvendo reações de hidratação. Pozolana, que contém sílica (SiO_2) em uma forma reativa, têm pouco ou nenhum valor cimentício por si mesma. No entanto, em uma forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) a temperaturas normais para formar compostos cimentícios (DOMONE e ILLSTON, 2010; DVORKIN *et al.*, 2012).

A incorporação de diferentes adições minerais em concreto pode ter um considerável efeito nas propriedades frescas e endurecidas (DING e LI, 2002; RAMAZANIANPOUR, 2012). O uso dessas adições proporciona maior coesão melhorando a distribuição do tamanho dos grãos e o empacotamento de partículas (ação física). Além disso, sua alta atividade pozolânica leva a um maior aprimoramento do empacotamento de partículas que é obtido pelos produtos

pozolânicos (ação química) e atua de forma complementar à ação física (BADOGIANNIS, *et al.*, 2004; CYR, *et al.*, 2006).

Segundo Nunes (2001) umas das principais propriedades das adições minerais é a superfície específica. A viscosidade tem relação direta com a superfície específica dos finos; quanto maior a superfície específica, maior será a viscosidade das misturas. As adições minerais melhoram o empacotamento das partículas por meio de uma ação física, que refletem numa maior coesão para as misturas do CAA (SKIFAS, *et al.*, 2014). As adições minerais podem também contribuir para a fluidez em decorrência da sua elevada finura. As pequenas partículas atuam preenchendo os vazios entre as maiores (cimento e agregados) promovendo, assim, melhor arranjo dos grãos e melhor aproveitamento da água de amassamento (BUCHER *et al.*, 2014). Dessa forma, o aumento da viscosidade e da estabilidade das misturas, é resultado de uma maior capacidade que os finos têm de adsorver grande quantidade de água, quando comparados ao cimento, o que irá reduzir a água livre na mistura. (KHAYAT *et al.*, 2002).

Segundo Cyr *et al.* (2000), partículas com formato irregular tendem a mostrar mais facilmente um comportamento de espessamento de cisalhamento e, portanto, um aumento da viscosidade. Ademais, uma grande quantidade de finos, com alta superfície específica e agregados de menor diâmetro médio, são fundamentais para aumentar a trabalhabilidade e melhorar o controle das propriedades do CAA. Melo e Carneiro (2010) analisaram a influência da finura das partículas em pastas e concretos, e constataram que quanto menores as partículas, menor é a demanda por água e superplastificante, para alcançar a fluidez desejada; essas diferenças foram mais expressivas ao passo em que o nível de substituição do cimento pela adição mineral aumentava.

Ghoudossi *et al.* (2014), fizeram um estudo sobre a densidade de empacotamento e observaram uma redução desse parâmetro com o uso de adição mineral comparado ao CAA de referência, assim como o potencial de segregação estática e deformação plástica. No entanto, a segregação dinâmica aumentou devido à redução do cimento para ligar o material e manter a estabilidade de misturas de CAA.

Skifas *et al.* (2014) constataram que a trabalhabilidade é afetada por níveis de substituição de adição mineral, resultando em uma maior exigência de

superplasticante a fim de adquirir um comportamento reológico similar, atribuindo esses efeitos à superfície específica mais alta e à forma irregular ou em forma de placa das partículas. A viscosidade, expressa pelo tempo de fluxo do funil V, aumenta quando o nível de adição é incorporado na mistura, independentemente da substituição. Por outro lado, uma aceleração da propagação do fluxo de queda é observada. Embora levando a diâmetros de queda mais baixos, pequenos problemas de bloqueio são observados para níveis mais elevados de substituição de pozolana para ambos os grupos de misturas, ainda sem sangramento ou segregação evidente.

Além disso, contribui para um maior volume de pasta em concretos, um fator chave para alcançar alta trabalhabilidade. A pasta de cimento reveste e separa as partículas dos agregados, formando uma camada "lubrificante". Esta camada reduz o atrito entre eles e facilita seu movimento e rearranjo (SHUTTER, et al., 2008). O uso de superplasticante no CAA é inevitável, pois ele é responsável por uma das principais propriedades, a fluidez (GOMES e BARROS, 2009). Reduz a água de mistura, mantendo a trabalhabilidade, que para o mesmo teor de cimento, permite reduzir a relação A/C e melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA (PEREIRA, et al., 2012; BARBUDO, et al., 2013).

Embora existam algumas exceções, a adição de superplasticante às misturas à base de cimento, possui duas consequências principais: uma redução significativa da tensão de escoamento e um pequeno ou nenhum efeito sobre a viscosidade plástica, atribuídas à defloculação das partículas de cimento. Por meio desses efeitos, aumenta-se a trabalhabilidade do CAA e obtêm-se misturas mais fluidas, com tensão de escoamento tão reduzida que pouca ou nenhuma vibração seja necessária para o adensamento. (FERRARI e DE LARRARD; 1998; PETROU, et al., 2000). Assim, com a utilização de superplasticantes, é possível controlar a reologia do concreto sem alterar a relação A/C, o que influencia diretamente na durabilidade e na resistência do material (NAKAJIMA e YAMAHA, 2004).

Os aditivos superplasticificantes podem exercer outras funções que influenciam na fluidez da mistura, como redução da tensão superficial da água, filme lubrificador e repulsão eletrostática entre as partículas de cimento, inibição da hidratação superficial e mudança na morfologia dos produtos de hidratação do cimento e na dispersão dos grãos de cimento (TUTIKIAN, 2004). Para Satish (2013) na fabricação de um CAA, devem ser adicionados uma quantidade elevada de substância redutora

de água ou superplastificante para conferir características de alto fluxo, e um percentual de finos à mistura agregada para ganhar a compacidade desejada e garantir as características no estado endurecido.

3.2.2 Influência dos aditivos químicos e minerais nas propriedades do CAA no estado endurecido

Sabe-se que as adições minerais melhoram as propriedades de engenharia e desempenho em relação ao concreto normalmente vibrado, em termos de suas características mecânicas e de durabilidade (CASSAGNABÈRE, *et al*, 2010). O cimento CPV tem a particularidade de atingir alta resistência nos primeiros dias de aplicação. O desenvolvimento de alta resistência inicial é obtido pelo uso da moagem mais fina do cimento, de modo que, em reação com a água, adquira maior resistência com maior velocidade. O clínquer é o mesmo usado para a fabricação de cimento convencional, mas permanece na fábrica por mais tempo. O menor tamanho de partícula do cimento CPV comparado ao cimento convencional, gera um tamanho de poro menor, e o efeito do refino de poros se torna menos significativo (BARIN, 2008).

As pozolanas melhoram o desempenho do concreto reagindo com CH para formar o gel secundário CSH. A formação do gel secundário CSH reduz a porosidade total e refina a estrutura do poro, melhorando assim a resistência e impermeabilidade. A relação Ca/Si atômico de CSH depende dos tipos de material pozolânico, proporção de mistura e tempo de cura (GURU *et al.*, 2013). Dessa forma, aumentam as propriedades macroestruturais, ou seja, resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade do concreto com o aumento do nível de substituição (DVORKIN *et al.*, 2012).

As proporções e os componentes da mistura também podem ter alguns efeitos nas propriedades frescas e endurecidas do CAA (ZHOU, *et al.*, 2018). O volume de agregado graúdo, a quantidade de materiais finos (aglutinante), a dosagem de superplastificante e a porcentagem do ar incorporado na mistura, podem afetar a fluidez, viscosidade e capacidade de passagem do CAA. (MARAR e EREN, 2011).

3.2.3 Influência dos agregados nas propriedades do CAA no estado fresco

A areia é o principal componente do CAA; seu tipo e graduação têm um efeito maior nas propriedades frescas e endurecidas do CAA, devido à finura, e requerem uma alta demanda de água e um grande teor de cimento para alcançar alta fluidez (GIRISH, *et al.*, 2010). Sempre há uma quantidade ideal de combinação de areia grossa e fina para reduzir vazios e minimizar os efeitos de soltura e parede. Com o aumento da areia mais fina, maior que o conteúdo ideal, a densidade de empacotamento é reduzida. Com isso, faz-se necessário cuidado extra durante a cura do CAA, para se evitar ocorrência de fissuras por retração do concreto no momento da pega e endurecimento (OKAMURA *et. al.* 2000).

Como os agregados estão presentes em altas proporções no concreto, eles têm um efeito significativo sobre as propriedades de fluxo de CAA fresco (BUCHER *et al.*, 2014). Os agregados formam mais de 60% do volume de concreto, e além das propriedades frescas, desempenham importante papel nas propriedades endurecidas. Com isso, o CAA é muito sensível a mudanças nas características dos agregados (forma, textura, tamanho máximo, graduação e morfologia). Portanto o agregado deve ser escolhido, cuidadosamente, antes de ser usado no CAA, pois tem grande influência nas propriedades reológicas (MELO e CARNEIRO, 2010; KHALEEL, *et al.* 2014).

As propriedades dos agregados podem ser caracterizadas quantitativamente por parâmetros facilmente implementados, como módulo de finura, conteúdo vazio não compactado e ângulo de atrito. Agregados com um grande tamanho, alto módulo de finura, baixo conteúdo de vazio não compactado e pequeno angulo de atrito, levam a uma baixa tensão de escoamento e viscosidade plástica, no entanto, os efeitos individuais, dessas características podem se contradizer e assim, os efeitos combinados, além da superfície específica devem ser levados em consideração para analisar o comportamento reológico do CAA (HU e WANG, 2011).

Nesse sentido, Petersson (1997) considerou que o tamanho máximo do agregado (10 mm e 20 mm) é adequado para produzir CAA. Hu e Wang (2011) mostraram que o agregado bem graduado, poderia reduzir consideravelmente a tensão de escoamento e a viscosidade do concreto. Já Gelker *et al.* (2002) mostraram que a tensão de escoamento relativa e a viscosidade do concreto, aumentam

significativamente, com o aumento da fração volumétrica do agregado graúdo no CAA. Partículas com uma forma quase esférica e uma textura de superfície lisa fornecem maior viabilidade para o CAA (HU e WANG, 2011).

Essas alterações na reologia refletem nas propriedades do CAA. Um tamanho máximo elevado, leva à diminuição da capacidade de passagem. Assim, a redução do conteúdo de agregado graúdo será necessária. A escolha do tamanho máximo depende da quantidade de barras de aço e dos espaços entre eles, onde maiores proporções de tamanho máximo maior podem levar ao bloqueio de agregados na área congestionada com barras de reforço. O conteúdo ótimo de agregados graúdos depende de dois parâmetros. O primeiro parâmetro é o tamanho máximo, em que valores menores de tamanho máximo levam a uma maior possibilidade de uso de conteúdo de agregado graúdo. O segundo parâmetro é a forma do agregado graúdo, se é esmagado ou arredondado, onde um maior conteúdo de formato arredondado leva à maior possibilidade de usar um conteúdo maior de agregado graúdo (EFNARC 2002).

Usar uma fonte de agregados bem graduada leva a redução nos custos de produção do CAA, já as misturas de CAA que incorporem uma fonte de agregado mal classificada, necessitam de mais viscosidade para evitar problemas de segregação o que eleva os custos (NEUWALD; 2004). A forma e o tamanho do agregado graúdo têm uma influência vital no volume necessário de argamassa e de pasta para cobrir todas as partículas. O agregado triturado tende a reduzir o fluxo devido ao Intertravamento das partículas angulares, enquanto o agregado arredondado melhora o fluxo devido ao menor atrito interno. Já o cascalho não esmagado, muitas vezes precisa de menos argamassa ou pasta que o calcário, e o granítica requer mais volume de argamassa. (ALEXANDER e PROSK, 2003).

Um maior volume de agregado graúdo do CAA para menores restrições de fluxo, mantendo a capacidade de passagem, e a otimização do volume agregado graúdo para diferentes restrições de fluxo, reduz o custo do CAA (NEPONUCENO, et al, 2016). Assim, o conteúdo de agregados graúdos deve ser inferior a 50% do volume sólido e do conteúdo de agregados finos inferior a 40% do volume de argamassa (OKAMURA e OUCHI, 2003). A limitação do volume de agregados graúdos no CAA também é um dos fatores que mais afeta suas capacidades de passagem e

preenchimento, ao mesmo tempo em que previne a sua segregação (EFNARC, 2005; RAMGE *et al.*, 2010).

3.2.4 Influência dos agregados nas propriedades do CAA no estado endurecido

As propriedades mecânicas devem diminuir quando o volume do agregado graúdo for de 60% a 30% no CAA (NIKBIN, *et al.*, 2014). As misturas de CAA contendo o tamanho máximo de 10 mm do agregado graúdo são maiores do que nas misturas com o tamanho máximo de 20 mm do agregado graúdo (KHALEEL, *et al.*, 2014).

Além do volume de agregados, o percentual de argamassa influencia na resistência a compressão do CAA. O aumento no percentual de argamassa leva a uma redução da resistência a compressão (MANUEL, 2005; SILVA e LIMA, 2016). Manuel (2005) a partir de concretos convencionais produziu CAA com teor de argamassa variando entre 55% a 75% e verificou uma redução de 52,3% na resistência à compressão aos 28 dias entre o traço com menor e maior percentual de argamassa. Assim como Silva e Lima (2016) que produziram CAA variando o percentual de argamassa e constataram um decréscimo de 26,3% entre o traço com menor e maior teor de argamassa.

O concreto auto adensável com relação A/C (água-cimento) e B/A (brita-areia) similar ao concreto convencional, terá resistência à compressão ligeiramente maior, devido à falta de vibração, melhorando a interface na zona de transição entre a pasta e os agregados. Nesse sentido, uma série de propriedades pode estar relacionada, como por exemplo, a resistência à tração, que pode ser igual à do concreto convencional de acordo com sua classe, uma vez que o volume da pasta não tem efeito significativo na tração. Já o módulo de elasticidade, pode ser reduzido, devido ao maior volume de pasta requerido para o concreto auto adensável, haja vista que o percentual de agregados, governa essa propriedade, o mesmo não ocorre com a contração, fluência e a deformação que são propriedades governadas pelo volume de pasta e com isso, são maiores nos concretos auto adensáveis. Deve-se salientar ainda, uma particularidade na contração por secagem, que além do volume de pasta, depende da relação A/C para justificar suas variações (EFNARC, 2005).

3.3 CAA com adições minerais

Nessa seção serão apresentadas pesquisas, referentes as características e particularidades das adições minerais, utilizadas nessa pesquisa, e as propriedades do CAA no estado fresco (capacidade de preenchimento, viscosidade, capacidade de passagem e resistência a segregação), e no estado endurecido (resistência a compressão, velocidade de pulso ultrassônico e absorção capilar), do CAA produzido com essas adições minerais.

3.3.1 CAA com Metacaulim

O metacaulim (MK) é uma adição mineral constituída por argila caulinitica calcinada a altas temperaturas entre 650 e 800 °C, resultando em um material de alta finura com propriedades pozolânicas (BADOGIANNIS, *et al.*, 2005, 2015; KAVITHA, *et al.*, 2015), que aceleram a hidratação do cimento, devido à alta reatividade com hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ativada termicamente sem a produção de CO_2 (BADOGIANNIS, *et al.*, 2015; KAVITHA, *et al.*, 2015). Este tratamento térmico visa destruir a estrutura cristalina e expulsar a água quimicamente ligada (CHAKRABORTY, 2003).

Ao contrário de outras adições minerais, o MK é fabricado sob temperatura de queima controlada (DING e LI, 2002) para otimizar os tamanhos das partículas e também afim de obter um alto grau de reatividade pozolânica quando misturado com cimento. Contém tipicamente 50 a 55% de SiO_2 e 40 a 45% de Al_2O_3 e é altamente reativo (POON *et al.*, 2006; DVORKIN, *et al.*, 2012; RESENDE, *et al.*, 2012; HASSAN e MAYO, 2014, GILL e SIIDDIQUE, 2018). Dessa forma, pode ser considerada uma adição mineral alumino-silicato (VEJMELKOVA, *et al.*, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012).

A adição de metacaulim de acordo com Badogiannis e Tsivilis (2009) é conhecida por refinar, reduzir o tamanho médio e melhorar a uniformidade da distribuição do tamanho do sistema dos poros. Além disso, reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é produzido durante a hidratação do cimento, criando assim produtos adicionais (gel secundário CSH) que modificam a microestrutura do concreto e contribuem para a melhoria da durabilidade do material, em termos de porosidade e permeabilidade

etc. (DING e LI, 2002; SIDDIQUE e CLAUS, 2009; BADOGIANNIS, et al., 2005, BADOGIANNIS e TSIVILIS, 2009; SAFIUDDIN, 2008; HASSAN e MAYO, 2014). Outro fator que contribui para a redução da porosidade é a relação Ca/Si do gel CSH que é maior para o MK do que para outras pozolanas, como cinza volante e escória de alto forno, devido a seus altos níveis de alumina e sílica (POON *et al.*, 2001; SHEKARCHI *et al.*, 2010).

Assim evidenciam-se as principais vantagens do uso do metacaulim como adição mineral em concretos e argamassas: melhorias na trabalhabilidade, microestrutura e resistência à compressão; permeabilidade reduzida, retração autógena; maior durabilidade e controle da reação álcali-agregado (ROJAS e CABRERA, 2002). Além de suas vantagens no desempenho de concreto, o metacaulim, como material de substituição do cimento, contribui para a redução das emissões de CO₂, em virtude da redução do consumo habitual de cimento portland, contribuindo para a redução de passivos ambientais, (CYR e MOURET, 2003; GUNIYSE, et al., 2008; CASSAGNABÈRE, et al., 2010).

3.3.1.1 Influência do Metacaulim nas propriedades do CAA no estado fresco

As propriedades reológicas do CAA devem ser influenciadas pela adição de metacaulim, devido às partículas de MK serem geralmente mais finas e apresentarem diferentes características de forma, comparadas ao cimento. A trabalhabilidade é influenciada pela finura e pela quantidade de MK adicionado nas misturas de CAA, que melhoram a viscosidade da mistura. Isso afeta o consumo de superplastificante e água (PERLOT, et al., 2013). Assim, a finura do MK é um fator muito importante para otimizar a produção do CAA em termos de A/C e conteúdo de superplastificante. Por outro lado, a quantidade de MK pode ser limitada para evitar resultados negativos para a resistência à compressão e misturas antieconômicas, com alto consumo de superplastificante (MELO e CARNEIRO, 2010; SKIFAS, et al., 2014; KANNAN, 2018). Este efeito é atribuído à maior reatividade e à superfície específica mais alta, comparado ao cimento (KANNAN e GANESAN, 2014; VEJMELKOVA, et al., 2011) e à forma irregular ou em forma de placa das partículas (SKIFAS, et al., 2014).

Algumas pesquisas mostram que aumentar a porcentagem de MK em substituição do cimento, reflete em uma redução da capacidade de preenchimento,

fluidez e habilidade passante em misturas de CAA. A perda na capacidade de preenchimento é aferida nos ensaios de *Slump flow*, T_{500} e Funil V. Os diâmetros de espalhamento diminuem com o aumento do percentual de MK na mistura; por outro lado, os tempos de espalhamento do T_{500} e de escoamento da mistura no funil V aumentam. Esses tempos maiores de T_{500} e Funil V indicam uma perda de fluidez nas misturas. A habilidade passante é verificada com o ensaio de caixa L, onde com o aumento no percentual de substituição do MK verifica-se uma redução na razão $H2/H1$. Dependendo do percentual de adição, as misturas podem apresentar problemas de bloqueio nas regiões de concentração de armadura (VEJMELKOVA, et al., 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, et al., 2014; HANNAN, 2018).

Esses resultados são reflexos do aumento da viscosidade que ajuda a melhorar a suspensão dos agregados na mistura, evita a segregação de agregados graúdos e mantém a mistura homogênea. A adição de MK, no entanto, especialmente em altas doses (até 20%) reduz o tempo de fluxo e aumenta a demanda de superplastificante nas misturas de CAA (CYR e MOURET, 2003; PERLOT, et al., 2013; HASSAN e MAYO, 2014).

3.3.1.2 Influência do Metacaulim nas propriedades do CAA no estado endurecido

Badogiannis et al (2005) concluíram que o MK tem um efeito muito positivo na resistência mecânica do CAA após 2 dias e especificamente aos 28 e 180 dias. Com a adição de MK ao concreto, a reação pozolânica é acelerada entre 7 e 28 dias, acompanhada de uma acentuada diminuição do teor de $Ca(OH)_2$. Estudos mais recentes corroboram com essa reação acelerada do MK. Skifas et al (2014) chegaram à conclusão de que os ganhos de resistência mecânica com a adição de MK são de até 90% aos 28 dias, ou seja, a ação pozolânica tem seu ciclo, quase completo nos primeiros 28 dias, alcançando o pico de resistência final aos 360 dias. Já Madandousti e Mousavi (2012) conseguiram identificar picos de resistência à compressão tanto em idades precoces (3 e 7 dias) como em idades um pouco mais avançadas (28 e 56 dias). Enfim, é consenso de muitos autores que a incorporação do MK substituindo parcialmente o cimento, proporciona as maiores resistências já nas idades iniciais do

concreto, devido à rapidez com que ocorrem as reações pozolânicas nas matrizes cimentícias com MK (RAZAK, *et al.*, 2004; VEJMELKOVA, *et al.*, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, *et al.*, 2014; KAVITHA, *et al.*, 2015; HANNAN, 2018).

No que diz respeito ao percentual ótimo de MK em substituição do cimento no CAA, a resistência à compressão, apresenta seus maiores resultados para 10% de substituição de aglomerante (RAZAK, *et al.*, 2004; BADOGIANNIS, *et al.*, 2005; KAVITHA, *et al.*, 2015). Outros estudos constataram que a substituição do cimento por 15% do MK otimizou tanto o desempenho mecânico quanto o de durabilidade (SIDIQUE e CLAUS, 2009; GILL e SIDIQUE, 2018; GHOUDDOSI e SAABADABI, 2017). Madandousti e Mousavi (2012) fizeram pesquisas com substituições de MK de 5% a 20 % e constataram que os maiores ganhos de resistência mecânica ocorreram entre 10% e 15% de substituição de MK. Já para Skifas *et al* (2014) os melhores ganhos de resistência mecânica são encontrados com percentuais de substituição de até 20 % de MK.

A mesma tendência de ganhos de resistência com a incorporação do MK no CAA se reflete na velocidade de pulso ultrassônico (módulo de elasticidade) (MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012). No entanto, no trabalho de Fonseca (2016) não foi identificado um ganho de velocidade de pulso compatível com o de resistência à compressão.

3.3.2 CAA com Pozolana da Casca de Arroz

A casca de arroz (CA) é um subproduto agrícola (resíduo) que é produzido durante o beneficiamento do arroz, cada tonelada de arroz gera 200 kg de casca ou palha de arroz, e durante a queima, são gerados até 40 kg de cinza (METHA e MONTEIRO, 2014). A CA é abundante em muitos países de cultivo de arroz, como, Vietnã, Índia, China e Brasil. Normalmente, a CA das fábricas de arroz é descartada diretamente no meio ambiente ou às vezes é despejada ou queimada em pilhas nos campos. Isso resulta em grave poluição ambiental, especialmente quando é desintegrado em condições úmidas (SAFIUDDIN, 2008). Dessa forma, o uso da CA como adição mineral, reduz o custo da produção de concreto e diminui a poluição ambiental causada pela emissão de CO₂ das fábricas de cimento (VEGAS, 2008) e

minimiza a carga ambiental, associada ao problema de descarte de resíduos, causado pela indústria de moagem de arroz (ZANG e MALHOTRA, 1996).

Em geral, a CA contém sílica com grande quantidade de carbono, por vários processos de pré-aquecimento, a enorme quantidade de carbono é reduzida na faixa de 2-5%, e a CA torna-se PCA (pozolana da casca de arroz). A PCA é um produto obtido a partir de CA tratado termicamente e é bem moído para fazer uma mistura mineral. A PCA pode ser produzida em quantidade de aproximadamente 22% a partir de CA crua. Pode ser obtida por várias formas de processo de queima controlada, processo de combustão e auto-queima. Na queima controlada, a temperatura é mantida de 650° C a 850° C por período adequado (RAMAZENIAPOUR, et al 2012).

A PCA com seu alto teor de sílica amorfa (aproximadamente 90% (SAFIUDDIN, 2008; SAFIUDDIN, et al., 2011; CHOPRA, 2014; CHOPRA, et al., 2015; GILL e SIDDIQUE, 2018), produzida sob combustão controlada em temperatura entre 600°C e 800°C e finamente moída, apresenta área superficial elevada e alta reatividade, tornando-se apta para ser utilizada em matrizes cimentícias, reduzindo a porosidade e a largura da zona de transição entre pasta e agregados. É um substituto muito bom para cimento no que diz respeito à resistência à compressão e a durabilidade do concreto (SAFIUDIN, 2008, SAFIUDDIN, et al., 2012; LUNG-CHAO, et al., 2011; KANNAN e GANESAN, 2014; CHOPRA, et al., 2015).

3.3.4.1 Influência da PCA nas propriedades do CAA no estado fresco

O uso da PCA influencia na trabalhabilidade. À medida que se aumenta o percentual de adição de PCA, a viscosidade aumenta e a capacidade de preenchimento e a habilidade de passagem diminuem o que pode ser melhorado aumentando-se a dose de superplastificante (MEMON, 2008; SAFIUDDIN, et al., 2012, CHOPRA, 2014; LE e DUDVIG, 2016). Isso se deve à alta reatividade e área superficial específica extremamente elevada dessa pozolana, que aumenta a capacidade de retenção de água e a viscosidade da mistura de CAA que são necessárias para evitar a segregação (SAFIUDDIN et al., 2012).

Várias pesquisas registraram a redução da capacidade de preenchimento do CAA com substituição de cimento por PCA. Memom (2008) testaram 9 (nove) misturas com percentuais de substituição de cimento por PCA de 5% e 10% e teores de superplastificante variando entre 3,5 e 4,5%. Apesar de todas as misturas,

apresentarem espalhamento dentro dos padrões da EFNARC (2005), com exceção da mistura 10%PCA3, 5%SP, observou-se claramente uma redução do diâmetro de espalhamento no *slump flow* com o aumento no percentual de PCA. Safiuddin *et al.* (2010) verificou que a capacidade de preenchimento de um CAA tende a diminuir com a menor relação A/F e maior teor de PCA, devido a observar que para um dado diâmetro de espalhamento, a demanda de água aumenta e uma dosagem mais elevada de superplasticificante é necessária para alcançar o espalhamento esperado.

Kannan e Ganesan (2014) compararam o CAA de referência com 6 (seis) misturas de CAA, variando a substituição de cimento por PCA de 5 a 30%, mantendo relação A/F e percentual de superplasticificante constante. Constatou-se que o aumento do teor de substituição de cimento por PCA diminui o diâmetro de espalhamento no *slump flow*, que reflete uma diminuição da capacidade de preenchimento. Le e Ludwig (2016) utilizaram PCA como substituto parcial do cimento em teores de até 20%, combinada a outros 20% de substituição de cinza volante, todas as composições com o mesmo fator A/F e o mesmo teor de superplasticificante. Registrhou-se redução nos diâmetros de espalhamento do *slump flow*. Os autores corroboram no sentido de que essa redução na capacidade de preenchimento é devido principalmente à maior área de superfície da PCA (MEMON, 2008; SAFIUDDIN, *et al.*, 2012, CHOPRA, 2014; LE e DUDVIG, 2016).

Outra forma de verificar a perda da capacidade de preenchimento do CAA com substituição do cimento por PCA é mensurar a fluidez das misturas por meio do aumento dos tempos no ensaio do funil-V e tempo de espalhamento T_{500} . No que se refere à perda de habilidade passante do CAA, observa-se uma redução da razão de bloqueio H_2/H_1 no ensaio da caixa-L com o aumento do teor de substituição de cimento por PCA (MEMON, 2008; KANNAN E GANESAN, 2014; LE e LUDWIG, 2016).

Outra pesquisa mostrou que a substituição de cimento por 25 e 50% de PCA em peso total de materiais cimentícios, à mistura de CAA, diminuindo a relação w/b de 0,40 para 0,38 e 0,36, respectivamente, à medida que o teor de PCA aumenta, o tempo do funil V aumenta, e o fluxo de queda diminui com a mesma dosagem de SP (MEMON, *et al.*, 2011). O aumento no fluxo de *slump* devido à substituição parcial do cimento por PCA em peso é consequência de um aumento no volume de pasta, como resultado da menor densidade da PCA (SAFIUDDIN, 2008).

3.3.4.2 Influência da PCA nas propriedades do CAA no estado endurecido

No que se refere ao estado endurecido, Ahmadi *et al.* (2007) utilizaram o PCA em 6 (seis) misturas como substituição por cimento de 10 e 20% do peso do material cimentício total, e observaram que o CAA produzido com o uso de PCA, apresentou ganhos de 31 a 41% nos valores de resistência à compressão, comparados ao CAA de referência sem o PCA; as misturas com 20% de substituição de cimento por PCA apresentaram os melhores resultados. Memon *et al.* (2011) realizaram pesquisas sobre CAA com substituição de cimento por PCA de até 10% do peso do material cimentício total, em 9 (nove) misturas, com relação A/F variando de 0,36 a 0,40 e percentual de superplasticificante de 3,5% a 4,5% e afirmaram que o CAA produzido com PCA apresentou perda de resistência à compressão para mistura com 5% de PCA e ganhos de resistência à compressão para misturas com 10% de PCA. Para o mesmo percentual de superplasticificante, há ganhos de resistência à compressão em comparação as misturas de referência. Já Safiuddin *et al.* (2010) utilizaram até 30% de PCA em substituição ao cimento no CAA. Com isso, constataram que o aumento do teor de PCA na mistura elevou em mais de 10% a resistência à compressão. Segundo os autores, as excelentes propriedades endurecidas foram obtidas com 15% de substituição de cimento por PCA.

Estudos mais recentes corroboram com as pesquisas supracitadas. Shatat (2013) estudou o efeito da PCA sobre a resistência à compressão das pastas de cimento com adição de pozolana e conclui que fatores como o teor, tipo e área de superfície e as características individuais do cimento são os fatores que contribuem para a variação da resistência mecânica. Os resultados da resistência à compressão das pastas de cimento feitas com misturas de cimento e PCA, mostram que a resistência de todas as pastas aumenta com o tempo de cura, sendo os melhores resultados, encontrados nas pastas que substituíram o cimento por PCA em até 10%.

Chopra (2014) e Chopra *et al.* (2015) substituíram o cimento por PCA nas proporções de 10, 15 e 20%. Elas observaram um aumento na resistência à compressão em todas as idades, quando o nível de substituição de PCA é mantido em 15%. Houve adição de cerca de 25% de resistência aos 7 dias, 33% aos 28 dias e 36% aos 56 dias. Le e Ludwig (2016) utilizaram a PCA como substituição do cimento em teores de até 20%, sempre combinada a outros 20% de cinza volante. Os resultados mostraram que com o aumento do teor de PCA a resistência à compressão

diminuiu nas idades precoces. As exceções foram os teores de 5 e 10% aos 7 dias, que apresentaram resultados similares ao traço de referência. Já aos 28 e 90 dias todos os traços com a PCA apresentaram resistências maiores que o traço de referência. Já Gill e Siddique (2018) constataram em sua pesquisa, que quando o cimento foi substituído por 10% de PCA, houve aumento de aproximadamente 5% na resistência à compressão aos 28 dias comparada à mistura de controle.

Os resultados satisfatórios, com relação resistência à compressão do CAA com substituição parcial de cimento por PCA, mostrados nessas pesquisas, são justificados pelo seu teor elevado de sílica amorfa, grande área superficial específica e pela intensa reatividade entre a água e o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento para produzir CSH adicional (SAFIUDDIN *et al.*, 2010, SHATAT, 2013; CHOPRA, 2014; CHOPRA, *et al.*, 2015; LE e DUDWIG, 2016; GILL e SIDDIQUE, 2018). Esse CSH adicional reduz a porosidade do concreto, preenchendo os poros capilares (efeito filer) e melhorando a microestrutura da matriz cimentícia do CAA e da zona de transição, o que leva ao aumento da resistência à compressão. A cura interna do CAA com substituição parcial do cimento por PCA tem um efeito na melhoria da resistência à compressão em idades mais avançadas, devido à sua estrutura porosa que pode absorver água livre durante a mistura. Esta quantidade de água pode ser liberada para a pasta de cimento em torno das partículas da PCA quando a umidade relativa diminuir na pasta durante a maturação, o que facilitaria uma hidratação prolongada. (NGUYEN *et al.*, 2011). Além disso, Le e Ludwig (2016) acrescentam que a presença da PCA também melhora a hidratação do cimento através dos locais de nucleação e efeitos de diluição.

Além da resistência mecânica, outras propriedades do estado endurecido, também elevam seu desempenho devido às vantagens que o PCA apresenta como pozolana. O módulo de elasticidade aumenta com a substituição parcial do cimento por PCA. Várias pesquisas mostram que com a inserção da PCA na matriz cimentícia, de maneira mais branda, aumenta a velocidade do pulso ultrassônico (AHMADI, *et al.*, 2007, SAFIUDDIN, *et al.*, 2010; SHATAT, 2013).

3.3.5 CAA com Fíler

O fíler calcário caracteriza-se como um pó fino, obtido em pedreiras de rocha calcária. Pode ser classificado como calcítico ou dolomítico, dependendo de sua composição química. Em geral, sua estrutura é porosa e apresenta superfície rugosa (FELEKOĞLU, *et al.*, 2009). O carbonato de cálcio (CaCO_3) ou calcita é o principal componente do calcário pulverizado e o emprego desse material em CAA's vem sendo objeto de muitas pesquisas, principalmente, devido ao melhoramento da matriz cimentícia e por seu efeito de preenchimento, que proporciona melhorias das propriedades do CAA e ganhos ambientais com a redução do consumo de cimento (UYBAL e YILMAZ, 2011; UYSAL *et al.*, 2012; GESOGLU *et al.*, 2012; MOHAMMED *et al.*, 2014; SILVA e BRITO, 2015; BARLUENGA, *et al.*, 2015).

Esses ganhos nas propriedades do estado endurecido são devido ao efeito físico do filer como agente de enchimento em materiais multifásicos, que melhora a distribuição de partículas do esqueleto granular das misturas e assegura um melhor empacotamento das partículas do sistema (SUA-IAM *et al.*, 2016). De acordo com Hoppe Filho (2008), o material inerte acelera as reações de hidratação devido à maior dispersão das partículas do cimento e à maior disponibilidade de pontos para a precipitação dos hidratos. Consoante Irassar (2009), este efeito é chamado de nucleação heterogênea, pois o fíler calcário atua como agente de nucleação, acelerando a hidratação do cimento, o que leva à cristalização desorientada do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),

3.3.5.1 Influência do fíler nas propriedades do CAA no estado fresco

A finura e a superfície específica do fíler calcário influenciam nas propriedades reológicas do CAA. A menor área superficial específica das partículas de fíler em comparação com o cimento reduz a demanda de água da mistura (UYBAL e YILMAZ, 2011; UYSAL *et al.*, 2012). Corroborando com a influência da área superficial na demanda de água, Yahia et al (2005) e Esping (2008), fizeram pesquisas com CAA utilizando fíler calcário com área superficial maior que o cimento e constataram um aumento significativo na demanda por água. Esping (2008) acrescenta que com o aumento da área superficial, a tensão de escoamento e a viscosidade também aumentam o que justifica o aumento na demanda de água e de aditivo

superplasticificante. Essas alterações na reologia refletem no espalhamento e tempo de fluxo das pastas e argamassas. Cavalcanti (2006) observou os espalhamento e tempo de fluxo com fíler de diferentes finuras e registrou menores espalhamentos e maiores tempo de fluxo para misturas com fíler de área de superfície específica maior.

A utilização de fíler calcário como substituto parcial do cimento em percentuais de até 30% melhora a capacidade de preenchimento dos CAA's, que pode ser observada através do aumento do diâmetro de espalhamento no ensaio de *slump flow*. (UYSAL e YILMAZ, 2011; UYSAL *et al.*, 2012). Nos casos em que o fíler apresenta área superficial específica menor que o cimento são percebidas melhorias na habilidade passante. Uysal e Yilmaz (2011) e Uysal *et al.* (2012) verificaram através do ensaio de caixa-L que todas as composições de CAA com substituição de cimento por fíler em teores de até 30% apresentaram resultados de razão H₂/H₁ maiores que o traço de referência.

Outras pesquisas também registraram melhorias na capacidade de preenchimento. Gesoglu *et al.*, (2012) e Silva e Brito (2015), utilizaram fíler calcário com percentuais de substituição parcial de 5 a 20% de cimento e registraram a redução do diâmetro de espalhamento no *slump flow*. Nos estudos de Gesoglu *et al.*, (2012), os menores diâmetros foram registrados com 15% de substituição e Silva e Brito (2015), obtiveram o menor diâmetro de espalhamento com 20% de substituição de cimento. Sua Iam *et al.*, (2016) também obtiveram redução de diâmetro de espalhamento com relação ao traço de referência, em um traço de CAA substituindo 20% de cimento por fíler calcário.

Já a habilidade de passagem teve melhorias, ou seja, aumento na razão H₂/H₁, em pesquisas feitas por Gesoglu *et al.*, (2012) e Silva e Brito (2015). No entanto, Sui ima *et al.*, (2016), contrariando outros estudos, obtiveram redução na habilidade de passagem com a substituição de fíler calcário com área superficial maior que o cimento. Foram feitos estudos em traços com percentuais de substituição de cimento por fíler de até 20%; a redução mais expressiva da razão H₂/H₁ foi encontrada no traço com 5% de substituição de fíler calcário por cimento.

Com relação à fluidez, estudos realizados com fíler calcário com área superficial maior que o cimento, apontam para um aumento na viscosidade com o aumento no percentual de substituição parcial de fíler calcário por cimento. Esse fato é comprovado por meio dos resultados do ensaio de T₅₀₀ e Funil V que registraram

tempos maiores para os traços com fíler calcário em relação ao traço de referência (GESOGLU, et al., 2012; SILVA e BRITO, 2015; SUA IAM et al., 2016). Apesar das análises de T_{500} e funil-V classificarem as amostras de CAA estudadas por Gesoglu et al. (2012) na mesma classe de viscosidade, o autor constatou um aumento no T_{500} e redução no Funil V, porém com resultados próximos ao traço de referência.

3.3.5.2 Influência do fíler nas propriedades do CAA no estado endurecido

No que diz respeito ao estado endurecido, pesquisas apontam para uma redução na resistência à compressão e na velocidade de pulso ultrassônico (UYSAL et al., 2012; SILVA e BRITO, 2015). O aumento do percentual de substituição parcial de fíler calcário por cimento, entre 10 e 30%, proporcionou uma redução na resistência à compressão de até 20% aproximadamente. Com relação à velocidade do pulso ultrassônico aos 28 dias, verificou-se uma pequena redução, inferior a 10% e uma significativa redução nos módulos de elasticidade estático e dinâmico, podendo alcançar aproximadamente até 15% e 12%, respectivamente (UYSAL et al., 2012).

Já Silva e Brito (2015) fizeram seus estudos com substituições parciais de fíler por cimento, entre 10% e 30% e constataram uma redução na resistência à compressão de até 15% aproximadamente. Os autores corroboram que o fíler calcário, por ser considerada uma carga inerte, não tem atividade pozolânica, ou seja, tem apenas efeito de enchimento, não contribuindo para a formação do CSH adicional que proporciona ganhos nas propriedades do estado endurecido (UYSAL et al., 2012; SILVA e BRITO, 2015).

Barluenga et al., (2015), utilizou percentual de substituição parcial de fíler calcário por cimento de 50%, e constatou uma redução na resistência à compressão, enquanto a velocidade de pulso ultrassônico permaneceu constante. No entanto, Gesoglu et al., (2012), utilizando percentual de substituição parcial de fíler calcário por cimento, entre 5 e 20%, constataram aumento na resistência à compressão tanto aos 28 dias quanto aos 90 dias, com exceção das mistura de 5% de substituição aos 28 dias que registrou resistência à compressão menor que a do traço de referência. Apesar de divergir com outras pesquisas, deve-se salientar que os ganhos de resistência são extremamente baixos, não superiores a 5% e podem ser justificados pelo melhor empacotamento das partículas do efeito fíler citado por Sua Iam et al

(2016) e a nucleação heterogênea que acelera a cristalização desorientada do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (IRASSAR *et al.*, 2009).

3.4 Metodologias de dosagem de CAA

O projeto da mistura de concreto é uma seleção de matérias-primas em proporções ótimas para dar ao concreto, propriedades requeridas nos estados fresco e endurecido para aplicações específicas. Nesse sentido, variações nas quantidades dos componentes são mais robustas para o estado endurecido que o estado fresco e assim, maior atenção deve ser dada sobre as propriedades no estado fresco, relacionadas a relação A/C, teor de agregados, entre outros, durante a preparação do CAA (ZHOU, *et al.*, 2018).

Metha e Monteiro (2014) definem dosagem do concreto como o processo de obtenção de uma combinação adequada de seus constituintes, cimento, agregado miúdo e graúdo, adições e aditivos, para produzir concreto de acordo com as especificações dadas para alcançar as propriedades desejadas. Com isso, um dos objetivos principais da dosagem do concreto é obter um produto que atenda, de maneira geral, dois requisitos básicos, a trabalhabilidade no estado fresco e a resistência mecânica no estado endurecido. Desde o primeiro desenvolvimento do CAA no final da década de 1980, vários métodos foram propostos para a dosagem das misturas em todo o mundo (GOMES e BARROS, 2009; NIE e AN, 2016). Uma quantidade considerável de trabalhos de pesquisa foi dedicada na última década para tornar o concreto auto adensável mais robusto.

Um dos métodos mais populares e importantes foi proposto pela primeira vez por Okamura e Ozawa (1997) e Ouchi *et al* (1996); depois foram aprimorados por Edamatsu *et al.* (1999). Este método parte do princípio de que o teor de agregado miúdo e graúdo são fixos e a relação superplasticante / pó em massa (Sp / P) e relação água / pó em volume (V_w / V_p) são ajustados para obter a fluidez necessária. Depois, muitas outras abordagens foram desenvolvidas; por exemplo, o proposto por Petterson *et al* (1996) consiste na composição de um esqueleto granular e uma quantidade mínima de pasta que garanta as propriedades de fluidez, viscosidade e habilidade de passagem ao concreto; Saak *et al* (1999) estabeleceram um método de dosagem com base no controle da reologia das pastas para garantir trabalhabilidade

sem sinais de segregação no CAA; Su *et al.* (2001) basearam-se no modelo de embalagem agregada e utilizaram a menor quantidade de pasta para preencher os vazios entre as partículas dos agregados não compactados. Nesses dois modelos, os autores partem do princípio de que a segregação dos agregados é governada por tensão de escoamento, viscosidade e densidade da pasta de cimento (GOMES e BARROS, 2009).

Apesar da importância da fluidez e estabilidade do CAA no estado fresco, os métodos de dosagem foram evoluindo, e além das propriedades no estado fresco, foram incorporadas características de resistência e durabilidade nos processos de dosagem, o que pode ajudar a difundir sua aplicação nas construções. Gomes (2002) desenvolveu um método de dosagem para CADAR (concreto auto adensável de alta resistência), seguindo a lógica de que a pasta governa a fluidez e a estabilidade dos agregados na mistura de concreto. No entanto, durante a fase pasta a relação A/C é definida conforme os parâmetros de resistência mecânica desejáveis.

Repette-Mello (2005) propuseram um método de dosagem, determinando a relação A/C, por meio de uma análise rápida das pastas e argamassas, com o intuito de alcançar uma resistência especificada em projeto, que permite obter o CAA com as características desejáveis no estado fresco, resistência e durabilidades compatíveis com os dos concretos usuais, com menor custo, por meio da otimização dos materiais com ensaios simples. Já Tutikian (2004) iniciava seu processo de dosagem definindo o diâmetro máximo do agregado graúdo em consonância com o objetivo da aplicação e dos finos a serem adicionados à mistura.

A abordagem na argamassa consistia em definir um teor ideal de argamassa seca e um diagrama de dosagem com três traços: rico, intermediário e pobre. Logo após os finos eram adicionados à mistura para corrigir a segregação e a partir dai, eram realizados os ensaios de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade e assim, obter um diagrama de dosagem e desempenho para o concreto. Esse método foi aperfeiçoado em 2007, ao se propor obter um CAA determinando o esqueleto granular máximo (O'REILLY, 1992) e utilizando-se o conceito de (DE LARRARD, 1999), para seleção dos materiais e a partir dai traçar o diagrama de dosagem desenvolvido pelo IPT/EPUSP (TUTIKIAN e MALMADIN, 2007).

Seguindo a mesma lógica Alencar e Helene (2006) desenvolveram um método que visava obter CAA por meio da correção da coesão do concreto fresco,

para alcançar fluidez, acrescentando adições minerais para a substituição parcial do cimento ou do agregado miúdo, com área superficial maior do que o material substituído, semelhante aos métodos propostos por TUTIKIAN (2004) e TUTIKIAN e MAL MADIN (2007), no sentido da abordagem da argamassa e definição de diagramas de dosagem. No entanto, este método difere no fato de inserir os finos já na definição inicial da argamassa para corrigir os parâmetros de auto adensabilidade, e só depois são definidos os agregados graúdos.

A dosagem é um processo que permite a obtenção das características desejadas para o concreto, e o mesmo é verdade também para pastas. No contexto internacional, inúmeros foram os métodos desenvolvidos desde os protótipos de Okamura em 1986. De acordo com Shi *et al* (2015) os métodos de dosagem de mistura, existentes para CAA na literatura, com base nos princípios de dosagem, podem ser classificados em cinco categorias: métodos empíricos de projeto, método de resistência à compressão, método de embalagem dos agregados, métodos baseados em modelo estatístico fatorial e métodos baseados na reologia de pasta. No entanto, além das categorias apresentadas por Shi *et al* (2015), são acrescentados os métodos de planejamento de misturas para experimentos, que vem ganhando espaço nas pesquisas como métodos de dosagem nos últimos 5 anos. Mais detalhes de cada um desses métodos estão descritos no **APÊNDICE 1**.

Diversos métodos de dosagem são apresentados por SHI *et al.* (2015): empíricos, nos quais tentativas sucessivas são feitas até conseguir o traço desejado; métodos baseados em propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido como reologia e resistência à compressão; métodos estatísticos, entre outros. O planejamento experimental de misturas faz parte dos métodos estatísticos que variam, representativamente, as proporções dos componentes básicos de uma mistura, entre limites pré-estabelecidos para analisar o comportamento da mesma.

O método de dosagem empírico é baseado em dados empíricos envolvendo teor de agregados graúdos e miúdos, teor de adições minerais, quantidade de água e cimento, e dosagem de superplastificante para determinar as proporções iniciais de mistura. As melhores estimativas das proporções de mistura, para as propriedades requeridas, são realizadas através de várias misturas experimentais e ajustes. Os métodos de dosagem que seguem essa linha de raciocínio são: (OKAMURA e

OZAWA, 1995); (EDAMATSU, SUGAMATA e OUCHI, 2003); (DOMONE, 2009); (KHALEEL e RASAK, 2014).

Os métodos baseados na resistência à compressão determinam cimento, aditivos minerais, água e conteúdo de agregados com base na resistência à compressão necessária. Esse tipo de método de dosagem de mistura determina proporções de mistura obtendo-se "o mínimo vazio" entre os agregados, baseando-se no modelo de empacotamento compressível, depois aplicando pastas para preencher o vazio entre os agregados. Os métodos de dosagem que seguem essa linha de raciocínio são: (GHAZI e AL JADIRI, 2010) e (DINAKAR, SETHY e SAHOO, 2013).

O método de embalagem dos agregados baseia-se nos efeitos de diferentes parâmetros chave, tais como: o conteúdo de misturas de cimento e adições minerais, razão água / pó, volume de agregado graúdo e dosagem de SP, na trabalhabilidade e resistência à compressão de CAA fresco e endurecido. Intervalos razoáveis para cada parâmetro são determinados, e a proporção de mistura é calculada de acordo com o projeto da mistura de concreto convencional. Os métodos de dosagem que seguem essa linha de raciocínio são: (HWANG e TSAI, 2005); (PETERSSON, BILLBERG e VAN 1996); (SU, *et al.* 2001); (SEDRAN e DE LARRARD, 1996) e (SHI e WU, 2005); (SEBAIBI, *et al.*, 2013); (KANADASAN e RAZAK, 2014); (LI, *et al.*, 2017) e (MA, *et al.*, 2017).

Muitos pesquisadores têm investigado o CAA a partir da reologia de pasta com o intuito de reduzir o trabalho e os materiais de laboratório, fornecendo uma base para o controle da qualidade. Na visão de Tutikian *et al* (2012), pode haver divergências em relação à abordagem de pastas e argamassas separadamente, ou em relação aos critérios para definição da composição granular, teor de materiais finos, e ainda, imposição de limites de relação A/C ou A/F, volume de pasta e teor de aditivos.

Embora este método possa reduzir a quantidade de trabalho e materiais, a proporção final do mix de CAA pode estar longe de ser econômico. Os ajustes V_W/V_P e Sp/P têm grandes etapas de mudança; assim, os resultados dos testes entre as misturas experimentais são não determinados. Os métodos de dosagem que seguem essa linha de raciocínio são: (SAAK, *et al.*, 2001); (BUI, AKKAYA e SHA, 2002), (FERRARA, *et al.*, 2007); (NANTHAGOPALAM e SAMATHAM, 2010); (BUCHER, *et*

al., 2014); (Wu e AN, 2014) e (Wu, *et al.*, 2016). Para evitar essas desvantagens, a correlação entre variáveis de mistura e características reológicas devem ser previstas inicialmente.

Essa necessidade impulsionou diversos pesquisadores a propor métodos de dosagem de mistura baseados em modelos fatoriais estatísticos que visam estabelecer as correlações entre variáveis de mistura e propriedades do CAA; estes modelos estatísticos são válidos para uma ampla gama de proporções de mistura e são capazes de prever as propriedades de trabalhabilidade do CAA. Assim, através de todas as proporções de mistura de CAA que se prevê serem adequadas para o alvo das propriedades de trabalhabilidade, pode encontrar-se a mistura mais económica e robusta, isto é, para conseguir a otimização da mistura do CAA. Os métodos de dosagem que seguem essa linha de raciocínio são: (KHAYAT, *et al.*, 1999); (OZBAY, *et al.*, 2009); (AHMED e HASSAN, 2014); (WU e AN, 2014); (ALYMAC, *et al.*, 2016); (HABIBI, *et al.*, 2018); (SELVARAJ e SILVARAMAM, 2018) e (ZHOU *et al.*, 2018).

As abordagens de modelagem estatística são comumente usadas para identificar a significância relativa dos parâmetros primários da mistura e seus efeitos acoplados nas propriedades relevantes do concreto (KIM, *et al.*, 2004). Existem dois tipos de DOE: projeto fatorial, que considera cada variável como fator independente, e projeto de mistura, que considera cada variável como um componente dependente. Nos últimos anos, a abordagem de projeto de mistura para dosagem do CAA vem ganhando espaço; os métodos de dosagem desenvolvidos, que seguem essa linha de raciocínio são: (BOUZIANI, 2013); (OLUWNO e KARADELIS, 2015); (NIE e AN, 2016) e (LEITE, 2016).

3.5 Planejamento Experimental de Misturas

Os planejamentos experimentais para análise das misturas têm ampliado suas aplicações na ciência, na engenharia e consequentemente na indústria, devido à mistura de matérias-primas, ser extremamente importante para os diversos setores tecnológicos (CORNELL, 1990). Os experimentos são, naturalmente, intrínsecos em qualquer processo de tomada de decisões científicas e servirão como base para a investigação do processo (MONTGOMERY e RUNGER, 2014). Nesse sentido, os

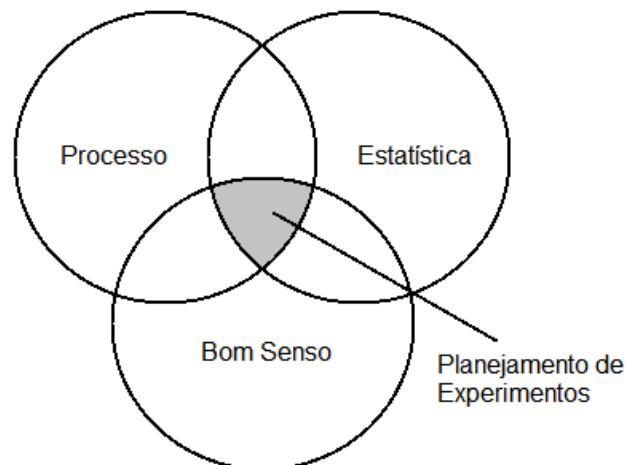
experimentos são necessários para validar teorias e formular novas hipóteses; planejar os experimentos, com o intuito de reproduzí-los sob condições controláveis, é fundamental para obter resultados mais confiáveis, com menor variabilidade, reduzindo o tempo de análise e os custos envolvidos no processo (MONTGOMERY, 1991).

No entanto, a influência de uma variável em outra de interesse, devido a certo número de fatores, atuando sobre um sistema, produz uma quantidade de respostas. Dessa forma, o sistema atua como uma função, desconhecida inicialmente, que opera sobre as variáveis de entrada (fatores) e produz as respostas observadas (saídas) (BARROS NETO, et al, 2010). Quando variáveis de mistura estão envolvidas em uma otimização, o resultado depende da proporção em que esses componentes se encontram e seus níveis não podem ser variados sem levar em conta os outros componentes. Em outras palavras, misturas são sistemas, cujas propriedades, dependem das proporções relativas dos seus componentes, e não de suas concentrações (COSCIONE et al, 2005).

Dois tipos de variáveis podem influenciar a resposta de um sistema químico: as de processo e as de mistura. Fatores como pH, temperatura e concentrações dos reagentes são exemplos típicos de variáveis de processo. Alterações nos níveis das variáveis de processo podem afetar o resultado experimental, através de seus efeitos principais (efeitos individuais) e de interação com outras variáveis de processo, mas seus níveis podem ser variados de forma independente uns dos outros durante o modelamento, como acontece nos planejamentos fatoriais (BARROS et al., 2002).

Segundo Rodrigues e Lemma (2014), para que se atinjam os objetivos desejados para o planejamento de experimentos, é necessário que haja uma interação entre o processo, a estatística e o bom senso (Figura 7), pois, o desenvolvimento exige a otimização dos processos produtivos, através da diminuição de tempo, custos e aumento da produtividade e da qualidade dos produtos, o que tem consagrado essa metodologia.

Figura 7 - Interação entre o conhecimento do processo, a estatística e o bom senso na definição do planejamento experimental e na análise dos resultados



Fonte: Rodrigues e Lemma, (2014)

A Escolha do planejamento experimental envolve o tamanho do experimento (número de réplicas), sequência de execução dos ensaios e determinação da necessidade de aleatorização ou do uso de blocos. Ao escolher o planejamento experimental, o pesquisador reduz o número total de ensaios, consequentemente reduz os custos da pesquisa (MACEDO, 2007).

3.5.1 Modelos estatísticos

De acordo com Macedo (2007), na utilização de métodos estatísticos para a análise dos resultados, o planejamento experimental deve estar fundamentado numa metodologia também estatística, possibilitando avaliar os erros experimentais que afetam esses resultados. Montgomery (1991) apresenta três princípios básicos para a definição de um plano experimental: o uso de réplicas, da aleatorização e de blocos.

A réplica consiste na aplicação de uma mesma condição pré-estabelecida em unidades experimentais diferentes (MONTGOMERY, 1991). É o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação (GALDAMEZ, 2002). A utilização desta técnica permite ao pesquisador obter uma estimativa de como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se esses resultados são estatisticamente diferentes, ou seja, se as

diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas (MONTGOMERY, 1991).

Aleatorização é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes (GALDAMEZ, 2002). Ocorre quando a seqüência dos ensaios e a escolha dos materiais utilizados são aleatórias. Uma das exigências do uso deste método para o planejamento experimental, e para a análise dos resultados é que as variáveis estudadas, e os erros experimentais, apresentem caráter aleatório (RODRIGUES E LEMMA, 2014). Esse conceito também se refere ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação (GALDAMEZ, 2002).

Por outro lado, pode-se optar pela blocagem da amostra, que é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não controláveis) dos experimentos. O objetivo é criar um experimento (grupo ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas (GALDAMEZ, 2002). O uso da blocagem aumenta a precisão no processo de experimentação, reduzindo a influência de variáveis incontroláveis. Esta técnica permite comparar as condições de interesse na experimentação por bloco, além de restringir a aleatorização à seqüência de ensaios interna dos blocos e não ao conjunto total de ensaios. (MONTGOMERY, 1991).

Desde que os ensaios sejam realizados com réplicas, o que significa que para uma mesma combinação de níveis sejam feitos mais de um ensaio, é possível que se tenha uma estimativa do erro experimental (DE BARROS NETO *et al.*, 2010). Segundo De Barros Neto *et al* (2010) os erros experimentais podem ser grosseiros devido à falta de atenção, pouco treino ou imperícia do operador; sistemáticos quando afetam os resultados no mesmo sentido e aleatórios quando podem ser associados à natural variabilidade dos processos físicos, levando a flutuações nos valores medidos. A variabilidade dos resultados do experimento, devido aos desvios cometidos durante o processo, independente do tipo de erro, pode ser traduzido por meio da variância de um ensaio.

Segundo Leite (2018) ao admitir que a variância das repetições é a mesma na região investigada, pode-se combinar os resultados de todos os ensaios e obter uma estimativa com um maior número de graus de liberdade, tendo em vista que o número de graus de liberdade (ν) é dado por $\nu_i = n_i - 1$. Quando o número de repetições

for igual para todos os ensaios à estimativa da variância experimental pode ser calculada pela simples média aritmética das variâncias dos ensaios.

Por fim, De Barros Neto *et al* (2010) afirma que deve-se inicialmente, decidir quais são os fatores e as respostas de interesse, em seguida, define-se o objetivo dos experimentos, para que se possa escolher o planejamento mais apropriado. Na análise dos dados, podem ser usados métodos estatísticos com o objetivo de garantir a confiabilidade e a validade dos resultados, estabelecendo conclusões objetivas e que o erro associado às conclusões esteja de acordo com o grau de confiança pré-estabelecido. É importante lembrar que esses métodos não informam se uma determinada variável apresenta ou não um efeito em particular (MACEDO, 2007).

3.5.1.1 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é utilizado para estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. É classificado como um método do tipo simultâneo, em que as variáveis que apresentam influências significativas na resposta são avaliadas simultaneamente. As variáveis são escolhidas e os experimentos são realizados em diferentes valores destes fatores para todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável selecionada. Diz-se que há interação dessas variáveis, quando o efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis (MACEDO, 2007).

Existem planejamentos fatoriais em que são exploradas uma ou mais variáveis com números de níveis diferentes. Assim, a representação do fatorial passa a ser, por exemplo, $2^1 \times 3^2 \times 5^3$, onde, 2, 3 e 5 são níveis para as variáveis 1, 2 e 3, respectivamente. Nos planejamentos experimentais em que as variáveis são exploradas em 2 níveis é comum codificá-los, usando os sinais (+) e (-). A atribuição destes sinais é feita arbitrariamente, não interferindo na realização dos experimentos ou interpretação dos resultados, além de permitir ilustrar o planejamento sob forma de matrizes de planejamento (MACEDO, 2007).

Os níveis não são necessariamente valores numéricos, uma vez que se pode ter variáveis qualitativas, ao invés de quantitativas, como fatores para o planejamento. Nesse caso, os níveis podem ser denominados também como classes (DE BARROS NETO, *et al.*, 2010). Os autores também definem que o modelo estatístico do planejamento fatorial é dado pela equação 1.

Equação 1 -

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Onde:

μ é a média dos resultados

τ_i é o efeito principal do fator A,

β_j é o efeito principal do fator B,

$(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos fatores A e B;

ε_{ijk} é o erro experimental

A primeira etapa do planejamento fatorial é especificar os níveis e os fatores que devem ser estudados no sistema, isto é, os valores dos fatores (ou as classes, nos casos qualitativos) que se usa para fazer os experimentos. Quando se tem muitos fatores ou muitos níveis em estudo, o esquema fatorial completo passa a ser inviável, pois o número de ensaios passa a ser muito alto. Uma solução pode ser a adoção de esquemas fatoriais incompletos, ou fracionários (RODRIGUES e LEMMA, 2009; DE BARROS NETO, *et al.*, 2010).

3.5.1.2 Planejamento de misturas

Nos experimentos com misturas as variáveis de resposta são dependentes apenas das proporções dos ingredientes presentes na formulação (CORNELL, 1990). Dois ou mais ingredientes são misturados para formar um produto final. As respostas variam quando são feitas alterações nas proporções dos ingredientes que a compõe e não são influenciadas pela quantidade total da mistura (SCHEFFÉ, 1958; CORNELL, 2002).

O objetivo do planejamento dos experimentos com misturas é a determinação das proporções dos ingredientes da formulação que resultem em um produto com características preestabelecidas (RIBEIRO, *et al.*, 2000). Nesse sentido, as respostas são tidas como uma função das propriedades mescladas conjuntas dos ingredientes na mistura (CORNELL, 2002).

As propriedades de uma mistura são determinadas pelas proporções de seus componentes, e não por valores absolutos; com isso, as proporções, sejam elas em

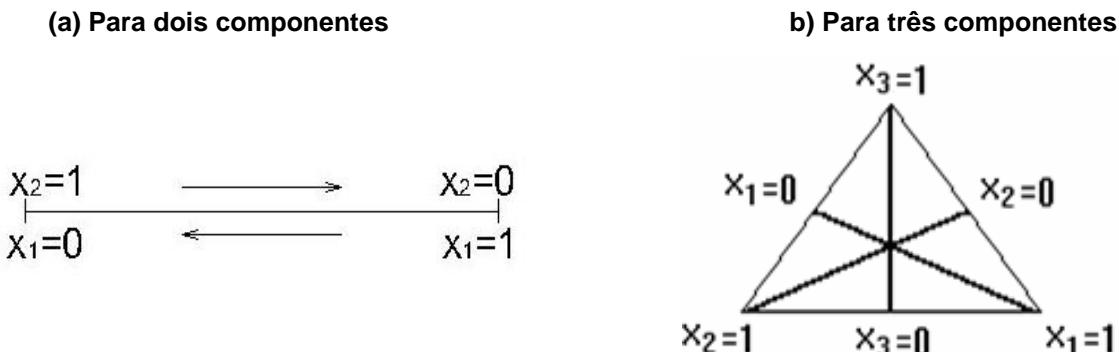
volume, em peso ou em número de mols, são valores não negativos e sempre variam entre zero e um. Além disso, somando-se as proporções de todos os ingredientes, obtém-se um somatório igual a um, ou seja, 100%. (SCHEFFÉ, 1958; DE BARROS NETO, *et al*, 2010).

$$\text{Equação 2} - \quad 0 \leq x_i \leq 1 \text{ com } i = 1, 2, \dots, q$$

$$\text{Equação 3} - \quad \sum x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$$

O sistema utilizado para formulações é o sistema de coordenadas simplex (Figura 8). A partir das equações 2 e 3, percebe-se que, como as proporções dos ingredientes devem ter uma soma igual a 1, as proporções x_i são variáveis dependentes, ou seja, a alteração da proporção de um dos componentes da formulação causará mudança na proporção de pelo menos um dos outros componentes (MACEDO, 2007).

Figura 8 – Sistema de coordenadas “simplex”



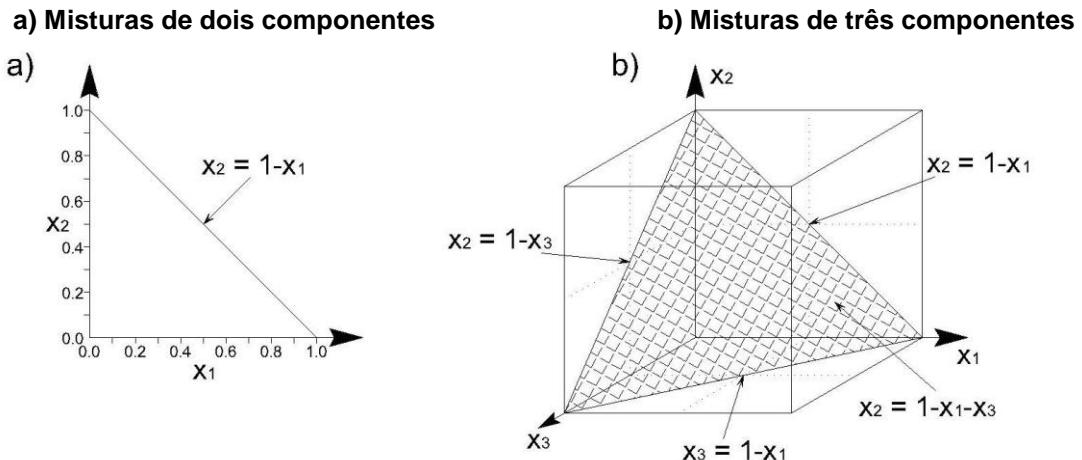
Fonte: Cornell, (1990)

De acordo com Macedo (2007) o espaço experimental resultante de uma mistura de três componentes, conforme ilustrado na Figura 7 é um triângulo equilátero e na representação cartesiana, seus eixos representam os três componentes da mistura. Os pontos no interior do espaço simplex representam misturas em que todas as proporções dos ingredientes são diferentes de zero. O ponto central representa uma mistura onde as proporções dos ingredientes são iguais; os meios dos lados correspondem a misturas de dois componentes, em que cada um está na proporção

de 50%; o ponto de interseção das três medianas corresponde a uma mistura em que cada ingrediente contribui com 33,33%.

Devido às restrições das equações 2 e 3, supondo que q seja o número de ingredientes, o espaço experimental assume a forma de uma região com $(q-1)$ dimensões denominada simplex. (CORNELL, 2002). A Figura 9 mostra misturas de dois e três componentes em eixos cartesianos. Em uma mistura de dois componentes, quando plotada em um eixo cartesiano, representa-se pela reta $(x_2=1-x_1)$ e para misturas de três componentes, torna-se $(x_1+x_2+x_3=1)$ que forma um triângulo equilátero, onde qualquer combinação possível para esta mistura estará inserida (DE BARROS NETO, *et al*, 2010).

Figura 9 – Representação de misturas em eixos cartesianos

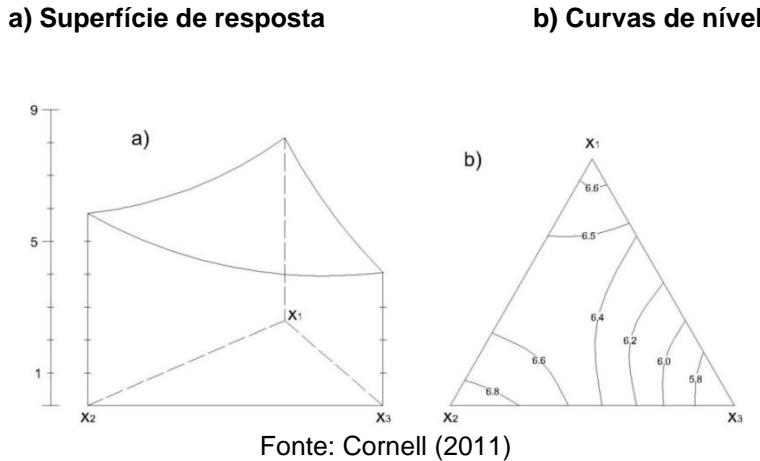


Fonte: De Barros Neto, *et al* (2010)

Um planejamento de experimentos com mistura tem como objetivo a adequação de um modelo que relate as respostas às proporções relativas de seus componentes por meio de uma equação matemática. Assim, modelando-se uma superfície de resposta, pode-se ter: a influência de cada componente, sozinho ou em combinação com os outros, na resposta, permitindo ao pesquisador, por exemplo, trabalhar apenas com os componentes mais reativos ou mais eficientes. Além disso, prever as respostas para qualquer combinação de proporções dos componentes e identificar as composições que proporcionem valores de respostas em um campo desejado (CORNELL, 2002). A variação de uma resposta, conforme Figura 10, pode

ser descrita por uma superfície de resposta desenhada acima do triângulo, ou por meio de curvas de nível (LEITE, 2018).

Figura 10 – Representação da variação de uma propriedade em uma mistura de três componentes



A primeira etapa para o planejamento de misturas é a definição do modelo estatístico que descreverá as respostas em termos das proporções dos ingredientes. Esta etapa é diretamente relacionada ao planejamento experimental, pois o modelo escolhido inicialmente irá determinar quais as composições mais interessantes, do ponto de vista estatístico, para a obtenção dos parâmetros desse modelo (BARROS NETO, *et al.*, 2010). Os modelos que serão apresentados a seguir são conhecidos na literatura como modelos de Scheffé, pois são modelos baseados nos polinômios canônicos apresentados por (SCHEFFÉ, 1958). O modelo mais simples para o estudo de misturas de dois componentes é o modelo aditivo, ou linear (BARROS NETO, *et al.*, 2010):

$$\text{Equação 4 - } yi = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon_i$$

Onde:

y_i : é o valor experimental da resposta,

β_0, β_1 e β_2 : são os parâmetros do modelo;

εi: é o erro aleatório.

De acordo com Leite (2018) o modelo linear é simples e não exige, nem ao menos que sejam realizadas misturas entre os componentes, uma vez que pode ser definido, apenas por experimentos com os componentes puros e não considera os

efeitos de interações entre os componentes. Assim, se faz necessário que sejam feitos experimentos em pontos onde ocorra necessariamente a “mistura”, seja para uma ampliação do modelo, ou mesmo para verificar se este é adequado. Ampliando-se o modelo linear para o modelo quadrático tem-se:

Equação 5 -

$$\hat{y} = b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_{12} * x_1 x_2$$

O modelo quadrático apresenta apenas um termo a mais do que o modelo linear, comparando as equações 5 e 4. Para obter os parâmetros do modelo são necessários três experimentos em pontos distintos. Dois destes são os mesmos utilizados para a definição do modelo linear, o terceiro deve ser uma mistura binária de composição qualquer.

Por fim, têm-se o modelo cúbico (equação 6), com os termos b_1* , b_2* e b_3* , que continuam sendo os mesmos do modelo linear: $b_i* = y_i$ para $i = 1, 2$ e 3 . Esses termos representam o efeito de interação entre os componentes que estes multiplicam. Entretanto, tal consideração pode ser relevante para o entendimento da variação da propriedade estudada, dessa forma, pode-se atribuir termos cúbicos ao modelo. A equação que define o modelo cúbico para a mistura de três componentes é:

$$\text{Equação 6} - \hat{y} = b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_{12} * x_1 x_2 + b_{13} * x_1 x_3 + b_{23} * x_2 x_3 + d_{12} * x_1 x_2 (x_1 - x_2) + d_{13} * x_1 x_3 (x_1 - x_3) + d_{23} * x_2 x_3 (x_2 - x_3) + b_{123} * x_1 x_2 x_3$$

Esse modelo com dez termos é conhecido como modelo cúbico completo, porém em muitas aplicações práticas, esse modelo pode ser simplificado e os termos d_{ij*} podem ser retirados. Dessa forma, passa-se a ter sete termos e é conhecido por modelo cúbico especial que é definido pela equação 7 (CORNELL, 2011):

$$\text{Equação: 7} - \hat{y} = b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_{12} * x_1 x_2 + b_{13} * x_1 x_3 + b_{23} * x_2 x_3 + b_{123} * x_1 x_2 x_3$$

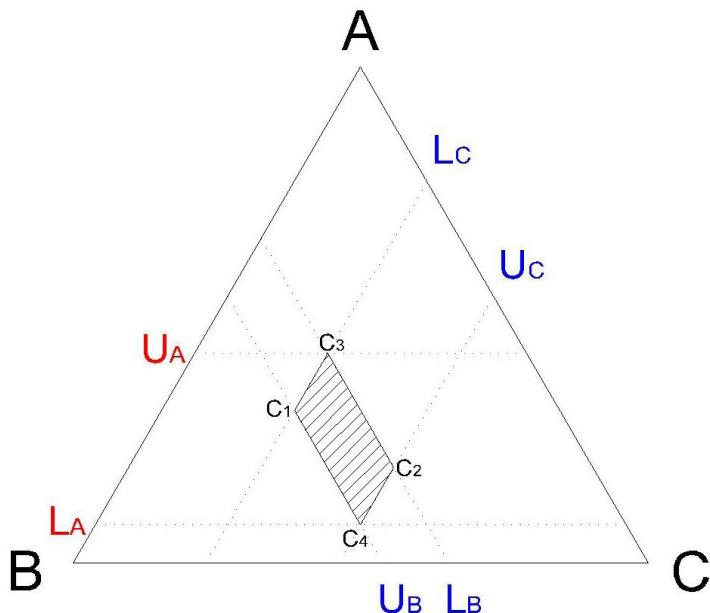
Essa equação (modelo cúbico completo) foi utilizada como base para definir os coeficientes gerados pelos dados na pesquisa de LEITE (2018), na análise de regressão.

3.5.1.3 Método do pseudo-simplex duplo (LEITE, 2018).

A primeira etapa do método, consiste na otimização da pasta, e é feita por meio do planejamento de mistura. Os planejamentos experimentais para o estudo de misturas consistem na premissa de que a soma dos seus componentes é sempre igual a 100%. Nesse contexto, de acordo com Leite (2018) o método do pseudo simplex duplo, aplica-se à mistura de três componentes em que são aplicadas restrições superiores ou inferiores e superiores em dois destes componentes, de forma que o terceiro também fica restrito mediante a definição de mistura, ou seja, a resposta da mistura é estudada efetivamente pela alteração da proporção de dois ingredientes e o terceiro fica condicionado ao valor restante para se completar 100%.

Outra restrição do modelo é que haja, no máximo, um único ponto onde ocorra mistura binária entre os componentes que sofreram as restrições, isto é, a proporção do componente que não sofreu restrições só é zero em, no máximo, um ponto. Quando observadas essas considerações, pode-se perceber que a região experimental é representada por uma sub-região do simplex original em forma de paralelogramo. A Figura 11 representa um esquema dessa sub-região.

Figura 11 – Esquema de simplex para misturas de três componentes (A,B e C) com restrições inferiores e superiores



Fonte: LEITE, (2018)

Segundo o autor o método sugere que sejam criados quatro pseudocomponentes (C_1 , C_2 , C_3 e C_4) a partir da união dos componentes originais nas proporções que representam os vértices da sub-região formada pelas restrições no material B e C (Figura 10). A partir desses compósitos, monta-se uma região de um losango através da união de duas regiões simplex formadas pelas misturas de $C_1+C_2+C_3$ e $C_1+C_2+C_4$, onde os compósitos C_3 e C_4 ficam em vértices opostos do losango e as retas que definem a mistura binária entre C_1 e C_2 nos dois simplex são coincidentes. O uso desse método implica que a variável de resposta será descrita por duas equações, uma para cada mistura de três compósitos. Por isso é necessário que seja definida uma rotina que indique quando deve ser utilizada cada uma dessas equações em termos dos componentes iniciais da mistura (LEITE, 2018).

Nesse sentido, quando são impostas restrições inferiores e superiores, ou seja, para um caso em particular onde $RL=RU$, ou seja, as retas de limite inferior e superior são coincidentes, em alguns ou em todos os componentes, a utilização de pseudocomponentes se apresenta como uma proposta interessante para definir a região experimental, que nesse caso, não se trata de um simplex e então, sugere-se a utilização de planejamentos alternativos (CORNELL, 2011).

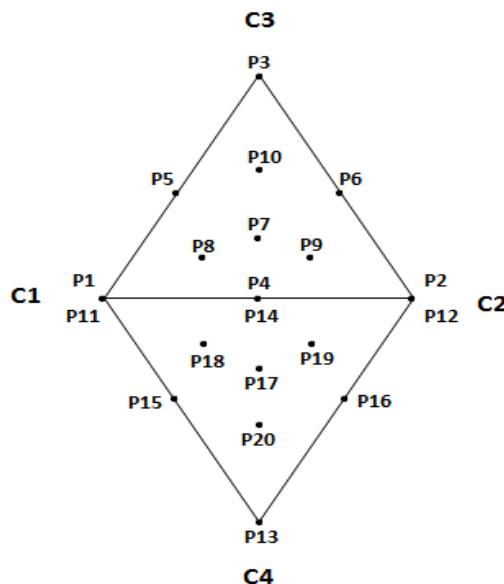
Equação $R_L = 1 - \sum_{i=1}^q L_i = 1 - (0,008 + 0,2 + 0,58) = 0,212$ 8

$$R_U = \sum_{i=1}^q U_i - 1 = (0,02 + 0,4 + 0,792) - 1 = 0,212$$

Equação 9

Satisfazendo a condição supracitada, de acordo com Leite (2018) o experimento pôde ser analisado pelo método apresentado por McLean e Anderson (1966) que sugere um algoritmo para a localização dos vértices, o centro das arestas e o centroide da região restrita e utilizá-los como pontos de coleta de dados, os quais são analisados por modelos do tipo sugerido por Scheffé (1958). Para o experimento serão definidos 10 (dez) pontos, sendo três vértices (pontos puros), três binários (entre dois vértices), um centroide e três pontos no interior de região simplex, de acordo com a Figura 12 que apresenta a região simplex e seus respectivos pontos.

Figura 12 – Pontos experimentais do pseudo simplex duplo



Fonte: Elaboração própria

Analizando os pontos na Figura 12, observa-se que os pontos sob a reta C1-C2 são coincidentes, ou seja, são os mesmos tanto para o simplex C1-C2-C3 como

para C₁-C₂-C₄. Além dos pontos e dos pseudocomponentes é preciso definir os limites de proporção dos materiais para mistura, nesse sentido, foram estabelecidos limite inferior e superior para o aditivo e a adição mineral e o cimento Portland que teve suas proporções, definidas em função destes, de acordo com a equação 10.

Equação - 10

$$L_i \leq x_i \leq U_i;$$

Onde:

x_i : Proporção do material i na mistura;

L_i : Limite inferior da proporção do material i na mistura;

U_i : Limite superior da proporção do material i na mistura;

x_{SP} : Proporção, em massa, de superplasticificante na mistura de cimento, adição mineral e superplasticificante.

x_{AM} : Proporção, em massa, de adição mineral na mistura de cimento, adição mineral e superplasticificante.

Estabelecidos os limites inferiores e superiores do aditivo e da adição mineral, devido ao planejamento de mistura tratar-se de um composto unitário, onde a soma dos seus componentes é igual a 1 ou 100%, é possível estabelecer automaticamente os limites para o cimento Portland, haja vista, que será a quantidade complementar para compor a mistura, ou seja, terá seu limite inferior condicionado aos limites superiores dos demais componentes, bem como seu limite superior condicionado aos limites inferiores dos outros componentes da mistura.

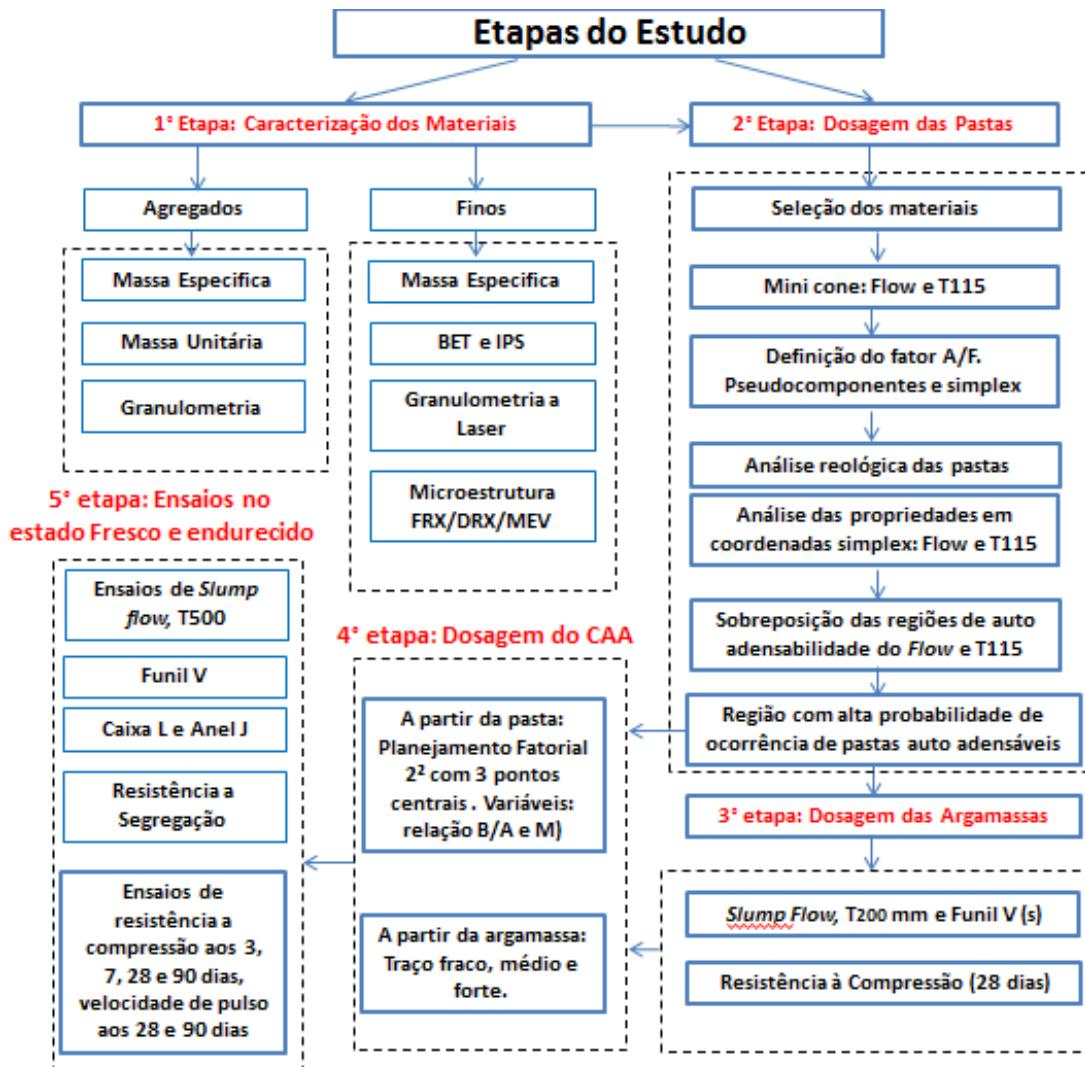
Após definir os pontos experimentais, as misturas foram submetidas ao teste de mini cone para avaliar espalhamento e tempo de escoamento (T₁₁₅), os resultados foram submetidos à análise estatística e representados em coordenadas simplex, para delimitar uma região de grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis, a fim de definir composições de pastas constitutivas para dosagem de argamassas e concretos auto adensáveis.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos realizados na execução do programa experimental que visaram alcançar os objetivos deste trabalho, a

validação do método de obtenção de pastas por meio do pseudo simplex duplo para dosagem do CAA. Dessa forma, foram realizados ensaios nas pastas, argamassas e concretos no estado fresco e endurecido, no que diz respeito às suas respectivas propriedades. O programa experimental utilizado nessa pesquisa foi dividido em cinco etapas, conforme o fluxograma de execução da pesquisa (Figura 13).

Figura 13 - Programa experimental (etapas do estudo)



Fonte: Elaboração própria

A primeira etapa é a caracterização dos materiais constituintes do concreto, tendo sido realizada através dos ensaios de massa específica e granulometria (materiais finos e agregados), além das análises por fluorescência de raios-x (FRX), difração de raios-x (DRX), microscopia eletrônica por varredura (MEV),

empacotamento dos finos, massa específica, IPS e análise de área superficial pelo método BET.

Na segunda etapa do trabalho, a análise das pastas foi feita com base no planejamento de mistura. As pastas foram submetidas aos ensaios de mini cone (*slump flow* e T_{115}), e foram representadas e analisadas em coordenada simplex. As pastas foram submetidas aos ensaios de cone Marsh para auxiliar na análise da viscosidade em conformidade com o T_{115} e ao ensaio de sedimentação pelo método de decantação de partículas sólidas na proveta, para avaliar a sua exsudação. Por fim, foram realizados ensaios na termogravimetria das pastas aos 28 e 90 dias (DTG), para auxiliar na análise das propriedades mecânicas do concreto. A terceira etapa, referente às argamassas, consistiu em produzir argamassas auto adensáveis a partir de pastas auto adensáveis na região simplex. As argamassas foram dosadas respeitando-se os parâmetros da EFNARC (2005) e foram submetidas à ensaios de *Slump flow*, T_{200} , Funil V e resistência à compressão aos 28 dias.

A quarta etapa, referente à dosagem do CAA foi feita de duas formas: a primeira, escolhendo-se uma pasta na região de auto adensabilidade das coordenadas simplex, definindo 7 (sete) misturas de CAA, por meio de um planejamento fatorial 2^2 com 3 pontos centrais. As variáveis da matriz de planejamento foram a relação B/A (brita/areia) e o M (materiais finos/materiais granulares), respeitando-se as recomendações da EFNARC (2005). A segunda forma de dosagem consistiu em produzir argamassas para definir o teor de agregado miúdo, conforme recomendações da EFNARC (2005) e em seguida definir três traços de CAA (fraco, médio e forte), conforme metodologia de Gomes (2002). Os concretos produzidos foram submetidos a ensaios de: *Slump flow*, T_{500} , anel J, funil V, caixa L e resistência à segregação pelo método da peneira 200. A quinta e última etapa da pesquisa, referente aos ensaios do concreto no estado endurecido, foram realizadas após cura úmida em tanques de água com cal hidratada. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias e velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 90 dias.

4.1 Caracterização dos Materiais

Foram realizados ensaios de caracterização do cimento, das adições minerais e dos agregados (areia e brita). Na sequência serão descritos os procedimentos e materiais utilizados, bem como as respectivas normas técnicas.

4.1.1 Materiais Finos

Como materiais finos, foi utilizado o CP V – ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial), para uma desforma do concreto mais rápida e ainda, três tipos de adição mineral: pozolana da casca do arroz (PCA) cedida pela empresa PILECO NOBRE que produz o material no município de Alegrete/RS; metacaulim da marca BZ (MK) cedido pela empresa BBM situada no município de Soledade/PB; fíler calcário (F) cedido pela MIBRA minérios que produz esse material na cidade de Campina Grande PB. Tanto para o CP–V como para as adições minerais, foram realizados ensaios de massa específica, densidade de empacotamento, distanciamento entre partículas (IPS) e microestrutura (área de superfície BET, granulometria a laser e FRX), apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas do cimento e adições minerais

| | CP – V | FC | MK | PCA |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Analise Química | | | | |
| CaO | 62,250% | 89,840% | 0,924% | 0,216% |
| SiO₂ | 22,110% | 4,755% | 55,740% | 98,330% |
| Al₂O₃ | 3,980% | 1,089% | 34,770% | 0,599% |
| SO₃ | 3,510% | | 0,279% | |
| Fe₂O₃ | 3,410% | 0,292% | 5,190% | 0,062% |
| MgO | 1,970% | | 0,041% | 0,205% |
| P₂O₅ | 0,640% | 0,022% | 0,019% | 0,290% |
| Na₂O | 0,420% | 0,535% | 0,030% | |
| BaO | 0,090% | 0,152% | 0,013% | |
| SrO | 0,080% | 0,047% | 0,037% | |
| Análise Física | | | | |
| Massa Específica (g/cm³) | 3,08 | 2,70 | 2,64 | 2,08 |
| Diâmetro médio das partículas (μm) | 9,06 | 7,88 | 13,22 | 10,79 |
| Área Superficial BET (m²/g) | 2,48 | 1,58 | 1,83 | 5,08 |
| Densidade de empacotamento (g/cm³) | 0,91 | 0,83 | 0,80 | 0,91 |
| IPS | | 0,032 | 0,050 | 0,035 |

** CP- v – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; FC – fíler calcário

Fonte: Elaboração própria

O ensaio de massa específica foi realizado tanto para o cimento, como para as adições minerais, de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Todos os ensaios de massa específica dos materiais no estado anidro foram realizados no LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas) do Centro de Tecnologia da UFPB.

O ensaio de granulometria a laser teve como intuito obter a distribuição granulométrica dos finos numa faixa de 0,10 μm a 500 μm (100 classes). Foi utilizado o método a seco, com pressão/distribuição de 2500,00 mb e medidas de 15s/5s/0. Os principais dados obtidos são o diâmetro máximo de 10, 50 e 90% das partículas e o diâmetro médio. Antes de submetidos ao ensaio, os finos passam pela peneira mesh 200, e são separados em sacos zipelock para protegê-los da umidade. Esse procedimento também foi feito para os ensaios de área de superfície BET, FRX, DRX e MEV.

As áreas superficiais específicas destes materiais (cimento, metacaulim, PCA e fíler calcário) foram analisadas em um equipamento de modelo BELSORP II-MINI da marca BEL JAPAN através de adsorção/dessorção de nitrogênio a 77 K. As amostras passaram por um tratamento térmico inicial a 200 °C por duas horas, em fluxo de nitrogênio, para remoção de possíveis gases adsorvidos nas amostras. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais – IFPB, Campus João Pessoa.

O ensaio para densidade de empacotamento foi realizado, nas misturas entre o CPV – ARI e as adições minerais, nas proporções referentes ao limite inferior e superior estabelecidos para a região simplex, e o ponto médio, dessas proporções, em um total de 3 (três) combinações para cada adição mineral. O ensaio foi realizado utilizando um recipiente de volume e massa conhecida, onde seriam inseridas as misturas de cimento e adição mineral, homogeneizadas com o auxílio de um saco zipelock. O resultado (**APÊNDICE 2**) é a razão entre a massa da mistura e o volume do recipiente que ela ocupa. Esse ensaio foi realizado no LABEME do Centro de Tecnologia da UFPB.

O distanciamento entre as partículas (IPS) é calculado de acordo com o método de Cardoso (2009), de acordo com a equação 11, onde V_{sa} é a área superficial volumétrica (produto entre a área superficial e a densidade real do pó), V_s

é a fração volumétrica dos sólidos e P_{of} é a porosidade de empacotamento das partículas.

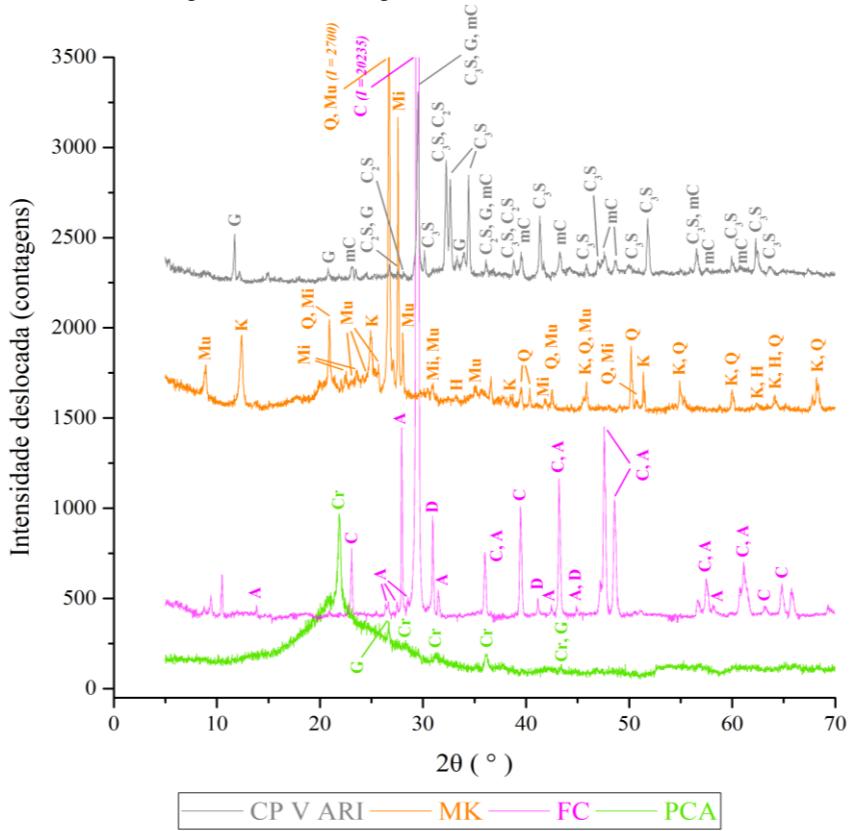
Equação -11

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right]$$

A análise de fluorescência de raios-x pelo método semiquantitativo foi feita a fim de realizar análise química sob atmosfera a vácuo. Para tal utilizou-se o equipamento Shimadzu modelo XRF-1800, onde os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg de amostra em pó fino depositado em um porta amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios X na faixa de energia de interesse. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização dos Materiais do Centro de Tecnologia da UFPB.

A caracterização por difração de raios-x foi realizada no Laboratório de Caracterização dos Materiais do Centro de Tecnologia da UFPB, equipamento Shimadzu modelo XDR-6000, sob as seguintes condições: radiação de CuKa que gera um feixe de raios-x em 40 Kv e 30 mA, com comprimento de onda $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$; a coleta de dados se deu num intervalo, ângulo inicial (2θ) de $3,0^\circ$ a $80,0^\circ$ passo angular de $0,02^\circ$ e velocidade de leitura $0,5^\circ/\text{min}$. A identificação dos picos foi feita pelo software X' Pert HighScore Plus 2.0. A identificação dos picos foi feita pelo software X' Pert HighScore Plus 2.0. Na Figuras 14 são mostrados os difratogramas do cimento, metacaulim, pozolana da casca de arroz e fíler calcário.

Figura 14 - Difratogramas dos finos utilizados



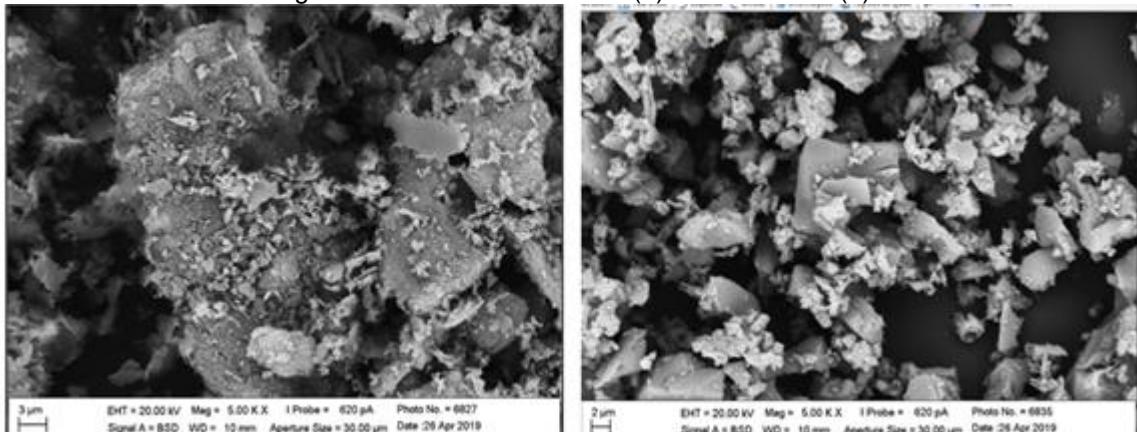
G = Gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); mC = Calcita magnesiana ($\text{Mg}_{0,03}\text{Ca}_{0,97}\text{CO}_3$); C₂S = (Ca_2SiO_4); C₃S = ($\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$); Mu = Muscovita [(K, Ca, Na)(Al, Mg, Fe)₂(Si, Al)₄O₁₀(OH)₂]; K = Caulinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄]; Q = Quartz (SiO₂); Mi = Microclínio (KAlSi₃O₈); H = Hematita (Fe₂O₃); A = Anortita (CaAl₂Si₂O₈); C = Calcita (CaCO₃); D = Dolomita [CaMg(CO₃)₂]; Cr = Cristobalita (SiO₂); G = Grafite (C).

Fonte: ?????

O difratograma de raios X apresentado na Figura 14 mostra que o cimento Portland V - ARI (Alta Resistência Inicial) é um material formado por Calcita, Gipsita e Silicatos de cálcio hidratado; o metacaulim é um aluminossilicato com picos de quartzo amorfo; a PCA é um material predominantemente amorfo e composto de sílica na forma de quartzo e o Fíler calcário, conforme ilustra a Figura 14 se mostrou predominantemente cristalino e tem natureza calcítica, pois é composto por calcita (CaCO₃).

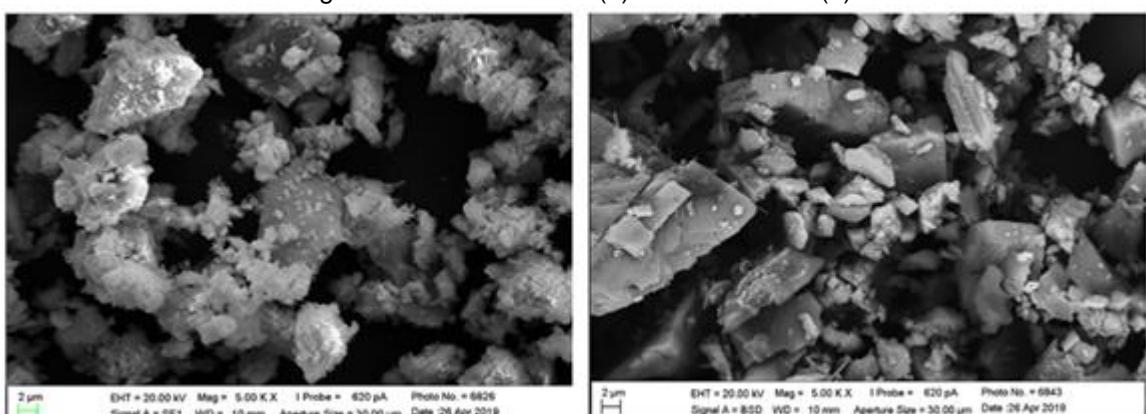
A caracterização por varredura da microestrutura (MEV) examina a superfície dos finos, de modo que o feixe de elétrons não atravessa o espécime. Um feixe eletrônico estreito é dirigido sobre a superfície das partículas, 'varrendo-a' de um lado para outro regularmente. Nas Figuras 15 e 16 são mostradas as imagens da microestrutura do cimento, MK, PCA e FC.

Figura 15 - MEV do CP V ARI (a) e Metacaulim (b)



Fonte: Elaboração própria

Figura 16 - MEV da PCA (a) e Fíler calcário (b)



Fonte: Elaboração própria

As partículas do metacaulim apresentaram formas variadas e superfície bastante rugosa, conforme apresentado na Figura 15 (b). A PCA apresentou partículas com formas mais uniformes e superfícies rugosas, como mostrado na Figura 16 (a). Já o Fíler, assim como a PCA, apresentou partículas com formatos regulares, porém, com superfícies mais lisas, conforme Figura 16 (b).

4.1.2 Agregados

Com relação ao agregado miúdo (areia natural quartzosa de rio) e agregado graúdo (brita granítica), eles foram comprados em depósitos de materiais de construção, nas proximidades da UFPB em João Pessoa/PB. Os ensaios de massa específica dos agregados miúdos e graúdos foram realizados de acordo com as

normas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009), respectivamente. A Tabela 2 apresenta os resultados desses ensaios.

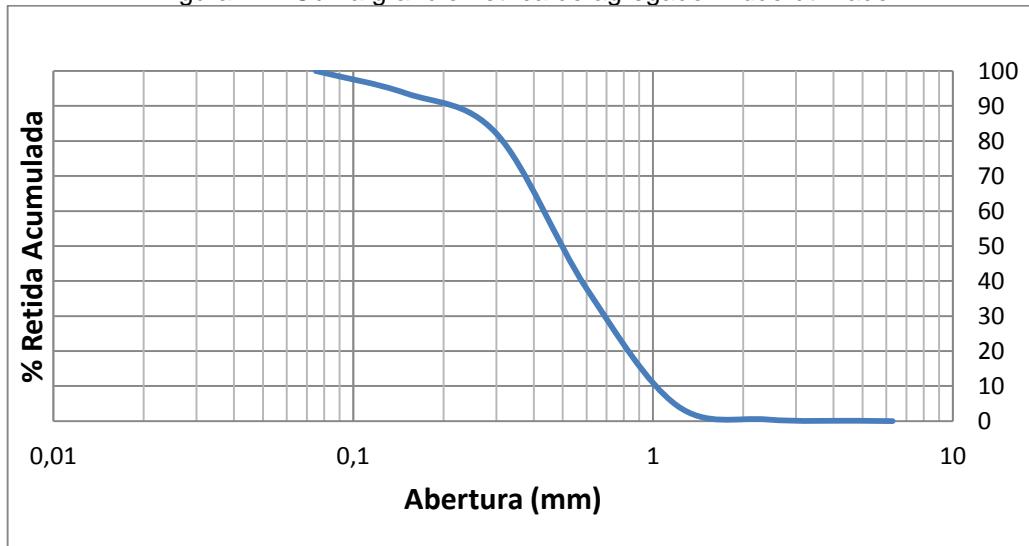
Tabela 2- Propriedades físicas dos agregados

| | Aggregado Miúdo | Aggregado graúdo |
|--|-----------------|------------------|
| Massa Específica (g/cm³) | 2,63 | 2,65 |
| Massa Unitária (g/cm³) | 1,59 | 1,43 |
| Diâmetro Máximo (mm) | 2,36 | 9,5 |
| Modulo de Finura | 2,27 | |

Fonte: Elaboração própria

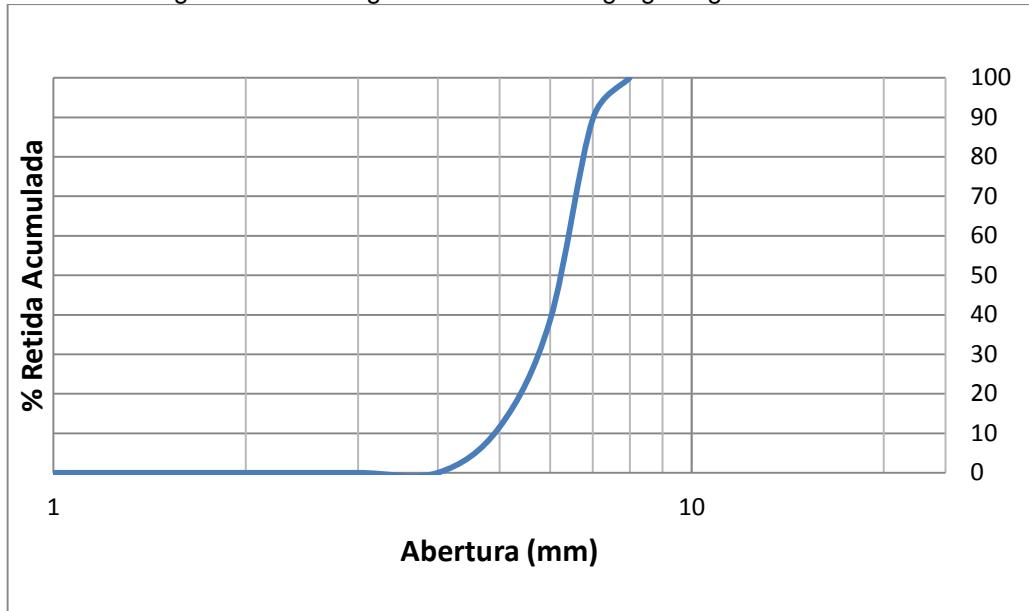
A granulometria dos agregados graúdo e miúdo (brita granítica e areia natural quartzosa) foi realizada por peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2001). Por este procedimento obteve-se as curvas granulométricas, apresentadas nas Figuras 17 e 18; os diâmetros máximos e módulos de finura estão apresentados na Tabela 2.

Figura 17 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado



Fonte: Elaboração própria

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado



Fonte: Elaboração própria

Além da granulometria, massa específica e unitária, foi realizado ensaio de empacotamento dos agregados (**APÊNDICE 2**), simulando o empacotamento dos grãos com as três relações B/A (0,82; 0,95 e 1,08), utilizadas na dosagem dos traços de CAA dessa pesquisa.

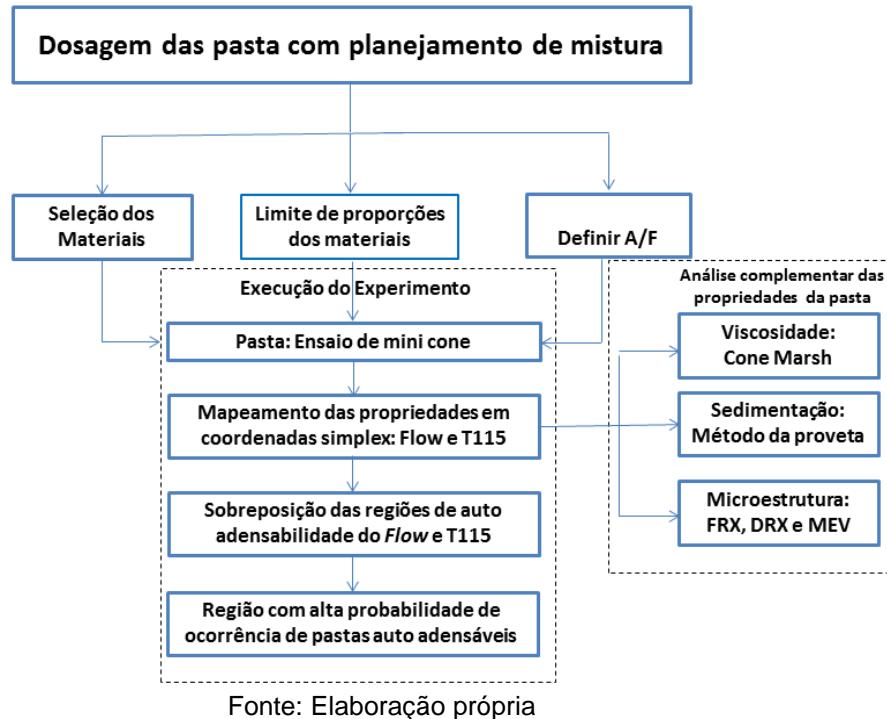
4.1.3 Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo ADVA™ CAST 525 fornecido pela Grace Brasil LTDA. Trata-se de um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos e com aspecto líquido, que não contém cloreto, apresenta um pH entre 3,00 e 5,50 e massa específica de 1,06 g/cm³.

4.2 Dosagem das pastas utilizando o método do pseudo simplex duplo

Nesta seção serão apresentados os métodos e estratégias que foram utilizados na etapa de dosagem das pastas. A princípio, será apresentado um fluxograma (Figura 19), mostrando as etapas do experimento, em seguida, serão descritas cada uma dessas etapas.

Figura 19 - Etapas da dosagem das pastas por meio do pseudo simplex duplo



Conforme fluxograma, apresentado na Figura 19, a dosagem das pastas consiste em 5 (cinco) etapas: Planejamento experimental das misturas, teste do mini cone (espalhamento e T_{115} mm), análise estatística das pastas (espalhamento e T_{115} mm), ensaios de cone Marsh e sedimentação das pastas e análise termogravimétrica das pastas.

4.2.1 Planejamento experimental das misturas

Essa etapa da dosagem consiste em definir os pontos experimentais que serão submetidos a testes no mini cone, a fim de verificar a espalhamento (*slump flow*) e a viscosidade (T_{115} mm). Para tal, inicialmente, foram definidas as variáveis do sistema (adição mineral, superplastificante e cimento) e seus respectivos limites de proporção para mistura. Nesse sentido, foram estabelecidos limite inferior e superior para o aditivo e a adição mineral, e o cimento Portland teve suas proporções definidas em função destes, de acordo com a equação 10 da seção 3.5.1.3.

Deve-se salientar que a relação A/F foi blocada no sistema, ou seja, teve seu valor constante para todos os pontos experimentais do pseudo simplex duplo. Além

dos pontos e dos pseudocomponentes, analisando-se os pontos na Figura 12, da seção 3.5.1.3, referente a região formada pelo pseudo simplex duplo, observa-se que os pontos sob a reta C1-C2 são coincidentes, ou seja, são os mesmos tanto para o simplex C1-C2-C3 como para C1-C2-C4, o que gera 17 pontos experimentais, conforme mostra o **APÊNDICE 3**, uma vez que os pontos sob a reta C1-C2-C4 (P1, P2 e P4) são idênticos.

Para definir esses limites, com vistas a alcançar os objetivos da dosagem, que é obter um concreto autoadensável com menor relação A/F e maior percentual de substituição de cimento por adição mineral possível, e então obter um CADAR (concreto auto adensável de alta resistência), seguindo os parâmetros do trabalho de Gomes (2002), foram tomados como referência pesquisas anteriores, vigentes na literatura, para definir os limites inferiores e superiores de substituição de cimento por adição mineral. Os percentuais mais utilizados e avaliados em outros trabalhos de CAA's com adições minerais variaram de 5,0% a 30% para o metacaulim (LE e LUDWIG, 2016; KAVITHA *et al.*, 2015), até 40% para PCA (LE e LUDWIG, 2016; SAFIUDDIN *et al.*, 2010; KANNAN e GANESAN *et al.*, 2014; CHOPRA, *et al.*, 2015) e até 35% para o fíler calcário (UYSAL e YILMAZ, 2011; UYSAL e YILMAZ, 2012; SILVA e BRITO, 2015; LEITE, 2016).

Essas pesquisas nortearam os testes iniciais para definir os pseudocomponentes. Conforme mostra (**APÊNDICE 4**), foram definidas até 5 (cinco) relações A/F e testados vários intervalos entre limite inferior e superior para cada relação A/F, submetendo ao teste do minicone o ponto mais fluido (menor percentual de adição e maior de aditivo) e o menos fluido (maior percentual de adição e menor de aditivo) dentre os pontos experimentais do pseudo simplex duplo.

Após a seleção dos materiais (cimento, adição mineral e aditivo) dos respectivos percentuais de utilização na mistura, e da definição da relação A/F; por meio do teste de mini cone, foi efetuada uma análise estatística dos resultados de espalhamento e T_{115} , e posteriormente, representados em coordenadas simplex. Em seguida, escolheu-se uma pasta com características auto adensáveis, contida na região simplex e então, foi efetuada uma dosagem, por meio de planejamento fatorial, combinando volume de pasta e esqueleto granular e, por meio da dosagem de argamassas para definir o teor de agregado miúdo e a partir dessas argamassas definirem o CAA.

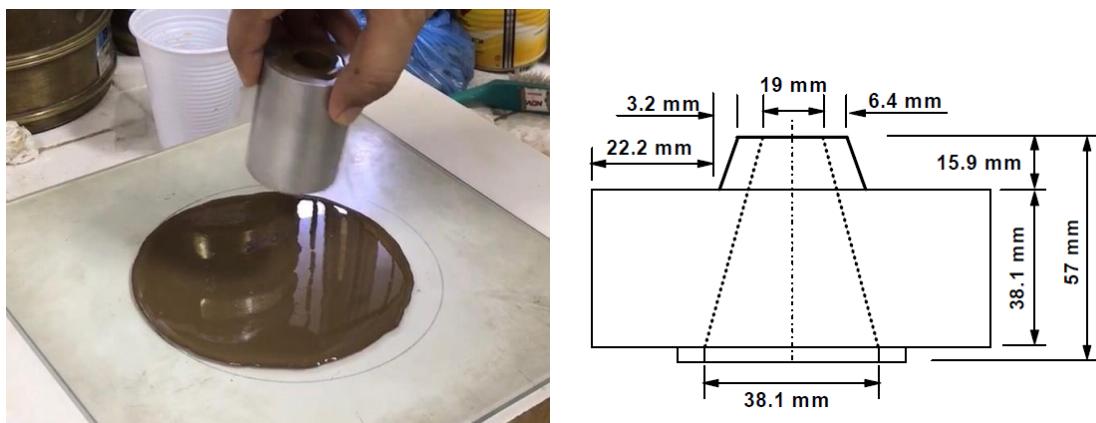
4.2.2 Ensaio do minicone

No ensaio de minicone, foi considerado para as pastas, uma massa de 500g (cimento, adição mineral e superplasticante) mais a massa da água. Os materiais foram pesados em uma balança com 0,1 g de precisão e estes foram misturados manualmente e mecanicamente para verificar diferenças entre os processos de mistura dos componentes. As pastas processadas manualmente foram misturadas em um recipiente até adquirir homogeneidade. Já as mecanizadas foram misturadas em uma cuba metálica: inicialmente de forma manual, para unir todos os componentes, e depois, foram misturadas durante 3 minutos, em um misturador mecânico (haste acoplada a uma furadeira). Em ambos os processos, a mistura foi feita de acordo com o procedimento utilizado no trabalho de (LEITE, 2018):

- ✓ Misturam-se os finos (cimento e adição mineral) com auxílio de um saco zipelock;
- ✓ Os finos são colocados em um recipiente, e 25% da água é adicionada para umidificar a mistura seca, mexendo os finos com uma espátula;
- ✓ Adiciona-se 25% da água ao copo com superplasticante e, aos poucos, derrama-se sobre os finos, enquanto estes são mexidos com a espátula. Essa etapa é repetida mais duas vezes para evitar que fiquem sobras de superplasticante no copo;
- ✓ A pasta é misturada até a homogeneidade ser obtida.

O ensaio do minicone (Figura 20) segue conforme o proposto por Gomes *et al.* (2003), sendo a cronometragem do tempo de espalhamento de 115 mm (T_{115}) feita em vídeo, pois frequentemente, trata-se de um intervalo de tempo muito pequeno e de difícil registro por meio de um cronômetro manual.

Figura 20 - Ensaio de minicone (a) e aparato utilizado no ensaio de minicone (b)



Fonte: GOMES et al. (2003)

O procedimento, em ambos os processos, manual e mecânico, que foi feito três vezes para cada pasta, passa pelas seguintes etapas (LEITE, 2016):

- ✓ Nivela-se a placa de vidro onde o ensaio será realizado;
- ✓ Centraliza-se o minicone na placa de vidro;
- ✓ A pasta é colocada dentro do minicone até preenchê-lo completamente;
- ✓ Levanta-se o minicone verticalmente para a pasta espalhar;
- ✓ Ao final do espalhamento, quatro medidas de diâmetro espaçadas de forma radialmente homogêneas são feitas. O espalhamento final será a média dessas medidas, sendo o desvio padrão feito também.
- ✓ O T_{115} é medido com uso de software de edição de vídeo, para melhor precisão.

Para o ensaio do minicone, verifica-se a capacidade de espalhamento da pasta, medindo o diâmetro final e o tempo que a amostra leva para atingir o espalhamento de 115 mm de diâmetro. Nesse sentido, as relações ótimas de dosagens são aquelas nas quais os resultados de espalhamento final estejam na faixa de 180 ± 10 mm e o tempo de espalhamento entre o intervalo de $2 \text{ s} \leq T_{115} \leq 4 \text{ s}$ (GOMES et al., 2003). No entanto, nesse trabalho, foram utilizados três tipos de adições minerais diferentes, com comportamentos reológicos diferentes e, optou-se por definir os intervalos de espalhamento e T_{115} mm, por meio de análise visual de estabilidade das pastas, em que são escolhidas pastas com espalhamento contínuo, sem sinais de segregação ou exsudação.

4.2.3 Análise estatística

As análises estatísticas foram efetuadas com o auxílio do software *Statistica* versão 8.0 da *StatSoft. Inc.®* onde as respostas foram plotadas em um sistema de coordenadas simplex. Os resultados de espalhamento e T_{115} mm das pastas foram inseridos no software que gerou uma região simplex, dividida por curvas de nível, onde foi possível definir uma região com grande probabilidade das pastas apresentarem propriedades auto adensáveis, uma vez que essa região é definida num intervalo de confiança de 95%.

Para verificar a confiabilidade dos dados e a qualidade do modelo gerado por esses dados, foram realizados teste R, com o intuito de verificar a correlação entre os dados, e o teste F para comparar os modelos estatísticos que foram ajustados aos dados da pesquisa, a fim de identificar o modelo que melhor se ajusta à população da qual esses dados foram amostrados (Tabela ANOVA). Além do F calculado em função dos dados, a tabela ANOVA fornece a regressão (efeitos), os resíduos, o erro puro e a falta de ajuste nos modelos linear, quadrático e espacial cúbico.

Na tabela ANOVA é possível verificar se as variáveis e suas interações são representativas ou não. Quando o modelo espacial cúbico é representativo, segundo a ANOVA, é preciso verificar a diferença entre as médias do modelo espacial cúbico e o modelo quadrático por meio da análise de variância entre esses dois modelos. Se a interação entre as três variáveis do modelo for nula, o modelo espacial cúbico pode ser desprezado e adota-se o modelo quadrático. Além disso, por meio do gráfico de Pareto, que mostra a probabilidade de cada variável e suas interações é possível reduzir o número de componentes do modelo estatístico, desprezando-se as variáveis não representativas, uma vez que seus efeitos não influenciam nas respostas do sistema.

Após o teste F, incluindo a análise das parcelas da falta de ajuste e do erro puro das variáveis *Flow* e T_{115} ; e, evidenciar-se que a falta de ajuste é estatisticamente significativa, ou seja, os valores de F são maiores do que os valores críticos da distribuição F para um intervalo de confiança 95%, ainda assim é possível chegar à conclusão de que o modelo é confiável, comparando os resultados obtidos no experimento e as respostas esperadas pelo modelo gerado. Com isso, se faz necessário comparar os valores estimados pelo modelo estatístico e os resultados

obtidos no experimento, em todos os pontos experimentais do pseudo simplex duplo, e verificar se a maior parte desses resultados se encontra dentro da margem mínima de erro, estabelecida pelo modelo.

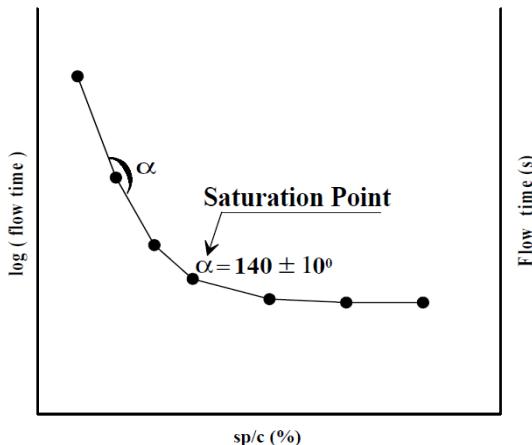
4.2.4 Ensaio de funil Marsh

No ensaio de funil Marsh, o tempo de escoamento de pastas com diferentes teores de superplasticante é usado para determinar o ponto de saturação, que é o ponto a partir do qual o aumento no teor de superplasticante é insignificante para a viscosidade da pasta. O método busca determinar a dosagem de superplasticante na pasta de cimento, usando como critério o controle de sua fluidez.

O ponto de saturação (Figura 21) foi obtido usando-se os dados de tempo de escoamento *versus* relação SP/C. O tempo de escoamento depende da geometria do cone, do volume de material colocado no cone e da composição do material utilizado. O valor de saturação de superplasticante, em geral, é determinado pelo ponto onde a inclinação do gráfico diminui drasticamente (DE LARRAND *et al.*, 1997; GOMES *et al.*, 2003).

O método utilizado nesta pesquisa tem como objetivo analisar a viscosidade das pastas, usando-se os dados de tempo de fluxo *versus* relação sp/c obtidos no teste do cone de Marsh. O tempo de fluxo pode ser considerado como uma função do aparelho (ou seja, tipo, geometria), do volume de material colocado no cone (V) e da natureza do fluido (isto é, composição do material). Além da análise da viscosidade, é possível determinar o ponto de saturação; o log (FLT) *versus* relação sp/c (%) é plotado, como na Figura 16 e o ângulo interno α é determinado em cada ponto de dados. O ponto de saturação é tomado como a dosagem onde α está dentro do intervalo $140^\circ \pm 10^\circ$ (GOMES, 2002).

Figura 21 - Procedimento para determinação do ponto de saturação



Fonte: Gomes, (2002)

O procedimento usado para realizar o ensaio com o cone Marsh tem início colocando-se o cone em uma posição vertical e estável, com o auxílio de um tripé. Na sequência, é umedecido o interior do cone, e com o orifício no fundo do cone fechado, é despejada a pasta dentro do cone. Então, após um período de tempo prescrito (0 a 15 segundos) é liberado o fundo do cone e simultaneamente inicia-se a cronometragem do tempo de escoamento da pasta. A medição é encerrada quando o volume de 500 ml de pasta escoar.

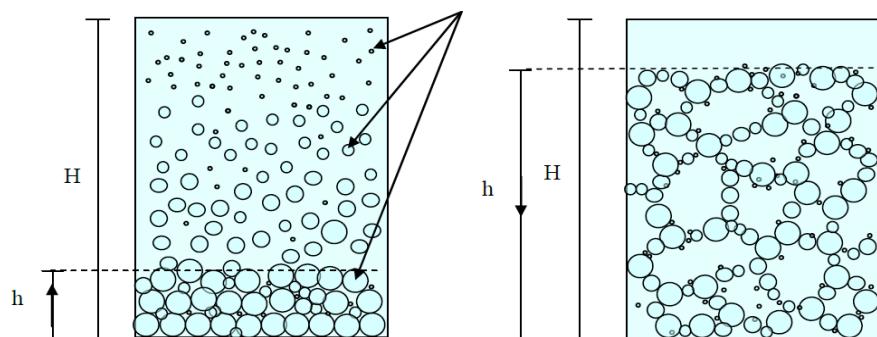
Foram 9 (nove) pastas submetidas ao teste de cone Marsh, produzidas a partir da mistura mecânica de 1000 g de componentes entre cimento, adição mineral e superplasticificante, que geram um volume de aproximadamente 500 ml de pasta. Os traços dessas pastas foram definidos, variando-se teor de adição mineral e superplasticificante entre limite inferior, superior e o ponto médio. O teste foi realizado com o intuito de consolidar os resultados do T_{115} mm, no tocante à análise da viscosidade e auxiliar na escolha da pasta, dentro da região simplex, com menor quantidade de adição mineral e superplasticificante, ou seja, a mais económica para obter o CAA.

No geral, a dosagem de saturação leva à alta fluidez na pasta, mas sem causar exsudação ou segregação de seus componentes. Para ajudar a análise da estabilidade das pastas é preciso avaliar a sua exsudação, que pode ser feito por meio do ensaio de sedimentação.

4.2.5 Ensaio de sedimentação de pastas com provetas graduadas

A avaliação da exsudação das pastas foi realizada por meio do ensaio de sedimentação com uso de proveta graduada e teve como base o estudo de MANSUR e MANSUR (2009). Neste ensaio, foram produzidas pastas a partir de mistura mecânica de 1000 g de componentes entre cimento, adição mineral e superplasticificante, que geram um volume de aproximadamente 500 ml. A sedimentação ocorrida foi determinada ao longo do tempo até que nenhuma variação fosse observada por 30 minutos.

Figura 22 - Comportamento de sedimentação de (a) suspensões estáveis e (b) suspensões floculadas/coaguladas



Fonte: MANSUR e MANSUR (2009)

O procedimento usado para realizar o ensaio de sedimentação é feito introduzindo-se cuidadosamente a pasta numa proveta graduada de 500 ml. Em seguida, com auxílio de um bastão, procedem-se as medições dos resíduos depositados no fundo da proveta em 1, 3, 5, 10, 15, 20 minutos, e com medições posteriores a cada 10 minutos, até que as medições se repitam por ao menos 3 (três) vezes. A sedimentação ocorrida é correspondente ao valor $(H-h)/H$, onde H é a altura total do volume de pasta e h a altura total do resíduos sedimentados no fundo da proveta, conforme ilustrado na figura 22. Com isso é possível construir o gráfico da sedimentação em função do tempo e avaliar a exsudação das pastas.

4.2.6 Análise termogravimétrica das pastas

As pastas escolhidas na região simplex, como constitutivas para argamassas e concretos auto adensáveis, passaram por análise termogravimétrica com o objetivo de verificar os ganhos e perdas de massa na composição dos produtos de hidratação, geradas aos 28 e 90 dias de cura úmida.

As amostras foram produzidas nas mesmas condições que as pastas submetidas ao teste com o minicone, e as mesmas condições de cura úmida, das argamassas e concretos em que essas pastas serviram como base de constituição. Ao chegar ao respectivo período de hidratação, as pastas foram inseridas em estufa durante 24 h a uma temperatura de 100°C e, após esfriar, foram destorreadas e passaram pela peneira mesh 200, para então serem submetidas ao ensaio de termogravimetria.

4.3 Dosagem do CAA

Nesta seção, serão apresentados os dois processos de dosagem utilizados nessa pesquisa. O primeiro processo consiste na reologia das pastas como base para prever o comportamento do CAA e o segundo, parte da premissa de que a argamassa governa a trabalhabilidade do CAA. Esses dois processos são apresentados na sequência.

4.3.1 Método do planejamento fatorial do concreto

Nesse processo de dosagem, segue-se com a premissa de que a pasta governa as propriedades do concreto no estado fresco (SAAK, *et al.*, 2001; BUI, *et al.*, 2002; NANTHAGOPALAM e SAMATHAM, 2009; DINIZ, 2013; BUCHER, *et al.*, 2014; WU e AN, 2014 e WU *et al.*, 2016). Para compor o planejamento fatorial, foi escolhida uma composição de pasta, dentre os pontos experimentais situados na região de auto adensabilidade, obtida por meio do ensaio de minicone, e foi definida a composição do esqueleto granular, B/A (relação brita/areia), de acordo com os parâmetros da (EFNARC, 2005).

O concreto foi produzido variando-se o M (relação agregados/finos) e a relação B/A, que foram as variáveis do planejamento fatorial 2² com três pontos centrais. A matriz de planejamento para esse experimento é apresentada na Tabela

3, já os níveis das variáveis dessa matriz (M e relação B/A) são apresentados na Tabela 4 e foram definidos de acordo com as recomendações da (EFNARC, 2005).

Tabela 3 – Matriz para o planejamento fatorial 2² com três pontos centrais

| Traço | M | RELAÇÃO B/A |
|-------|----|-------------|
| 1 | 1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 |
| 3 | 1 | 1 |
| 4 | -1 | 1 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 - Variáveis e níveis do planejamento fatorial para o concreto

| VARIÁVEL | NÍVEIS | | |
|----------|--------|------|------|
| | 1 | 0 | -1 |
| M | 4,00 | 3,25 | 2,50 |
| B/A | 1,08 | 0,95 | 0,82 |

Fonte: Elaboração própria

Os níveis de M são definidos para proporcionar a lubrificação necessária, com a menor quantidade de pasta possível, a fim de conferir fluidez e coesão ao concreto, haja vista que a pasta é a responsável por suas características de fluxo. Já a relação B/A deve compor o esqueleto granular com o menor índice de vazios, para que assim, necessite de uma menor quantidade de pasta para o seu empacotamento.

A partir da pasta de constituição, calcula-se a quantidade de agregados por meio da relação M, para um volume de concreto de 30 l. Em seguida, calcula-se a quantidade de agregado miúdo e graúdo por meio da relação B/A. Após calcular o volume de agregado miúdo e graúdo, desmembram-se os constituintes da pasta e divide-se cimento, adição mineral, superplasticificante, água, areia e brita, por suas respectivas massas específicas, para obter o traço em peso e consequentemente, as quantidades para produzir o CAA.

Nessa pesquisa, será utilizada outra maneira de dosar o concreto auto adensável a partir da análise estatística das pastas, ajustando o teor de agregado miúdo por meio da dosagem das argamassas.

4.3.2 Método do binário de argamassa

Nesse processo de dosagem, segue-se com a premissa de que a argamassa governa as propriedades do concreto no estado fresco (DOMONE, *et al.*, 2006; WU e AN, 2014 NEPOMUCENO, *et al.*, 2016; ALYAMAC, *et al.*, 2016; HABIB, *et al* 2018 e MA, *et al* 2017).

Para iniciar o estudo em argamassa, o primeiro passo é escolher uma composição de pasta, dentro da região de auto adensabilidade, estabelecida pelo método do pseudo simplex duplo; em seguida, é definido um binário, que combina teores de pasta e de agregado miúdo. Nesta pesquisa, foram definidos teores de pasta entre 50,0% e 60,0%, haja vista que de acordo com a EFNARC (2005) o teor de agregado miúdo em argamassas não deve ser inferior a 40,0% do peso total em massa. Nesse sentido, foram submetidos aos ensaios de *Flow* e *Funil V*, 5 (cinco) traços de argamassa, sendo feita uma repetição. Buscou-se a produção de uma argamassa de modo a se obter os parâmetros necessários para conferir sua auto adensabilidade. A necessidade de pequenas correções foi considerada.

As argamassas foram produzidas, optando-se pelo processo mecânico de homogeneização, por meio de argamassadeira. Para compor a argamassa, pesou-se entre areia, cimento, adição mineral e aditivo, uma massa equivalente a 5000 g. A água foi pesada à parte, devido ser fixa em função da quantidade de finos (A/F). A produção das argamassas seguiu as seguintes etapas:

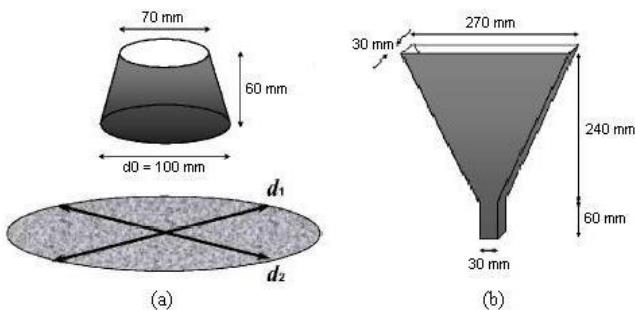
- ✓ Homogeneização do pó (cimento e adição mineral), com o auxílio de um saco zipelock;
- ✓ Inserir numa bacia os finos já misturados e, adicionar 25,0% da água, para promover a mistura da pasta, repete-se esse procedimento mais duas vezes para diluir e remover os resíduos nas paredes do recipiente;
- ✓ Procede-se a homogeneização mecânica das mistura (três minutos), sendo metade do tempo em velocidade média e a outra metade em velocidade alta.
- ✓ Adiciona-se a mistura o agregado miúdo e a mistura é homogeneizada mecanicamente na argamassadeira por mais três minutos, sendo metade do tempo em velocidade média e a outra metade em velocidade alta.

Segundo Domone (2006), no CAA as partículas do agregado graúdo são envoltas em uma camada de argamassa que deve ser suficientemente espessa para promover a fluidez necessária, assim como conferir ao concreto adequada estabilidade e habilidade de passagem. Dessa forma, há uma relação entre a reologia

desses dois materiais, sendo possível a realização de ensaios em argamassa para a previsão do comportamento do concreto.

Os ensaios *slump flow* e funil em V, cujos equipamentos são apresentados na Figura 23, apresentam correlação com as constantes do modelo de Bingham, tensão de escoamento inicial e viscosidade plástica, respectivamente. O uso combinado desses dois testes, então, permite uma descrição adequada da reologia das argamassas, na ausência de um equipamento mais sofisticado, como reômetro ou viscosímetro.

Figura 23 - Teste de auto adensabilidade das argamassas: (a) Slump Flow e (b) Funil em V



Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

O espalhamento da argamassa é feito por meio do *slump flow*; preenche-se o cone com argamassa, eleva-o e verifica-se a média dos dois diâmetros, perpendiculares entre si formados pelo espalhamento da argamassa. A viscosidade é mensurada por meio do ensaio de funil em V; preenche-se o funil com argamassa, abre-se a portinhola na base do funil, deixando a argamassa livre para fluir por uma abertura de dimensões pré-estabelecidas, e mede-se o tempo que a argamassa leva para escoar por esta abertura.

Após realizar os ensaios no estado fresco, as argamassas foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias. O diâmetro final do espalhamento e o tempo que a argamassa leva para alcançar o diâmetro de 200 mm, junto com o tempo registrado no funil V, classificam a argamassa de acordo com os critérios de auto adensabilidade.

Neste trabalho, assim como na análise das pastas, serão aceitas as argamassas que apresentarem fluidez e coesão, sem sinais de segregação ou exsudação, haja vista que cada pozolana apresenta módulos de finura diferente, o que interfere nas propriedades reológicas. Além disso, devem apresentar resistência

à compressão aos 28 dias satisfatória, e assim, a argamassa que atingir todos esses fatores será escolhida para compor o CAA.

Ainda que não apresentem características auto adensáveis, podem ser feitos ajustes, para corrigir as inconformidades identificadas e promover coesão e fluidez às argamassas para alcançar os padrões de auto adensabilidade. Nesse sentido, os diferentes ensaios para caracterização do CAA no estado fresco podem apresentar resultados inesperados por diversas causas, conforme mostra o Quadro 1, que apresenta as possíveis causas de não conformidades e as recomendações para ações corretivas.

Quadro 1 - Ações corretivas para corrigir não conformidades nos resultados dos ensaios no CAA

| Ensaio | Resultado | Possível causa | Ações Corretivas |
|-------------|----------------------|---|---|
| Slump Flow | Inferior ao esperado | Alta viscosidade e tensão de cisalhamento | Aumentar o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP |
| | Superior ao esperado | Baixa viscosidade e segregação | Diminuir o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP; aumentar o teor de finos e areia mais finas |
| T 200 (s) | Inferior ao esperado | Viscosidade muito baixa | Diminuir o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP; aumentar o teor de finos e areia mais finas |
| | Superior ao esperado | Alta viscosidade e tensão de cisalhamento | Aumentar o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP |
| Funil V (s) | Inferior ao esperado | Viscosidade muito baixa | Diminuir o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP; aumentar o teor de finos e areia mais finas |
| | Superior ao esperado | Alta viscosidade e tensão de cisalhamento | Aumentar o teor de água, volume de pasta e a dosagem de SP |

Fonte: Adaptado de Manuel (2005)

Após ajustar as argamassas e identificar o teor de agregado miúdo, a fim de compor a dosagem do concreto é preciso mensurar a resistência à compressão, e em seguida, identificar o teor de agregado graúdo, capaz de proporcionar fluidez, viscosidade e coesão ao concreto. Nesse sentido, é preciso analisar as recomendações da EFNARC (2005) que estabelece os limites de utilização dos constituintes do CAA no processo de dosagem. Dessa forma, de acordo com o que estabelece a norma o CAA deve ter em sua composição de 270 l/m³ a 360 l/m³ de agregado graúdo. A partir desse intervalo, são definidos três traços para o CAA,

conforme mostra a Tabela 5, que apresenta as composições de traços fraco, médio e forte, de acordo com a quantidade de argamassa proposta para sua constituição.

Tabela 5 – Composição do CAA a partir dos ensaios de argamassa.

| TRAÇO | RELAÇÃO B/A | (l/m ³) AGREGADO GRAÚDO |
|-------|-------------|-------------------------------------|
| FRACO | 1,08 | 0,360 |
| MÉDIO | 0,95 | 0,315 |
| FORTE | 0,82 | 0,270 |

Fonte: Elaboração própria

A partir da argamassa de constituição, calcula-se quantidade de agregado graúdo por meio da relação B/A, para um volume de concreto de 30 l. Após calcular o volume de agregado graúdo, desmembram-se os constituintes da pasta e divide-se cimento, adição mineral, superplastificante, água, areia e brita, por suas respectivas massas específicas, para obter o traço em peso e assim, obter as quantidades para produzir o CAA.

4.4 Ensaios do CAA no estado fresco

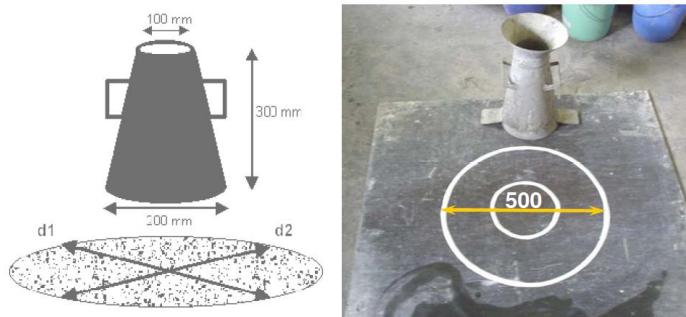
Nesse estágio é preciso avaliar o CAA no estado fresco por meio de diversos testes que consistem em avaliar suas três propriedades básicas: a capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação. Há vários ensaios que avaliam estas características, mas neste trabalho serão utilizados apenas os ensaios *slump flow test*, T_{500} , Anel J, funil-V, caixa-L e resistência à segregação, que serão detalhados a seguir.

4.4.1 Slump Flow

Ensaio que tem como objetivo mensurar a capacidade de preenchimento por gravidade do CAA, cujas respostas são o T_{500} e o espalhamento final. Além de verificar o bom espalhamento do concreto, é preciso observar se há segregação ou exsudação para garantir a resistência mecânica e durabilidade desejada. O ensaio de *slump flow* é baseado no ensaio de *slump test* para a determinação da consistência dos concretos vibrados, de modo que em ambos os ensaios utiliza-se como equipamento o cone de Abrams (Figura 24). No ensaio de *slump flow*, porém, devido à alta fluidez do concreto,

mede-se o espalhamento do concreto após a retirada do cone. Determina-se também o tempo que o concreto leva para atingir um diâmetro de 500 mm (T_{500}). A extensão final do fluxo do concreto (df) corresponde ao diâmetro final (KLEIN, 2006).

Figura 24 - Ensaio de espalhamento do concreto (slump flow test)



Fonte: Manuel, (2005)

Como visto na Figura 24, utiliza-se o mesmo tronco de cone do ensaio para concreto vibrado, com diâmetro interno superior de 100 mm, inferior de 20 mm e altura de 300 mm, mudando-se apenas a base quadrada que possui 1,00 m x 1,00 m, pois será medido o diâmetro do espalhamento. O CAA ao ser colocado no cone de Abrams não deve ser compactado. Assim como na argamassa, após a retirada do cone é medido o diâmetro em duas direções perpendiculares e é tirada a média do espalhamento. Deve-se verificar se o CCA apresenta coesão, observando-se se houve um espalhamento por igual do agregado graúdo (Figura 25), classificando o IEV (índice de estabilidade visual).

Figura 25 - Slump Flow Test

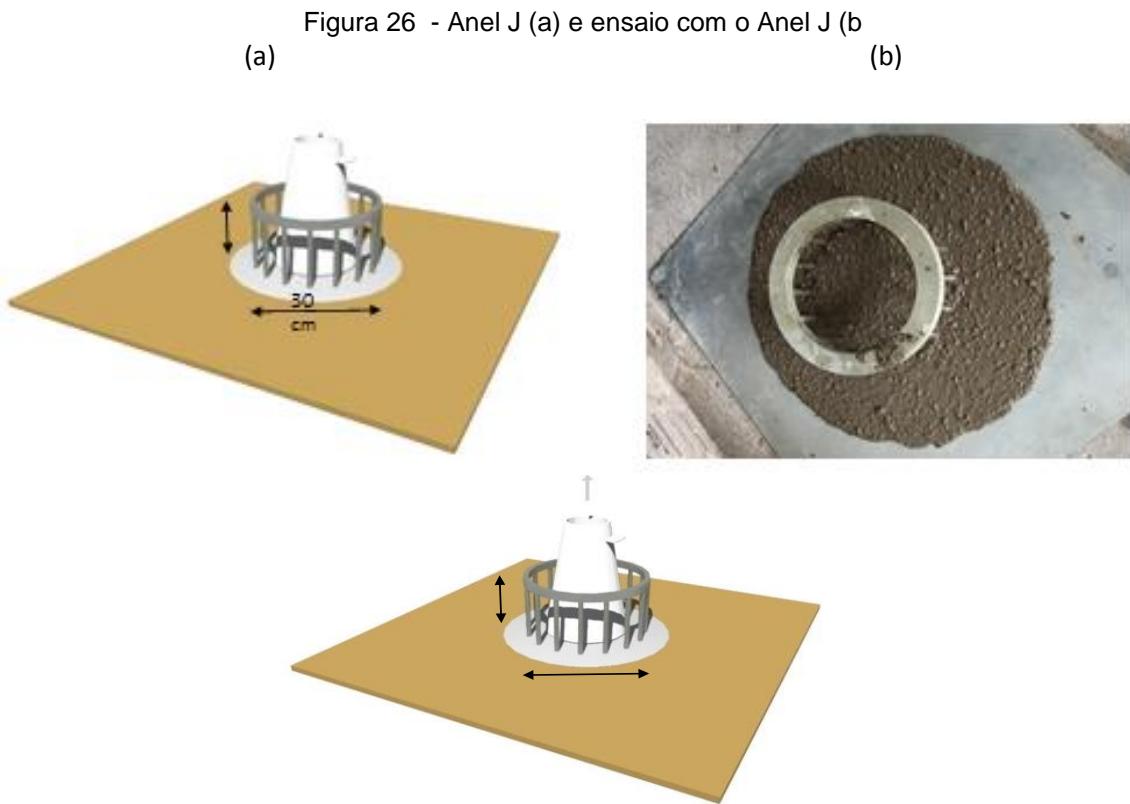


Fonte: Elaboração própria

O ensaio foi executado conforme a NBR – 15823-2/2010 e filmado para mensurar o tempo de espalhamento $T_{500\text{mm}}$, com o auxílio do Windows media player. O teste $T_{500\text{mm}}$ verifica o tempo gasto pelo CAA do momento que o cone é erguido verticalmente, até alcançar a marca dos 500 mm. Assim, o teste do espalhamento e o $T_{500\text{ mm}}$ podem ser realizados simultaneamente. Neste teste, assim como no $T_{115\text{ mm}}$ das pastas e $T_{200\text{ mm}}$ das argamassas, é possível verificar a viscosidade do CAA, pois, de acordo Alencar (2008), um concreto mais viscoso precisará de mais tempo para atingir o mesmo espalhamento, devido à maior coesão entre os constituintes. Os resultados de espalhamento e $T_{500\text{ mm}}$ serão classificados de acordo com as classes definidas na EFNARC (2005), conforme **ANEXO 1**.

4.4.2 Anel J

Este ensaio é similar ao ensaio de *slump flow*, porém, utiliza-se um aparato metálico em forma de anel, ilustrado na Figura 26, para simular uma armadura com o objetivo de avaliar além da capacidade de preenchimento, a habilidade de passagem, por meio da simulação de um bloqueio.



Fonte: Diniz, (2013)

A execução deste ensaio segue o mesmo procedimento de um ensaio normal de *slump flow*, basta apenas colocar o anel J para simular uma situação real, onde o CAA precise escoar entre as barras de uma armadura. O anel J tem 16 (dezesseis) furos com rosca, separados de forma equidistante, onde são fixadas barras de aço com 100 mm de comprimento; o espaçamento entre as barras deve obedecer ao intervalo de 48 ± 2 mm, ou conforme a realidade da obra onde o CAA será aplicado (EFNARC, 2005).

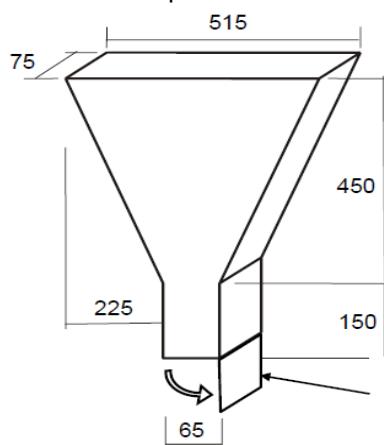
Assim como no *slump flow*, o ensaio foi filmado e o tempo de espalhamento $T_{500\text{mm}}$, foi mensurado com o auxílio do Windows media player para mensurar a viscosidade e a capacidade de passagem do concreto. Os resultados serão classificados de acordo com as classes definidas pela EFNARC (2005), conforme **ANEXO 1**.

4.4.3 Teste do Funil V

Ensaio que tem como objetivo mensurar a capacidade de passagem do CAA e tem o tempo de fluxo como resposta. Além de verificar o tempo, deve-se observar se o fluxo de queda do concreto é contínuo para verificar se o concreto apresenta coesão e viscosidade adequada. Este ensaio utiliza um molde em forma de漏斗, conforme mostra a Figura 27, podendo ser em acrílico ou metal, e tem o objetivo de medir a viscosidade e a tendência à segregação da mistura. O concreto normalmente estará segregando quando o tempo para esvaziar o漏斗 for grande ou quando ocorrer o bloqueio do漏斗. Além disso, se o concreto tiver pouca fluidez, haverá também uma tendência em levar muito mais tempo para escoar no漏斗. Por outro lado, deve-se observar durante o ensaio, a forma como ocorre o escoamento; um bom concreto deve escoar de maneira contínua e ao cair deve espalhar-se bem (MANUEL, 2005).

O漏斗 V, conforme ilustrado na Figura 27, possui duas seções de tamanhos e formas diferentes. Para assegurar a eficiência do equipamento é necessário que em seu orifício de saída inferior haja um sistema de abertura rápida (à prova de passagem d'água quando fechada), seja em forma de porta deslizante ou com dobradiça (EFNARC, 2005).

Figura 27 - Molde para ensaio de漏斗 V



Fonte: EFNARC, (2005)

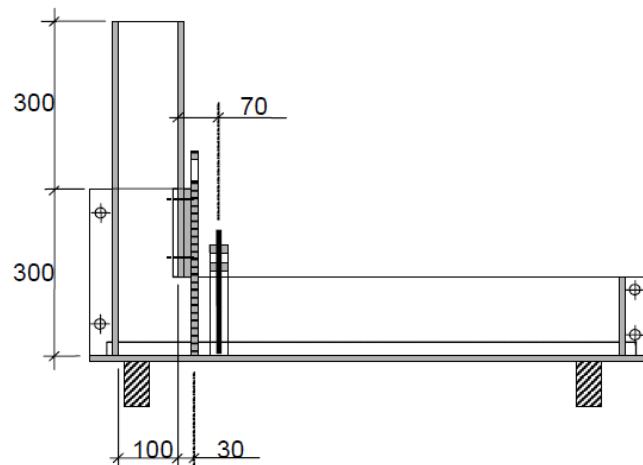
O ensaio foi executado conforme a NBR 15823-5/2010 e os resultados serão classificados de acordo com as classes definidas na EFNARC (2005), conforme **ANEXO 1**. Após analisar a capacidade de preenchimento e a viscosidade, segue-se

com a análise da capacidade de passagem do CAA. Nessa pesquisa, para analisar essa propriedade foi realizado o ensaio de caixa L, conforme recomendações da (EFNARC, 2005; NBR 15823-4, 2010).

4.4.4 Ensaio de Caixa L

O ensaio da caixa em L, em inglês L-Box, busca determinar a capacidade de passagem do concreto por barras de armadura. A caixa em L é constituída por um depósito vertical com uma abertura para um canal horizontal, sendo esta abertura fechada por uma comporta, que se abre para a passagem do concreto, conforme a Figura 28. Atrás dessa comporta, são colocadas barras de armaduras espaçadasumas das outras a uma distância mínima de três vezes o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado, segundo recomendações de (KLEIN, 2006; EFNARC; 2005; GOMES; 2002).

Figura 28 - Molde utilizado para ensaio de caixa L



Fonte: EFNARC (2005)

O ensaio foi executado conforme a NBR 15823-5/2010, cessado o escoamento, foram medidas as alturas H1 e H2, conforme Figura 28, e assim, por meio da equação 12, calcula-se a habilidade passante (HP), razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal.

$$\text{Equação 12} - \quad \text{HP} = H_2/H_1$$

A EFNARC (2005) recomenda que para fins de auto adensabilidade no teste de caixa L (**ANEXO 1**), os valores de HP devem oscilar entre 0,80 e 1,00, para assegurar espalhamento, sem problemas de bloqueio durante o lançamento do concreto nas estruturas.

4.4.5 Ensaio de resistência à segregação com peneira

Este ensaio mede a resistência à segregação do concreto através da relação entre a massa de argamassa passante e a massa de concreto lançado sobre uma peneira durante um determinado período. O procedimento do ensaio consiste em retirar uma amostra de aproximadamente $10 \pm 0,5$ l de concreto em um recipiente e deixa-lo em repouso e tampado por um período de $15 \pm 0,5$ minutos. (EFNARC, 2005). A relação de segregação é calculada através da equação abaixo e arredondado para o 1% mais próximo. A EFNARC (2005) recomenda RS (**ANEXO 1**).

$$\text{Equação 13} - \quad RS = \frac{(P_{rcp} - P_r)}{P_c} \times 100 \text{ (%)}$$

Onde:

P_{rcp} = Massa da peneira + fundo + amostra

P_r = Massa da peneira

P_c = Massa do fundo + amostra

Figura 29 - Teste de segregação pelo método da Peneira



Fonte: Elaboração própria

Após realizar os testes com o CAA no estado fresco, o concreto foi moldado em corpos de prova de 10 x 20 cm, que depois foram desmoldados e mantidos em cura úmida para seguir com os ensaios das propriedades do estado endurecido.

4.5 Ensaio do CAA no estado endurecido

Nesta seção são apresentados os procedimentos para a execução dos ensaios com o CAA no estado endurecido: resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico e absorção por capilaridade. Essa etapa inicia-se logo após cessar os ensaios no estado fresco com a moldagem dos corpos de prova.

4.5.1 Moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios no estado endurecido foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os corpos de prova foram moldados logo após cessar os ensaios do concreto no estado fresco, por meio de conchas e colher de pedreiro, sem nenhuma compactação. Os corpos de prova permaneceram em processo de endurecimento no pátio do LABEME (Figura 30 (a) e 30 (b)), durante 24 h e, em seguida, procedeu-se a desforma dos corpos de prova.

Figura 30 - Moldagem dos corpos de prova (a) e Desmoldagem dos corpos de prova (b)



Fonte: Elaboração própria

Após a desforma, os corpos de prova foram identificados com giz de cera, de acordo com o tipo de adição mineral (MK, PCA e FC) e o processo de dosagem, 01 a 07 (Planejamento Fatorial) e 08 a 10 (dosagem por argamassas).

4.5.2 Cura

Após a desmoldagem e identificação, os corpos de prova seguiram para cura úmida em um tanque, que consiste em uma caixa d'água de 1000 l (Figura 31) onde permaneceram por até 90 dias imersos em água com cal para promover a hidratação do concreto equilibrando o pH da água. Durante a cura úmida houve troca de água a cada ciclo e adições periódicas de cal a cada 30 dias.

Figura 31 - Processo de cura úmida



Fonte: Elaboração própria

Os corpos de prova foram retirados do tanque nas idades de hidratação, pré-determinadas, para avaliar o comportamento mecânico das composições de CAA, no estado endurecido. Para tal, foram realizados testes de resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico.

4.5.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão do CAA foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) sendo analisadas três amostras cilíndricas para cada uma das seguintes idades: 3, 7, 28 e 90 dias. Antes do ensaio, os corpos de prova foram retificados e durante a ruptura, foi utilizado um capacete metálico com neoprene em seu interior para ajustar qualquer imperfeição que houvesse para dar mais acurácia aos resultados. Utilizou-se uma prensa elétrica hidráulica com capacidade para 100 toneladas da marca Contenco (Figura 32) no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da UFPB.

Figura 32 - Ensaio de resistência compressão



Fonte: Elaboração própria

Assim, para a realização deste ensaio, logo após a desforma as amostras foram submetidas à cura úmida até a respectiva idade de rompimento e o resultado da resistência à compressão de cada composição de CAA foi definida como a média dos valores das três amostras analisadas.

4.5.4 Velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio de velocidade do pulso ultrassônico foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013). Trata-se de um ensaio não-destrutivo, que foi realizado antes do ensaio de resistência à compressão, utilizando-se assim, os mesmos corpos de prova, após retificar suas faces, obtendo-se resultados para as idades de 28 e 90 dias. Foi utilizado o aparelho Pundit Lab+, da marca Proceq SA, (Figura 33) com dois transdutores de 54 kHz e resolução de 0,1 μ s, no laboratório do GMAT (Grupo de Pesquisa de Materiais e Resíduos de Construção Civil) do IFPB campus João Pessoa.

Figura 33 - Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico



Fonte: Elaboração própria

O valor da velocidade do pulso ultrassônico para cada composição de CAA foi definido como a média entre os quatro valores mensurados em cada uma das três amostras analisadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados, bem como suas análises e discussões. De início, serão apresentados e discutidos os resultados da primeira etapa dessa pesquisa, que consiste na dosagem de pastas para concretos auto adensáveis, utilizando três tipos de adição mineral por meio do método do pseudo simplex duplo. A dosagem inicia-se por meio da análise estatística das pastas de cimento, superplastificante e adição mineral.

5.1 Análises das pastas

De acordo com a metodologia proposta, inicialmente, após selecionar os materiais constituintes da mistura, foram feitos testes para definir os limites de proporção, sempre testando, para cada suposto simplex, os prováveis pontos de maior e menor fluidez, com o intuito de identificar características de auto adensabilidade, conforme o **APÊNDICE 4**. Nesse momento, além de vários intervalos de proporções, foram testados vários fatores A/F (água/finos), a fim de identificar pelo menos uma mistura com dois fatores A/F diferentes e assim, observando dentre as pastas com características auto adensáveis, o ponto a partir do qual ocorre a segregação, de modo a definir o intervalo de espalhamento final e de T_{115} para cada tipo de adição mineral estudado nessa pesquisa.

Após simulações, arbitrando de acordo com a literatura, percentuais de substituição de adição mineral e superplastificante, definem-se os limites de utilização para os constituintes das pastas (pseudocomponentes), de acordo com a equação 10, sendo testados os percentuais de adição mineral e de teor de superplastificante, para encontrar o percentual de cimento que complete a mistura unitária. Os pseudocomponentes para as misturas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Pseudocomponentes para misturas do simplex

| Pseudocomponentes | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Vértices | SP (%) | MK (%) | CP (%) | SP (%) | PCA (%) | CP (%) | SP (%) | FC (%) | CP (%) |
| C1 | 0,020 | 0,200 | 0,780 | 0,020 | 0,200 | 0,780 | 0,015 | 0,150 | 0,835 |
| C2 | 0,015 | 0,300 | 0,685 | 0,010 | 0,400 | 0,590 | 0,005 | 0,350 | 0,645 |
| C3 | 0,015 | 0,200 | 0,785 | 0,010 | 0,200 | 0,790 | 0,005 | 0,150 | 0,845 |
| C4 | 0,020 | 0,300 | 0,680 | 0,020 | 0,400 | 0,580 | 0,015 | 0,350 | 0,635 |

SP - Aditivo Superplastificante; CP - Cimento Portland V - ARI; MK - Metacaulim; PCA - Pozolana da Casca do Arroz; FC - Fíler Calcário.

Fonte: Elaboração própria

A partir dos pseudocomponentes, são definidos os pontos experimentais do simplex, seguindo os dados do **APÊNDICE 3**. Nesse sentido, a Tabela 7 apresenta os componentes reais para as misturas com MK, PCA e FC.

Tabela 7 – Pontos experimentais para as misturas do simplex

| Pontos | PSEUDOCOMPONENTES | | | | COMPONENTES REAIS | | | | | | | | |
|--------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | C1 (%) | C2 (%) | C3 (%) | C4 (%) | SP (%) | Mk (%) | CP (%) | SP (%) | PCA (%) | CP (%) | SP (%) | FC (%) | CP (%) |
| 1 | 100,0% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 2,00% | 20,00% | 78,00% | 2,00% | 20,00% | 78,00% | 1,50% | 15,00% | 83,50% |
| 2 | 0,00% | 100,0% | 0,00% | 0,00% | 1,50% | 30,00% | 68,50% | 1,00% | 40,00% | 59,00% | 0,50% | 35,00% | 64,50% |
| 3 | 0,00% | 0,00% | 100,0% | 0,00% | 1,50% | 20,00% | 78,50% | 1,00% | 20,00% | 79,00% | 0,50% | 15,00% | 84,50% |
| 4 | 50,00% | 50,00% | 0,00% | 0,00% | 1,75% | 25,00% | 73,25% | 1,50% | 30,00% | 68,50% | 1,00% | 25,00% | 74,00% |
| 5 | 50,00% | 0,00% | 50,00% | 0,00% | 1,75% | 20,00% | 78,25% | 1,50% | 20,00% | 78,50% | 1,00% | 15,00% | 84,00% |
| 6 | 0,00% | 50,00% | 50,00% | 0,00% | 1,50% | 25,00% | 73,50% | 1,00% | 30,00% | 69,00% | 0,50% | 25,00% | 74,50% |
| 7 | 33,30% | 33,30% | 33,30% | 0,00% | 1,67% | 23,33% | 74,99% | 1,33% | 26,66% | 71,99% | 0,83% | 21,66% | 77,49% |
| 8 | 50,00% | 25,00% | 25,00% | 0,00% | 1,75% | 22,50% | 75,75% | 1,50% | 25,00% | 73,50% | 1,00% | 20,00% | 79,00% |
| 9 | 25,00% | 50,00% | 25,00% | 0,00% | 1,63% | 25,00% | 73,38% | 1,25% | 30,00% | 68,75% | 0,75% | 25,00% | 74,25% |
| 10 | 25,00% | 25,00% | 50,00% | 0,00% | 1,63% | 22,50% | 75,88% | 1,25% | 25,00% | 73,75% | 0,75% | 20,00% | 79,25% |
| 11 | 100,0% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 2,00% | 20,00% | 78,00% | 2,00% | 20,00% | 78,00% | 1,50% | 15,00% | 83,50% |
| 12 | 0,00% | 100,0% | 0,00% | 0,00% | 1,50% | 30,00% | 68,50% | 1,00% | 40,00% | 59,00% | 0,50% | 35,00% | 64,50% |
| 13 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 100,0% | 2,00% | 30,00% | 68,00% | 2,00% | 40,00% | 58,00% | 1,50% | 35,00% | 63,50% |
| 14 | 50,00% | 50,00% | 0,00% | 0,00% | 1,75% | 25,00% | 73,25% | 1,50% | 30,00% | 68,50% | 1,00% | 25,00% | 74,00% |
| 15 | 50,00% | 0,00% | 0,00% | 50,00% | 2,00% | 25,00% | 73,00% | 2,00% | 30,00% | 68,00% | 1,50% | 25,00% | 73,50% |
| 16 | 0,00% | 50,00% | 0,00% | 50,00% | 1,75% | 30,00% | 68,25% | 1,50% | 40,00% | 58,50% | 1,00% | 35,00% | 64,00% |
| 17 | 33,00% | 33,00% | 0,00% | 33,00% | 1,83% | 26,64% | 71,43% | 1,67% | 33,30% | 64,94% | 1,17% | 28,31% | 70,43% |
| 18 | 50,00% | 25,00% | 0,00% | 25,00% | 1,88% | 25,00% | 73,13% | 1,75% | 30,00% | 68,25% | 1,25% | 25,00% | 73,75% |
| 19 | 25,00% | 50,00% | 0,00% | 25,00% | 1,75% | 27,50% | 70,75% | 1,50% | 35,00% | 63,50% | 1,00% | 30,00% | 69,00% |
| 20 | 25,00% | 25,00% | 0,00% | 50,00% | 1,88% | 27,50% | 70,63% | 1,75% | 35,00% | 63,25% | 1,25% | 30,00% | 68,75% |

SP - Aditivo Superplastificante; CP - Cimento Portland V -ARI; MK - Metacaulim; PCA - Pozolana da Casca do Arroz; FC - Filler calcário

Fonte: Elaboração própria

A partir dos percentuais definidos na Tabela 7, as pastas foram produzidas inicialmente optando-se pelo processo manual, variando-se a relação A/F. O **APÊNDICE 5** apresenta os resultados do teste de mini cone realizado com as três adições minerais utilizadas nessa pesquisa.

A partir dos dados da Tabela 7 foi possível realizar os testes do mini cone para 3 (três) relações A/F com o MK e PCA, e 2 (duas) para o FC, com uma variação de 0,020. Para o MK e o FC, observa-se uma relação direta entre quantidade de água e espalhamento e inversa com o T_{115} . A relação com a quantidade de água pode ser justificada pelos estudos de Wong e Kwan (2008) e Bucher (2014), em cujas pesquisas, a quantidade de água de uma pasta é dividida em duas partes: água mínima (necessária para preencher os vazios no sistema de poros) e a água em excesso (responsável pela fluidez). Ao aumentar a relação A/F, como a água mínima é fixa, aumenta-se a quantidade de água em excesso e, consequentemente, a fluidez das pastas, o que justifica o aumento no espalhamento e a redução nos tempos no T_{115} .

As pastas com MK, apesar da coesão apresentada, precisaram de uma maior quantidade de água para alcançar a fluidez desejada; isso se deve à maior área superficial e às irregularidades dos grãos, conforme análise do MEV na Figura 15 (b), associadas à menor densidade de empacotamento, que aumenta os vazios no sistema de poros e a quantidade de água de amassamento (água mínima), necessária para homogeneizar as pastas. Além disso, o IPS alto, na ordem de 0,050, indica para um maior afastamento entre as partículas e maior lâmina de água em volta das partículas.

Apesar do menor diâmetro médio e da regularidade das partículas, conforme análise no MEV na Figura 16 (a), as pastas produzidas com PCA, também apresentaram uma quantidade de água elevada para promover a fluidez necessária, devido à maior área superficial das partículas ($5,08 \text{ m}^2/\text{g}$), três vezes maior que a do cimento ($1,83 \text{ m}^2/\text{g}$); que aumenta a área de lâmina de água na superfície das partículas, porém o IPS na ordem de 0,035 reduz a espessura de água que é responsável pela separação das partículas e interação entre elas, corroborando com os estudos de (WONG e KWAN, 2008).

Dentre as adições minerais, as pastas com FC foram as que precisaram de uma menor demanda de água para alcançar a fluidez desejada. O menor diâmetro e

também menor área superficial e afastamento entre as partículas, associados à regularidade dos grãos, conforme análise do MEV na Figura 16 (b) proporcionou melhor empacotamento das partículas, reduzindo o volume de vazios no sistema de poros e a quantidade de água mínima para o amassamento da mistura; e menor quantidade de água em volta das partículas devido menor área superficial e menor IPS (0,032), que leva a uma menor lâmina d'água em volta das partículas reduzindo também a quantidade de água em excesso responsável pela fluidez (BUCHER, *et al.*, 2014; WONG e KWAN, 2008).

Ademais, não se observou tão claramente para as pastas com PCA, relações entre quantidade de água e espalhamento e T_{115} em função das dificuldades em homogeneizar as pastas, devido à alta área de superfície, que requer maior tensão para o cisalhamento das partículas, e com isso, maior energia no processo de mistura. As particularidades das partículas como, finura e área superficial, influenciaram no tempo e energia necessária para homogeneização das pastas e geraram distorções grosseiras (VANCE, *et al.*, 2015).

Após a análise das pastas produzidas por processo de homogeneização manual, foram produzidas pastas por meio de processo mecânico, a fim de melhorar a padronização do processo de homogeneização de mistura e obter dados mais confiáveis. As pastas com MK, PCA e FC foram produzidas com A/F de 0,42; 0,38 e 0,28, respectivamente. O **APÊNDICE 6** apresenta os valores de espalhamento para pastas produzidas por processo manual e mecânico com mesma relação A/F. O valor médio de relação A/F foi escolhido para prosseguir com a pesquisa, com exceção do FC, que devido ao fato de ter sido executado com apenas duas relações A/F, optou-se pela menor relação A/F.

As pastas com MK não apresentaram grandes divergências entre os valores obtidos no processo manual e mecânico. No entanto, a PCA e o FC apresentaram diferenças significativas. As dificuldades de padronização do tempo de homogeneização dificultaram a ação do superplastificante e foi uma das causas dos maiores desvios, assim como a energia de homogeneização.

O conjunto de pastas, produzidas por processo manual e mecânico, foi submetido à análise estatística (Tabela 8), para verificar a correlação e confiabilidade dos dados obtidos no experimento.

Tabela 8 - Síntese da análise estatística das pastas produzidas por processo manual e mecânico

| SIMPLEX | Parâmetros | Metacaulim | | | | PCA | | | | Fíler Calcário | | | |
|---------|------------|------------|------------------|--------|------------------|----------|------------------|--------|------------------|----------------|------------------|--------|------------------|
| | | Mecânico | | Manual | | Mecânico | | Manual | | Mecânico | | Manual | |
| | | Flow | T ₁₁₅ | Flow | T ₁₁₅ | Flow | T ₁₁₅ | Flow | T ₁₁₅ | Flow | T ₁₁₅ | Flow | T ₁₁₅ |
| 1 | Rsqr | 0,952 | 0,959 | 0,981 | 0,946 | 0,945 | 0,974 | 0,817 | 0,623 | 0,972 | 0,968 | 0,940 | 0,908 |
| | MSresidual | 0,333 | 0,051 | 0,153 | 0,037 | 0,046 | 0,082 | 0,324 | 0,554 | 0,243 | 0,020 | 0,313 | 0,361 |
| 2 | Rsqr | 0,971 | 0,973 | 0,976 | 0,934 | 0,948 | 0,922 | 0,776 | 0,571 | 0,963 | 0,899 | 0,885 | 0,817 |
| | MSresidual | 0,225 | 0,035 | 0,185 | 0,354 | 0,041 | 0,094 | 0,299 | 0,776 | 0,122 | 0,055 | 0,176 | 0,377 |

Fonte: Elaboração própria

Analizando-se os dados da Tabela 8, observa-se que para as pastas com MK, os resultados para ambos os processos, manual e mecânico, apresentaram excelente correlação (Rsqr) entre os dados. No entanto, para a PCA e o FC, observa-se uma queda na correlação e aumento nos resíduos (Msresidual), no processo manual, o que pode comprometer a qualidade dos modelos de previsão gerados a partir desses dados. Essas distorções grosserias são devido às características das partículas que influenciam nas condições de ensaio e foram previstas por (VANCE, *et al.*, 2015) e refletem no erro padrão (alto Msresidual), constatado por meio da análise estatística, corroborando com (NEHDI e. RAHMAN, 2004).

Os maiores desvios foram identificados nas pastas com PCA, que apresentaram problemas com relação à variação entre espalhamento e T₁₁₅, e ainda com relação à A/F, em virtude das dificuldades encontradas durante o processo de homogeneização manual, devido às características das partículas dos finos (grande área de superfície das partículas). Além disso, associado à maior energia exigida pelo processo, às dificuldades de padronização se estenderam pelo tempo de homogeneização das pastas. O mesmo ocorreu nas pastas com FC, em que foi encontrada dificuldade na padronização dos tempos de mistura, o que influenciou na ação do superplasticificante e gerou distorções entre os resultados do experimento.

Apesar da padronização da sequência de mistura, dos materiais e das condições ambientais, as características das adições minerais dificultaram a padronização do tempo e intensidade de mistura, principalmente o FC e a PCA, gerando distorções entre os resultados, conforme (CASTRO, 2011; VANCE *et al.*, 2015). Com isso, segue-se com a análise reológicas das pastas produzidas pelo processo mecânico, apresentados na Tabela 9. Na sequência, segue-se com a análise estatística desses dados.

Tabela 9 – Respostas observadas para Flow (cm) e T115 (s) nas pastas

| Pontos | Metacaulim (A/F - 0,42) | | | PCA (A/F - 0,38) | | | Filer Calcário (A/F - 0,28) | | |
|--------|-------------------------|----------|--------|------------------|----------|--------|-----------------------------|----------|--------|
| | Flow (cm) | T115 (s) | Classe | Flow (cm) | T115 (s) | Classe | Flow (cm) | T115 (s) | Classe |
| 1 | 20,88 | 0,36 | SEG | 20,42 | 1,18 | SEG | 19,73 | 1,28 | SEG |
| 2 | 12,40 | 3,70 | NA | 17,60 | 2,41 | AA | 14,90 | 2,33 | NA |
| 3 | 18,57 | 0,35 | AA | 18,82 | 1,74 | AA | 13,63 | 2,67 | NA |
| 4 | 18,63 | 0,63 | AA | 18,81 | 1,75 | AA | 18,83 | 1,52 | AA |
| 5 | 20,74 | 0,46 | SEG | 19,73 | 1,30 | SEG | 18,93 | 1,58 | AA |
| 6 | 16,95 | 1,32 | NA | 19,88 | 1,24 | SEG | 12,20 | 3,55 | NA |
| 7 | 21,15 | 0,22 | SEG | 19,59 | 1,25 | SEG | 18,61 | 1,67 | AA |
| 8 | 20,57 | 0,42 | AA | 20,15 | 1,12 | SEG | 19,69 | 1,25 | SEG |
| 9 | 18,06 | 0,85 | AA | 19,64 | 1,35 | SEG | 18,49 | 1,65 | AA |
| 10 | 19,38 | 0,62 | AA | 19,90 | 1,25 | SEG | 18,66 | 1,67 | AA |
| 11 | 20,88 | 0,36 | SEG | 20,42 | 1,18 | SEG | 19,73 | 1,28 | SEG |
| 12 | 12,40 | 3,70 | NA | 17,60 | 2,28 | AA | 14,90 | 2,33 | NA |
| 13 | 20,53 | 0,29 | SEG | 18,15 | 2,23 | AA | 20,09 | 0,78 | SEG |
| 14 | 18,63 | 0,63 | AA | 18,81 | 1,75 | AA | 17,73 | 2,67 | AA |
| 15 | 20,51 | 0,28 | SEG | 19,54 | 1,40 | SEG | 20,10 | 0,87 | SEG |
| 16 | 17,67 | 0,80 | AA | 19,36 | 1,54 | AA | 19,93 | 0,95 | SEG |
| 17 | 18,73 | 0,42 | AA | 19,54 | 1,48 | AA | 19,93 | 0,98 | SEG |
| 18 | 20,49 | 0,27 | AA | 19,60 | 1,42 | SEG | 20,45 | 0,82 | SEG |
| 19 | 18,07 | 0,79 | AA | 19,18 | 1,76 | AA | 18,88 | 1,77 | AA |
| 20 | 20,55 | 0,45 | SEG | 19,53 | 1,44 | SEG | 20,40 | 0,97 | SEG |

SEG - Segregação; AA - Auto Adensável; NA - Não Adensável

Fonte: Elaboração Própria

O conjunto de pastas com propriedades auto adensáveis do simplex apresentou espalhamento na média de ($19,00 \text{ cm} \pm 1,50 \text{ cm}$; $18,50 \text{ cm} \pm 1,00 \text{ cm}$; $18,50 \pm 0,50 \text{ cm}$) e T_{115} na ordem de ($0,60 \text{ s} \pm 0,30 \text{ s}$; $2,00 \text{ s} \pm 0,50 \text{ s}$; $1,50 \text{ s} \pm 0,50 \text{ s}$) para as pastas produzidas com MK, PCA e FC, respectivamente. Esses valores foram obtidos, de acordo com a média e o desvio padrão dos resultados de diâmetro e tempo de espalhamentos para as pastas com propriedades auto adensáveis de acordo com análise de estabilidade visual, definindo os limites inferior (não adensável) e superior (segregação) para cada conjunto de pasta de acordo com a adição mineral. Esses intervalos foram adotados como zona de auto adensabilidade, tanto para o espalhamento como para o T_{115} .

A pesquisa segue com a análise estatística (**APÊNDICE 7**), para tal os dados obtidos nos ensaios de mini cone, foram inseridos no software Statistica versão 8.0

da StatSoft para verificar a correlação entre eles e obter a superfície de resposta, para os dois parâmetros (*flow* e T_{115}). Considera-se, inicialmente, os dados referentes ao espalhamento final (*flow*), apresentados na Tabela 9, tanto para mistura formada pelo simplex 1 (C1, C2 e C3), como para o simplex 2 (C4, C2, C3).

Tabela 10 – Síntese da análise estatística das pastas produzidas

| SIMPLEX | Parâmetros | MK | | PCA | | FC | |
|---------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| | | Flow | T_{115} | Flow | T_{115} | Flow | T_{115} |
| 1 | Rsqr | 0,952 | 0,959 | 0,945 | 0,974 | 0,972 | 0,968 |
| | MSresidual | 0,333 | 0,051 | 0,046 | 0,082 | 0,243 | 0,020 |
| 2 | Rsqr | 0,971 | 0,973 | 0,948 | 0,922 | 0,963 | 0,899 |
| | MSresidual | 0,225 | 0,035 | 0,041 | 0,094 | 0,122 | 0,055 |

Fonte: Elaboração Própria

Analisando-se os dados da Tabela 10, observa-se que para as pastas produzidas, os resultados apresentaram excelente correlação (Rsqr), entre os dados. Esses valores acima de 0,90 registrados na correlação entre os dados, associados aos baixos valores dos resíduos (Msresidual), evidenciam a boa qualidade do modelo estatístico gerado por esses dados.

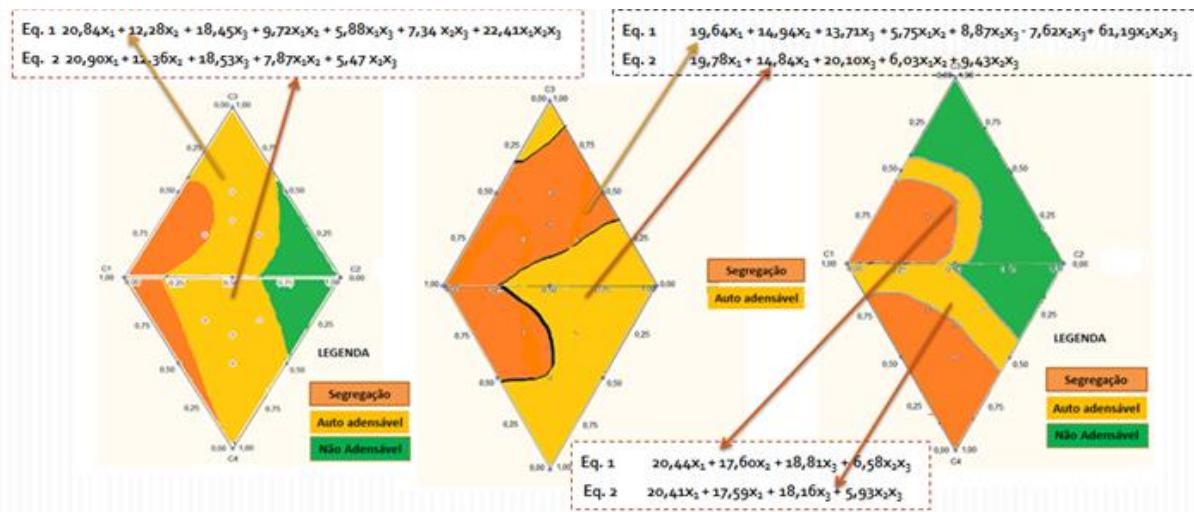
A análise de variância foi feita para verificar se o modelo quadrático é melhor que o espacial cúbico para representar os dados do modelo em uma equação de regressão. Os dados dos simplex 1 e 2 da variável T_{115} e simplex 1 da variável *flow* para pastas com FC; simplex 2 da variável *flow* para MK e PCA e simplex 1 da variável T_{115} das pastas com PCA foram submetidos a análise de variância e apresentaram resultados superiores a 1 o que indica que o ponto centroide, interação entre as três variáveis da mistura, não é necessário para a análise estatística. Os demais simplex, devido apresentar interação nula entre as três variáveis do sistema, tem solução trivial nula e consequentemente, não necessita de análise de variância para escolher o modelo quadrático para escrever a equação de regressão.

Além disso, para consolidar esse fato foi feito o teste F, comparando-se os valores tabelados em função dos graus de liberdade do planejamento experimental e os calculados pelos dados gerados, para identificar se há falta de ajuste. Verificou-se então que a falta de ajuste entre os dados gerados pelo modelo estatístico, não foi representativa para os dois simplex da variável espalhamento (MK), no simplex 2 da variável T_{115} e simplex 1 da variável espalhamento (PCA). Os demais simplex, mesmo

apresentando falta de ajuste significativa, foram submetidos à análise dos resíduos (diferença entre valor estimado pelo modelo estatístico e o obtido no experimento), e obtiveram em pelo menos 80% dos pontos experimentais, valores dentro da margem de erro estabelecida pelo modelo estatístico, o que consolida a qualidade dos modelos estatísticos gerados, e assim, prossegue-se a análise reológica das pastas.

Após verificar a confiabilidade do modelo gerado pelos dados obtidos no teste de mini cone, segue com representação gráfica em coordenadas simplex (superfície de resposta) e as equações de regressão. A figura 34 apresenta a superfície de resposta e as equações de regressão dos resultados da variável *flow* para as pastas produzidas a partir das três adições minerais utilizadas nessa pesquisa.

Figura 34 – Superfície de resposta da variável *flow* das pastas



Fonte: Elaboração Própria

A variável *Flow*, apresentada na Figura 34, mostrou uma relação direta com o superplastificante e inversa com a adição mineral, apesar de esta ser bem menos representativa. A relação inversa entre espalhamento das pastas e o percentual de substituição de adição mineral se justifica devido à alta reatividade e maior área superficial do MK ($2,48 \text{ m}^2/\text{g}$), e do PCA ($5,08 \text{ m}^2/\text{g}$) em relação ao cimento ($1,58 \text{ m}^2/\text{g}$), e menos expressivo o FC ($1,83 \text{ m}^2/\text{g}$) que leva a um aumento na demanda por superplastificante para misturas com percentuais de adição mais elevados, a fim de manter o padrão de espalhamento.

O maior diâmetro médio das partículas do PCA ($13,22 \mu\text{m}$), em relação ao cimento ($9,06 \mu\text{m}$), aumenta a densidade de empacotamento ($0,91\text{g}/\text{cm}^3$), devido às

partículas do cimento de menor diâmetro ocuparem os espaços vazios entre as partículas do PCA. No caso do FC e MK, o diâmetro médio das partículas (7,88 μm e 10,79 μm), respectivamente, dificulta o empacotamento com as partículas do cimento, além disso, a irregularidade dos grãos do MK aumenta o tamanho dos poros que reflete numa menor densidade de empacotamento (0,80 g/cm^3). Essas alterações previstas por Ferraris *et al.*, (2001) interferem no tamanho dos vazios entre os grãos e na demanda por água para preencher o sistema de poros (BUCHER, 2014). Nas pastas produzidas com MK, a forma irregular e textura rugosa das partículas, conforme MEV (Figura 15 (b) e no PCA a maior área de superfície (Tabela 1), conseguiram reduzir o espalhamento para maiores percentuais de substituição, mantendo o percentual de superplastificante constante.

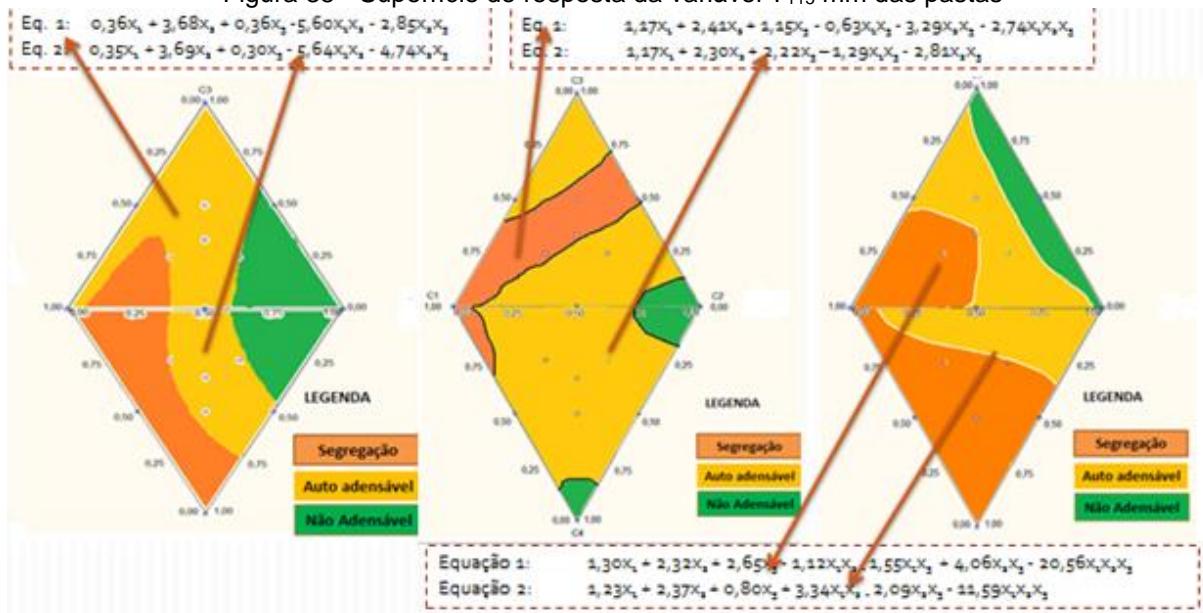
A regularidade e esfericidade das partículas da PCA, verificados no MEV (Figura 16 (a), melhoram o efeito de preenchimento, aumenta a densidade de empacotamento (FERRARIS, *et al.*, 2001) e a fluidez das pastas. As pastas tendem a aumentar o diâmetro de espalhamento de 20% até 30% de substituição de PCA por cimento e de 30% a 40% de substituição, apresentam leve redução nos diâmetros de espalhamento, corroborando com os resultados de densidade de empacotamento, em que se observa um aumento na densidade de empacotamento de 0,89 g/cm^3 nas pastas com 20%PCA80%CP para 0,94 g/cm^3 nas pastas com 30%PCA70%CP, ao aumentar o percentual para 40%PCA60%CP a densidade de empacotamento reduz para 0,89 g/cm^3 , acompanhando as oscilações dos diâmetros de espalhamento das pastas.

No espalhamento das pastas com FC, verifica-se uma forte relação direta com a demanda por superplastificante, no momento em que as pastas, independente do percentual de substituição por FC, tendem a não adensar para teores menores que 0,75% de superplastificante, alcançam auto adensabilidade para teores entre 0,75% e 1,0% e acima desse percentual, há clara tendência à segregação das pastas. Com relação ao percentual de adição de FC, verifica-se uma redução no diâmetro de espalhamento até 25% e acima de 30% observa-se um leve aumento no diâmetro de espalhamento com tendência a segregação.

Os efeitos provocados no espalhamento das pastas, pela utilização das adições minerais, devido à: composição, densidade de empacotamento, finura,

distribuição de tamanho das partículas, provocando o efeito de enchimento, efeito morfológico e de dispersão, corroboram com os estudos de (DENG WU *et al.*, 2017). A análise das pastas segue com a representação em coordenadas simplex dos resultados da variável T_{115} (Figura 35), as equações de regressão e a região com grande probabilidade de ocorrência de pastas com tempos de escoamento adequado para alcançar auto adensabilidade.

Figura 35 - Superfície de resposta da variável T_{115} mm das pastas



Fonte: Elaboração Própria

Analizando a superfície de resposta do T_{115} , verifica-se que o teor de adição mineral tem relação direta com o T_{115} , ou seja, quanto maior o percentual de substituição, maior o tempo de espalhamento das pastas, no entanto, com o superplasticificante, a relação é inversa, e reduz bastante, quando associados a baixos teores de adição mineral, região que apresentou os menores tempos de espalhamento. Nessa região, observa-se claramente a segregação das pastas devido à baixa coesão e viscosidade, em função de um menor aprisionamento das partículas, que aumenta a dispersão entre elas, e reduz a força interpartículas (BELLOTO, 2013). Com isso, pode-se dizer que as adições minerais contribuíram para o aumento da viscosidade das pastas, impedindo a segregação, o que pode ser observado com maiores tempos de espalhamento registrados nos pontos experimentais com maiores teores de substituição, onde verificam-se pastas mais viscosas e mais coesas, com

tendência a apresentar alta resistência à segregação, no entanto, quando associados aos maiores percentuais de superplastificante, ocorre uma tendência a segregação, com exceção das pastas com PCA.

As características das partículas influenciaram no empacotamento, com o aumento no percentual de substituição de cimento por adição mineral, houve aumento da densidade de empacotamento que reduziu os vazios no sistema de poros e a quantidade de água mínima para o amassamento da pasta, aumentando a quantidade de água em excesso, responsável pela fluidez (BUCHER *et al.*, 2014). Entretanto, as pastas com PCA não apresentaram o mesmo comportamento, houve aumento nos tempos de espalhamento a entre 30% e 40% de substituição que corrobora com a variação da densidade de empacotamento que nesse caso apresentou redução, acompanhada por aumento no volume de poros e água de amassamento, o que justifica menos água em exceção para dar fluidez das pastas, aumentando os tempos de escoamento. Nessa região do simplex das pastas com PCA, observa-se uma tendência das pastas não auto adensarem, diferente do MK e FC que apresentaram tendência à segregação.

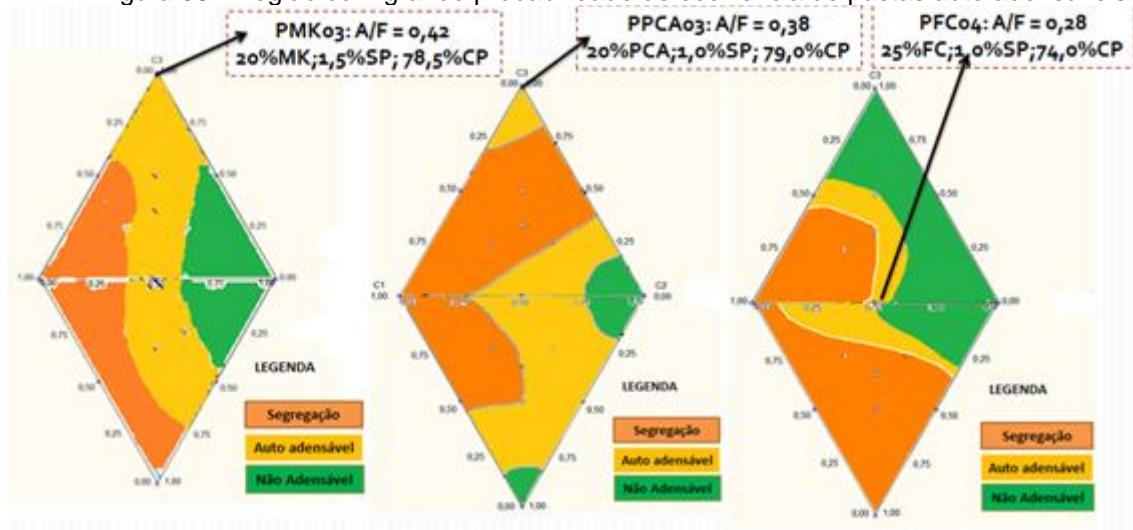
O IPS (distância entre as partículas no sistema) apresentou a mesma variação da densidade de empacotamento, ou seja, diminuiu para pastas com maiores percentuais de adição mineral o que justifica o aumento nos tempos de espalhamentos, haja vista que as pastas mais aglomeradas e menos dispersas em suspensão tendem a ter mais dificuldade para escoar.

Além disso, fatores relacionados a irregularidade e textura rugosa das partículas (DENG WU, *et al.*, 2017) também contribuem para o aumento da viscosidade. As pastas com MK, com partículas mais rugosas, apresentaram maior estabilidade, conseguindo espalhar rápido sem segregar, diferente das pastas com PCA e FC, de forma mais esféricas e lisas, apresentarem menor resistência a segregação e consequentemente menor estabilidade, o que justifica a maior sensibilidade dessas pastas a ação do superplastificante, sobretudo as pastas com FC.

Por fim, chega-se a delimitação da região com grande probabilidade de ocorrência de pasta adequada para um CAA, por meio da interseção da região proposta para a variável (*flow*) e a variável T_{115} que são representadas na Figura 36,

conforme os intervalos de espalhamento e de tempos de escoamento (T_{115}) para as pastas definidas na Tabela 7.

Figura 36 - Região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis



Fonte: Elaboração Própria

De acordo com a Figura 36, observa-se que 9 (nove) dos 20 (vinte) pontos experimentais, definidos na Tabela 7, além de n pontos dentro da região amarela, atendem aos requisitos de auto adensabilidade, tanto para o espalhamento (flow) como para a viscosidade (T_{115}), para pastas produzidas com MK e PCA, para as pastas produzidas com FC apenas 7 (sete) pastas se enquadram nesses parâmetros. Dessa forma, pode ser escolhida uma composição de pasta, que combinada a teores adequados de agregado, possa gerar argamassas e concretos auto adensáveis, ou auxiliar na dosagem do CAA.

O simplex formado pelas pastas produzidas com MK apresentou a maior região de auto adensabilidade, coerente com a maior coesão das pastas em função da morfologia dos finos, irregularidade das partículas e rugosidade da superfície. A região central do pseudo simplex duplo apresentou composições de pastas com características auto adensáveis, entretanto, as pastas com maiores percentuais de superplasticificante, regiões próximas a C1 e C4, predominantemente segregaram e não adensaram nas composições de pastas, próximas a C2 que combinam os menores percentuais de superplasticificante e maiores percentuais de substituição de cimento por MK. Nesse caso a adição mineral teve maior influência no

comportamento reológico, espalhamento e viscosidade que o superplasticante, corroborando com a análise estatística.

Para as pastas com PCA, devido à alta área de superfície dos grãos, que dificultou o espalhamento e aumentou o tempo de escoamento que é reflexo de uma redução na viscosidade; observa-se uma maior tendência à segregação, devido a grande área representada no pseudo-simplex-duplo, para as pastas com menor percentual de substituição. Na região próxima a C1, sobretudo, na parte superior do paralelogramo, onde as composições de pastas combinam percentuais de substituição de PCA entre 20,00% e 30,00%, mesmo combinado a menores percentuais de superplasticante, apresentaram uma grande tendência à segregação. Entretanto, composições de pastas com substituição de PCA acima de 30,00%, combinado a percentuais de superplasticante entre 1,75% e 2,00%, também apresentaram sinais de segregação. Na parte inferior do paralelogramo, onde as composições de pastas apresentam percentuais de substituição acima de 30,00%, observa-se uma tendência em auto adensar. Apenas numa pequena região no entorno de C2 e C4, com percentuais de 40,00% de substituição, registram-se os menores diâmetros de espalhamento e maiores tempos de escoamento, corroborando com a análise estatística que apontou uma grande correlação entre a PCA, o espalhamento e o T_{115} .

Por fim as pastas com FC, devido a menor área de superfície e menor reatividade, apresentaram menor estabilidade e área de auto adensabilidade. Observou-se uma relação maior entre espalhamento, T_{115} e o percentual de superplasticante, comparado ao percentual de substituição de FC, corroborando com a análise estatística. A região de auto adensabilidade para as pastas com FC foi bem menor quando comparada as pastas com MK e PCA. As pastas apresentaram dificuldades de auto adensar para percentuais de superplasticante entre 0,5% e 0,75%, região próxima a C2 e C3. Na estreita faixa entre 0,75% e 1,0% de superplasticante (região central do pseudo-simplex-duplo), registra-se a região de auto adensabilidade e para pastas com mais de 1,0% de superplasticante, região próximo a C1 e C4, registram-se sinais de segregação.

Para auxiliar na escolha da pasta é preciso avaliar dentre as misturas, as mais econômicas e que apresentem propriedades autoadensáveis, como resistência a segregação e exsudação de seus componentes. Nesse sentido, para consolidar

análise de viscosidade das pastas, além do T_{115} é necessário verificar o teste de cone Marsh, que além de consolidar os resultados do T_{115} mm, pode auxiliar na escolha de pastas mais econômicas, e assim, escolher uma pasta com espalhamento compatível e menor consumo de superplastificante possível.

5.1.1 Análise da viscosidade e sedimentação das pastas

Como as pastas em relação ao T_{115} apresentaram alguns resultados que fogem da variação direta com o superplastificante, conforme pesquisas anteriores (JIANG, et al., 1999; BELLOTO, 2013), isso pode comprometer a análise da viscosidade por meio do ensaio de mini cone. Dessa forma, essas distorções, encontradas nos resultados do T_{115} motivaram a análise da viscosidade das pastas, por meio do ensaio de cone Marsh, que além de verificar o ponto de saturação das pastas, serve para avaliar o controle de viscosidade, a fim de substituir a análise do T_{115} . Os resultados do ensaio estão apresentada na Tabela 11, que traz também os resultados do ensaio de sedimentação pelo método de decantação na proveta.

Tabela 11 - Análise da viscosidade e resistência à segregação das pastas

| Composição das Pastas | Mini Cone (cm) | | Cone Marsh | | Sedimentação | | Estabilidade da Pasta |
|-----------------------|----------------|------|------------|----------|--------------|---------|-----------------------|
| | Flow | T115 | T5 (min) | T45(min) | (H-h)/h | T (min) | |
| MK30%SP1,5% | 14,07 | 1,61 | 1,59 | 2,31 | 0,14 | 70 | NA |
| MK30%SP1,75% | 19,26 | 0,35 | 1,26 | 1,59 | 0,14 | 70 | AA |
| MK30%SP2,0% | 18,58 | 0,57 | 1,19 | 1,26 | 0,16 | 70 | AA |
| MK20%SP1,5% | 19,03 | 0,32 | 0,45 | 1,31 | 0,24 | 70 | AA |
| MK20%SP1,75% | 20,12 | 0,51 | 0,34 | 1,18 | 0,26 | 70 | SEG |
| MK20%SP2,0% | 20,15 | 0,22 | 0,31 | 1,10 | 0,28 | 70 | SEG |
| PCA40%SP1,0% | 17,60 | 2,41 | 2,26 | 3,12 | 0,10 | 70 | AA |
| PCA40%SP1,5% | 19,36 | 1,54 | 2,07 | 2,53 | 0,12 | 80 | AA |
| PCA40%SP2,0% | 18,15 | 2,23 | 1,57 | 2,41 | 0,13 | 80 | AA |
| PCA20%SP1,0% | 18,82 | 1,74 | 1,27 | 1,43 | 0,20 | 80 | AA |
| PCA20%SP1,5% | 19,73 | 1,30 | 1,18 | 1,35 | 0,18 | 80 | SEG |
| PCA20%SP2,0% | 20,43 | 1,18 | 1,12 | 1,29 | 0,18 | 90 | SEG |
| FC35%SP0,5% | 14,90 | 2,33 | 2,23 | | | | NA |
| FC35%SP1,0% | 19,93 | 0,95 | 1,58 | 3,15 | 0,20 | 90 | SEG |
| FC35%SP1,5% | 20,09 | 0,78 | 1,55 | 3,21 | 0,21 | 90 | SEG |
| FC15%SP0,5% | 13,63 | 2,67 | 4,16 | | | | NA |
| FC15%SP1,0% | 18,93 | 1,58 | 2,34 | 4,28 | 0,16 | 80 | AA |
| FC15%SP1,5% | 19,73 | 1,28 | 2,21 | 3,21 | 0,18 | 90 | SEG |

Fonte: Elaboração Própria

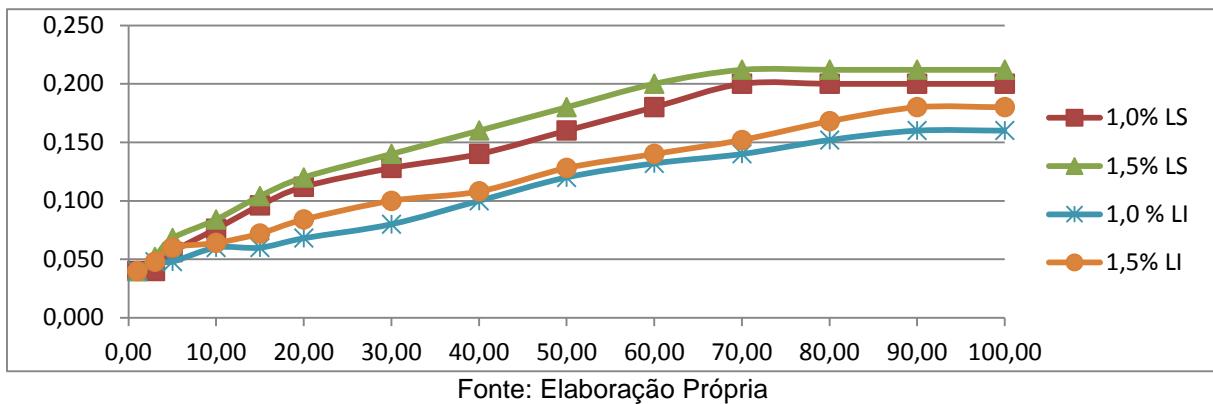
Pode-se notar que as pastas com 20% de MK e PCA apresentaram os menores tempos de escoamento (cone Marsh), conforme a literatura pesquisada; daí percebe-se claramente a ação do superplastificante que ao aumentar sua dosagem, mantendo-se constante o percentual de substituição de adição mineral.

Esses valores de tempo de escoamento aos 5 min e 45 min, corroboram com a literatura pesquisada; o mesmo não ocorre com os tempos de escoamento ($T_{115\text{mm}}$), no ensaio de mini cone, uma vez que não se identificou a relação inversa que a demanda de superplastificante tem com a tensão de escoamento e com a viscosidade das pastas, essas distorções foram relatadas nos trabalhos de (WALLEWIK, 2011; FLATT, *et al.*, 2005) que questionaram a eficiência do T_{115} para descrever o comportamento da viscosidade das pastas.

Além disso, os resultados nos tempos de escoamento do cone Marsh também corroboram com a variação entre densidade de empacotamento e área de superfície específica, ao variar-se o percentual de superplastificante para o mesmo percentual de adição mineral. Por outro lado, não se observa uma relação inversa entre tempo de escoamento e percentual de aditivo, nos demais resultados no mini cone, corroborando com a hipótese de que os dados desse teste não refletem o comportamento para a viscosidade das pastas.

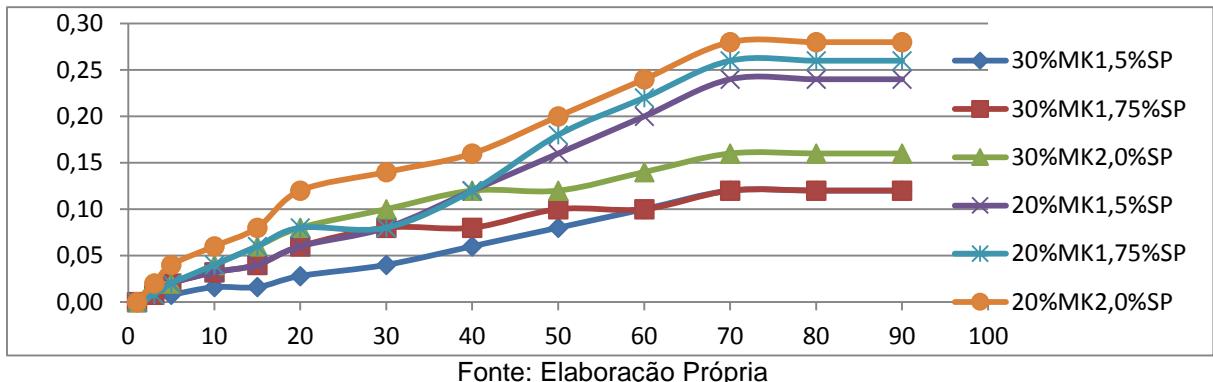
Ademais, as pastas produzidas com FC se apresentaram menos estáveis que as produzidas com MK e PCA. Apenas uma das seis pastas analisadas apresentou parâmetros autoadensáveis. As características das partículas: menor área de superfície, finura, regularidade e superfície lisa dos grãos, além do fato de se tratar de uma adição de menor reatividade, contribuíram para as divergências com as outras adições minerais utilizadas nessa pesquisa. Para analisar a influência das adições minerais e do superplastificante, na segregação e exsudação das pastas, os resultados dos ensaios de sedimentação pelo método de decantação na proveta graduada, são representados nos gráfico 1 a 3 e na sequência é feita a análise desses resultados.

Gráfico 1 – Resultados do teste de sedimentação nas pastas com MK



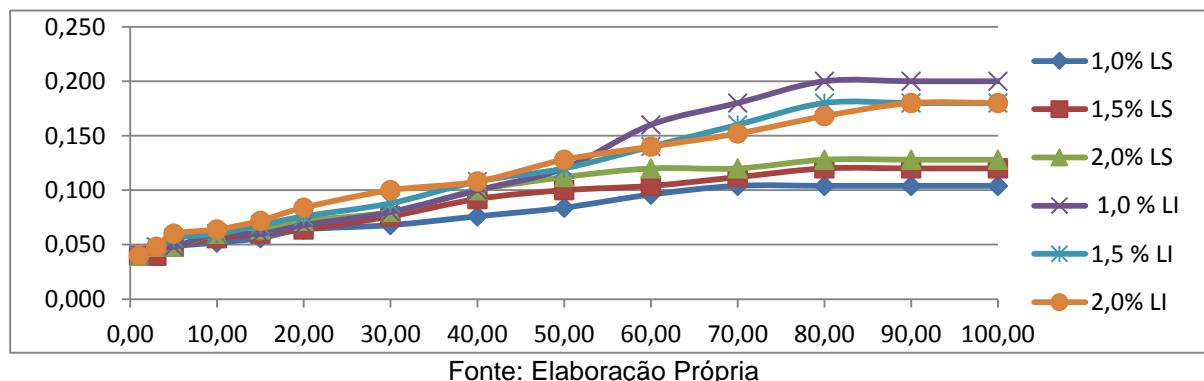
Fonte: Elaboração Própria

Gráfico 2 – Teste de sedimentação das pastas com PCA



Fonte: Elaboração Própria

Gráfico 3 – Teste de sedimentação das pastas com FC



Fonte: Elaboração Própria

Analisando os Gráficos 1, 2 e 3, observa-se que há uma relação direta entre a exsudação e o percentual de superplastificante, ou seja, aumentar a demanda de superplastificante para um mesmo percentual de adição mineral acarreta em um aumento na sedimentação das pastas, o que corrobora com Nedhi e Rahman (2004) que defende que o aumento na demanda de superplastificante reduz a viscosidade e, como consequência, aumenta a sedimentação das pastas. Além disso, analisando os

gráficos 1, 2 e 3 é possível verificar que as pastas sedimentam suas partículas até 70 minutos (MK e PCA) após a mistura de seus componentes e a partir daí estabilizam, com exceção das pastas MK20%SP1,75% e PCA20%SP1,5% cujo processo de sedimentação se estabilizou aos 60 minutos após a mistura.

A influência do percentual de adição mineral e sua demanda de superplastificante corroboram com os estudos de Nedhi e Rahman (2004), ao constatar-se que as pastas com os menores percentuais de adição mineral alcançaram maiores níveis de sedimentação que as pastas com os maiores percentuais de substituição, com o mesmo percentual de aditivo. As regiões simplex próximas a C2 que combinam baixo percentual de aditivo e alto teor de adição mineral, apresentaram as pastas com maiores dificuldade de escoar, o que consolida a influência do aumento no percentual de substituição de cimento por adição mineral para melhorar a resistência a segregação das pastas.

A partir desses dados, pode-se inferir que maiores teores de adição mineral reduziram/inibiram a segregação nas pastas testadas, devido ao aumento na densidade de empacotamento (MK e PCA), maiores teores dessas adições promovem uma maior concentração volumétrica das partículas em dispersão, refletem em um aumento na tensão de cisalhamento, redução da fluidez e aumento na coesão entre os constituintes das pastas (BELLOTO, 2013). Essa relação entre a densidade de empacotamento e segregação estática é compatível com as pesquisas realizadas por (GHOUDOSSI, et al., 2014).

A maior área de superfície do sistema de partículas aumenta com o aumento no percentual de substituição de cimento por MK e PCA, e associado aos efeitos da densidade de empacotamento, e da irregularidade na morfologia das partículas (MK), foi responsável pelo aumento na viscosidade e coesão entre as partículas, contribuindo para a redução dos níveis de sedimentação.

Para as pastas produzidas com FC (gráfico 3) pode-se inferir que menores teores de superplastificante reduziram/inibiram a segregação nas pastas testadas, uma vez que, reduziram o índice de sedimentação até 1,0%, no entanto, para teores de superplastificante de 0,5% não foi possível realizar o ensaio devido a alta viscosidade e baixa fluidez das pastas. Além disso, foi possível verificar que as pastas sedimentam suas partículas até 80 minutos para pastas com 15,0% de substituição e 90 minutos para pastas com 35,0% de percentual de substituição parcial do cimento

por FC, após a mistura de seus componentes e a partir daí estabilizam. Já para as pastas com PCA as misturas estabilizam após 80 minutos e para o MK após 70 minutos, que corrobora com o fato das pastas com MK serem mais estáveis e no geral apresentarem maior coesão e resistência a segregação.

5.1.2 Análise da termogravimétrica das pastas autoadensáveis

Para finalizar a análise das pastas e seguir com a dosagem das argamassas e, posteriormente, do concreto, procedeu-se com a análise de micro estrutura das pastas escolhidas, dentre as pastas autoadensáveis, nas regiões de grande probabilidade de pastas autoadensáveis, na região simplex de cada adição mineral. A Tabela 12 apresenta a composição dessas pastas.

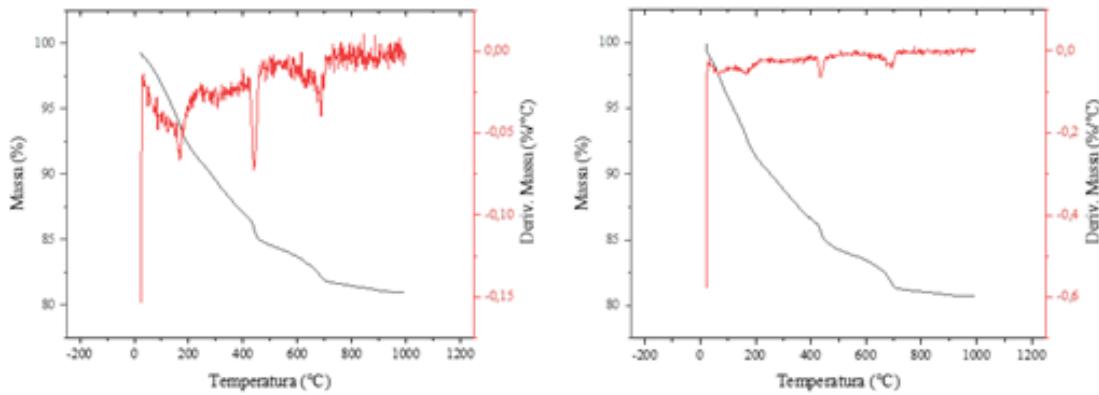
Tabela 12 - Composição das pastas autoadensáveis

| Adição Mineral | CP (%) | AM (%) | SP (%) | A/F |
|----------------|--------|--------|--------|------|
| MK | 78,50 | 20,00 | 1,50 | 0,42 |
| PCA | 79,00 | 20,00 | 1,00 | 0,38 |
| FC | 74,00 | 25,00 | 1,00 | 0,28 |

Fonte: Elaboração própria

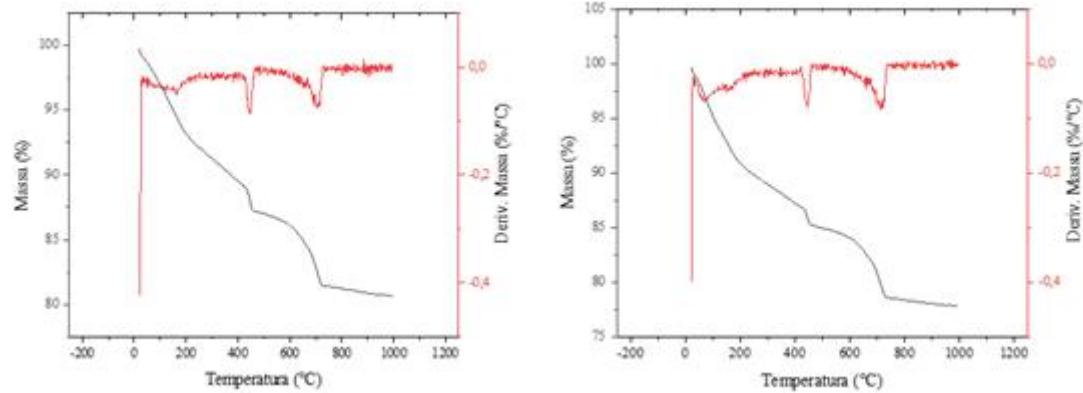
A escolha da composição dessas pastas, dentro da região simplex com grande probabilidade de ocorrência de pastas autoadensáveis, se deu em virtude da análise de viscosidade e resistência à segregação das pastas, com o objetivo de identificar, pastas com menor percentual de substituição de adição mineral e superplasticante possíveis, com as características desejáveis. No entanto, para o filer calcário, após teste inicial, com o CAA e as argamassas, devido às dificuldades encontradas, em se auto adensar, optou-se por escolher uma composição de pastas com maior percentual de finos e superplasticante, diferentemente do metacaulim e da PCA. Após selecionar as pastas e seguir o processo de dosagem, foi feita uma análise termogravimétrica das pastas (Figuras 37 a 39), das pastas constitutivas aos 28 e 90 dias de hidratação.

Figura 37 - Diagrama de termogravimetria de pastas com MK aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)



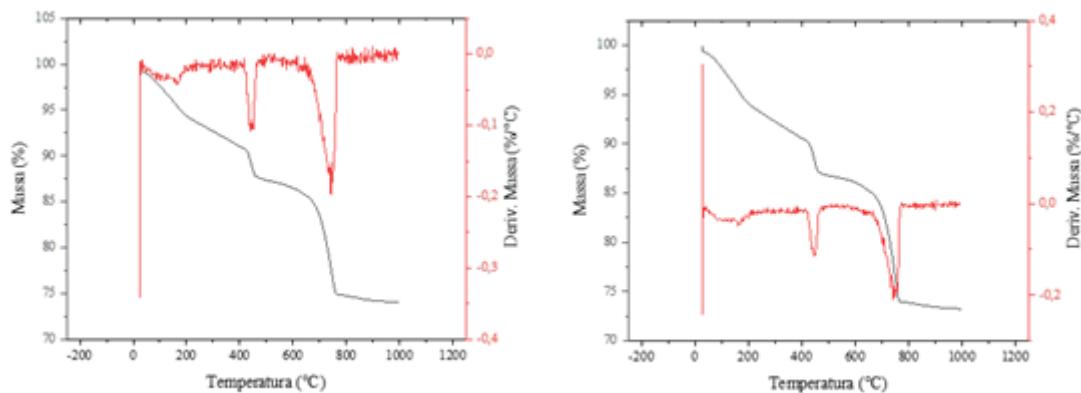
Fonte: Elaboração Própria

Figura 38 – Diagrama de temogravimetria de pastas com PCA aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 39 - Diagrama de termogravimetria de pastas com FC aos 28 dias (a) e 90 dias de hidratação (b)



Fonte: Elaboração Própria

A figura 37 apresenta a curva termogravimétrica e a termogravimetria derivada para a pasta produzida com 20% de substituição de cimento por MK. Observa-se na curva as faixas

de temperatura onde ocorre a perda de massa associada com os produtos de hidratação do cimento. A perda de massa ocorrida entre 0-105°C é devido à evaporação de água livre, entre 105-420°C ocorre a desidratação devido a perda de água quimicamente combinada com o C-S-H, a decomposição do hidróxido de cálcio ocorreu entre 420-500°C, e entre 600-700°C ocorre a descarbonatação.

Nas figuras 38 e 39 observa-se as curvas termogravimétricas e a termogravimetria derivada para as pastas produzida com 20% de substituição de cimento por PCA e 25 % de FC, respectivamente. Para ambas as pastas, a perda de massa ocorrida entre 0-105°C é devido à evaporação de água livre, entre 105-400°C ocorre a desidratação devido a perda de água quimicamente combinada com o C-S-H, a decomposição do hidróxido de cálcio ocorreu entre 400-500°C, e entre 650-750°C ocorre a descarbonatação.

A perda de massa de água livre foi bastante acentuada para pasta produzida com MK e para pasta produzida com PCA aos 90 dias a perda de massa também foi considerável, reflexo da maior quantidade de água de amassamento para essas pastas, corroborando os baixos índices de perda de água livre da pasta produzida com FC que dentre as três pastas é a que apresenta menor quantidade de água de amassamento $A/F = 0,31$. As pastas com PCA apresentaram perdas de massa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menos expressivas que as pastas produzidas com MK e FC. As pastas produzidas com FC apresentaram perda de massa de CaCO_3 acentuada aos 28 dias e aos 90 dias. As pastas com PCA e MK apresentaram perdas de massa de CaCO_3 menos expressivas que as pastas produzidas com FC.

5.2 Dosagem das Argamassas

Para composição das argamassas (Tabela 13), observam-se os limites estabelecidos pela EFNARC (2005). Nesse sentido, foram produzidas cinco argamassas, variando-se teores de pasta e areia para verificar as propriedades de auto adensabilidade, espalhamento (*Flow* e T_{200}) e fluidez (Funil V).

Tabela 13 – Composição das prováveis argamassas autoadensáveis

| Pontos Experimentais | Pseudocomponentes | | Componentes Reais | |
|---|-------------------|--------|-------------------|-----------|
| | C1 (%) | C2 (%) | Pasta (%) | Areia (%) |
| 1 | 100% | 0% | 60,00% | 40,00% |
| 2 | 0% | 100% | 50,00% | 50,00% |
| 3 | 50% | 50% | 55,00% | 45,00% |
| 4 | 25% | 75% | 52,50% | 47,50% |
| 5 | 75% | 25% | 57,50% | 42,50% |
| C1= 60%Pasta40%Areia e C2= 50%Pasta50%Areia | | | | |

Fonte: Elaboração própria

Seguindo as recomendações das combinações expostas na Tabela 13 e a composição das pastas escolhidas na região simplex (região com grande probabilidade de ocorrência de pastas autoadensáveis), chegam-se aos componentes reais das argamassas (Tabela 14) que foram submetidas aos testes de mini *slump* e funil V, e posteriormente, resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 14 – Componentes reais em peso das argamassas

| Ponto | MK | | | | PCA | | | | FC | | | | Areia (g) |
|-------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|-----------|
| | P_{SP} | P_{AM} | P_{CP} | Água | P_{SP} | P_{AM} | P_{CP} | Água | P_{SP} | P_{AM} | P_{CP} | Água | |
| 1 | 36,0 | 480,0 | 1984,0 | 1034,9 | 24,0 | 480,0 | 1896,0 | 855,4 | 19,2 | 600,0 | 1880,8 | 694,6 | 3000,0 |
| 2 | 30,0 | 400,0 | 2070,0 | 1037,4 | 20,0 | 400,0 | 1580,0 | 712,8 | 16,0 | 500,0 | 1984,0 | 695,5 | 3750,0 |
| 3 | 33,0 | 440,0 | 2027,0 | 1036,1 | 22,0 | 440,0 | 1738,0 | 784,1 | 17,6 | 550,0 | 1932,4 | 695,1 | 3375,0 |
| 4 | 31,5 | 420,0 | 2048,5 | 1036,8 | 21,0 | 420,0 | 1659,0 | 748,4 | 16,8 | 525,0 | 1958,2 | 695,3 | 3562,5 |
| 5 | 34,5 | 460,0 | 2005,5 | 1035,5 | 23,0 | 460,0 | 1817,0 | 819,7 | 18,4 | 575,0 | 1906,6 | 694,9 | 3187,5 |

P_{SP} =Peso do Superplasticificante; P_{AM} =Peso da Adição Mineral e P_{CP} =Peso do cimento

Fonte: Elaboração Própria

Definidas as composições das argamassas, segue-se o experimento, submetendo-as a testes de espalhamento (*Flow* e T_{200}) e fluidez (Funil V), realizando uma repetição para cada ponto. O objetivo dessa análise é verificar quais dessas argamassas apresentam propriedades autoadensáveis, ou seja, espalhamento com fluidez em fluxo contínuo, sem apresentar exsudação ou segregação de seus constituintes. Nesse sentido, a Tabela 15 apresenta os resultados dos testes de espalhamento e funil V, realizados nas argamassas, definidas na Tabela 13.

Tabela 15 – Resultados dos testes de espalhamento e Funil V das argamassas

| Ponto | T 200 (s) | D final (cm) | T (s) | Estabilidade Visual | Parâmetro incompatível | Possível Causa | Ações Corretivas |
|---------|-----------|--------------|-------|---------------------|------------------------------------|-------------------|---|
| ARGMK1 | 0,87 | 36,25 | 2,27 | Segregação | Flow (alto) e Funil V (baixo) | Baixa viscosidade | Reducir o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 0,73 | 36,75 | 2,66 | | | | |
| ARGMK2 | 1,50 | 30,40 | 4,28 | Auto Adensável | | | |
| | 1,33 | 30,80 | 3,98 | | | | |
| ARGMK3 | 0,90 | 33,20 | 3,24 | Auto Adensável | | | |
| | 0,87 | 33,40 | 3,18 | | | | |
| ARGMK4 | 1,26 | 32,80 | 3,35 | Auto Adensável | | | |
| | 1,43 | 33,50 | 3,26 | | | | |
| ARGMK5 | 0,90 | 35,40 | 2,73 | Auto Adensável | | | |
| | 0,90 | 35,55 | 2,74 | | | | |
| ARGPCA1 | 0,80 | 39,50 | 2,09 | Segregação | Flow (alto) e Funil V (baixo) | Baixa viscosidade | Reducir o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 0,90 | 39,25 | 2,35 | | | | |
| ARGPCA2 | 2,15 | 34,75 | 5,69 | Auto Adensável | | | |
| | 2,25 | 34,25 | 5,93 | | | | |
| ARGPCA3 | 1,20 | 37,75 | 3,94 | Segregação | Flow (alto) e Funil V (baixo) | Baixa viscosidade | Reducir o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 1,25 | 37,20 | 4,34 | | | | |
| ARGPCA4 | 1,50 | 36,75 | 5,28 | Auto Adensável | | | |
| | 1,50 | 36,50 | 5,60 | | | | |
| ARGPCA5 | 1,10 | 38,75 | 3,98 | Segregação | Flow (alto) e Funil V (baixo) | Baixa viscosidade | Reducir o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 1,15 | 38,25 | 4,14 | | | | |
| ARGFC1 | 1,05 | 42,50 | 7,16 | Segregação | Flow (alto) e Funil V (baixo) | Baixa viscosidade | Reducir o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 1,15 | 42,75 | 7,56 | | | | |
| ARGFC2 | 4,45 | 31,00 | 29,19 | Não Adensável | Funil V e T ₂₀₀ (altos) | Alta viscosidade | Aumentar o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 4,10 | 32,25 | 40,62 | | | | |
| ARGFC3 | 1,95 | 39,00 | 9,06 | Auto Adensável | | | |
| | 2,35 | 37,75 | 11,16 | | | | |
| ARGFC4 | 2,50 | 34,75 | 14,68 | Não Adensável | Funil V e T ₂₀₀ (altos) | Alta viscosidade | Aumentar o teor de água, volume de pasta ou de SP |
| | 2,60 | 34,00 | 16,19 | | | | |
| ARGFC5 | 1,30 | 40,25 | 8,75 | Auto Adensável | | | |
| | 1,35 | 39,25 | 8,56 | | | | |

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 15, observa-se que as argamassas dosadas com o teor máximo de pasta, para as três adições minerais (ARGMK1, ARGPCA1 e ARGFC1), apresentaram segregação. Entretanto, observaram-se nas demais combinações que a redução do teor de pasta conferiu às

argamassas as propriedades desejadas, ou seja, funcionou como um ajuste, de acordo com as recomendações da EFNARC/2005, consultando o Quadro 1, apresentado na metodologia desse trabalho. Os ajustes são definidos para corrigir as inconformidades, verificadas nos ensaios de espalhamento e funil V, que impendem que as argamassas obtenham espalhamento, fluidez e coesão suficientes para conferir suas características de auto adensabilidade.

Além da relação direta entre percentual de pasta e espalhamento, observa-se um comportamento similar entre as argamassas e as pastas, além de uma ótima correlação entre os dados, com $R^2 = 0,96$ para o MK e a PCA, e $R^2 = 0,89$ para o FC. Nas argamassas produzidas com MK, identifica-se uma maior coesão e resistência à segregação (espalhamento uniforme), devido à sua alta reatividade, e menor espalhamento, em função da maior área de superfície específica e irregularidade das partículas.

Já as argamassas com PCA apresentaram uma maior tendência a segregar e maior diâmetro de espalhamento, em função de a PCA apresentar um alto percentual de sílica amorfa e partículas com menores diâmetros e maior regularidade dos grãos, o que aumenta a densidade de empacotamento, reduz a tensão de cisalhamento e propicia maior escoamento, corroborando com uma maior instabilidade visual das argamassas, sobretudo, a exsudação e bordas mais desuniformes.

As argamassas com FC também seguiram a mesma tendência de espalhamento das pastas, apresentaram maior sensibilidade as variações de volume de pasta e de agregado miúdo, com maior capacidade de espalhamento e tendência à segregação com maiores volumes de pasta e grande dificuldade de espalhamento para menores volume de pasta, verificados por meio de análise de estabilidade visual.

O agregado miúdo teve relação inversa com o espalhamento e, devido ao baixo módulo de finura 2,27 e apresentar cerca de 7,0% das partículas com diâmetro menor que 0,075 mm, reduziu a tensão de cisalhamento e consequentemente, a capacidade de espalhamento das argamassas (HU e WANG, 2011). Além disso, atuou como intensificador de viscosidade, inserida na matriz de finos, e contribuiu para o controle de segregação nas argamassas, produzidas com as pozolanas de alta reatividade (MK e PCA). No entanto, devido a intensificar a viscosidade, dificultou o espalhamento das argamassas produzidas com FC, sobretudo as que apresentaram

maior percentual de agregado miúdo, devido ao aumento dos finos e a necessidade em aumentar a demanda de água ou de superplastificante para que essas argamassas alcançassem a fluidez necessária para se auto adensarem.

A viscosidade das argamassas é avaliada pelos ensaios de $T_{200\text{ mm}}$ e Funil V que relacionam tempo de espalhamento e escoamento, respectivamente, além de possibilitar a análise de estabilidade visual das argamassas, em que é possível verificar sinais de segregação, exsudação ou fluidez insuficiente. Os resultados dos ensaios de viscosidade das pastas apresentaram boa correlação. O T_{200} apresentou $R_{\text{sq}} = 0,89$ para o MK, $R_{\text{sq}} = 0,83$ para a PCA e $R_{\text{sq}} = 0,85$ para o FC. Já o ensaio de funil V apresentou $R_{\text{sq}} = 0,89$ para o MK, $R_{\text{sq}} = 0,88$ para a PCA e $R_{\text{sq}} = 0,81$ para o FC.

A relação direta entre viscosidade das pastas e o percentual de agregado miúdo é constatada, no momento em que se observa que as argamassas com menor percentual de agregado apresentaram os menores tempos de espalhamento ($T_{200\text{ mm}}$) e escoamento (Funil V) e, as argamassas com maior percentual de agregado miúdo apresentam os maiores tempos. Observa-se que as argamassas produzidas com FC foram mais sensíveis à variação dos percentuais de pasta e de agregado miúdo, sobretudo, no ensaio de funil V, em que a argamassa com maior percentual de agregado miúdo não conseguiu escoar completamente por falta de fluidez, devido à alta viscosidade plástica. Ademais, as argamassas produzidas com metacaulim e PCA sofreram menos os efeitos da incorporação de parte do agregado miúdo nos finos, devido à alta reatividade dessas pozolanas.

Para finalizar o estudo com as argamassas, se faz necessário alinhar os bons resultados no estado fresco ao estado endurecido. Nesse sentido, a resistência à compressão aos 28 dias (Tabela 16) se configura como a uma variável necessária para escolher uma das argamassas para dosagem do CAA.

Tabela 16 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias

| Pontos | Carga de Ruptura (ton) | | | Área (cm ²) | Tensão de Ruptura (MPa) | | |
|--------|------------------------|------|-------|-------------------------|-------------------------|-------|-------|
| | MK | PCA | FC | | MK | PCA | FC |
| ARG01 | 11,04 | 8,39 | 10,00 | 0,1963 | 56,24 | 42,74 | 50,94 |
| | 10,50 | 8,23 | 10,34 | 0,1963 | 53,49 | 41,93 | 52,67 |
| ARG02 | 10,17 | 8,48 | 11,93 | 0,1963 | 51,81 | 43,20 | 60,77 |
| | 10,81 | 8,72 | 12,40 | 0,1963 | 55,07 | 44,42 | 63,17 |
| ARG03 | 10,25 | 9,07 | 10,87 | 0,1963 | 52,22 | 46,20 | 55,37 |
| | 10,51 | 8,62 | 12,59 | 0,1963 | 53,54 | 43,91 | 64,14 |
| ARG04 | 9,71 | 9,41 | 12,07 | 0,1963 | 49,47 | 47,94 | 61,49 |
| | 9,98 | 9,55 | 11,60 | 0,1963 | 50,84 | 48,65 | 59,09 |
| ARG05 | 8,85 | 8,70 | 13,01 | 0,1963 | 45,08 | 44,32 | 66,28 |
| | 9,81 | 8,38 | 12,39 | 0,1963 | 49,97 | 42,69 | 63,12 |

Fonte: Elaboração própria

Constata-se, de acordo com os dados apresentados na Tabela 16, que o 1º traço de argamassa para o MK, o 4º traço para PCA e o 5º traço para o FC apresentaram a maior resistência à compressão aos 28 dias. Com isso, à luz do exposto, no que se refere à resistência mecânica, estes seriam os melhores traços de argamassa para compor o CAA. No entanto, o ARGMK1 apresentou sinais de segregação, logo recomenda-se o ARGMK2 que atende bem as propriedades do estado fresco e endurecido. Já no caso do PCA e do FC, os traços recomendados apresentaram, além de alta resistência mecânica, propriedades compatíveis satisfatórias no estado fresco.

Ademais, a relação entre resistência mecânica e percentual de pasta ou de agregado miúdo, que se configuram como variáveis de entrada do sistema apresentou baixa correlação, $R_{sqr}=0,63$ para o MK, $R_{sqr}=0,72$ para o PCA e $R_{sqr}=0,69$ para o FC, no modelo full cubic. A correlação foi menor que a obtida nos ensaios no estado fresco, devido às variáveis que mais impactam na variação da resistência mecânica (A/F e percentual de adição mineral) terem permanecido constantes. Nesse sentido, verificou-se que houve pouca variação na carga de ruptura e, consequentemente, na resistência à compressão entre as argamassas produzidos a partir da mesma pasta.

Dentre as três adições minerais, as argamassas com FC em média apresentaram as maiores resistências à compressão 59,70 Mpa, 15% maior que as argamassas produzidas com MK (51,77 Mpa) e 33,00% maior que as produzidas a partir das pastas com PCA (44,60 Mpa) de resistência à compressão aos 28 dias. Com

isso, percebe-se a importância da compacidade para a resistência mecânica, mesmo com menor reatividade, conforme análise de DRX (Figura 14), a pasta constitutiva das argamassas com FC se apresentaram mais densas que as demais pastas produzidas com o MK e a PCA, o que pode ser justificado pelo menor fator A/F das argamassas com FC.

5.2.1 Dosagem do concreto a partir das pastas (Planejamento Fatorial)

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos testes para verificar os parâmetros de capacidade de preenchimento e passagem, viscosidade e resistência à segregação, conforme recomendações da EFNARC 2005. A Tabela 17 apresenta a composição dos traços de CAA definidos com base em um planejamento fatorial 2² com três pontos centrais, em que M (relação entre material granular/finos) e B/A (relação brita/areia) se configuram como as variáveis do sistema. Ademais, essas misturas tem como base uma pasta constitutiva, apresentadas na Tabela 12 da seção 4.3.6, com propriedades autoadensáveis, escolhida na região simplex, representada na Figura 36.

Tabela 17 - Composição das misturas de CAA com dosagem a partir das pastas

| TRAÇOS | CONSUMOS | | | | | | | PARÂMETROS | | | | |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------------|---------------------------|------|------|---------|
| | CIM | AM | FINOS | AGM | AGG | W | SP | ÁGUA/ FINOS | PASTA (L/m ³) | B/A | M | (%) ARG |
| MK01 | 469,32 | 119,57 | 588,89 | 786,25 | 644,72 | 247,33 | 8,97 | 1,24 | 446,33 | 0,82 | 2,50 | 0,68 |
| MK02 | 347,33 | 88,49 | 435,82 | 957,85 | 785,44 | 183,05 | 6,64 | 1,24 | 330,32 | 0,82 | 4,00 | 0,64 |
| MK03 | 469,32 | 119,57 | 588,89 | 687,97 | 743,00 | 247,33 | 8,97 | 1,24 | 446,33 | 1,08 | 2,50 | 0,63 |
| MK04 | 347,50 | 88,54 | 436,04 | 836,82 | 903,76 | 183,14 | 6,64 | 1,24 | 330,48 | 1,08 | 4,00 | 0,58 |
| MK05 | 399,63 | 101,82 | 501,45 | 825,16 | 783,91 | 210,61 | 7,64 | 1,24 | 380,06 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| MK06 | 399,63 | 101,82 | 501,45 | 825,16 | 783,91 | 210,61 | 7,64 | 1,24 | 380,06 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| MK07 | 399,63 | 101,82 | 501,45 | 825,16 | 783,91 | 210,61 | 7,64 | 1,24 | 380,06 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| PCA01 | 471,67 | 119,41 | 591,09 | 806,18 | 661,06 | 224,61 | 5,97 | 1,07 | 440,80 | 0,82 | 2,50 | 0,68 |
| PCA02 | 353,79 | 89,57 | 443,35 | 966,27 | 792,34 | 168,47 | 4,48 | 1,07 | 330,63 | 0,82 | 4,00 | 0,64 |
| PCA03 | 471,67 | 119,41 | 591,09 | 705,40 | 761,84 | 224,61 | 5,97 | 1,07 | 440,80 | 1,08 | 2,50 | 0,63 |
| PCA04 | 353,48 | 89,49 | 442,97 | 844,74 | 912,32 | 168,33 | 4,47 | 1,07 | 330,34 | 1,08 | 4,00 | 0,59 |
| PCA05 | 402,28 | 101,84 | 504,12 | 840,20 | 798,19 | 191,57 | 5,09 | 1,07 | 375,94 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| PCA06 | 402,28 | 101,84 | 504,12 | 840,20 | 798,19 | 191,57 | 5,09 | 1,07 | 375,94 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| PCA07 | 402,28 | 101,84 | 504,12 | 840,20 | 798,19 | 191,57 | 5,09 | 1,07 | 375,94 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| FC01 | 463,75 | 156,67 | 620,42 | 846,19 | 693,87 | 198,53 | 6,27 | 0,95 | 407,13 | 0,82 | 2,50 | 0,68 |
| FC02 | 343,58 | 116,07 | 459,66 | 1001,8 | 821,47 | 147,09 | 4,64 | 0,95 | 301,63 | 0,82 | 4,00 | 0,64 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|--------|------|------|------|
| FC03 | 463,75 | 156,67 | 620,42 | 740,41 | 799,65 | 198,53 | 6,27 | 0,95 | 407,13 | 1,08 | 2,50 | 0,63 |
| FC04 | 343,27 | 115,97 | 459,24 | 875,78 | 945,84 | 146,96 | 4,64 | 0,95 | 301,36 | 1,08 | 4,00 | 0,59 |
| FC05 | 392,65 | 132,65 | 525,31 | 875,51 | 831,74 | 168,10 | 5,31 | 0,95 | 344,71 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| FC06 | 392,65 | 132,65 | 525,31 | 875,51 | 831,74 | 168,10 | 5,31 | 0,95 | 344,71 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |
| FC07 | 392,65 | 132,65 | 525,31 | 875,51 | 831,74 | 168,10 | 5,31 | 0,95 | 344,71 | 0,95 | 3,25 | 0,63 |

*CIM=Cimento; AM=Adição Mineral; AGM= Agregado Miúdo; AGG= Agregado Graúdo; W=água e SP= Superplasticificante

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a EFNARC (2005), todas as misturas apresentadas na Tabela 17, com exceção do FC01 e FC03, se enquadram no consumo de finos recomendado que é de até 600 kg/m³; o volume de pasta está acima do recomendado, com exceção das misturas MK02 e MK04, que estão abaixo dos 380 l/m³. Além disso, os pontos centrais MK05, MK06 e MK07 apresentaram volume de pasta próximo do recomendado pela norma. Entretanto, as misturas de CAA com PCA e FC se enquadram no volume de pasta estabelecido pela norma, com exceção das misturas com M=2,5 que apresentaram volume de pasta superior a 380 l/m³.

Com relação ao consumo de agregado graúdo, apenas as misturas MK01, MK03, PCA01 e FC01 apresentaram consumo inferior a 750 kg/m³, os demais traços se enquadram no consumo recomendado por norma.

A quantidade de água ficou acima do recomendado em todas as misturas com metacaulim, com relação A/F = 1,24, enquanto a norma estabelece consumo de água em um intervalo $0,85 \leq A/F \leq 1,10$. Essa alta quantidade de água está relacionada às particularidades do metacaulim que devido à sua maior área de superfície (2,48 m²/g), maior que a do cimento (1,83 m²/g), e irregularidade das suas partículas, necessita de uma maior quantidade de água e superplasticificante para alcançar a fluidez necessária (SKIFAS, *et al.*, 2014).

As demais misturas de CAA apresentaram consumo de água dentro do que estabelece a norma, mesmo as misturas com PCA que apesar da alta área de superfície das partículas, compensou com um bom empacotamento, devido à finura e regularidade de suas partículas e apresentou fator A/F próximo ao limite máximo estabelecido pela norma, corroborando com os estudos de (SAFIUDDIN, *et al.*, 2012) que prever um alto consumo de água e superplasticificante para o CAA produzido com PCA. As misturas com filer apresentaram os menores consumos de água (A/F=0,95), devido às particularidades das partículas, menor área superficial, finura e regularidade

das partículas, conforme discutido na análise das pastas e argamassas, corroborando com (UY SAL e YILMAZ, 2011; UY SAL et al., 2012).

Deve-se salientar que as pastas foram produzidas em dois pseudo-simplex-duplo, com fator A/F fixo em 0,28 e 0,30, como o objetivo da dosagem é alcançar maiores resistências mecânicas, iniciou-se os testes do CAA com fator A/F de 0,28, no entanto, observou-se uma dificuldade de espalhamento, desde os ensaios com argamassas, além disso, nos ensaios de cone marsh, também foi observada uma alta viscosidade, registrando elevados tempos de escoamento. Essa dificuldade registrada na análise da viscosidade, da pasta e da argamassa, postergou ao concreto. Ao fazer testes iniciais com as misturas dos pontos centrais, tendo em vista a falta de fluidez, optou-se por fazer ajuste na quantidade de água, passando a testar, o A/F=0,30, depois A/F= 0,32, fechando o ajuste final com A/F=0,31, para sair o mínimo possível da pasta constitutiva.

A relação B/A e M foram fixadas no sistema para atender ou se aproximar ao máximo dos parâmetros da EFNARC (2005) e o volume de argamassa variou entre 0,58 e 0,68, ou seja, duas das misturas da Tabela 22 (01 e 02), para as três adições minerais, apresentaram percentual de argamassa acima do recomendado pela EFNARC (2005) que é de 0,53 a 0,63. Na sequência, após análise geral da composição das misturas de CAA, conforme recomendações da EFNARC (2005) são apresentadas na Tabela 18, os resultados dos ensaios para avaliar os parâmetros de capacidade de preenchimento e passagem, viscosidade e resistência à segregação, conforme recomendações da norma supracitada.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios com CAA dosados a partir das pastas no estado fresco

| Traço | Slump Flow (cm) | T500 (s) | Anel J (cm) | Funil V (s) | Caixa L H2/H1 | RS (%) | IEV |
|--------------|-----------------|----------|-------------|-------------|---------------|--------|-----|
| MK01 | 86,00 | 1,70 | 84,00 | 5,38 | 0,93 | 5,25 | 1 |
| MK02 | 67,00 | 4,05 | 62,50 | 15,16 | 0,75 | 0,22 | 0 |
| MK03 | 87,00 | 1,80 | 84,50 | 4,97 | 0,87 | 10,37 | 1 |
| MK04 | 65,00 | 4,45 | 60,50 | 17,25 | 0,70 | 0,07 | 0 |
| MK05 | 74,50 | 2,40 | 71,50 | 6,84 | 0,83 | 2,03 | 0 |
| MK06 | 79,50 | 2,10 | 77,00 | 5,64 | 0,85 | 3,67 | 0 |
| MK07 | 72,50 | 2,45 | 69,50 | 6,18 | 0,83 | 3,12 | 0 |
| PCA01 | 87,00 | 2,85 | 84,50 | 6,81 | 0,94 | 9,03 | 1 |
| PCA02 | 40,00 | 0,00 | 36,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 3 |

| | | | | | | | |
|---|-------|------|-------|-------|------|------|---|
| PCA03 | 86,00 | 2,90 | 84,00 | 6,81 | 0,94 | 9,03 | 1 |
| PCA04 | 36,00 | 0,00 | 34,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 3 |
| PCA05 | 72,00 | 7,55 | 68,50 | 20,22 | 0,89 | 1,63 | 0 |
| PCA06 | 71,50 | 7,00 | 69,00 | 18,37 | 0,87 | 1,20 | 0 |
| PCA07 | 71,00 | 8,40 | 68,50 | 32,28 | 0,86 | 1,12 | 0 |
| FC01 | 88,00 | 3,70 | 86,00 | 9,38 | 0,95 | 4,48 | 1 |
| FC02 | 42,50 | 0,00 | 37,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3 |
| FC03 | 83,00 | 5,75 | 81,00 | 11,91 | 0,94 | 6,37 | 1 |
| FC04 | 40,00 | 0,00 | 35,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3 |
| FC05 | 72,00 | 7,90 | 68,00 | 22,21 | 0,89 | 3,03 | 0 |
| FC06 | 68,00 | 9,70 | 66,50 | 28,50 | 0,82 | 3,12 | 0 |
| FC07 | 72,50 | 7,50 | 69,50 | 19,08 | 0,88 | 4,32 | 0 |
| RS=Resistência à Segregação e IEV=Índice de Estabilidade Visual | | | | | | | |

Fonte: Elaboração própria

Os resultados dos testes com o CAA no estado fresco foram submetidos à análise estatística, apresentada na Tabela 19, para verificar a correlação entre os dados, qualidade do modelo e quais variáveis são mais representativas para prever o comportamento das misturas.

Tabela 19 - Análise estatística dos resultados dos testes do CAA no estado fresco

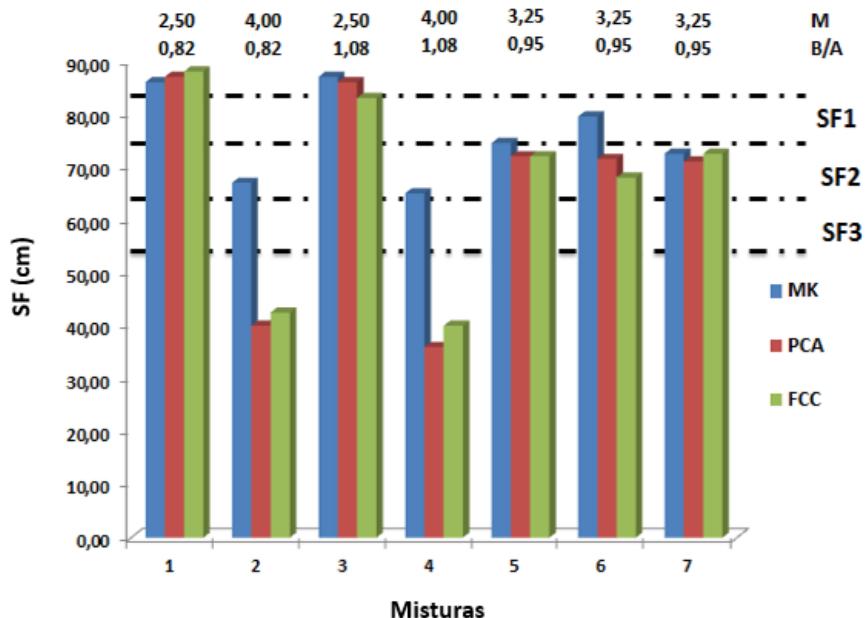
| Adição Mineral | Parâmetros | Slump Flow (cm) | T500 (s) | Anel J (cm) | Funil V (s) | Caixa L H2/H1 | RS (%) |
|----------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
| MK | Rspr | 0,94 | 0,879 | 0,945 | 0,78 | 0,964 | 0,957 |
| | Adj | 0,88 | 0,758 | 0,89 | 0,56 | 0,927 | 0,914 |
| | Ms residual | 8,99 | 0,291 | 10,08 | 0,361 | 0 | 1,08 |
| | M | -20,5 | 2,5 | -22,75 | 11,03 | -0,175 | -7,665 |
| PCA | B/A | -0,5 | 0,25 | -0,75 | 0,84 | -0,055 | 2,485 |
| | Rspr | 0,941 | 0,11 | 0,945 | 0,054 | 0,76 | 0,813 |
| | Adj | 0,883 | 0 | 0,891 | 0 | 0,52 | 0,625 |
| | Ms residual | 49,06 | 22,386 | 46,77 | 271,628 | 0,093 | 6,101 |
| FCC | M | -48,5 | -2,875 | -42,25 | -6,81 | -0,94 | -8,908 |
| | B/A | -2,5 | 0,025 | -0,75 | 0 | 0 | -0,023 |
| | Rspr | 0,944 | 0,275 | 0,949 | 0,163 | 0,771 | 0,937 |
| | Adj | 0,897 | 0 | 0,899 | 0 | 0,543 | 0,875 |
| FC | Ms residual | 35,842 | 21,516 | 40,393 | 199,272 | 0,088 | 0,693 |
| | M | -44,25 | -4,725 | -47,25 | -10,645 | -0,945 | -5,426 |
| | B/A | -3,75 | 1,025 | -3,5 | 1,265 | -0,005 | 0,946 |

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 19, observa-se que todos os testes, para as misturas produzidas com MK, apresentaram excelente correlação dos resultados obtidos no experimento e baixo erro experimental, (**APÊNDICE 8**), o que garante a qualidade do modelo de previsão que pode ser gerado por esses dados. No entanto, os ensaios de T_{500} e Funil V para as misturas com PCA e FC, que medem a viscosidade, tiveram a análise comprometida, devido ao alto índice de instabilidade das misturas (IEV=3) e apresentaram baixa correlação e alto resíduo, ao contrário dos demais ensaios. Em todos os testes a variável M foi representativa para a variação dos resultados e a variável B/A foi pouco expressivo, com exceção das misturas de PCA e FC nos ensaios de T_{500} e Funil V, em que M também não foi representativa, conforme diagrama de Pareto (**APÊNDICE 9**). Após verificar que os resultados obtidos são consistentes, segue-se analisando os parâmetros de auto adensabilidade. O primeiro é a capacidade de preenchimento, que é avaliada por meio dos ensaios de *slump flow* e anel J.

5.2.1.1 Capacidade de preenchimento do CAA (Planejamento fatorial)

Os resultados de capacidade de preenchimento são apresentados nos Gráficos 4 e 5, *Slump Flow* e anel J, respectivamente. Nesse momento, foi possível verificar a estabilidade do concreto por meio de análise visual do espalhamento, verificando-se a uniformidade das bordas e a coesão entre os constituintes da mistura.

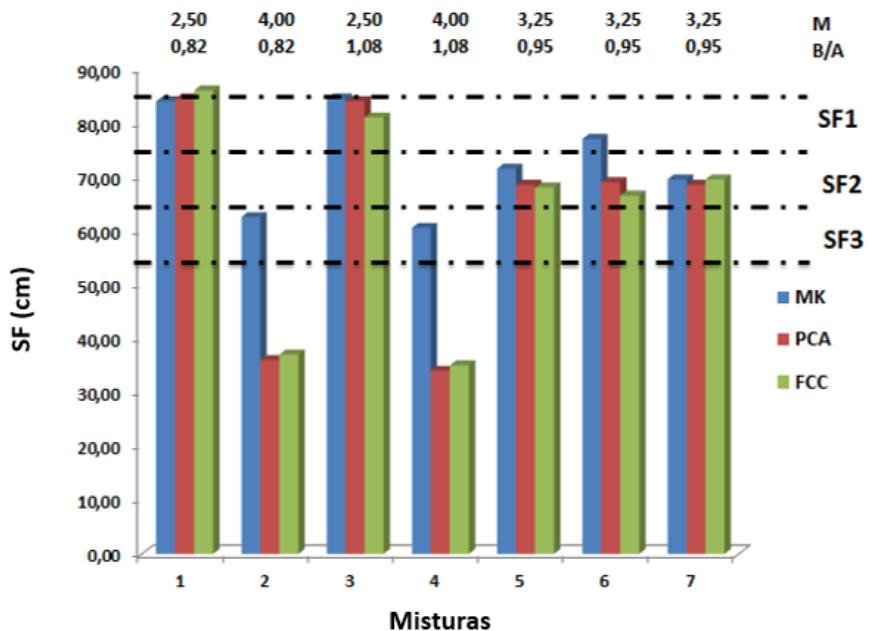
Gráfico 4 - Resultados do *Slump Flow* do CAA dosados a partir das pastas

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o Gráfico 4 as misturas 01 e 03, nas três adições minerais, com exceção do FC03, não se enquadram em nenhuma das classes da EFNARC (2005); essas misturas apresentaram sinais de segregação (IEV=1) durante o ensaio e o maior volume de pasta, dentre todas as misturas. As demais misturas ficaram classificadas na classe SF2, com exceção do MK06 e FC03 na SF1 e MK04 na SF3. As misturas 02 e 04, com menor volume de pasta, apresentaram os menores espalhamentos, inclusive, nas misturas produzidas com PCA e FC, constatou-se IEV=3 que configura um alto grau de instabilidade na mistura, as quais, assim como as misturas 01 e 03 não se enquadram nas classes determinadas pela EFNARC (2005). Por outro lado, os pontos centrais apresentaram resultados intermediários; nesse momento, observa-se a relação direta entre volume de pasta e o espalhamento, evidenciado na análise estatística.

No tocante à relação B/A não se observa uma variação expressiva, que é constatada ao verificar que ao variar a relação B/A, não há uma variação lógica com o espalhamento. Os resultados dos ensaios com o Anel J (Gráfico 5) também seguem o mesmo comportamento; inclusive, é possível perceber uma tendência de bloqueio nas misturas 02 e 04, em virtude da dificuldade de passar pelas barras de aço para se espalhar sobre a placa metálica.

Gráfico 5 - Resultados do ensaio de Anel J do CAA dosados a partir das pastas



Fonte: Elaboração própria

Os resultados obtidos nos ensaios de *slump flow* e anel J corroboram com os estudos de Shutter *et al* (2008) que verificaram uma relação direta, entre a trabalhabilidade e o volume de pasta. Já o volume de argamassa não apresentou relação com o preenchimento, tendo em vista que ao variar o volume de argamassa, mantendo-se o volume de pasta constante (variação do B/A), não se observa variações expressivas nos resultados de espalhamento.

O volume e o tamanho máximo do agregado graúdo também têm influencia no espalhamento. Nas misturas foi utilizada brita com diâmetro máximo 9,5 mm, dentro do recomendado por (WU e WANG, 2011, KHALEEL, *et al.*, 2014). Além disso, a forma regular e arredondada do agregado graúdo utilizado, também contribui para a redução da tensão de cisalhamento que aumentou a capacidade de preenchimento (ALEXANDER e PROSK, 2003); o volume de agregado graúdo está dentro dos parâmetros da EFNARC (2005), com exceção dos traços com relação B/A=0,82, que estão próximo do limite mínimo recomendado. Os demais traços apresentam volume de agregado graúdo, próximo do limite máximo estabelecido pela norma, o que exige uma maior fluidez das argamassas para espalhar o alto volume de agregado graúdo (NEPONUCENO, *et al.*, 2016).

A trabalhabilidade é influenciada pela finura e a quantidade de adição mineral adicionada às misturas de CAA, que melhoram sua viscosidade. Isso afeta o consumo de superplasticificante e água, conforme visto na tabela 17 (PERLOT, *et al.*, 2013). Esses resultados são reflexos do aumento da viscosidade que ajuda a melhorar a suspensão dos agregados na mistura, evita a segregação dos agregados graúdos e mantém a mistura homogênea, o que foi comprovado com a excelente coesão nas misturas de CAA, produzidos com metacaulim, com exceção de MK01 e de MK03 que apresentaram leve segregação, mas com boa suspensão dos grãos dos agregados graúdos, conforme estudos realizados por (CYR e MOURET, 2003; PERLOT, *et al.*, 2013; HASSAN e MAYO, 2014).

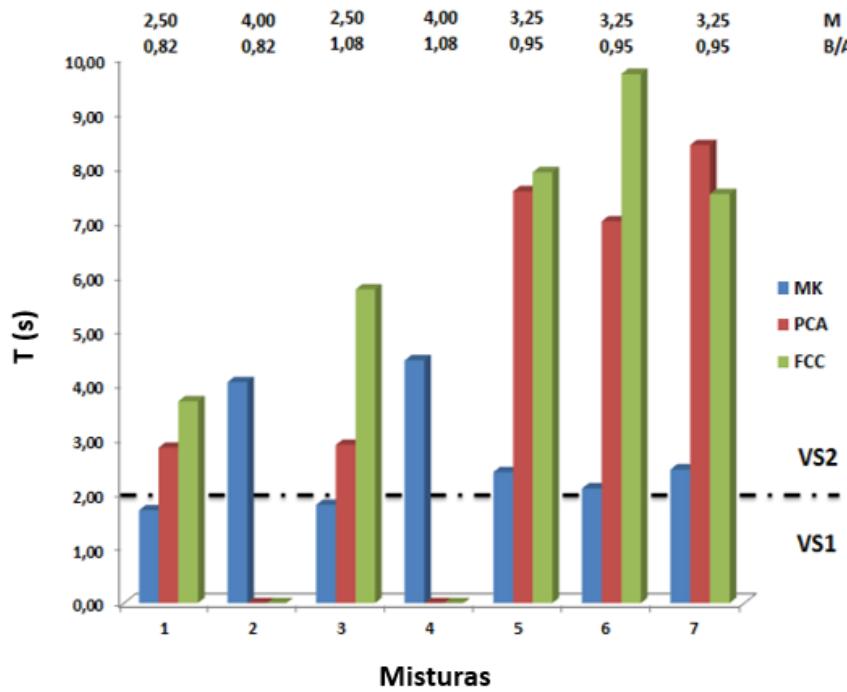
Com relação as misturas 02 e 04 produzidas, sobretudo, com PCA e FC, observa-se uma brusca redução do diâmetro de espalhamento. Essa redução na capacidade de preenchimento é devida principalmente à maior área de superfície da PCA, corroborando com os estudos de (MEMON, 2008; SAFIUDDIN, *et al.*, 2012, CHOPRA, 2014; LE DUDVIG, 2016). A maior densidade de empacotamento da PCA ($0,91 \text{ g/cm}^3$), devido à finura e regularidade das partículas, conforme verificado por meio do MEV (Figura 15 a), aumenta a concentração das partículas e reduz o volume de pasta, conforme os dados de volume de pasta para as misturas de CAA (Tabela 17). Essa redução no volume de pasta reduz a capacidade de preenchimento do concreto, corroborando com a análise estatística e com estudos de (SAFIUDIN, 2008; SHUTTER, *et al.*, 2008).

A finura e a superfície específica do fíler influenciaram nas propriedades reológicas do CAA. As partículas com menor diâmetro, maior regularidade e superfície lisa, do FC, conforme mostra o MEV ilustrado na figura 15 (b), proporciona melhor efeito de enchimento, que provoca a redução da área de superfície e densidade de empacotamento do sistema de partículas. Com a redução, na área de superfície do FC ($1,58 \text{ m}^2/\text{g}$) e densidade de empacotamento ($0,86 \text{ g/cm}^3$), a tensão de escoamento e a viscosidade também diminuem o que reflete na menor quantidade de água e superplasticificante, conforme visto na Tabela 17 e em consonância com os estudos (UYDAL e YILMAZ, 2011; UYDAL *et al.*, 2012).

5.2.1.2 Viscosidade do CAA (Planejamento Fatorial)

A viscosidade é mais bem avaliada pelos testes: T_{500} e Funil V, apresentados nos Gráficos 6 e 7. Além de mensurar os tempos de espalhamento e escoamento, é possível verificar a estabilidade das misturas, mediante a continuidade do fluxo de escoamento.

Gráfico 6 - Resultados do ensaio de T_{500} do CAA (Planejamento Fatorial)



Fonte: Elaboração própria

Analisando-se o Gráfico 6 observa-se uma relação inversa entre o volume de pasta e o tempo de espalhamento, corroborando com a análise estatística. As misturas com menor volume de pasta apresentaram maior dificuldade de espalhamento, ao contrário das misturas com maior volume de pasta; novamente, não se observou variação expressiva nos tempos de espalhamento, ao variar a relação B/A, no momento em que não se observa variações expressivas, nos tempos de espalhamento, bem como ao variar o teor de argamassa.

As misturas MK01 e MK03 foram classificadas como VS1 e apresentaram leve segregação e as demais misturas foram classificadas como VS2, e apresentaram excelente coesão entre os componentes da mistura, apesar de FC01 e FC03 apresentar leve segregação. Já as misturas 02 e 04, produzidas com PCA e FC não apresentaram fluidez suficiente para escoar. Com isso, os resultados do ensaio corroboram com os estudos de Shutter *et al* (2008) que relacionam trabalhabilidade e

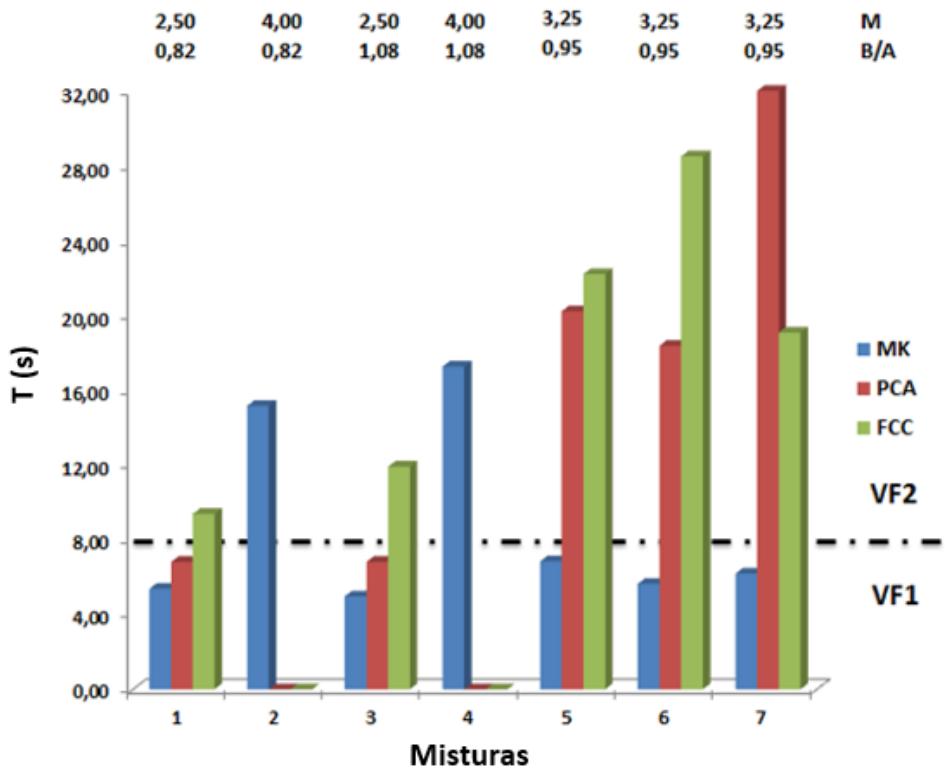
volume de pasta, haja vista que a viscosidade apresentou relação inversa com o volume de pasta.

Esses resultados corroboram com (CYR e MOURET, 2003; PERLOT, *et al.*, 2013; HASSAN e MAYO, 2014), que relacionam a trabalhabilidade com as propriedades do metacaulim, sobretudo, a finura menor que a do cimento, e área de superfície específica, que nesse caso é superior ao do cimento, que proporcionam um aumento na viscosidade, e ajudam a melhorar a suspensão dos agregados na mistura, o que evita a segregação de agregados graúdos e mantém as misturas mais homogêneas. A alta reatividade do PCA que de acordo com o FRX tem um percentual de 98,33% de sílica amorfa, e a alta área de superfície específica (5,08 m²/g), proporcionam um aumento na viscosidade, e ajudaram a melhorar a suspensão dos agregados na mistura (SAFIUDDIN, *et al.*, 2012).

Já para o CAA produzido com FC devido ao menor diâmetro das partículas e área superficial específica do FC, a redução na viscosidade, dificultou a suspensão dos agregados na mistura (UYBAL e YILMAZ, 2011; UYSAL *et al.*, 2012), o que aumenta a possibilidade de segregação de agregados graúdos. Esse fato pode ser constatado, com FC03 que apresentou sinais de segregação, mesmo com diâmetro de espalhamento compatível com a EFNARC (2005), diferentemente, das misturas com MK e PCA. Já as misturas mais secas, FC02 e FC04, além da falta de fluidez, apresentaram aspecto áspero, com alto índice de instabilidade visual (IEV=3), ou seja, apresentou menor instabilidade que o CAA produzido com MK e PCA.

Além do T₅₀₀ o teste com funil V mensura a viscosidade do CAA, e seus resultados são apresentados no Gráfico 7. Assim como T₅₀₀, os tempos de escoamento seguiram uma relação inversa com o volume de pasta.

Gráfico 7 - Resultados do ensaio de Funil V do CAA (Planejamento Fatorial)



Fonte: Elaboração própria

Observando-se os resultados no Gráfico 7 verificam-se baixos tempos de escoamento para as misturas com MK, classe VF1, com exceção de Mk02 e Mk04, classe VF2, com mais dificuldades para espalhar sobre a placa metálica, identificado no teste de T_{500} e escoar através do funil V. Isso se deve à redução da trabalhabilidade, devido ao menor volume de pasta (SHUTTER, et al., 2008). Já para as misturas produzidas com PCA e FC registraram-se maiores tempos de escoamento, acima de 2,0 s (VF2). Deve-se salientar que as misturas 02 e 04, não apresentaram fluidez suficiente para escoar em função do baixo volume de pasta.

Esses tempos maiores refletem uma perda na fluidez, devido ao aumento da viscosidade nas misturas com MK (VEJMELKOVA, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAJI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, 2014; HANNAN, 2018). Que foi intensificado nas misturas com PCA que apresentaram perdas ainda maiores de fluidez, devido ao aumento da viscosidade, verificados nos estudos de (MEMON, 2008; SAFIUDDIN, 2008; MEMON, et al., 2011; KANNAN e GANESAN; 2014; LE LUDWIG, 2016); assim como nas misturas com FC, verificados nos estudos de (UYDAL e YILMAZ, 2011; UYDAL et al., 2012).

Nas misturas com PCA e FC o escoamento ocorreu de forma continua nas misturas com volume de pasta intermediário (pontos centrais), e com leve descontinuidade nas misturas com maior volume de pasta, caracterizando IEV=1. As misturas com menor volume de pastas apresentaram escoamento, inicialmente com falhas até interromper totalmente, o que caracteriza IEV=3. Isso mostra que o CAA com PCA e FC, apresentou baixa coesão, devido à redução da viscosidade, aumentando a segregação das misturas, o que pode ser atribuído às características das partículas da PCA e do FC.

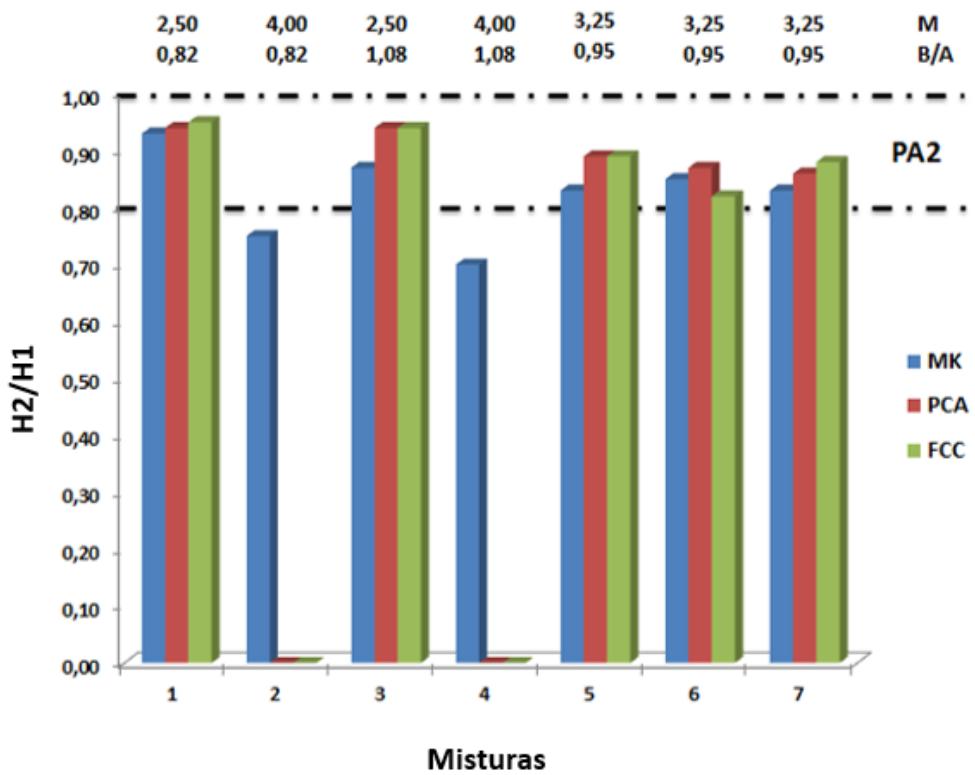
Apesar dos baixos tempos registrados, o escoamento ocorreu de forma contínua em todas as misturas com MK, mesmo nas misturas MK01 e MK03, que apresentaram sinais leves de segregação (IEV=1), o que mostra que o CAA apresentou coesão, devido ao aumento da viscosidade, evitando a segregação e melhorando a homogeneidade das misturas (CYR E MOURET, 2003; PERLOT, *et al.*, 2013; HASSAN e MAYO, 2014).

A maior área de superfície específica do MK e da PCA, em relação ao cimento, aumenta a viscosidade das pastas, corroborando com a pesquisa de (NUNES, 2001). Além disso, a maior densidade de empacotamento do PCA (0,91 g/cm³) é outro fator que contribui para redução do volume de pasta, devido a maior concentração das partículas, consoante estudos de (GHOUDOSSI, *et al.*, 2014) e que se reflete em perda de fluidez, melhora a coesão e resistência à segregação, tornando o CAA mais homogêneo.

5.2.1.3 Capacidade de Passagem do CAA (Planejamento Fatorial)

Após analisar a capacidade de preenchimento, fluidez e viscosidade do CAA, o Gráfico 8 apresenta os resultados do ensaio de caixa L, que avalia a habilidade de passagem das misturas de CAA.

Gráfico 8 - Resultados do ensaio de caixa L do CAA (Planejamento Fatorial)



Fonte: Elaboração própria

De acordo com a EFNARC (2005), os resultados do ensaio de caixa L, o resultado da razão H2/H1 deve variar entre 0,80 e 1,00. Observa-se que a maioria das misturas de CAA, com exceção do MK02 e MK04, apresentaram resultados dentro desse intervalo, sendo classificados como PA2. As misturas 02 e 04 produzidas com PCA e FC não escoaram entre as barras, devido à alta viscosidade e baixa fluidez. Verifica-se uma relação direta entre a razão H2/H1 e volume de pasta que de acordo com a análise estatística é a variável mais representativa para variação dos resultados do ensaio. A relação B/A teve uma leve influência, ao verificar uma modesta variação com o volume de agregado graúdo, comportando-se conforme estudos de (ALEXANDER e PROSK, 2003; EFNARC, 2005; RAMGE *et al.*, 2010).

Para as misturas com PCA e FC a relação B/A não teve influência, assim como o volume de argamassa. De acordo com os dados ilustrados no Gráfico 8; ao variar a relação B/A os resultados do experimento apresentam variação pouco expressiva. O mesmo ocorre ao variar o percentual de argamassa, mantendo o percentual de pasta constante, não se observa alterações expressivas na habilidade de passagem.

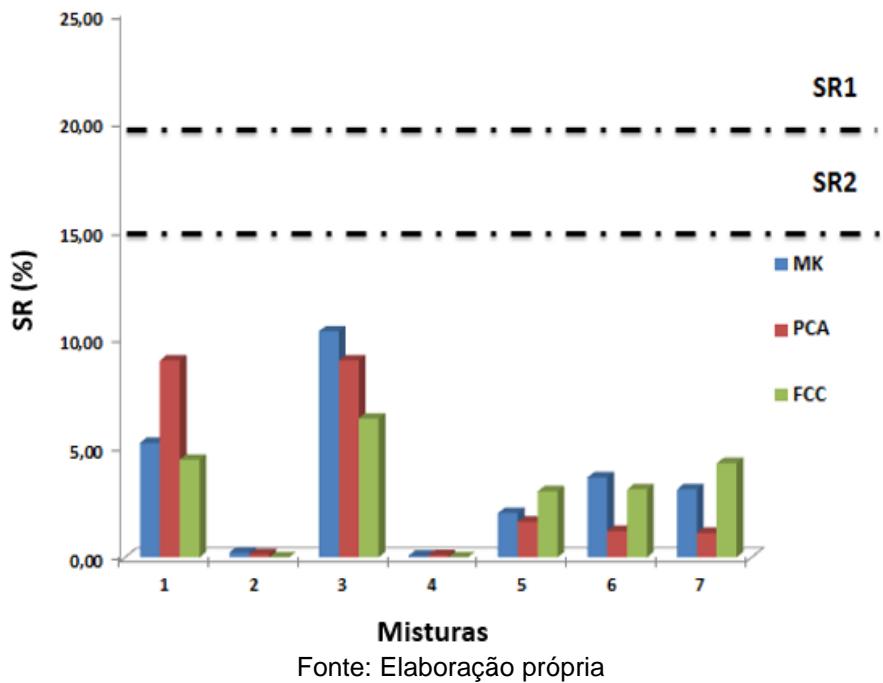
Ao verificar uma relação direta, entre volume de pasta e habilidade passagem, deve-se salientar que o volume e diâmetro máximo do agregado graúdo tiveram grandes influências na capacidade de passagem do CAA. Mesmo com o diâmetro máximo do agregado graúdo (9,5 mm) dentro do que recomenda a literatura (KHALEEL, et al., 2014), forma regular e arredondado, e o volume de agregado graúdo próximo das quantidades mínimas que recomenda a EFNARC (2005), o volume de pasta das misturas 02 e 04 não foi suficiente para fazer com que o CAA superasse as barras metálicas e pudesse escoar entre elas.

Associado ao baixo volume de pasta, o percentual de 20% de substituição de MK, além de aumentar as demandas por água e superplastificante para alcançar a fluidez, reduz a razão H2/H1, e as misturas passam a apresentar problemas de bloqueio (VEJMELKOVA, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, 2014; HANNAN, 2018). Essa dificuldade na capacidade de passagem é devido à textura rugosa e à forma irregular das partículas de MK, identificadas no MEV (Figura 15 a), que dificultam o escoamento do CAA (SKIFAS, et al., 2014). O percentual de 20% de substituição de PCA também reduz a razão H2/H1, e as misturas passam a apresentar problemas de bloqueio (MEMON, 2008; KANNAN E GANESAN; 2014; LE LUDWIG, 2016).

5.2.1.4 Resistência a segregação do CAA (Planejamento Fatorial)

Além da análise da estabilidade visual, a coesão e resistência à segregação do CAA, foram avaliadas por meio do teste de resistência à segregação, onde os dados obtidos são apresentados no Gráfico 9. O método utilizado foi o teste da peneira marsh 200, conforme a norma 15823/2017, apresentado na metodologia do trabalho.

Gráfico 9 - Resultados do ensaio de resistência à segregação do CAA (Planejamento Fatorial)



Fonte: Elaboração própria

Verifica-se uma relação direta entre o percentual que passa pela peneira 200 e o volume de pasta que de acordo com a análise estatística é a variável mais representativa para a variação dos resultados do ensaio. Todas as misturas apresentaram resistência à segregação dentro dos limites estabelecidos pela EFNARC (2005), inferior a 15,00%; mesmo as misturas 01 e 03, que foram identificados com IEV 1 e sinais de segregação, apresentaram excelente coesão e suspensão dos agregados na argamassa, conforme literatura pesquisada que afirma nos estudos de (MELO E CARNEIRO, 2010; SKIFAS, *et al.*, 2014; KANNAN, 2018) que a finura e o percentual de adição de MK entre 15% e 20% em substituição ao cimento melhoram a viscosidade do CAA, e consequentemente, a coesão e resistência à segregação do CAA.

A adição da PCA ao CAA em substituição ao cimento melhoram a viscosidade, e consequentemente, a coesão e resistência à segregação do CAA. Isso se deve a alta reatividade da PCA que de acordo com o FRX (Tabela 1) apresenta 98,33% de sílica amorfa e a área superficial específica extremamente elevada 5,08 m²/g, que aumenta a capacidade de retenção de água e a viscosidade da mistura de CAA que são necessárias para evitar a segregação, corroborando com a pesquisa de (SAFIUDDIN *et al.*, 2012). A regularidade das partículas, verificadas no MEV (Figura

16 a) e baixa massa específica 2,08 g/cm³, contribuem para uma maior densidade de empacotamento 0,91 g/cm³ e concentração de partículas e reduz o volume de pasta, reduzindo a segregação.

A adição de FC ao CAA em substituição ao cimento reduziu a viscosidade, e consequentemente, a coesão e resistência à segregação do CAA. Com a substituição de cimento por FC, com partículas mais finas, e área superficial menor; melhora o empacotamento dos grãos, provocando uma redução na densidade de empacotamento. Esse efeito, além de reduzir a demanda de água e superplastificante, melhora os aspectos de deformação plástica, observados no ensaio de *slump flow* e anel J e resistência à segregação estática, corroborando os resultados do teste da peneira. Por outro lado, reduz a resistência à segregação dinâmica, o que justifica a mistura FC03 apresentar sinais de segregação, mesmo com diâmetro de espalhamento compatível com a EFNARC (2005). Esses efeitos adversos entre segregação estática e dinâmica corroboram com os estudos de (MELO e CARNEIRO, 2010).

Por fim, com o volume de agregado graúdo dentro dos padrões da EFNARC e diâmetro máximo de 9,5 mm, a tensão de cisalhamento é reduzida, o que contribui para uma maior homogeneidade do CAA, conforme estudos de (KHALEEL, et al., 2014; HU e WANG, 2011).

5.2.2 Dosagem do CAA a partir da argamassa

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes para verificar os parâmetros de capacidade de preenchimento e passagem, viscosidade e resistência à segregação, conforme recomendações da EFNARC 2005, Tabela 13 e a composição das misturas de CAA (Tabela 20), com dosagem a partir da argamassa com as três adições minerais utilizadas nesse estudo. As misturas foram definidas com base em três níveis de M (relação entre material granular e os finos da mistura) e B/A (relação brita/areia), em que a relação B/A assim como no planejamento fatorial, variou de 0,82 a 1,08 e o M variou em função da relação B/A e de acordo com a argamassa de constituição.

As argamassas foram escolhidas de acordo com suas características de espalhamento, fluidez e viscosidade, além da resistência mecânica. Como a

resistência mecânica teve pouca variação entre as misturas e todas as misturas alcançaram resistência satisfatória, para os objetivos da pesquisa, foram escolhidas as argamassas, com menor percentual de pasta e que apresentassem a capacidade de se auto adensar. Nesse sentido, para o CAA do MK e do PCA, foram escolhidas as argamassas com 50,0% de pasta e 50,0% de agregado miúdo (argamassa 2), já para o fíler foi escolhida uma composição com 55,0% de pasta e 45,0 de agregado miúdo (argamassa 3).

Tabela 20 – Composição das misturas do CAA (dosagem a partir da argamassa)

| TRAÇOS | CONSUMOS | | | | | | | PARÂMETROS | | | | |
|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------------|---------------------------|------|------|---------|
| | CIM | AM | FINOS | AM | AG | W | SP | A/F | PASTA (L/m ³) | B/A | M | (%) ARG |
| MK08 | 416,96 | 106,23 | 523,19 | 859,12 | 704,48 | 219,74 | 8,97 | 1,24 | 396,54 | 0,82 | 3,00 | 0,66 |
| MK09 | 400,02 | 101,92 | 501,94 | 824,66 | 783,42 | 210,81 | 7,64 | 1,24 | 380,43 | 0,95 | 3,20 | 0,63 |
| MK10 | 384,63 | 97,99 | 482,62 | 791,45 | 854,77 | 202,70 | 7,35 | 1,24 | 365,79 | 1,08 | 3,40 | 0,60 |
| PCA08 | 421,67 | 107,43 | 529,10 | 868,83 | 712,44 | 201,06 | 9,02 | 1,07 | 398,12 | 0,82 | 3,00 | 0,66 |
| PCA09 | 404,33 | 103,02 | 507,35 | 833,55 | 791,87 | 192,79 | 7,73 | 1,07 | 380,89 | 0,95 | 3,20 | 0,63 |
| PCA10 | 388,62 | 99,01 | 487,63 | 799,65 | 863,63 | 185,30 | 7,43 | 1,07 | 366,08 | 1,08 | 3,40 | 0,60 |
| FCC08 | 445,25 | 150,42 | 595,67 | 866,79 | 710,77 | 190,61 | 6,78 | 0,95 | 398,70 | 0,82 | 2,65 | 0,67 |
| FCC09 | 424,76 | 143,50 | 568,26 | 834,11 | 792,40 | 181,84 | 5,74 | 0,95 | 375,26 | 0,95 | 2,85 | 0,64 |
| FCC10 | 406,44 | 137,31 | 543,75 | 802,20 | 866,38 | 174,00 | 5,49 | 0,95 | 359,08 | 1,08 | 3,05 | 0,61 |

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a EFNARC (2005), as misturas apresentadas na Tabela 20, se enquadram no consumo de finos recomendado (até 600 kg/m³). O volume de pasta está dentro dos limites recomendados pela norma, entre 300 e 380 l/m³, novamente, com exceção do MK08, PCA08 e FCC08, misturas com maior percentual de argamassa. Com relação ao consumo de agregado graúdo, as misturas apresentaram consumo entre 750 kg/m³ e 1000 kg /m³, se enquadram no consumo de agregado graúdo recomendado por norma, com exceção das misturas com relação B/A=0,82, com consumo de agregado graúdo inferior a 750 kg/m³.

A quantidade de água seguiu as mesmas quantidades das misturas com a dosagem por meio do planejamento fatorial, mesmo partindo da argamassa, devido ter origem da mesma pasta constitutiva, com o MK apresentando consumo de água superior ao recomendado, devido as característica das partículas dessa pozolana, e o PCA e FC dentro do consumo de água previsto pela EFNARC (2005).

A relação (B/A) foi fixada e junto com a composição da argamassa foi definido o M. Para o MK e a PCA o (M) foi o mesmo, haja vista que partiu da mesma composição de argamassa (50,0% pasta e 50,0% areia); já o fíler apresentou (M) maior em função da composição da argamassa que apresenta um volume de pasta de 55,0%. Esse aumento no volume de pasta refletiu nos percentuais de argamassa na composição do CAA que foram maiores que os do MK e PCA. Na sequência, após análise geral da composição das misturas de CAA, conforme recomendações da EFNARC (2005) são apresentadas na Tabela 21, os resultados dos ensaios para avaliar os parâmetros de capacidade de preenchimento e passagem, viscosidade e resistência à segregação, conforme recomendações da norma supracitada.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco (Dosagem por Argamassa)

| Mistura | Slump Flow (cm) | T500 (s) | Anel J (cm) | Funil V (s) | Caixa L H2/H1 | RS (%) | IEV |
|--------------|-----------------|----------|-------------|-------------|---------------|--------|-----|
| MK08 | 82,00 | 1,90 | 80,00 | 6,78 | 0,89 | 1,48 | 0 |
| MK09 | 81,00 | 2,00 | 78,50 | 7,97 | 0,86 | 0,54 | 0 |
| MK10 | 72,50 | 3,20 | 69,00 | 12,34 | 0,80 | 0,12 | 0 |
| PCA08 | 81,00 | 6,40 | 78,50 | 9,90 | 0,89 | 3,61 | 0 |
| PCA09 | 77,00 | 7,20 | 75,00 | 13,60 | 0,86 | 1,32 | 0 |
| PCA10 | 73,50 | 8,10 | 72,00 | 19,30 | 0,85 | 0,75 | 0 |
| FCC08 | 78,50 | 6,80 | 77,00 | 14,69 | 0,91 | 2,26 | 0 |
| FCC09 | 76,00 | 7,70 | 74,50 | 16,91 | 0,89 | 2,03 | 0 |
| FCC10 | 73,00 | 8,90 | 71,50 | 20,37 | 0,84 | 7,69 | 0 |

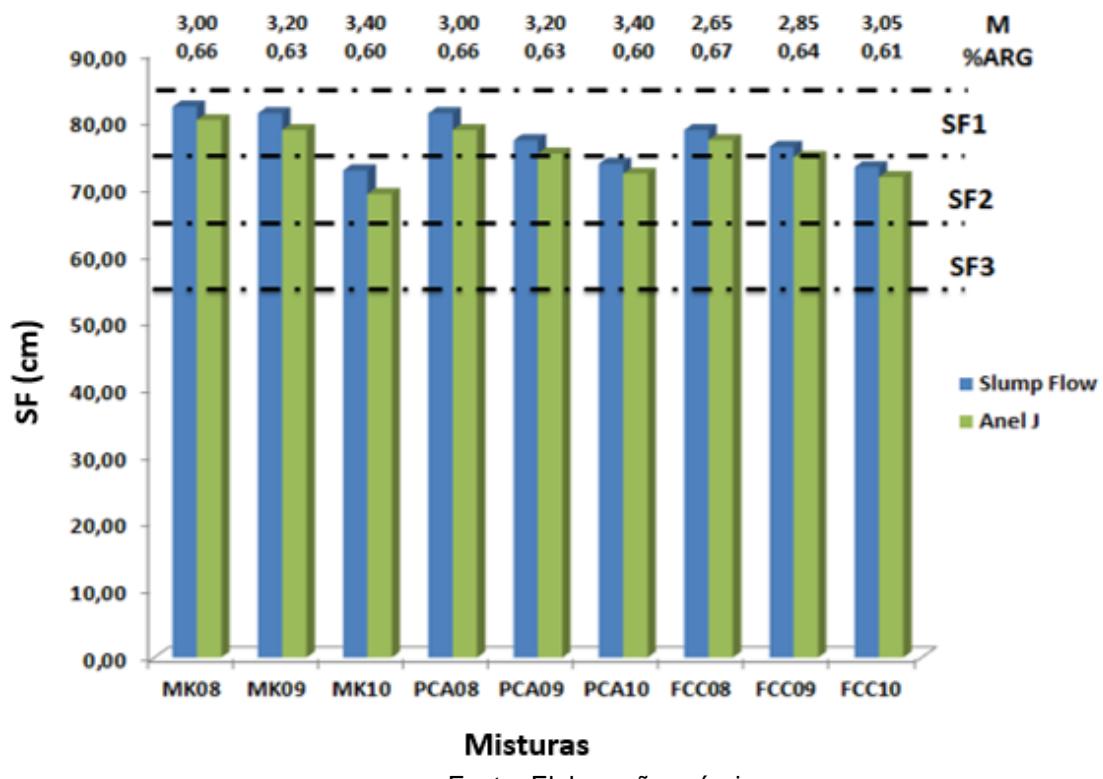
Fonte: Elaboração própria

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 21, verifica-se que todas as misturas obtiveram respostas satisfatórias, em consonância com os critérios estabelecidos pela EFNARC (2005). Na sequência será discutido cada um desses parâmetros que conferem auto adensabilidade as misturas.

5.2.2.1 Capacidade de preenchimento do CAA a partir da argamassa

O primeiro parâmetro de auto adensabilidade é a capacidade de preenchimento, que é avaliada por meio dos ensaios de *slump flow* e *anel J*. Os resultados desses ensaios são apresentados no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Resultados do Slump Flow e Anel J do CAA dosado por argamassa



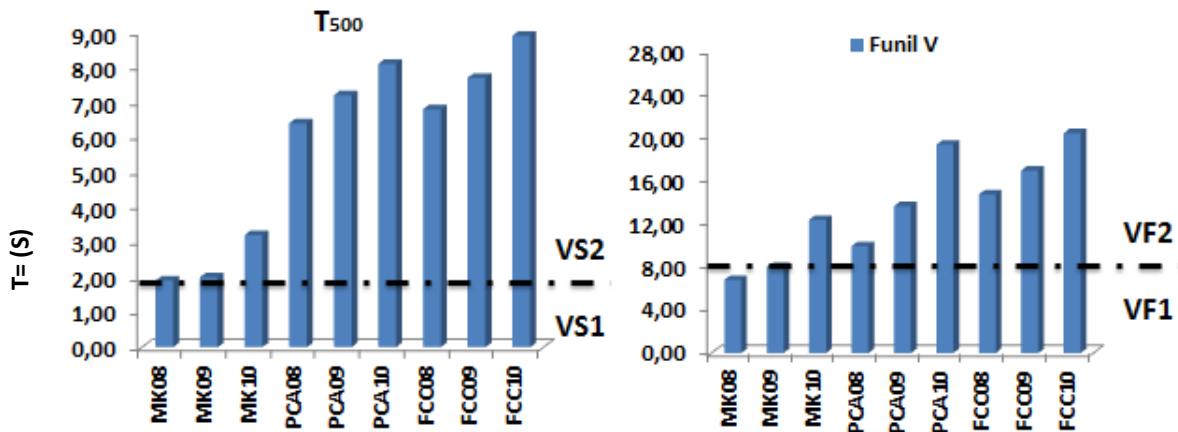
De acordo com o Gráfico 10, as misturas MK10, PCA10 e FCC10 se enquadram na classe SF02 e as demais misturas na classe SF01 conforme EFNARC (2005). Nenhuma das misturas de CAA apresentou sinais de segregação sendo classificados como IEV=0. Observou-se uma relação direta entre espalhamento e volume de pastas, bem como entre volume de argamassa e espalhamento, em todas as adições minerais utilizadas. O ensaio de anel J apresentou comportamento similar ao *slump flow*. Nenhum dos traços de CAA apresentou dificuldades de superar as barras de aço e conseguiram espalhar com facilidade.

As misturas com menor volume de pasta, apresentaram menor facilidade de espalhamento, com isso, os resultados do ensaio corroboram com os estudos de Shutter *et al* (2008) e assim como para o *flow* e anel J, observa-se uma variação entre os tempos de espalhamento e o volume de pasta, e volume de argamassa, no entanto, essa relação é inversa. Essa relação conforme visto na Tabela 20, é consequência do volume de pasta, uma vez que a pasta, na verdade é constitutiva tanto para argamassa como para o CAA e se torna a base para os dois caminhos de dosagem do CAA utilizados nessa pesquisa.

5.2.2.2 Viscosidade do CAA a partir da argamassa

A viscosidade é mais bem avaliada pelos testes: T_{500} e Funil V, apresentados no Gráfico 11 (a) e 11 (b). Além de mensurar os tempos de escoamento, é possível verificar a estabilidade das misturas, mediante a continuidade do fluxo de escoamento.

Gráfico 11 - Resultados dos testes de viscosidade do CAA a partir da argamassa
(a) (b)



Fonte: Elaboração própria

Com exceção do MK08 e MK09, todas as misturas foram classificadas como VS2 de acordo com a EFNARC (2005), observa-se que o CAA com FC apresentou tempos maiores de espalhamento comparado ao CAA com MK e PCA, apesar de apresentar espalhamento compatível com as demais adições minerais, ou seja, as pastas com FC apresentaram maior viscosidade.

Os resultados do teste com o funil V, assim como T_{500} , seguiram em uma relação inversa, com o volume de pasta e volume de argamassa. Os resultados mostraram tempos de escoamento para as misturas, classe VF2, conforme EFNARC (2005), com exceção de MK08 e MK09, que assim como no ensaio de T_{500} , apresentaram maior fluidez e menores tempos de escoamento. O escoamento ocorreu de forma continua nas misturas, Isso mostra que o CAA, apresentou boa coesão, devido ao controle da viscosidade, reduzindo a segregação das misturas, o que pode ser atribuído ao volume e as características da pasta constitutiva. Além disso, a densidade de empacotamento, em todas as combinações, foi menor que o cimento, isso contribui para o aumento do volume de pasta, devido a maior

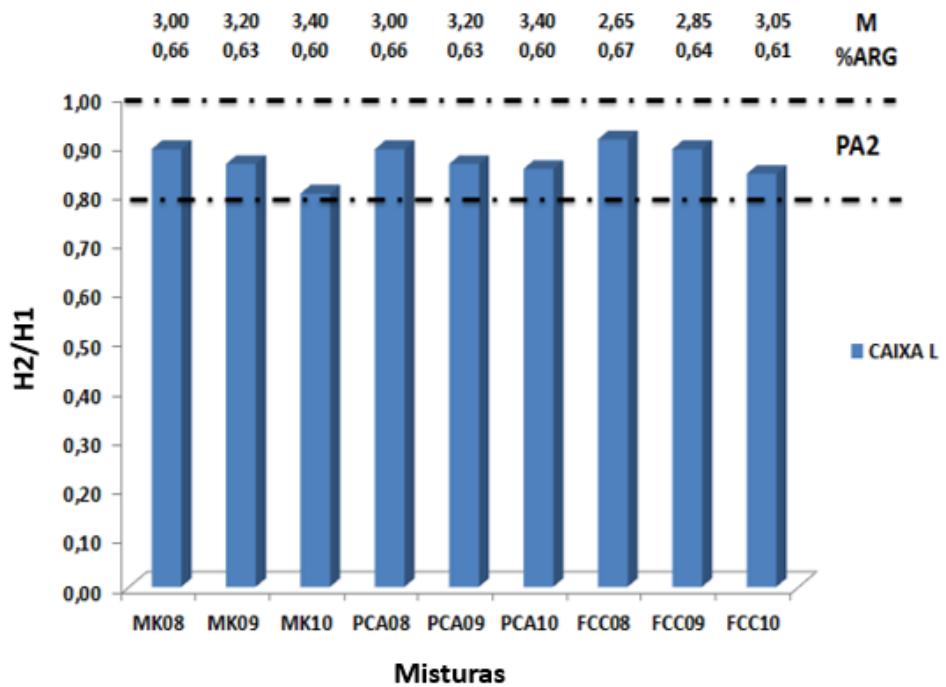
concentração das partículas, consoante estudos de (GHOUDOSSI, et al., 2014) e que se reflete em uma maior fluidez do CAA.

Apesar do maior volume de pasta e argamassa, apresentados na composição do CAA com FC, os maiores tempos de espalhamento no T_{500} e escoamento no funil V, evidenciam a grande influência das propriedades da pasta constitutiva na governança nas propriedades de fluxo do concreto, conforme (SAAK, et al., 2001; BUI, et al., 2002; NANTHAGOPALAM e SAMATHAM, 2009; YEH, et al., 2009; DINIZ, 2013; BUCHER, et al., 2014 e WU et al., 2016).

5.2.2.3 Capacidade de passagem do CAA a partir da argamassa

Após analisar a capacidade de preenchimento, fluidez e viscosidade do CAA, o Gráfico 12, apresenta os resultados do ensaio de caixa L, que avalia a capacidade de passagem das misturas de CAA.

Gráfico 12 - Resultados do ensaio de caixa L do CAA a partir da argamassa



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que todas as misturas de CAA, apresentaram resultados entre 0,80 e 1,00, dentro do intervalo estabelecido pela EFNARC (2005), sendo

classificados como PA2. Verifica-se uma relação direta entre razão H2/H1 e volume de pasta, assim como volume de argamassa.

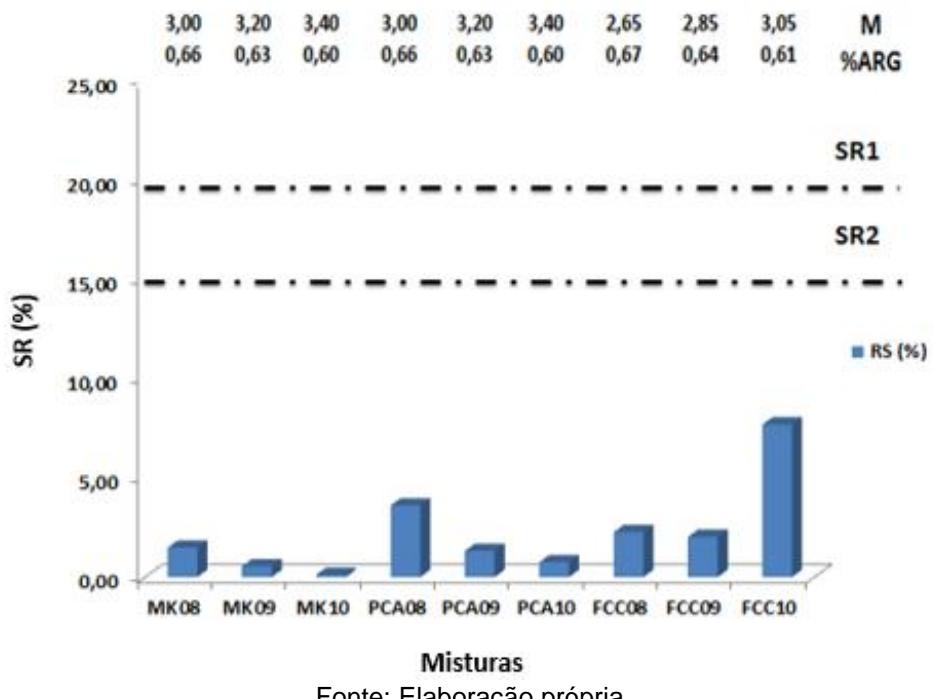
As características do agregado graúdo como diâmetro máximo de 9,5 mm conforme recomenda a literatura (KHALEEL, *et al.*, 2014) a forma regular e arredondado, e o volume de agregado graúdo que está consoante as quantidades recomendadas pela EFNARC (2005), contribuíram para melhores resultados de capacidade de passagem, comprovando que as características dos agregados influenciam fortemente as propriedades reológicas do CAA (ALEXANDER e PROSK, 2003; EFNARC, 2005; RAMGE *et al.*, 2010)

Apesar dos excelentes resultados, observa-se que o CAA com PCA e FC, apresentou maior capacidade de passagem que as misturas feitas a partir da pasta com MK. Mesmo o CAA com FC que apresentou menor deformabilidade (tensão de escoamento) e misturas mais viscosas, com grandes tendências tixotropicas, as particularidades do MK reduziram a capacidade de passagem do CAA, corroborando com estudos que prevêem problemas de bloqueio para misturas de CAA com substituição de cimento por MK (VEJMELKOVA, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, 2014; HANNAN, 2018).

5.2.2.4 Resistência à segregação do CAA a partir da argamassa

Além da análise da estabilidade visual, a coesão e resistência à segregação do CAA, foram avaliadas por meio do teste de resistência a segregação, onde os dados obtidos são apresentados no Gráfico 13. O método utilizado para análise da resistência a segregação foi o teste da peneira marsh 200, conforme a norma 15823/2017, apresentado na metodologia do trabalho.

Gráfico 13 - Resultados do ensaio de Resistência à segregação do CAA (argamassa)



Fonte: Elaboração própria

Todas as misturas apresentaram resistência à segregação dentro dos limites estabelecidos pela EFNARC (2005), inferior a 15,00%. As adições minerais introduzidas na matriz cimenticia do CAA em substituição ao cimento reduziram a viscosidade, e consequentemente, aumentaram a coesão e resistência à segregação do CAA.

A substituição de cimento por essas adições, com partículas mais finas, e área superficial maior, com exceção do FC, reflete no empacotamento dos grãos provocando uma redução na densidade de empacotamento. Esse efeito, além de aumentar a demanda de água e superplastificante, melhora os aspectos de deformação plástica, observados no ensaio de *slump flow* e anel J e resistência à segregação estática, corroborando os resultados do teste da peneira.

Com o volume de agregado graúdo dentro dos padrões da EFNARC e diâmetro máximo de 9,5 mm, a tensão de cisalhamento é reduzida, o que contribui para maior homogeneidade do CAA, conforme estudos de (KHALEEL, et al., 2014; HU e WANG, 2011). Essas características favoráveis do agregado graúdo contribuem para uma maior resistência à segregação das misturas.

5.3 Análise das propriedades do CAA no estado endurecido

Para avaliar o CAA produzido no estado endurecido, foram realizados testes de resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico.

5.3.3.1 Resistência à compressão

Foram realizados testes de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias (Tabela 22); para os CAA's produzidos com os três tipos de adição mineral e por dosagem a partir da pasta e a partir da argamassa.

Tabela 22 - Resultados dos testes de Resistência à Compressão do CAA (Mpa)

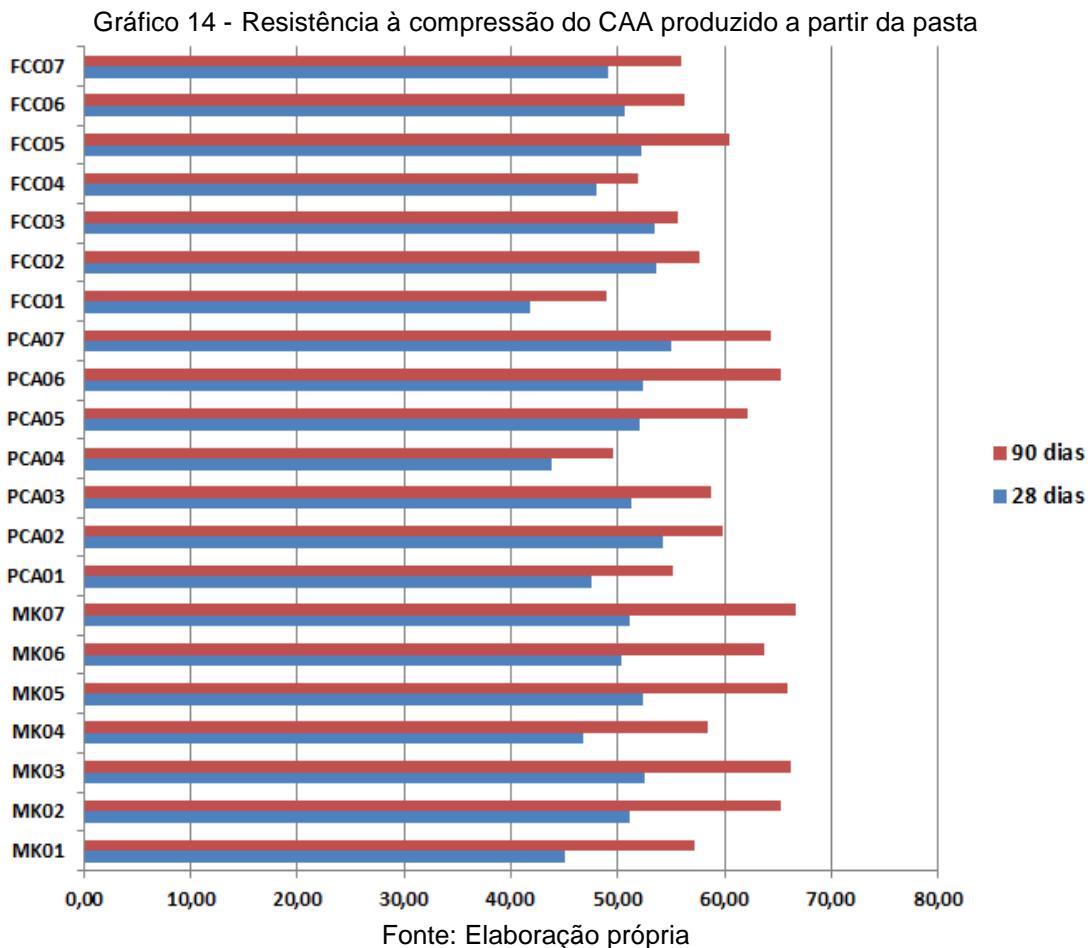
| Misturas | MK | | | | PCA | | | | FC | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 03 dias | 07 dias | 28 dias | 90 dias | 03 dias | 07 dias | 28 dias | 90 dias | 03 dias | 07 dias | 28 dias | 90 dias |
| P01 | 40,31 | 42,47 | 45,03 | 57,22 | 30,15 | 37,49 | 47,59 | 55,24 | 35,22 | 37,66 | 41,85 | 48,98 |
| P02 | 38,00 | 42,38 | 51,05 | 65,29 | 37,49 | 42,16 | 54,22 | 59,82 | 39,81 | 42,86 | 53,54 | 57,59 |
| P03 | 34,95 | 42,37 | 52,58 | 66,22 | 37,22 | 40,88 | 51,33 | 58,72 | 39,06 | 41,81 | 53,45 | 55,61 |
| P04 | 32,22 | 39,92 | 46,77 | 58,40 | 28,65 | 36,47 | 43,78 | 49,64 | 33,09 | 38,04 | 47,96 | 51,88 |
| P05 | 41,04 | 47,87 | 52,34 | 65,95 | 34,07 | 43,08 | 52,06 | 62,10 | 40,96 | 42,91 | 52,16 | 60,50 |
| P06 | 38,37 | 46,30 | 50,42 | 63,72 | 34,98 | 41,10 | 52,42 | 65,35 | 39,36 | 41,83 | 50,63 | 56,28 |
| P07 | 40,59 | 45,93 | 51,14 | 66,72 | 37,46 | 43,71 | 54,95 | 64,28 | 38,24 | 41,41 | 49,17 | 56,00 |
| A08 | 34,43 | 41,77 | 45,16 | 69,22 | 30,23 | 38,89 | 45,66 | 59,16 | 38,19 | 42,54 | 48,67 | 54,41 |
| A09 | 34,26 | 41,06 | 47,47 | 70,82 | 32,75 | 40,73 | 47,74 | 58,44 | 41,24 | 45,85 | 49,48 | 54,26 |
| A10 | 38,34 | 42,78 | 47,60 | 71,32 | 33,51 | 41,95 | 48,14 | 61,19 | 40,41 | 44,06 | 50,75 | 54,12 |
| Média | 37,25 | 43,29 | 48,96 | 65,49 | 33,65 | 40,65 | 49,79 | 59,39 | 38,56 | 41,90 | 49,77 | 54,96 |

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar os dados da Tabela 22, observa-se uma relação direta entre resistência à compressão e o tempo para todas as misturas de CAA. Aos 7 e 28 dias praticamente não houve variação nas médias de resistência para as três adições minerais, no entanto, aos 3 dias, as misturas com FC, em média, apresentaram resistência a compressão 13,50% maior que as misturas com PCA e compatível com o MK, já aos 90 dias as misturas com MK apresentaram resistência a compressão, 8,0% maior que as misturas produzidos com PCA e 16,0% maior que as misturas produzidos com FC. Com relação ao processo de dosagem, não houve variações consideráveis entre as médias de resistência à compressão, entre o concreto produzido a partir da análise das pastas e a partir da análise das argamassas.

5.3.3.2 Resistência a compressão do CAA (planejamento fatorial)

Os resultados do teste de resistência à compressão do CAA produzido a partir da pasta por meio de planejamento fatorial (Gráfico 14) apresentaram boa correlação com $R^2=0,76$ e 0,66, para o MK e a PCA, respectivamente, e excelente para o FC com $R^2=0,92$ (**APÊNDICE 10**). Porém, a variável M e B/A, não foram consideradas significativas para previsão das respostas.

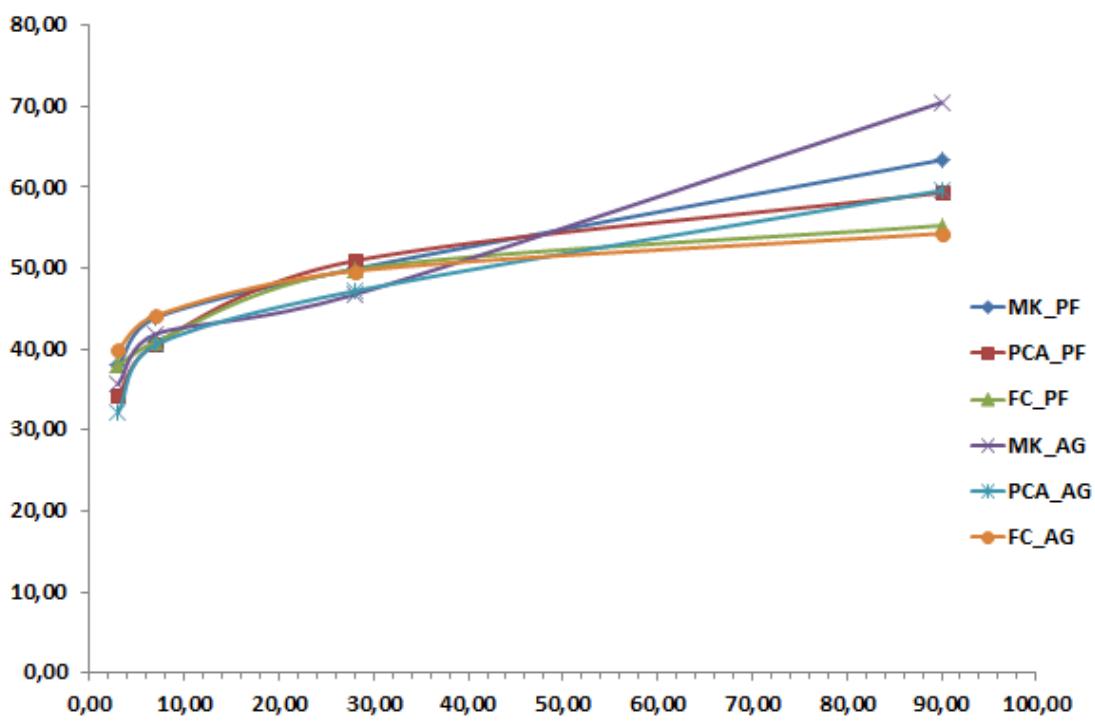


Para o CAA produzido a partir das pastas, não se observou variação entre resistência a compressão e relação B/A e M, ou volume de pasta, na análise estatística, entretanto, observa-se que as misturas de CAA, produzidos com volume de argamassa de 63,0% (P03 e pontos centrais) e 64,0% (P02), apresentaram as maiores resistências. Todos as misturas obtiveram resistência à compressão superior a 40 MPa aos 28 dias, alcançando assim, os objetivos da dosagem com relação à resistência à compressão.

Os dados corroboram com a análise estatística no sentido de não apresentar relação com a pasta e com a argamassa, apresentando as menores resistência nas misturas 01 e 04 que combinaram as maiores diferenças entre volume de pasta e percentual de argamassa. Já as demais misturas, com equilíbrio entre volume de pasta e percentual de argamassa, sobretudo, as misturas intermediárias, com B/A=0,95, apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão. Os ganhos de resistência à compressão entre 28 e 90 dias, são identificados em todas

as misturas e os ganhos de resistência à compressão ao longo do tempo são apresentados no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Curvas de crescimento das resistências à compressão do CAA



Fonte: Elaboração própria

Analisando o CAA produzido com MK, observa-se que inicialmente, apresentaram resistência a compressão muito alta, corroborando com estudos de (RAZAK, et al., 2004; VEJMELKOVA, 2011; MADANDOUSTI e MOUSAVI, 2012; HASSAN e MAYO, 2014; SKIFAS, 2014; KAVITHA, 2015; HANNAN, 2018). Já aos 28 dias alcançaram resistências no mesmo patamar das demais adições minerais utilizadas e, as maiores resistências aos 90 dias. Os ganhos de resistência à compressão com a adição de MK são previsto até 28 dias, quando alcançam até 90,0% de toda resistência mecânica (SKIFAS, et al., 2014). No entanto, nessa pesquisa, constatou-se um pico de resistência mecânica aos 90 dias, corroborando com estudos de Mandoussi e Mousavi (2012) que identificaram maiores ganhos de resistência com MK após os 28 dias de hidratação.

Os bons resultados de resistência à compressão condizem com os estudos de Rodrigues (2017), que enfatizou os ganhos de resistência com uso de MK. O percentual de substituição de 20,0% proporciona maiores ganhos de resistência à

compressão, conforme (SKIFAS, et al., 2014). Apesar da maior quantidade de água nas misturas de CAA com MK ($A/F=0,42$), a alta reatividade com o Ca (OH)₂, produz CSH adicional, que melhora a resistência mecânica (DING e LI, 2002; SIDDIQUE e CLAUS, 2009; BADOGIANNIS, 2005, 2009, SAFIUDDIN, 2008; HASSAN e MAYO, 2014).

O CAA produzido com PCA apresentou as menores resistências nas idades precoces, corroborando com (LE e LUDWIG, 2016). No entanto, observa-se ganhos de resistência aos 28 e 90 dias. Esses ganhos de resistência são devido ao teor elevado de sílica amorfa (98,33%), e pela intensa reatividade com a água e o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento para produzir CSH adicional, corroborando com as pesquisas de (SAFIUDDIN et al., 2010, SHAT, et al., 2013; CHOPRA, 2014; CHOPRA, et al., 2015; LE DUWIG, 2016; GIL, et al., 2017).

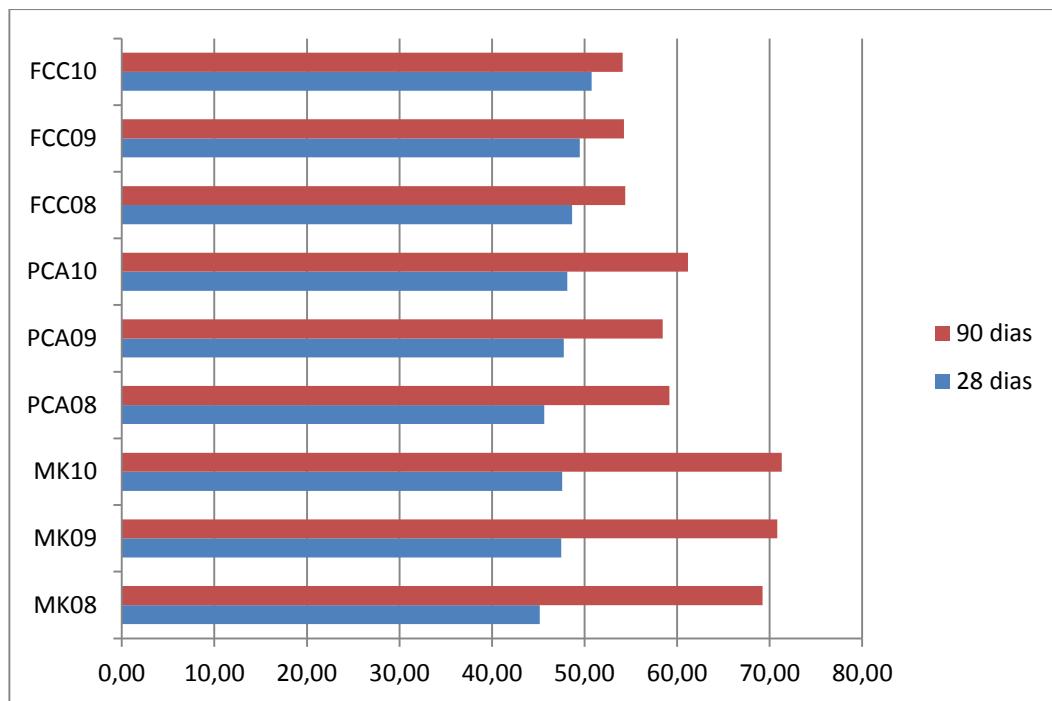
As misturas de CAA produzidas com FC apresentaram resistência à compressão compatível com as demais adições minerais nas idades precoces, porém, não conseguiram manter os ganhos de resistência aos 28 e 90 dias. A alta compacidade da pasta, devido a baixa quantidade de agua, ($A/F=0,31$), e o efeito físico de enchimento que de acordo com Sua-iam, et al., (2016), contribuem para resistência compressão e conseguiram manter os padrões de resistência a compressão nas idade precoces.

Houve maior perda de massa de acordo com a análise termogravimétrica (Figuras 37, 38 e 39) para o CAA produzido a partir do FC entre 28 e 90 dias, comparado ao PCA e MK o que corrobora com os ganhos maiores de resistência mecânica entre 28 e 90 dias do CAA produzido a partir de pastas com PCA e MK.

5.3.3.3 Resistência a compressão do CAA (planejamento fatorial)

O CAA produzido a partir da dosagem das argamassas também passou por testes de resistência à compressão, conforme mostra o Gráfico 16, porém, sem análise estatística e com as misturas variando conforme o volume de argamassa e, consequentemente, de pasta, em virtude da relação B/A = 0,95 se manter constante para as três misturas.

Gráfico 16 - Resistência à compressão do CAA produzido a partir da argamassa



Fonte: Elaboração própria

Observando-se os resultados verifica-se claramente uma relação inversa, entre percentual de argamassa e resistência à compressão, corroborando com (MANOEL, 2005; SILVA, 2016), ou seja, ao passo que o percentual de argamassa aumenta de 0,60 a 0,67, a resistência mecânica diminui.

Observa-se claramente, comportamento similar aos concretos dosados a partir da pasta por planejamento fatorial, com as três adições minerais, com resistência a compressão aos 28 dias, variando entre 45,0 e 50,0 MPa, e as misturas produzidas com FC, apresentando resistências ligeiramente maiores que o MK e a PCA, nas idades precoces. No entanto, aos 90 dias, devido à atividade pozolânica da PCA e do MK, o CAA produzido com essas adições minerais, passa a apresentar ganhos de resistência maiores que o FC, principalmente o MK que apresentou as maiores resistências com média 70,45 MPa, seguido das misturas com PCA 59,60 MPa, enquanto o FC, apesar de alcançar altas resistências, teve média inferior ao MK e PCA; 54,26 MPa de resistência à compressão aos 90 dias.

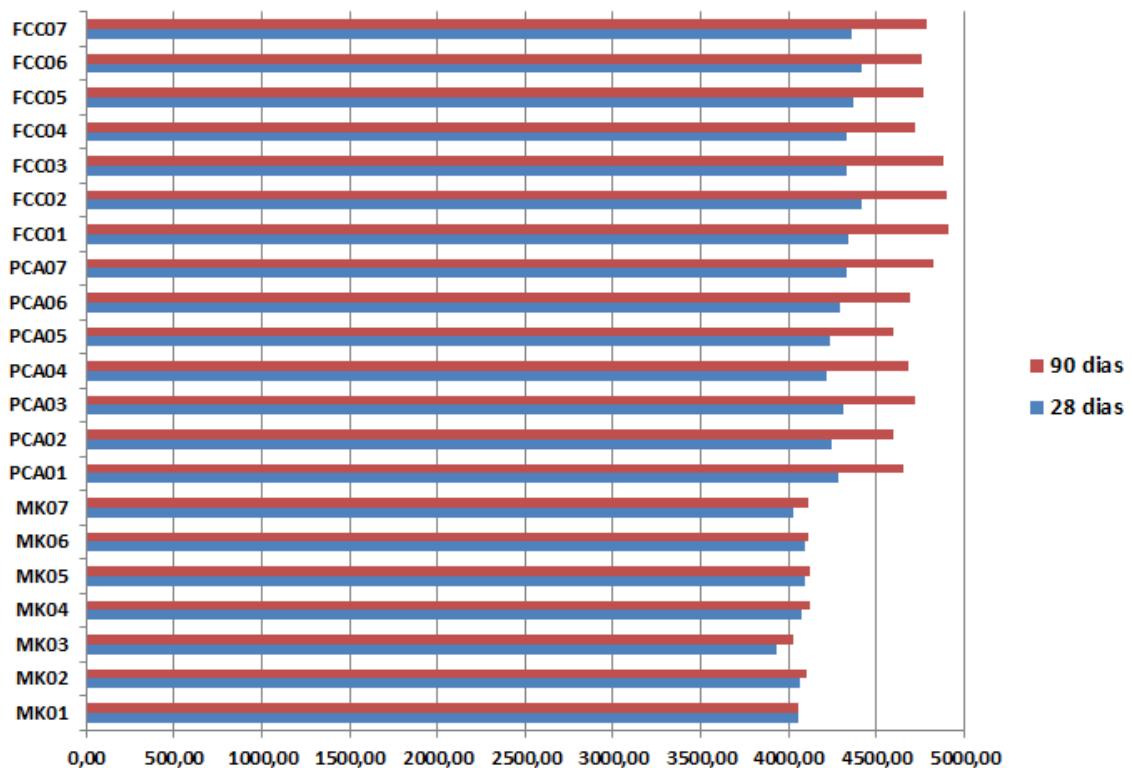
Além disso, observou-se a tendência das misturas com PCA de apresentar menores resistências à compressão em idades precoces, assim como nas misturas dosados diretamente da pasta por planejamento fatorial, corroborando com (LE e

LUDWIG, 2016), e os resultados de resistência à compressão das misturas de CAA produzidos com MK, apresentando resistência à compressão aos 28 dias menores que o esperado, porém, em consonância com estudos de Mandoussi e Mousavi (2012), que identificaram maiores ganhos de resistência com MK após os 28 dias de hidratação. Na sequência, a análise das propriedades do CAA no estado endurecido segue com os resultados do ensaio de ultrassom.

5.3.3.4 Velocidade de pulso ultrassônico.

Para avaliar a qualidade do concreto, além do ensaio de resistência à compressão, foram realizados testes de ultrassom, haja vista que, os resultados do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico estão relacionados com a porosidade do concreto. Os gráficos 17 e 18, apresentam os resultados da velocidade do pulso ultrassônico, de todas as misturas produzidas a partir da pasta e da argamassa, respectivamente, tanto aos 28 como aos 90 dias.

Gráfico 17 - Resultados do ensaio de ultrassom para o CAA dosado por planejamento fatorial



Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentaram correlação $R_{sqr}=0,72$; 0,54 e 0,66, para o CAA produzido com MK, PCA e FC, respectivamente (**APÊNDICE 11**). No entanto, ao aplica a *curvature check*, verifica-se uma maior correlação, acima de 0,80, o que indica que o modelo proposto é quadrático e não linear. Os valores das velocidades variaram aos 28 dias entre 3392 e 4419 m/s, e aos 90 dias variaram entre 4032 e 4914 m/s.

Para todas as misturas observa-se um aumento das velocidades entre as idades de 28 e 90 dias, visto que essa propriedade melhora com a evolução da resistência do CAA (SUA-IAM *et al.*, 2016). Seguindo a lógica da redução da porosidade ao passo em que o concreto alcança maiores idades de hidratação da pasta cimentícia (CHOPRA, 2014; CHOPRA, *et al.*, 2015). Com isso infere-se que a velocidade do pulso ultrassônico do CAA está relacionada com a densidade do material, sendo mais elevada a velocidade quanto mais densa for a estrutura. Logo, dentre as composições com adições minerais as mais densas são as produzidas com FC, atribuído a baixa relação $A/F=0,31$ e ao efeito físico de preenchimento.

O efeito desses fatores na redução da porosidade: redução da relação A/F , maior volume de C-S-H, e um bom empacotamento das partículas da mistura (SAFIUDDIN *et al.*, 2010), refletem os maiores valores de velocidade de pulso do CAA com PCA, atribuídos a maior quantidade de C-S-H, devido o alto percentual de sílica amorfada, contida na PCA 98,33%, conforme FRX (Tabela 1). Devido essa alta reatividade que a PCA é considerada por muito autores como um substituto muito bom para cimento no que diz respeito à resistência à compressão e durabilidade do concreto (SAFIUDIN, 2008, 2012; LUNG-CHAO, *et al.*, 2011; KANNAN e GANESAN, 2014; CHOPRA, *et al.*, 2015). Apesar de resistência a compressão e velocidade de pulso ultrassônico estar relacionadas à densidade da estrutura porosa do CAA, pode-se dizer que os seus resultados foram influenciados pelos mesmos fatores: o aumento do fator A/F em massa e a utilização de adição mineral com atividade pozolânica.

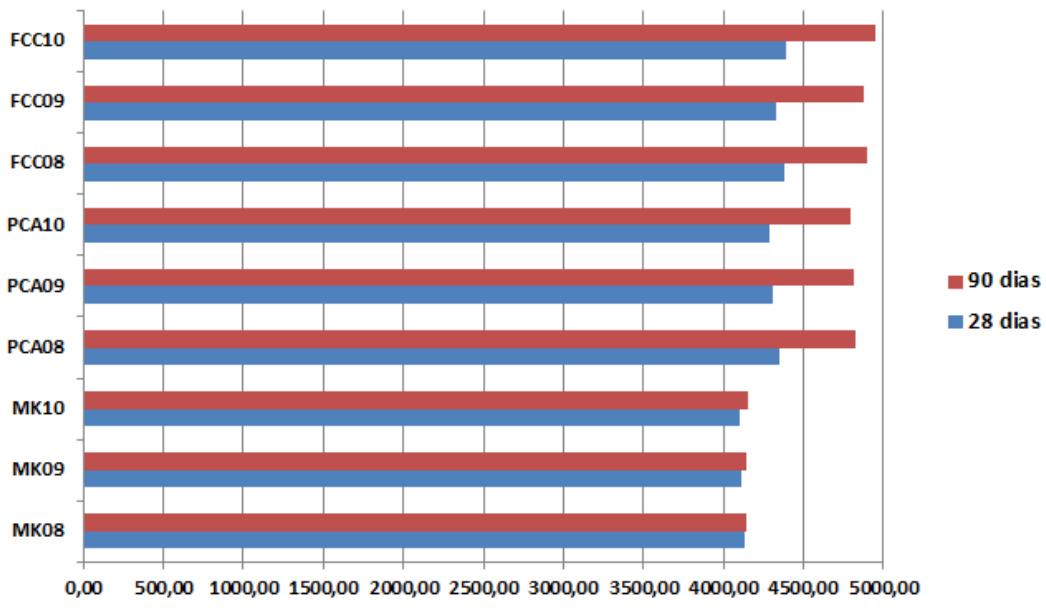
No entanto, nos resultados de velocidade do pulso ultrassônico, não se observa a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão; no CAA produzido com MK em que se observa um considerável ganho de resistência a compressão entre 28 e 90 dias, e a velocidade de pulso ultrassônico, praticamente não variou, ao contrário do que diz a literatura, que a ação pozolânica do MK, melhora significativamente as propriedades da microestrutura, aumentando a formação adicional de C-S-H e reduzindo a largura do microtrilho na zona de transição. As

propriedades da microestrutura melhoram as propriedades de macroestrutura do CAA (KAVITHA, 2015). No entanto, resultados contraditórios também foram identificados nos estudos de (FONSECA, 2016).

Além disso, o CAA produzido com FC que apresentou as maiores velocidades de pulso obteve as menores resistências à compressão aos 90 dias. No entanto, a literatura aponta para uma redução na velocidade de pulso ultrassônico com a substituição de cimento por FC (UYBAL, et al., 2012, SILVA e BRITO, 2015). Por outro lado, as misturas com FC apresentam maiores percentuais de hidróxido de cálcio livre (CH), devido a grande quantidade de calcita, identificada no DRX do FC (Figura 14), a estrutura porosa apresenta um maior percentual de macro poros, o que comprova que nesse caso, os fatores físicos são mais relevantes que os químicos (MOHAMMED et al., 2014).

O CAA produzido a partir da dosagem das argamassas também passou por ensaio de ultrassom, conforme mostra o Gráfico 22, porém, sem análise estatística e com as misturas variando conforme o volume de argamassa e, consequentemente, de pasta, em virtude da relação B/A = 0,95 se manter constante para as misturas.

Gráfico 18 - Resultados dos testes de ultrassom do CAA dosado por argamassas



Fonte: Elaboração própria

Observando-se os resultados apresentados no Gráfico 22 percebe-se claramente, comportamento similar aos concretos dosados a partir da pasta por

planejamento fatorial, com as três adições minerais. Além disso, observa-se uma relação entre volume de argamassa e velocidade pulso, para o CAA com MK e PCA, corroborando com os resultados obtidos para resistência a compressão que também apresentou essa relação. Nesse caso, evidencia-se a correlação entre resistência a compressão e velocidade de pulso ultrassônico. Essa correlação não foi identificada nas misturas de CAA feitos a partir do FC.

Assim como no planejamento fatorial, verifica-se um aumento na velocidade de pulso com o tempo (SUA-IAM *et al.*, 2016), principalmente, no CAA com PCA e FC que registraram aumento de 10,0% na velocidade de pulso entre 28 e 90 dias de cura úmida. Já o MK, praticamente não houve aumento na velocidade de pulso, contrariando os resultados de resistência à compressão que identificaram picos de resistências entre 28 e 90 dias de cura úmida. Esses resultados seguem o mesmo comportamento dos resultados obtidos a partir do planejamento fatorial, assim como, o FC que apresentou as maiores velocidades de pulso e menores resistências à compressão, aos 90 dias. Por fim, esses resultados contraditórios, tanto com relação ao CAA com MK como para o FC, também foram encontrados na pesquisa de (FONSECA, 2016).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa foi motivada com o objetivo de aprimorar e validar o método obtenção de pastas para dosagem do CAA, utilizando planejamento de misturas, por meio do pseudo simplex duplo. A partir daí, após análise dos resultados obtidos neste trabalho, destacam-se as principais conclusões: A dosagem das pastas auto adensáveis passou por ajustes na quantidade de água e no processo de homogeneização. Após realizar os testes com vários fatores A/F, foi feita uma análise estatística prévia, para verificar a correlação entre os dados, viabilidade de gerar modelos de previsão e representar esses dados por meio de coordenada simplex. Nesse sentido, foram observadas excelentes correlações para as pastas com MK, correlações boas para o FC e médias para a PCA.

Como as pastas foram produzidas manualmente, as características das adições minerais, influenciaram nos resultados. Nesse sentido, com o MK foi possível controlar a energia de homogeneização e o tempo de mistura, para padronizar o

tempo de atuação do superplasticante, o que gerou excelentes correlações. No entanto, as dificuldades encontradas em misturar pastas com FC e com PCA, devido às dificuldades de manter um padrão de tempo e de energia de homogeneização, influenciaram em correlações abaixo do esperado e dessa forma, optou-se pela mecanização do processo.

A mecanização do processo permitiu a representação dos dados das pastas com PCA e FC em coordenadas simplex, devido à aumentar a correlação entre os dados. Nesse momento, evidencia-se que o processo de mistura mecânica é estatisticamente mais eficiente que o processo de mistura manual e a importância da padronização no processo de mistura. Dessa forma, o primeiro objetivo específico do trabalho é alcançado, ao completar o ciclo de dosagem das pastas.

As pastas produzidas mecanicamente, apenas com um fator A/F, foram submetidas à análise estatística, e apresentaram excelentes correlações, que possibilitaram sua representação gráfica em coordenadas simplex. Essa representação gráfica, gerou uma região denominada “grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis” e reflete as características das adições minerais e estabilidade das pastas por essas adições geradas. Evidencia-se então, uma relação clara entre: características dos finos, estabilidade das pastas e região de grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis.

A análise de viscosidade por meio dos tempos de escoamento no cone marsh ($T_{5\text{ min}}$ e $T_{45\text{ min}}$), mostra uma relação direta com a viscosidade das pastas, diferentemente do $T_{115\text{ mm}}$, que em muitos casos, não foi possível verificar essa relação entre viscosidade e tempo de espalhamento, mostrando que o $T_{115\text{ mm}}$ não é um parâmetro confiável para representar a viscosidade das pastas.

A viscosidade como agente de controle da coesão entre partículas, também foi verificada, uma vez que as pastas com maior tempo de escoamento no cone Marsh, (mais viscosas), apresentaram os menores índices de sedimentação. Além disso, por meio dessa análise é possível verificar a estabilidade das pastas e, nesse sentido, observa-se uma maior estabilidade para as pastas produzidas com MK e PCA, ao contrário das pastas com FC que apresentaram maior sensibilidade as variações de percentual de substituição cimento por FC e de aditivo superplasticante.

A finura e regularidade das partículas influenciaram no empacotamento dos grãos, e consequentemente, na densidade de empacotamento. A densidade de empacotamento e o IPS (afastamento entre as partículas) influenciaram na demanda de água de amassamento das pastas, que associado à área de superfície específica, determinaram a quantidade de água e superplastificante para que as pastas alcançassem a fluidez necessária.

Após análise estatística das pastas, de viscosidade e de resistência à segregação, foi possível escolher uma pasta constitutiva, para dosagem de argamassas e concretos auto adensáveis, uma em cada região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis, conforme características de espalhamento e viscosidade, com menor consumo de adição mineral e superplastificante possível para reduzir custos de produção e assim, alcançar o terceiro objetivo específico do trabalho.

As argamassas produzidas a partir das pastas constitutivas, com os mesmos percentuais de pasta e de agregado miúdo, apresentaram comportamento similar às pastas, isso revela que as propriedades de fluxo da argamassa são sensíveis às variações de comportamento de fluxo da pasta constitutiva.

O CAA produzido a partir da pasta, por meio de planejamento fatorial, apresentou propriedades compatíveis com os parâmetros da EFNARC (2005), sobretudo os traços intermediários. Entretanto, os traços mais fluidos apresentaram problemas de segregação e os mais secos, falta de fluidez. Além disso, apresentaram excelentes correlações, com exceção dos parâmetros relacionados à viscosidade: T_{500} e funil V, para o CAA produzido com PCA e FC. Essas distorções são reflexo das dificuldades encontradas desde a dosagem das pastas com essas adições minerais, haja vista que a dosagem do CAA foi feita utilizando a mesma quantidade de agregados.

Nesse momento, evidencia-se uma relação entre a região simplex das pastas e o intervalo de M adotado para dosagem do CAA. O CAA com MK apresentou estabilidade suficiente para varrer o intervalo estabelecido pelo M . No entanto, o CAA com PCA e FC com menor estabilidade, necessitariam de um intervalo menor de M , corroborando com a menor região simplex obtida por meio da dosagem dessas pastas.

O CAA produzido a partir das argamassas apresentou propriedades compatíveis com os parâmetros da EFNARC (2005), e uma relação direta entre os volumes de pasta e de argamassa e as propriedades de fluxo do CAA. Nenhum CAA apresentou problemas de segregação ou falta de fluido, devido ao menor M que relaciona o volume de pasta e o volume de material granular das misturas, produzidas por meio desse processo de dosagem.

Todas as misturas de CAA produzidas, a partir das pastas constitutivas com as três adições minerais utilizadas nessa pesquisa, alcançaram resistência à compressão superior a resistência de projeto (40,0 MPa aos 28 dias). A análise estatística apontou para uma boa correlação entre os dados. Porém, não foi verificada relação com M e B/A, que se configuraram como as variáveis de entrada para o sistema. Foi verificada uma relação inversa entre volume de argamassa e resistência à compressão, mais evidente, nas misturas produzidas a partir das argamassas. Entre as misturas produzidas com a mesma pasta constitutiva, observou-se uma baixa amplitude entre os resultados de resistência à compressão.

Os resultados de velocidade de pulso ultrassônico apresentaram resultados acima de 4000 m/s aos 28 dias e 4500 m/s aos 90 dias, com exceção dos traços produzidos com MK que apresentaram resultados inferiores. Apesar de satisfatórios, esses resultados são contraditórios, haja vista que se esperava uma relação entre resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico. Além disso, a análise estatística apontou para correlações médias entre os resultados e a análise por *curvature check* apontou para um modelo quadrático.

Por fim, o objetivo principal da pesquisa foi alcançado, haja vista que foi possível dosar pastas com propriedades auto adensáveis, com três diferentes tipos de adição mineral e por meio de análise estatística representar os resultados em coordenadas simplex e definir uma região com grande probabilidade de ocorrência de pastas auto adensáveis. A partir dessas pastas, foi possível reproduzir argamassas e concretos auto adensáveis, com propriedades satisfatórias tanto no estado fresco como no estado endurecido.

REFERÊNCIAS

- ACI 237 R-07. **Self-consolidating concrete.** American Concrete Institute, USA, Reported by ACI committee 237, ISBN: 0-87031-244-8; 2007.p.30.
- AKRAM, T. et al, **Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash**, Construction and Building Materials V. 23, P. 703–712, 2009.
- ALENCAR, R. S. A.; HELENE, P. R. L. **Concreto autoadensável de elevada resistência: Inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados.** Revista Concreto e Construções, ano 34, n. 43, p. 43-52, jun./ago. 2006.
- ALEXANDER, C. e PROSK, T., **Self-Compacting Concrete-Influence of the Coarse Aggregate on The fresh Concrete Properties**, concrete.de , , pp. 1-4. 2003.
- ALYMAC, K. E. et al, **Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method**, journal of cleaner production, V.12, 2016.
- AHMADI, M. A., et al., **Development of mechanical properties of self compacting concrete contain rice husk ash.**in: International Journal of Computer and Information Engineering, 1, 259-262, 2007.
- AHMED, A. A. e HASSAN, A. A. A. **Application of Statistical Analysis for Mixture Design of High-Strength Self-Consolidating Concrete Containing Metakaolin**, J. Mater. Civ. Eng. V. 26, n 6, 2014.
- AN, X. et al., **Rock-filled concrete, the new norm of SCC in hydraulic engineering in China**, Cement and Concrete. Composites. V. 54, P.89–99. 2014.
- ARAUJO, J. L.; et al. **Concreto auto adensável com materiais locais no nordeste brasileiro.** In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. Anais... Vitória: IBRACON, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland** – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: **Concreto auto-adensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3: Concreto auto-adensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4: Concreto auto-adensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5: Concreto auto-adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V.** Rio de Janeiro, 2010.

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 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 2013.

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 NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

BADOGIANNIS E, et al., **Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value.** Cements Concrete Responses; v. 34, p. 1035–41, 2004.

BADOGIANNIS E, et al., **Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins.** Cement Concrete Composites; v.27, p.197–203, 2005

- BADOGIANNIS E, TSIVILIS S. **Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete.** Cement Concrete Composites, v.31, p. 128–133, 2009.
- BADOGIANNIS E, *et al.*, **Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete**, Construction and Building Materials, v. 82, p.133–141, 2015.
- BANFILL, P. F. G. **Rheology of fresh cement and concrete**, *Rheology reviews*, pp.61-130, 2006.
- BARIN, D.S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**, Dissertação de M. Sc., Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RGS, Brasil, 2008.
- BARBUDO A, *et al.* **Influence of water reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete**. J Clean Prod, v. 59, p. 93–98. 2013.
- BARLUENGA, G. *et al.* **Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions**, Construction and Building Materials, v. 94, p. 728–736, 2015.
- BARROS NETO, B.; *et al*; **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**, Ed. da Unicamp: Campinas, 2002.
- BARTOS, P.J.M. **Measurement of Key Properties of Fresh Self-compacting Concrete**. In: CEN/STAR PNR Workshop on mensuarement, testing and stardardisation: Future needs in the field of construction materials, 2000, Paris. **Proceedings**...Paris: CEN/STAR, 2000.
- BELLOTTO, M., **Cement paste prior to setting: A rheological approach**. Cement and Concrete Research 52 (2013) 161–168
- BOUZIANI, T. **Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach**, Construction and Building Materials, v. 49, p. 308–314, 2013.
- BUCHER, R. *et al.*, **Self-compacting concrete using flash-metakaolin:design method**, Materials and Structures, 2014.
- BUI V.K, AKKAYA Y, SHAH S.P. **Rheological model for self-consolidating concrete**. ACI Mater J, v.99, n. 6, 2002.
- CARDOSO, F. A.; **Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado) Programa de Pós graduação em Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2009.

CASSAGNABÈRE F, *et al.* **Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects.** Construction and Building Materials; v. 24, p.1109–1118. 2010

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Tese (Doutorado) em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2007.

CASTRO, A. L. *et al.*, **Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão**, Revista Cerâmica, V. 57, p. 63-75, 2011.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuições ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais.** 2006 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, 2006.

CAZACLIU, B.; ROQUET, N. **Concrete Mixing Kinetics by Means of Power Measurement.** Cement and Concrete Research, v. 39, n. 8, p. 182-194, 2009.

CHAKRABORTY A.K. **New data on thermal effects of kaolinite in the high temperature region.** J Thermal Anal Calorim, v. 71, p. 799–808, 2003.

CHOPRA, D. **Mechanical and durability proprieties of self compacting concrete containing rice husk ash,** 2014, thesis, master of engineering (structural enginnering), Thapar University, Patiala, India, 2014.

CHOPRA, D. *et al.*, **Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash,** biosystems engineering v. 130 p. 72-80, 2015.

CLAISSE, P. A. *et al.*, **Workability of cement paste,** ACI Mater. V. 98, P. 476-482, 2001.

M. COLLEPARDI, **Self-Compacting Concrete: what is new? 2001**

CORNELL, J. **Experiments with mixture designs, models and analysis of mixture data,** 2. ed. New York: Wiley, 1990.

CORNELL, J. A. **A primer on experiments with mixtures.** Hoboken: John Wiley & Sons, 2011a. 372p.

CORNELL, J. A. **A Retrospective View of Mixture Experiments.** Quality Engineering, v. 23, n 04, p. 315-331, 2011b.

COSCIONE, A. R. *et al.* **O modelamento estatístico de misturas: experimento tutorial usando voltametria de redissolução anódica,** Química Nova, Vol. 28, No. 6, p. 1116-1122, 2005

CYR M, et al., **Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives.** Cement Concrete Res; v.30, p. 1477–1483, 2000.

CYR M e MOURET M **Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design.** In ACI Special Publication. ACI, Farmington Hills, MI, USA, vol. 217, pp. 241–256, 2003.

CYR M, et al. **Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength.** Cement Concrete Res; v.36, p.264–277, 2006.

DE BARROS NETO, B.; et al. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414p.

DE FRANÇA, M. S. et al., **Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional,** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, abr./jun. 2012.

DE LARRARD, F. SEDRAN T. **Mixture-proportioning of high-performance concrete,** Cement Concrete Res. V. 32, P. 1699-1704, 2002.

DENG WU, J. et al., **Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete - A review,** cement and concrete composites, V. 7 P. 1-27, 2017.

DINAKAR P, SETHY K.P, SAHOO U.C. **Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag.** Mater Des; v.43, p.161–169, 2013.

DINIZ, M. e AZEREDO, G. A., **Self-compacting concrete obtained by the use of kaolin wastes,** Construction and Building Materials v- 38 (2013) 515–523

DING J.T e LI Z. **Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete.** ACI Mater J. v. 99, p.393–398. 2002.

DOMONE P. **Mortar tests for material selection and mix design of SCC.** cement and concrete composites v. 28, p. 39–45, 2006.

DOMONE P. **Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method.** 2009.

DOMONE, P.L e ILLSTON, J.M, **Construction Materials: Their Nature and Behaviour,** fourth ed., Taylor and Francis Publication, 2010. p. 590.

DVORKIN, A. et al., **Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture,** Construction and Building Materials, V.37 p. 851–864, 2012.

EDAMATSU, Y. *et al*, **A rational mix-design method for self compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles**, in: Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 309–320.

EDAMATSU Y, SUGAMATA E OUCHI. M. **A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests**. In: International RILEM symposium on self compacting concrete. RILEM Publications SARL; 2003.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC, 2002.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC, 2005.

ESPING, O. *et al*, **Methods for characterization of fillers and fines for self-compacting concrete**. In: THIRD INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1, 2003, Stockholm. **Anais**. Reykjavik: RILEM Publications SARL, 2003. p. 208-219.

ESPING, O. **Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete**, Cement Concrete. Research, v.38, n.7, pp 938–944, 2008.

FELEKOGLU B, *et al*. **Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete**. Build Environ;v. 42, p.1795–1802, 2009

FERRARA L. *et al*, **A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete**, Cement and Concrete Research, V. 37, P. 357-371, 2007.

FERRARIS, C. F. e DE LARRARD, F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology**. *NISTIR 6094*, Feb. 1998.

FERRARIS, C. F.; *et al*. **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 2, p. 245-255, Fevereiro. 2001.

FLATT, R. J. *et al*, **Linking yield stress measurements: Spread test versus Viskomat**, Cement and Concrete Research, 2005.

FONSECA, T. V., **Avaliação de concretos auto adensáveis com baixo consumo de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca de arroz, fíler calcário e cal hidratada**. Natal, 119p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Norte

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos.** Tradução de Alexandre Matos de Souza Melo. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2014. 662p.

GALDÁMEZ, E.V.C. (2002). **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos.** São Carlos, 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GEIKER, M. R. *et al.*, **The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete**, Cement Concrete Research, V. 32, P.1791-1795, 2002.

GESOGLU, M.; *et al.* **Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash.** Construction and Bulidings Materials, v.37, p. 160-170, 2012.

GHAZI F.K e JADIRI AI R. S. **New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements.** ACI Mater J; v. 107, n 5, 2010.

GOLASZEWSKI, J. SZWABOWSKI, J. **Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars**, Cement Concrete Res. V. 34, P.235-248, 2004.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139p. Tese (Doutorado), Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2002.

GOMES, P. C. C.; *et al.*, **Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais.** V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, p. 1-14, 2003.

GOMES, P. C. C. e BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009. 165p.5

GHOUDOSSI, A. *et al.*; **Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixture,** Construction and Building Materials. V.53, p.102–109, 2014.

GHOUDOSSI, A. e SAADABADI, A. **Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin,** Construction and Building Materials, v. 154, p. 219–228, 2017.

- GILL, A. S. e SIDDIQUE, R. **Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash**, Construction and Building Materials, v. 157, p. 51–64, 2018.
- GIRISH S, et al., **Influence of powder and paste on flow properties of SCC**. Constr Build Mater; v.24, p. 2481–2488, 2010.
- GÜNEYISI E, et al. **Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin**. Materials Structure, v. 41, p. 937–49, 2008.
- GURU, J.J. et al., **Micro and macrolevel properties of fly ash blended self-compacting concrete**. Mater. Des. 46, 696–705, 2013.
- HABIBI A. e GHOMASHI J., **Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results**, Construction and Building Materials V. 168, P.113–123, 2018.
- HASSAN A. A. A e MAYO, J. R. **Influence of mixture composition on the properties of SCC incorporating metakaolin**, Magazine of Concrete Research, V. 66, n° 20, p. 1036–1050, 2014.
- HWANG C, TSAI C. **The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete**. In: Zhiwu Yu et al., editors. SCC'2005-China: 1st international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete. RILEM Publications SARL, 2005.
- HO, D. W. S. et al., **The use of quarry dust for SCC applications**. Cement and Concrete Research, n. 32, Pergamon, p. 505-511, 2002.
- HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II, 318 p. São Paulo, 2008.
- HU J, WANG K. **Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology**. Construction Build Mater; V.25:p.1196–204, 2011.
- IRASSAR, E. F. et al. **Hidratação e propriedades de cimentos compostos (com três adições) com fíler calcário e escória**. Revista ALCONPAT, Yucatan, v. 05, n. 2, p. 83-95, mai – ago. 2015.
- JIANG, S. et al., **Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility**, Cement Concrete Research, 29, P.71-78. 1999.
- KANADASAN J, RAZAK H. A. **Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing**. Mater Des; v. 56, p:9–19, 2014.

KANNAN, V. e GANESAN, K., **Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin**. Construction Building Materials. V.51, p. 225–234, 2014.

KANNAN, V. **Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin**, Construction and Building Materials, V.160, p. 169–179, 2018.

KHALEEL, O.R. *et al*, **The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC)**, Procedia. Eng. v.14, p. 805–813, 2014.

KHALEEL O. R, HASAK A. R. **Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate**. Mater Des, v. 53, p.691–700, 2014

KHAVITA, O. R., *et al.*, **Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete**, Applied Clay Science, v. 114, p. 370–374, 2015.

KHAYAT, K.H, *et al.*, **Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications**. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELFCOMPACTING CONCRETE, 1999, Stockholm. **Proceedings**...Stockholm: RILEM Publications, 1999, p.143-152.

KHAYAT K. H, *et al*. **Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete**. Materials Structure; v. 32, nº9, p. 679–686, 1999.

KHAYAT, K., *et al.*, **Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concretes**, ACI Materials Journal, n. 99, pp. 234-241, 2002.

KIM J. I, *et al*. **Application of neural networks for estimation of concrete strength**. J Mater Civil Eng v. 16, p. 257–264, 2004.

KLEIN, Z. F., **Investigação de argamassas para dosagem do concreto auto adensável contendo ora filler calcário ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao Filler**: Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis - 2006.

LE, H. T. e LUDWIG, H. M. **Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete**. Materials and Design, v. 89, p. 156-166, 2016.

LEITE, G. U., **Uso do planejamento experimental de misturas na otimização da pasta e no empacotamento de agregados para produção do CAA**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba – João pessoa/PB, 2018.

LI J., et al.; **A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories**, Construction and Building Materials V. 157, P. 621–634, 2017.

LUNG-CHAO H, et al. **Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete**. Construction and Building Materials. V. 25, p. 3768-3772, 2011..

LU, C. et al., **Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability**. Construction and Building Materials, v. 75, p. 157–162, 2015.

MACEDO, R. M. P. R. de. **Aplicação da metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmicas para telhas**. 2007. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, Natal.

MADANDOUST R. e MOUSAVI S.Y. **Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin**. Construction and Building Materials, v. 35, p.752–760, 2012.

MANUEL. P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto adensáveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MA K., et al., **Improved mix design method of self-compacting concrete based on coarse aggregate average diameter and slump flow**, Construction and Building Materials, V. 143 P. 566–573, 2017.

MANSUR, A. A. P., e MANSUR, H. S. (2009). **Estudo da adição de poli (álcool vinílico) na sedimentação de pastas cimentícias**. In 10º Congresso Brasileiro de Polímeros.

MCLEAN R. A, ANDERSON V. L **Extreme vertices design of mixture experiments**. Technometrics, v. 8, n° 3, p.:447–454, 1966.

MELO, K. A. e CARNEIRO, A. M. P., **Effect of Metakaolin's fineses and content in self-consolidating concrete**, Construction and Building Materials, v.24, p.1529–1535, 2010.

MEMON, S.A., et al. **Production of low cost self compacting concrete using rice husk ash**. In: First international conference on construction in developing countries (ICCIDC-1), Pakistan, pp. 31–4, 2008.

MEMON, S.A., et al., **Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self compacting concrete**. Construction and Building Materials. V. 25, p. 1044-1048, 2011.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOHAMMED, M.K. *et al*, **Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture**, Construction. Building. Materials. v. 72, p. 83–93, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 832p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5 th Edition, 1991.

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE. Recife, 2010.

NAKAJIMA, Y. YAMADA, K. **The effect of the kind of calcium sulfate in cements on the dispersing ability of poly naphthalene sulfonate condensate superplasticizer**, Cement Concrete Res. V.34, p.839-844, 2004.

NANTHAGOPALAN P., e SANTHANAM M., **A new empirical test method for the optimisation of viscosity modifying agent dosage in self-compacting concrete**, Materials and Structures, v. 43, p. 203–212, 2010.

NEHDI, M. e RAHMAN, M.A. **Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction**, Cement Concrete Res. 34, 11 p. 1993-2007, 2004.

NEPOMUCENO, M.C.S. *et al*. **Maximum coarse aggregate's volume fraction in self-compacting concrete for deferent flow restrictions**, Construction. Build. Materials. V.113 851–856, 2016.

NEUWALD, A. **Self-Consolidating Concrete**, MC Magazine, pp. 2-4, 2004.

NGUYEN V. T. **Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete** [PhD thesis], 2011,. The Netherlands: Delft University of Technology; 2011.

NIKBIN, I.M. *et al.*, **Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete**, Construction and Build. Materials. V.52, p. 137–145, 2014.

NIE, D. e AN, X., **Optimization of SCC mix at paste level by using numerical method based on a paste rheological threshold theory**, Construction and Building Materials, V. 102, P. 428–434, 2016.

NOGUCHI, J.; *et al*. **Rheological Approach Passing Ability between Reinforcing bars of self compacting concrete**. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1999, **Proceedings...**Stockholm: RILEM Publications, 1999, p. 83-94.

NUNES, S. C. B. **Concreto Auto-Compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001.

OKAMURA, H. e OZAWA, K. **Mix design for self-compacting concrete**, concrete internacional. Lib. Jpn. Soc. Civ. Eng. 25 V.6, P.107–120, 1995.

OKAMURA, H. **Self-compacting high performance concrete**. in Concrete internacional, Vol. 19, Nº 7. P. 50-54, 1997.

OKAMURA, H. OZAWA, K. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Structural Concrete, Nº 1. Março, 2000.

OKAMURA, H. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, Nº 1. Abril, 2003.

OLIVEIRA, I. R. STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C., “**Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**”, Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000)

OLUBANWO, A. O. KARADELIS, e J. N. **Applied mixture optimization techniques for paste design of bonded roller-compacted fibre reinforced polymer modified concrete (BRCFRPMC) overlays**, Materials and Structures, v. 48, p.2023–2042, 2015.

O'REILLEY, V. D. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: PINI, 1992.

OUCHI, M. *et al.*, **Development of a simple self compactability testing method for acceptance at job site**. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE STRUCTURE, 1996.

OZBAY E. *et al.*, **Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method**, Construction and Building Materials, v. 23, p. 694–702, 2009.

PANDOLFELLI, V. C. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, P.195, 2000.

PARK, C. K. *et al.* **Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures**”, Cement Concrete Res. V. 35, P. 842-849, 2005.

PETERSSON O, BILLBERG P, VAN B. K. **A model for self-compacting concrete**. 1996.

PETERSSON, O., **Preliminary Mix Design"Final Report of Task 1**, Sweedish Cement and Concrete Research Institute, pp.15-19, 1997.

PEREIRA P, et al., **The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates**. Construction and Build 2012.

PERLOT, C. et al. **Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry**. Cement e Concrete Composites, v. 44, p. 50-57, 2013.

PETROU, M. et al., **Influence of mortar rheology on aggregate settlement**, ACI Mater. J. V. **97**, p. 479-485, 2000.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R., GALLO, J.; PANDOLFELLI, V. C., **How mixs affect the rheology and refractory castables**, parte I e II. American ceramic society Bulleti. V 80 – 2001.

POON, C.S., et al, **Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes**. Cement concrete responses, v.31, p.1301–1306, 2001.

POON, C.S., et al., **Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete**. Construction and Building Materials. V. 20, p. 858–865, 2006.

PRAKASH N, SANTHANAM M., **A study of the interaction between viscosity modifying agent and high range water reducer in self-compacting concrete**. Proceedings of international conference on measuring, monitoring and modeling concrete properties, Greece, 3–7 July, p. 449–454, 2006.

RAMEZANIANPOUR A. A, BAHRAMI J. H. **Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes**. Construction Building Materials; v.30, p. 470–479, 2012.

RAMGE P, et al., **Segregation of coarse aggregates in self compacting concrete**. In: Khayat KH, Feys D, editors. v. 1. RILEM Book series; p.113–25, 2010.

RAZAK H. A, et al. **Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials**. Cements Concretes Composites, v.26, p. 883–889, 2004.

REPETTE, W. L. **Concretos de última geração: presente e futuro**, In: ISAIA, G. C., Editor. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, 2005, v. 2, p. 1509-1550.

RESENDE, M. L. S. et al., **Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta**, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 135-146, 2012.

RIBEIRO, J. L. D, et al. **Minimizing manufacturing and quality costs in multiresponse optimization.** Quality Engineering, V. 13, 2000.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358 p.

RODRIGUES, D.A.E.; et al. **Efeito da adição de metacaúlim na absorção capilar e carbonatação do concreto** revista Matéria, Suplemento, 2017.

ROJAS M. F. e CABRERA J. **The effect off temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of Metakaolin–lime–water systems.** Cement Concrete Res v.32, p.133–138, 2002.

SAAK A. W, et al. **New methodology for designing self compacting concrete.** ACI Mater J; v. 98, n° 6, 2001.

SAFIUDDIN M, 2008 **Development of Self-consolidating High Performance concrete Incorporating Rich Husk Ash.** PhD thesis, The University of Waterloo, Canada, 2008.

SAFIUDDIN M. D, et al., **Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash.** Cement Concrete Composites, v.32: p. 708–717, 2010

SAFIUDDIN M. D, et al., **Efficacy of ASTM saturation techniques for measuring the water absorption of concrete.** Arab J Sci Eng, v. 35, p.761–768, 2011

SAFIUDDIN M. D, Salam AMD and Jumaat MZ, **Flowing ability of self-consolidating concrete and its binder paste phase including palm oil fuel ash.** Magazine of Concrete Research, v. 64, p. 931–944, 2012.

SATISH. S, e KESHAVMUTHY. H, **Comparison of high Strength concretes, Journal of civil engeneering and technology.** V, 1. N° 1. July-december, 2013.

SCHEFFE, Henry. Experiments With Mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological),** v. 20, n. 02, p. 344-360, 1958

SCHWARTZENTRUBER, L. D. et al., **Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self-Compacting Concrete (SCC),** *Cement and Concrete Research*, n.36, pp.1203–1213, 2006.

SEBAIBI, N. et al, **Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard,** Construction and Building Materials, v. 43, p. 382–388, 2013.

SEDRAN T, De LARRARD F. **Optimization of self-compacting concrete tanks to packing model.** In: **Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7;** 1999.

SELVARAJ, S. e SIVARAMAN, S, **Prediction model for optimized self-compacting concrete with fly ash using response surface method based on fuzzy classification**, The Natural Computing Applications Forum, 2018.

SEPULCRE A. A, OLIVARES F. H, **Interfacial transition zone (ITZ) analysis in hydraulic lime restoration mortars for grouting of historical masonrys**, Int. J. Arch. Heritage, v. 6, p. 396–414, 2012.

SHATAT, M.R. **Hydration behaviour and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin**. Arabian Journal of Chemistry. V.12, p. 1-6, 2013.

SHI C, WU Y. **Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder**. ACI Mater J, v.102, n.5, 2005.

SHI C. *et al.*, **A review on mixture design methods for self-compacting concrete**, Construction and Building Materials, v. 84, p. 387–398, 2015.

SHEKARCHI, M. *et al.*, **Transport properties in metakaolin blended concrete**. Construction. Building Materials. V.24, p. 2217–2223, 2010.

SCHUTTER G, et al., **Self-compacting concrete**. Caithness, Scotland, UK: Whittles Publishing; 2008.

SIDDIQUE R, KLAUS J. **Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review**. Appl Clay Sci v.43, p.392–400, 2009.

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

SILVA, D. R., e LIMA, E. B., **Influência do teor de argamassa nos concretos em relação à resistência mecânica e relação A/C**. 2016. 25f. Artigo (Engenharia Civil). Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2016.

SKIFAS, I. P. *et al.*, **Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin**, Construction and Building Materials, v. 64, p. 121–129, 2014.

SU N, *et al.* **A simple mix design method for self-compacting concrete**. Cement Concrete Research, v. 31, n° 12: p.1799–807, 2001.

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

SUGHATAN, A. **Self Compacting High Performance Concrete with Steel Fibres.** International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), Vol. 4, N° 1. Junho, 2016

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** 2004, 149 p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto adensáveis.** 2007 162 p. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F. e PACHECO. M, **Concreto auto adensável (CAA) comparativo entre os métodos,** Revista IBRACON de estruturas e Materiais, v. 5, n 4, p. 500-529, 2012.

UYBAL, M.; YILMAZ, K. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete.** Cement e Concrete Composites, v. 33, p. 771-776, 2011.

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

VANCE, K. et al., **The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models,** Cement & Concrete Composites, V. 59, P.38–48, 2015.

VEGAS P. **Rice production and marketing.** California, USA: Sage V Foods, LLC, Los Angeles; 2008.

VEJMELKOVA E., et al. **Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag.** Construction Build Materials, v. 25, p.1325–31, 2011.

WALLEVIK, H. WALLEVIK, J. E., **Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes,** Cement and Concrete Research V. 41 P.1279–1288, 2011.

XIE, Y. et al, **Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC),** Cement Concrete Composites. V.55, p.223–231, 2015,

ZHANG, M. H., MALHOTRA, V. M., **High – Performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** Materials Journal, ACI. V. 93, p. 629-636, 1996.

ZERBINO, R. et al., **Reología de hormigones autocompactables,** in: Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 13, 2006.

ZHOU, W. *et al.* **Norm method to define and evaluate robustness of self-compacting concrete due to component quantity variations**, Construction and Building Materials, V.161, P. 246–253, 2018.

WONG H. H. C, KWAN AKH. **Rheology of cement paste: role of excess water to solid surface area ratio**. J Mater Civ Eng 2008; 20:189–97.

WONG HHC, KWAN A.K.H. **Packing density of cementitious materials**: Part 1 – Measurement using a wet packing method. Mater Struct 2008; 41:689–701.

WU, Q; AN, X. **Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste**. Construction and Building Materials, v. 53, p. 642-651, 2014.

WU, J. *et al*, **Simulation on the Self-Compacting Concrete by an Enhanced Lagrangian Particle Method**, Advances in Materials Science and Engineering V. 2016, P. 1 a 11, 2016.

YAHIA, A.; *et al*. **Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio**. In: Cement and Concrete Research, n.35, p. 532-539, 2005.

YEH, C. *et al.*, **Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex–centroid mixture design and neural networks**, Engineering with Computers (2009) 25:179–190.

ANEXO 1 - Classificação adotada pelas especificações da EFNARC para o CAA

A.4.2 Classification used in the specification of SCC

Where the properties of SCC are classified, Tables A.1 to A.5 apply.

NOTE. It is normal to specify only a slump-flow class. In some situations it is also necessary to specify, as initial tests, an L-box class and/or a segregation resistance class and/or either the T_{500} value or a V-funnel class.

Table A.1 – Slump-Flow classes

| Class | Slump-flow in mm |
|-------|------------------|
| SF1 | 550 to 650 |
| SF2 | 660 to 750 |
| SF3 | 760 to 850 |

Table A.2 – Viscosity classes

| Class | T_{500} , s | V-funnel time in s |
|----------|---------------|--------------------|
| VS1/ VF1 | ≤ 2 | ≤ 8 |
| VS2/ VF2 | > 2 | 9 to 25 |

Table A.3 – Passing ability classes (L-box)

| Class | Passing ability |
|-------|---------------------------|
| PA1 | $\geq 0,80$ with 2 rebars |
| PA2 | $\geq 0,80$ with 3 rebars |

Table A.4 – Segregation resistance classes (sieve segregation)

| Class | Segregation resistance in % |
|-------|-----------------------------|
| SR1 | ≤ 20 |
| SR2 | ≤ 15 |

APÊNDICE 1- Resumo dos métodos de dosagem existentes na literatura internacional

| | | |
|---|------------------------------------|---|
| Métodos empíricos | Okamura, e Ozawa (1995) | Corrigir o teor de agregados (miúdo e graúdo) e depois obter auto adensabilidade ajustando W/B e dosagem superplastificante |
| | Edamatsu, Sugamata, e Ouchi (2003) | Usar o teste de espalhamento de argamassa e funil em V para selecionar o volume de agregado fino, a proporção volumétrica de água/finos e a dosagem de superplastificante. |
| | Domone (2009) | Estimar as proporções da mistura e, em seguida, realizar testes para provar um determinado conjunto de propriedades requeridas para as misturas. |
| | Khaleel e Rasak (2014) | Utiliza diferentes propriedades dos agregados e faz a dosagem nas três fases: inicialmente na pasta de cimento são definidos os teores de agua e superplastificante, depois, na fase de argamassa são definidos os teores de adição mineral e agregado miúdo e só ao final nos testes já com o concrete é que se define o percentual de agregado graúdo. |
| Resistência de Resistência à Compressão | Ghazi, e Al Jadiri (2010) | Fornecer misturas de CAA com resistência à compressão especificada, considerando a classificação do agregado em misturas de CAA (módulo de finura de agregado fino e tamanho máximo de agregado graúdo). O método ACI 211.1 para CC e o método EFNARC para CCA, foram adotados como base desse novo método. Nesse novo método, a faixa real de resistência à compressão do método ACI 211.1 foi ampliada de 15 para 40 MPa (2145 a 5800 psi) para cobrir uma faixa mais ampla de resistência (15 a 75 MPa [2145 a 10,875 psi]), cobrindo tanto misturas CAA normais como de alta resistência. |
| | Dinakar, Sethy, Sahoo (2013) | Consiste na dosagem de concretos auto adensáveis baseados no conceito de eficiência: fixa-se o teor total de cimento ou pó para CAA; em seguida é corrigida a porcentagem de escória e calculada sua eficiência ; calcula-se o teor de água e logo após o conteúdo agregado graúdo e miúdo; por fim é feita a dosagem de superplastificante (SP) e testes no estado fresco no CAA para ajustes na proporção da mistura. |
| Método de embalagem dos agregados | Hwang, e Tsai (2005) | Utilizara o DMDA (Algoritmos de projeto para misturas densas), derivado da teoria da densidade máxima e teoria da pasta em excesso. |
| | Petersson, Billberg, e Van (1996) | Baseada principalmente na determinação do esqueleto granular (conteúdo vazio), num volume mínimo de pasta, que garanta auto adensabilidade ao concreto e nos critérios de bloqueio e deformabilidade, garantido por adequados valores nos ensaios de caixa L e slum flow (espalhamento), respectivamente. |
| | Su, et al, (1999) | Fundamentado no fator de embalagem (PF) para controlar o conteúdo de agregado graúdo e miúdo na proporção de mistura, que consiste em preencher com pasta composta por materiais cimentícios, os espaços vazios existentes entre as partículas dos agregados não compactados, assegurando a fluidez, habilidade de preenchimento e de passagem do CAA. |
| | Sedran, e De Larrard (1996) | Uso de um software para projetar o CAA com base no modelo de embalagem compressível (CPM). O software foi desenvolvido com base na abordagem teórica do comportamento do CAA em estado fresco, e de um modelo matemático desenvolvido no LCPC, chamado de Compressible Packing Model. Este modelo permite otimizar o esqueleto granular do concreto. |
| | Shi e Wu (2005) | Utiliza uma combinação da teoria da pasta excessiva e diretrizes da ACI para projetar concretos leves auto adensáveis. Para aumentar a fluidez e evitar a segregação foram adicionadas as misturas pó de vidro e cinza volante. |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| Reologia das Pastas | Sebaibi, et al (2013) | O método proposto determina o fator de empacotamento "PF" (conteúdo agregado), após o qual, pó de sílica ativa é usado para aumentar a resistência e obter melhor trabalhabilidade da pasta fresca. O modelo de embalagem compressível, o método chinês e o padrão FN EN 206-1 para projeto de mistura de CAA são usados como diretrizes básicas do método. |
| | Kanadasan e Razak (2014) | Baseado no empacotamento de partículas para obter o desenho final da mistura, Integrando o nível real de empacotamento do volume de agregado e de pasta. As proporções de mistura selecionadas foram verificadas preparando o CAA de empacotamento real e seu desempenho foi avaliado para as propriedades endurecidas. |
| | Li et al (2017) | Método de dosagem para CAA de agregado leve, com base nas teorias de espessura de filme de empacotamento e argamassa. O método é composto por duas etapas: otimização do esqueleto granular e otimização da composição dos materiais cimentícios. O primeiro é conduzido de acordo com ASTM C 29, embalando diferentes quantidades de agregados graúdos e miúdos, e a pasta usando o método mínimo de água necessário. Para verificar a sua aplicabilidade para CAA de agregados leves, cinco proporções de mistura com MFT variável (ou seja, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0 e 2,2 mm) foram projetados. |
| | Ma et al (2017) | Com base nas relações entre fluxo de slump (SF), Volume e diâmetro médio de agregado graúdo (Vg, i) e (dav, i), respectivamente, e utilizado em CAA, verificou-se que o SF (espalhamento) e o agregado graúdo poderiam fluir para um status de camada única compacta quando o teste SF fosse realizado. Portanto, um melhor método de dosagem de CAA foi proposto de acordo com as relações entre SF, dav, i e Vg, i. O volume e o diâmetro médio do agregado graúdo tem relação inversa ao SF, ou seja, quanto maior o volume menor o SF e quanto menor o diâmetro do agregado graúdo maior o SF. Quando o tamanho nominal do agregado graúdo for de 5 a 20 mm, o SF adequado para o CAA deve ser de 570 mm a 720 mm |
| | Saak, et al (2001) | Metodologia de dosagem que tem como parâmetro crítico conciliar a reologia da pasta e controlar a segregação dos agregados e a trabalhabilidade no CAA. A teoria sugere que a segregação dos agregados é governada pela tensão de escoamento, viscosidade e densidade da matriz da pasta de cimento. O conceito de zona de auto fluxo reológico (SFZ) para o concreto é introduzido onde segregação dos agregados é evitada, mas o concreto tem uma alta trabalhabilidade. |
| Reologia das Pastas | Bui, Akkaya e Sha (2002) | Baseia-se nos critérios de reologia da pasta, que incluem viscosidade aparente mínima, vazão mínima e taxa ótima de viscosidade / fluxo para obter concreto auto adensável com deformabilidade e resistência à segregação. Os critérios reológicos da matriz de pasta de cimento estão relacionados ao diâmetro médio e ao espaçamento entre os agregados, que são influenciados pelas propriedades físicas e pelo conteúdo dos agregados. As propriedades do SCC foram caracterizadas por medidas quantitativas de segregação e fluxo. |
| | Ferrara, et al. (2007) | Um modelo de reologia das pastas é aplicada ao projeto de misturas de CAA reforçado com fibra de aço. As fibras são incluídas na distribuição do tamanho de partícula do esqueleto sólido através do conceito de diâmetro equivalente, definido com base na superfície específica. A influência das fibras (tipo e quantidade) na classificação do esqueleto sólido, conteúdo mínimo e propriedades reológicas da pasta necessária para alcançar a auto adensabilidade e a estabilidade reológica necessárias foram estudadas. Os testes foram realizados em ambos concretos liso e reforçado com fibra, feitos com uma variedade de composições de mistura. |
| | Nanthagopalam e Samatham (2009) | Otimização da dosagem de VMA (Aditivos modificadores de viscosidade) para pastas cimentícias de diferentes proporções entre água e pó. O princípio deste método foi baseado na lei de Stokes. As propriedades reológicas das pastas de CAA com VMA foram estudadas usando um |

| | | |
|--|-----------------------------|---|
| | | viscosímetro. Os estudos foram também estendido ao concreto para validação da dosagem otimizada obtida a partir dos testes na pasta de cimento. |
| | Buncher et al (2014) | Foi utilizado o método de embalagem molhada, e as interações entre todos os constituintes da pasta de cimento, foram consideradas. A partir do volume de água necessário apenas para preencher os vazios entre os materiais em pó suspensos na densidade máxima de empacotamento, um volume de água em excesso foi deduzido para ajustar o fluxo de pasta para aplicações de auto adensabilidade. O volume de água retido pelo esqueleto granular projetado (embalagem máxima) demonstrou não alterar as propriedades de fluxo da pasta. A associação pasta/agregado foi testada com Cimento Portland , cimentos misturados (calcário ou escória), alta gama do tipo policarboxilato agente redutor de água e areia siliciosa arredondada (0/4 mm) e cascalho (4/14 mm). Além disso, a área superfície BET foi um critério relevante para a otimização do fluxo da pasta. |
| | Wu e AN (2014) | O modelo teórico sugere que as características reológicas influenciam na fluidez e resistência à segregação do CAA, influenciando a força de suporte e a condição de movimento das partículas dos agregados. O fluxo de mini <i>slump</i> da pasta e a trabalhabilidade do CAA foram testados para verificar o modelo. |
| | Wu et al (2016) | Método baseado em partículas Lagrangianas melhorado, o método Hidrodinâmico de Partículas Suavizadas (SPH), são desenvolvidas neste estudo para simular o fluxo de CAA como não-newtoniano para alcançar resultados estáveis com convergência e propriedades satisfatórias, equações de Navier-Stokes e equações de conservação de massa incompressíveis são resolvidas como básicas. Modelo reológico cruz é usado para simular a relação de tensão de cisalhamento e de deformação do CAA. O modelo reológico cruzado é usado para simular a tensão de cisalhamento e a relação de deformação do CAA. O método de partículas de espelhos é usado para limites de parede. O método de SPH aprimorado é testado por um típico problema de fluxo de queda 2D e também aplicado ao teste L-box. |
| Planejamento Estatístico Fatorial | Khayat, et al (1999) | Obter uma relação estatística entre cinco parâmetros de mistura e as propriedades do concreto |
| | Ozbay, et al (2009) | A metodologia de projeto de experimentos de Taguchi foi utilizada para otimização das misturas. Para esse fim, as misturas são projetadas em um arranjo ortogonal L18 com seis fatores, a saber, " relação (W / C) ", teor de água (W) ", agregado fino para agregado total (s / a) ", " conteúdo de cinzas volantes (FA) ", " conteúdo de agente de absorção de ar (AE) "e" conteúdo de superplasticificante (SP) ". As misturas são testadas, tanto em estado fresco como endurecido para atender a todos os requisitos práticos e técnicos do CAADAR (concreto auto adensável de alta resistência. Os melhores níveis possíveis para proporções de mistura são determinados para a maximização das propriedades almejadas. |
| | Alymac et al (2016) | Desenvolver um CAA eco eficiente, viável com a quantidade máxima de pó de mármore usando a Metodologia da Superfície de Resposta. As relações foram determinadas entre as proporções de A/C e F/C e as respostas, tais como fluxo de <i>slump</i> , T50, funil V e resistência à compressão. |
| | Habibi et al (2018) | Otimização de dosagem para CAA, dada a importância dos custos de produção, com base em resultados experimentais de 42 (quarenta e duas) misturas. O custo total de um metro cúbico de CAA é considerado como a função no problema de otimização, que deve ser minimizado. A limitação da resistência à compressão de 28 dias e o fluxo de queda do CAA foram considerados como as principais restrições do modelo. Dois modelos matemáticos são desenvolvidos para estimar a resistência do CAA e usados para definir as principais restrições no modelo de otimização. O CAA foi preparado, considerando a importância da classificação da areia |

| | |
|-------------------------------------|---|
| | <p>na resistência à compressão do CAA e o pó de pedra foi usado para melhorar o módulo de finura da areia. A programação quadrática seqüencial foi empregada para resolver o problema otimização do CAA baseado no modelo proposto.</p> |
| Selvaraj a Silvaramam (2018) | <p>Modelo de previsão de dados usando uma máquina de vetores de suporte multiclasse aprimorada baseada em regras inteligentes e difusas, enquanto otimiza as práticas de teste e ensaios necessários para a dosagem do CAA, usando a metodologia de superfície de resposta (RSM). O método Taguchi com um arranjo L18 e fator de três níveis foi usada para reduzir o número do experimentos. Foram utilizados quatro elementos de regulação: cimento, cinzas volantes, razão A/F e superplastificante. Dois resultados como o fluxo de slump no estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido aos 28 dias foram avaliados. Otimizações dos resultados foram definidas usando o RSM.</p> |
| Zhou et al (2018) | <p>Baseado nos conceitos de álgebra linear (usando análise de norma de vetores) foi proposto a fim de definir e avaliar a robustez do CAA. A robustez das misturas de CAA podem ser descritos e avaliados de uma forma mais intuitiva e tanto as variações de conteúdo de quantidades, tais como a fração volumétrica e a graduação, afetam fortemente as propriedades frescas do CAA de baixo teor de ligantes.</p> |
| Ahmed e Hassan (2014) | <p>Método estatístico de experimentos para otimizar as proporções de mistura de CAA de alta resistência. A otimização envolveu a variação de três fatores da mistura (variáveis) em cinco níveis diferentes. Esses fatores incluíram o conteúdo total de ligantes, a porcentagem de pozolana e a relação A/F. A análise estatística foi explorada para determinar os fatores mais significativos que afetam as propriedades do CAA e o nível ótimo de cada variável. Um total de 27 misturas foram testadas nos estados fresco e endurecido para obter a melhor mistura de CAA e para comparar seus resultados com misturas de CAA contendo outros materiais complementares de cimentação.</p> |
| Wu e An (2014) | <p>O modelo teórico sugere que as características reológicas influenciam na fluidez e resistência à segregação do CAA, influenciando a força de suporte e a condição de movimento das partículas dos agregados. O fluxo de mini-slump da pasta e a trabalhabilidade do CAA foram testados para verificar o modelo.</p> |
| Planejamento de Misturas | Bouziani (2013) <p>Uma modelagem para projeto de mistura foi usada para destacar os efeitos da areia do rio (RS), areia triturada (CS) e areia da duna (DS) como proporções em sistemas binário e ternário, na fluidez, capacidade de passagem, segregação e resistência mecânica do CAA. As respostas do modelo estatístico derivado são fluxo de queda, tempo de funil ao V, caixa L, estabilidade e resistência à compressão a 2, 7 e 28 dias. Os modelos matemáticos derivados permitem ilustrar a variação de diferentes respostas em ternários de contorno em relação às proporções de RS, CS e DS. Isso proporciona flexibilidade para otimizar combinações de RS, CS e DS com uma determinada propriedade que atenda a recomendações específicas</p> |
| | Oluwbanjo e Karadelis (2015) <p>Foi utilizado técnicas de otimização com planejamento de misturas de materiais para proporcionar e projetar o componente de pasta (P) de um polímero reforçado com fibra compactada de concreto modificado. Ao restringir o intervalo de variabilidade dos constituintes da pasta, foi criado um espaço de design viável com 13 pontos experimentais tratados com base nas propriedades estruturais e elásticas necessárias da sobreposição. O tempo de consistência ideal para consolidação total e comportamento composto com o substrato cimento foi estabelecido entre 34,1 e 34,9 s, enquanto a densidade máxima aparente resultante atinge entre 97,1 e 98,0% da densidade teórica livre de ar. Os testes interfaciais de tensão e</p> |

| | |
|------------------------|--|
| | de cisalhamento realizados sobre o revestimento de mistura ótimo também exibiram boa capacidade de ligação com o substrato. |
| Nie e An (2016) | Método numérico para otimizar as proporções de mistura de CAA ao nível da pasta com base na teoria do limiar reológico de pasta que deve satisfazer os critérios para garantir o CAA com boa fluidez e resistência à segregação. No total, foram realizados inicialmente 12 testes de fluxo de mini <i>slump</i> e derivadas características reológicas relevantes. A correlação entre variáveis de mistura e características reológicas foi determinada usando um método de interpolação bilinear. Uma área de auto adensabilidade ao nível da pasta foi definida escolhendo a mistura cujas características reológicas satisfizeram os critérios e a mistura econômica foi obtida da área, em um processo de iteração. |

APÊNDICE 2 – Empacotamento das Partículas

| Ensaio de densidade de empacotamento dos materiais finos | | | | | | | |
|--|------------|----------|--------|--------|----------|----------|--------|
| Ponto | Composição | PA+R (g) | PR (g) | PA (g) | Vr (cm³) | Y(g/cm³) | Média |
| P01 | 100%CP | 226,00 | 176,00 | 50,00 | 54,83 | 0,912 | 60,127 |
| P02 | 80%CP20%MK | 217,60 | 176,00 | 41,60 | 54,83 | 0,759 | 0,804 |
| P03 | 75%CP25%MK | 219,90 | 176,00 | 43,90 | 54,83 | 0,801 | |
| P04 | 70%CP30%MK | 222,80 | 176,00 | 46,80 | 54,83 | 0,854 | |
| P05 | 85%CP15%FC | 224,00 | 176,00 | 48,00 | 54,83 | 0,875 | 0,832 |
| P06 | 75%CP25%FC | 222,90 | 176,00 | 46,90 | 54,83 | 0,855 | |
| P07 | 65%CP35%FC | 217,90 | 176,00 | 41,90 | 54,83 | 0,764 | |
| P08 | 80%CP20%CA | 224,50 | 176,00 | 48,50 | 54,83 | 0,885 | 0,908 |
| P09 | 70%CP30%CA | 227,90 | 176,00 | 51,90 | 54,83 | 0,947 | |
| P10 | 60%CP40%CA | 224,90 | 176,00 | 48,90 | 54,83 | 0,892 | |

| Fator de empacotamento dos agregados (Massa unitária) | | | | |
|---|---------|----------|----------|-------------|
| Relação B/A | Mr (kg) | Vr (dm³) | Mra (kg) | Mu (kg/dm³) |
| 0,82 | 4,75 | 7,00 | 17,40 | 1,81 |
| 0,95 | 4,75 | 7,00 | 17,15 | 1,77 |
| 1,08 | 4,75 | 7,00 | 17,35 | 1,80 |
| Brita 1 | 4,75 | 7,00 | 14,79 | 1,43 |
| Areia | 4,75 | 7,00 | 15,90 | 1,59 |

APÊNDICE 3 – Tabela com os pontos experimentais e seus componentes reais

Pontos experimentais e seus componentes reais

| Pontos | Pseudocomponentes | | | | Componentes Reais | | |
|--------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|-------------|
| | C1 (%) | C2 (%) | C3 (%) | C4 (%) | SP (%) | AM (%) | Cimento (%) |
| 1 | 100% | 0% | 0% | 0% | | | |
| 2 | 0% | 100% | 0% | 0% | | | |
| 3 | 0% | 0% | 100% | 0% | | | |
| 4 | 50% | 50% | 0% | 0% | | | |
| 5 | 50% | 0% | 50% | 0% | | | |
| 6 | 0% | 50% | 50% | 0% | | | |
| 7 | 33% | 33% | 33% | 0% | | | |
| 8 | 50% | 25% | 25% | 0% | | | |
| 9 | 25% | 50% | 25% | 0% | | | |
| 10 | 25% | 50% | 25% | 0% | | | |
| 11 | 0% | 0% | 0% | 100% | | | |
| 12 | 50% | 0% | 0% | 50% | | | |
| 13 | 0% | 50% | 0% | 50% | | | |
| 14 | 33% | 33% | 0% | 33% | | | |
| 15 | 50% | 25% | 25% | 0% | | | |
| 16 | 25% | 50% | 25% | 0% | | | |
| 17 | 25% | 25% | 50% | 0% | | | |
| 18 | 50% | 25% | 0% | 25% | | | |
| 19 | 25% | 50% | 0% | 25% | | | |
| 20 | 25% | 25% | 0% | 50% | | | |

APÊNDICE 4 – Tabelas para definição dos limites de proporção dos pseudocomponentes e relação A/F

Pontos experimentais para definição dos limites de proporção dos componentes

| A/F | | Slump Flow | | | T115 | | |
|------|---|------------|----|----|------|----|----|
| | | D1 | D2 | D3 | T1 | T2 | T3 |
| 0,36 | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| 0,38 | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| 0,40 | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| 0,42 | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| 0,44 | 1 | | | | | | |
| | 2 | | | | | | |

Quantidades dos componentes dos pontos experimentais para escolha dos pseudocomponentes

| Componentes Reais | | | Quantidade 500 g | | | Relação A/F | | | | |
|-------------------|--------|--------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 0,42 | 0,44 |
| SP (%) | AM (%) | CP (%) | P _{SP} | P _{AM} | P _{CP} | PÁGUA | PÁGUA | PÁGUA | PÁGUA | PÁGUA |
| LS | LI | | | | | | | | | |
| LI | LS | | | | | | | | | |

***LS - Limite superior e LI - Limite Inferior

APÊNDICE 5 – Resultados do *Flow* e T_{115} para as pastas com variação de relação A/F

| Pontos | Metacaulim (MK) | | | | | | Pozolana da Casca de Arroz (PCA) | | | | | | Fíler Calcário (FC) | | | |
|--------|-----------------|-------|-------|----------|------|------|----------------------------------|-------|-------|----------|------|------|---------------------|-------|----------|------|
| | Flow (cm) | | | T115 (s) | | | Flow (cm) | | | T115 (s) | | | Flow (cm) | | T115 (s) | |
| | 0,40 | 0,42 | 0,44 | 0,40 | 0,42 | 0,44 | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 0,28 | 0,30 | 0,28 | 0,30 |
| 1 | 19,43 | 20,33 | 21,56 | 1,52 | 0,39 | 0,31 | 19,60 | 20,08 | 20,04 | 1,69 | 1,11 | 1,24 | 20,25 | 20,71 | 1,41 | 1,32 |
| 2 | 9,88 | 12,20 | 12,78 | | 3,90 | 2,75 | 15,98 | 16,73 | 16,79 | 3,22 | 1,51 | 1,90 | 16,92 | 18,29 | 2,68 | 1,99 |
| 3 | 18,11 | 18,88 | 18,65 | 1,39 | 0,33 | 0,32 | 17,38 | 17,50 | 18,43 | 2,37 | 1,67 | 1,23 | 14,07 | 15,96 | 3,04 | 2,47 |
| 4 | 18,31 | 18,60 | 19,13 | 1,47 | 0,60 | 0,43 | 17,50 | 18,13 | 17,73 | 2,07 | 1,82 | 1,59 | 19,26 | 19,93 | 1,67 | 1,45 |
| 5 | 18,83 | 20,25 | 20,99 | 1,23 | 0,45 | 0,36 | 18,90 | 19,85 | 18,72 | 1,71 | 1,20 | 1,05 | 19,26 | 18,68 | 1,79 | 1,56 |
| 6 | 16,63 | 17,33 | 17,10 | 1,44 | 0,85 | 0,99 | 17,65 | 17,30 | 17,08 | 2,47 | 2,06 | 2,22 | 15,50 | 17,06 | 1,42 | 1,42 |
| 7 | 18,57 | 19,90 | 20,04 | 1,15 | 0,25 | 0,75 | 18,50 | 19,25 | 18,01 | 1,72 | 1,52 | 1,78 | 19,70 | 19,79 | 1,61 | 1,43 |
| 8 | 18,64 | 20,50 | 20,89 | 1,05 | 0,43 | 0,38 | 18,83 | 19,25 | 19,44 | 1,90 | 1,80 | 1,73 | 19,41 | 21,00 | 1,64 | 1,32 |
| 9 | 17,97 | 17,90 | 18,50 | 3,05 | 0,90 | 0,50 | 18,08 | 17,25 | 18,46 | 2,14 | 1,87 | 1,95 | 18,59 | 21,04 | 1,46 | 1,47 |
| 10 | 19,13 | 19,50 | 20,43 | 1,16 | 0,45 | 0,31 | 18,30 | 18,25 | 18,54 | 1,90 | 1,74 | 2,00 | 17,99 | 20,13 | 1,84 | 0,92 |
| 11 | 19,43 | 20,33 | 21,56 | 1,58 | 0,39 | 0,31 | 19,60 | 20,08 | 20,04 | 1,69 | 1,11 | 1,24 | 20,25 | 20,71 | 1,59 | 1,32 |
| 12 | 9,88 | 12,20 | 12,78 | | 3,90 | 2,75 | 15,98 | 16,73 | 16,79 | 3,22 | 1,51 | 1,90 | 16,92 | 18,29 | 2,68 | 1,99 |
| 13 | 19,28 | 19,90 | 21,18 | 0,67 | 0,33 | 0,28 | 17,43 | 17,48 | 17,43 | 2,08 | 2,01 | 1,82 | 20,84 | 21,40 | 1,54 | 1,12 |
| 14 | 18,31 | 18,60 | 19,13 | 1,13 | 0,60 | 0,43 | 17,50 | 18,13 | 17,73 | 2,07 | 1,82 | 1,59 | 19,26 | 19,93 | 1,67 | 1,45 |
| 15 | 18,93 | 20,75 | 20,88 | 1,17 | 0,25 | 0,26 | 16,85 | 18,15 | 19,15 | 2,16 | 1,80 | 1,74 | 19,96 | 20,92 | 1,27 | 1,66 |
| 16 | 17,58 | 18,10 | 18,77 | 1,48 | 1,05 | 0,39 | 17,38 | 18,73 | 17,69 | 2,33 | 2,02 | 2,20 | 19,98 | 20,57 | 1,35 | 1,37 |
| 17 | 16,52 | 18,50 | 19,82 | 2,01 | 0,40 | 0,36 | 17,93 | 18,50 | 16,58 | 2,30 | 1,74 | 1,37 | 19,77 | 21,61 | 1,52 | 1,37 |
| 18 | 17,03 | 20,80 | 20,91 | 1,88 | 0,30 | 0,36 | 17,80 | 18,75 | 17,85 | 1,93 | 2,14 | 1,89 | 19,01 | 20,55 | 1,50 | 1,32 |
| 19 | 15,64 | 17,95 | 18,54 | 2,26 | 0,75 | 0,53 | 17,18 | 18,83 | 17,21 | 2,20 | 2,13 | 2,30 | 18,56 | 21,17 | 1,44 | 1,69 |
| 20 | 17,38 | 20,25 | 20,58 | 1,58 | 0,37 | 0,32 | 17,77 | 19,23 | 18,31 | 2,14 | 1,92 | 1,81 | 18,91 | 21,44 | 1,65 | 1,44 |

APÊNDICE 6 – Análise comparativa entre as pastas produzidas por processo manual e mecânico

| Pontos | Metacaulim (A/F - 0,42) | | | | PCA (A/F - 0,38) | | | | Filer Calcário (A/F - 0,28) | | | |
|--------|-------------------------|----------|-----------|----------|------------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|----------|-----------|----------|
| | Mecânico | | Manual | | Mecânico | | Manual | | Mecânico | | Manual | |
| | Flow (cm) | T115 (s) | Flow (cm) | T115 (s) | Flow (cm) | T115 (s) | Flow (cm) | T115 (s) | Flow (cm) | T115 (s) | Flow (cm) | T115 (s) |
| 1 | 20,88 | 0,36 | 20,33 | 0,39 | 20,42 | 1,18 | 20,08 | 1,11 | 19,73 | 1,28 | 20,25 | 1,41 |
| 2 | 12,40 | 3,70 | 12,20 | 3,90 | 17,60 | 2,41 | 16,73 | 1,51 | 14,90 | 2,33 | 16,92 | 2,68 |
| 3 | 18,57 | 0,35 | 18,88 | 0,33 | 18,82 | 1,74 | 17,50 | 1,67 | 13,63 | 2,67 | 14,07 | 3,04 |
| 4 | 18,63 | 0,63 | 18,60 | 0,60 | 18,81 | 1,75 | 18,13 | 1,82 | 18,83 | 1,52 | 19,26 | 1,67 |
| 5 | 20,74 | 0,46 | 20,25 | 0,45 | 19,73 | 1,30 | 19,85 | 1,20 | 18,93 | 1,58 | 19,26 | 1,79 |
| 6 | 16,95 | 1,32 | 17,33 | 0,85 | 19,88 | 1,24 | 17,30 | 2,06 | 12,20 | 3,55 | 15,50 | 1,42 |
| 7 | 21,15 | 0,22 | 19,90 | 0,25 | 19,59 | 1,25 | 19,25 | 1,52 | 18,61 | 1,67 | 19,70 | 1,61 |
| 8 | 20,57 | 0,42 | 20,50 | 0,43 | 20,15 | 1,12 | 19,25 | 1,80 | 19,69 | 1,25 | 19,41 | 1,64 |
| 9 | 18,06 | 0,85 | 17,90 | 0,90 | 19,64 | 1,35 | 17,25 | 1,87 | 18,49 | 1,65 | 18,59 | 1,46 |
| 10 | 19,38 | 0,62 | 19,50 | 0,45 | 19,90 | 1,25 | 18,25 | 1,74 | 18,66 | 1,67 | 17,99 | 1,84 |
| 11 | 20,88 | 0,36 | 20,33 | 0,39 | 20,42 | 1,18 | 20,08 | 1,11 | 19,73 | 1,28 | 20,25 | 1,59 |
| 12 | 12,40 | 3,70 | 12,20 | 3,90 | 17,60 | 2,28 | 16,73 | 1,51 | 14,90 | 2,33 | 16,92 | 2,68 |
| 13 | 20,53 | 0,29 | 19,90 | 0,33 | 18,15 | 2,23 | 17,48 | 2,01 | 20,09 | 0,78 | 20,84 | 1,54 |
| 14 | 18,63 | 0,63 | 18,60 | 0,60 | 18,81 | 1,75 | 18,13 | 1,82 | 17,73 | 2,67 | 19,26 | 1,67 |
| 15 | 20,51 | 0,28 | 20,75 | 0,25 | 19,54 | 1,40 | 18,15 | 1,80 | 20,10 | 0,87 | 19,96 | 1,27 |
| 16 | 17,67 | 0,80 | 18,10 | 1,05 | 19,36 | 1,54 | 18,73 | 2,02 | 19,93 | 0,95 | 19,98 | 1,35 |
| 17 | 18,73 | 0,42 | 18,50 | 0,40 | 19,54 | 1,48 | 18,50 | 1,74 | 19,93 | 0,98 | 19,77 | 1,52 |
| 18 | 20,49 | 0,27 | 20,80 | 0,30 | 19,60 | 1,42 | 18,75 | 2,14 | 20,45 | 0,82 | 19,01 | 1,50 |
| 19 | 18,07 | 0,79 | 17,95 | 0,75 | 19,18 | 1,76 | 18,83 | 2,13 | 18,88 | 1,77 | 18,56 | 1,44 |
| 20 | 20,55 | 0,45 | 20,25 | 0,37 | 19,53 | 1,44 | 19,23 | 1,92 | 20,40 | 0,97 | 18,91 | 1,65 |

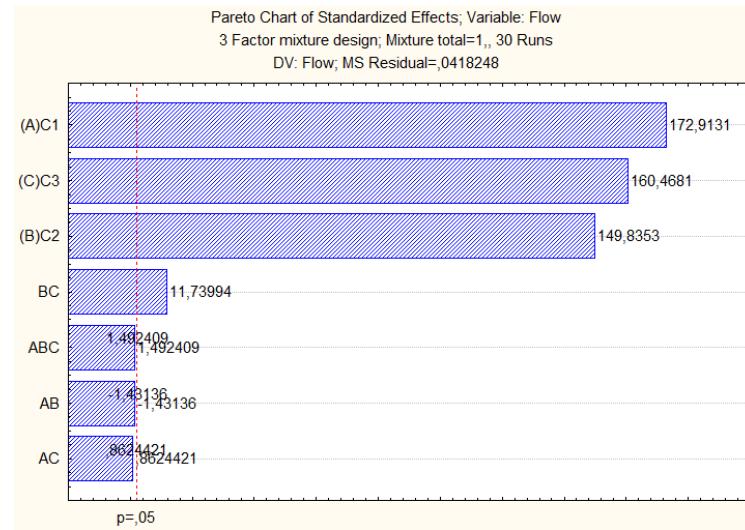
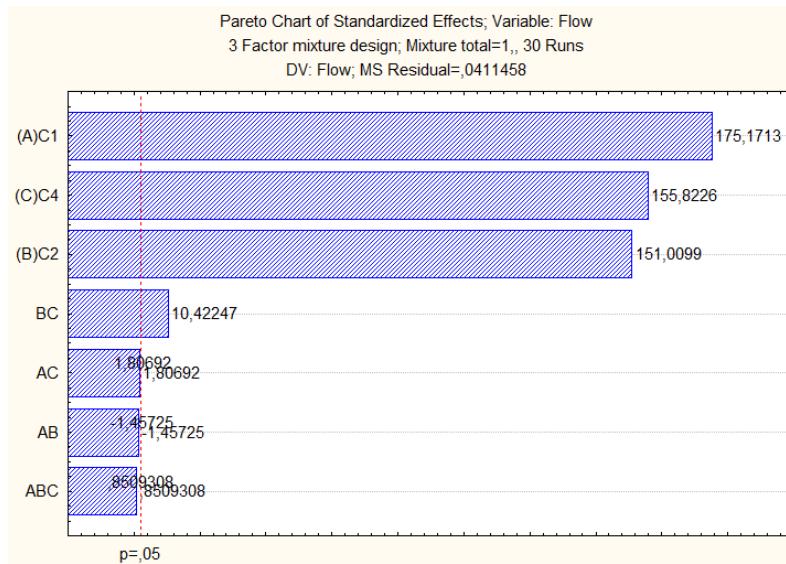
APÊNDICE 7 (a) – Análise estatística das pastas com PCA (variável flow)

Os dados de espalhamento foram inseridos no *estatistic* 8.0 para verificar a correlação e obter os coeficientes (Tabela 1) a fim de gerar um modelo de regressão.

Tabela 1 – Sumário dos coeficientes da variável Flow das pastas com PCA

| Fator | SIMPLEX 1 - Rsqr=,9447; Adj:,9302; MS Residual=,0459208 | | | | | | | SIMPLEX 2 - Rsqr=,0,9483; Adj:,0,9348 ; MS Residual=,0411458 | | | | | | | |
|------------|---|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--|---------------|--------------|---------------|--------------|--|--|--|
| | Coeff. | Std. Err. | t (23) | p | -95% | 95% | Coeff. | Std. Err. | t (23) | p | -95% | 95% | | | |
| (A)C1 | 20,440 | 0,123 | 166,021 | 0,000 | 20,185 | 20,694 | 20,414 | 0,117 | 175,171 | 0,000 | 20,173 | 20,655 | | | |
| (B)C2 | 17,604 | 0,123 | 142,987 | 0,000 | 17,349 | 17,859 | 17,599 | 0,117 | 151,010 | 0,000 | 17,357 | 17,840 | | | |
| (C)C3 | 18,806 | 0,123 | 152,754 | 0,000 | 18,552 | 19,061 | 18,159 | 0,117 | 155,823 | 0,000 | 17,918 | 18,400 | | | |
| AB | -0,644 | 0,602 | -1,071 | 0,295 | -1,889 | 0,600 | -0,830 | 0,569 | -1,457 | 0,159 | -2,008 | 0,348 | | | |
| AC | 0,517 | 0,602 | 0,860 | 0,399 | -0,727 | 1,762 | 1,029 | 0,569 | 1,807 | 0,084 | -0,149 | 2,207 | | | |
| BC | 6,582 | 0,602 | 10,943 | 0,000 | 5,338 | 7,827 | 5,934 | 0,569 | 10,423 | 0,000 | 4,756 | 7,112 | | | |
| ABC | 5,412 | 3,395 | 1,594 | 0,125 | -1,612 | 12,436 | 2,735 | 3,214 | 0,851 | 0,404 | -3,914 | 9,384 | | | |

Observando os dados da tabela 1, identifica-se uma ótima correlação para o modelo cúbico espacial, adotado para o simplex 1 e 2, com Rsqr na ordem de 0,94 e 0,95, respectivamente. No simplex 1 todas as variáveis são representativas, no entanto, apenas a interação BC é representativa para as respostas do experimento, o mesmo ocorre com o simplex 2, onde as interações AB, AC e ABC, destacadas em vermelho, não são representativas e a análise pode ser efetuada desconsiderando seus efeitos. O diagrama de Pareto (Figura 1 e 2) representa graficamente a intensidade dessas interações.

Figura 1 - Diagrama de Pareto referente ao simplex 1**Figura 2 - Diagrama de Pareto referente ao simplex 2**

Com base nos coeficientes gerados pelos resultados do experimento, na tabela 1, têm-se a seguinte equação de regressão, para o simplex 1 e 2, respectivamente:

$$\text{Equação - 1} \quad 20,44x_1 + 17,60x_2 + 18,81x_3 + 6,58x_2x_3$$

$$\text{Equação - 2} \quad 20,41x_1 + 17,59x_2 + 18,16x_3 + 5,93x_2x_3$$

Após a análise das interações e da correlação entre os dados do simplex, segue-se com a avaliação dos modelos, conforme ANOVA (Tabela 2) que apresentam os resultados do *Flow* para o simplex 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2 – ANOVA da variável *Flow* no modelo cúbico especial para pastas com PCA

| Model | SIMPLEX 1 | | | | | SIMPLEX 2 | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| | SS Effect | df Effect | MS Effect | SS Effect | MS | SS Effect | df Effect | MS Effect | SS Effect | MS |
| Linear | 9,552 | 2,000 | 4,776 | 9,530 | 0,353 | 10,715 | 2,000 | 5,358 | 7,574 | 0,353 |
| Quadratic | 8,202 | 1,000 | 8,202 | 1,328 | 0,051 | 6,598 | 3,000 | 2,199 | 0,976 | 0,051 |
| Special Cubic | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,328 | 0,051 | 0,030 | 1,000 | 0,030 | 0,946 | 0,051 |
| Total Adjusted | 19,082 | 29,000 | 0,658 | | | 18,289 | 29,000 | 0,631 | | |

Observando os dados da tabela 2, constata-se que tanto para o simplex 1 como para o simplex 2, devido a interação entre as três variáveis ser desprezível, a regressão é a mesma para os dois modelos, quadrático e cúbico espacial, e o resíduo entre os dois é nulo. Dessa forma, torna-se desnecessário a análise de variância entre os dois modelos, tendo em vista que a solução nula é trivial.

Para fechar a análise, é preciso incluir as parcelas da falta de ajuste e do erro puro, representada pela ANOVA (Tabelas 3) para os simplex 1 e simplex 2, da variável *Flow*. Observa-se que a falta de ajuste é estatisticamente significativa, pois os valores de F são superiores aos valores críticos do teste F para 95% de confiança $4,28 > 2,60$ para o simplex 1, e $0,13 < 3,10$ para o simplex 2.

Tabela 3 – ANOVA incluindo a falta de ajuste da variável *Flow* para pastas com PCA

| Source | SIMPLEX 1 | | | | | SIMPLEX 2 | | | | |
|-----------------------|-----------|-------|-------|--------|-------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | SS | df | MS | F | p | SS | Df | MS | F | p |
| Model | 17,754 | 3,000 | 5,918 | 115,85 | 0,000 | 17,342 | 6,000 | 2,890 | 70,24 | 0,000 |
| Total Error | 1,328 | 26,00 | 0,051 | | | 0,946 | 23,000 | 0,041 | | |
| Lack of Fit | 0,747 | 6,000 | 0,124 | 4,284 | 0,006 | 0,017 | 3,000 | 0,006 | 0,125 | 0,944 |
| Pure Error | 0,581 | 20,00 | 0,029 | | | 0,929 | 20,000 | 0,046 | | |
| Total Adjusted | 19,082 | 29,00 | 0,658 | | | 18,289 | 29,000 | 0,631 | | |

Apesar da falta de ajuste identificada por meio do teste F, para o simplex 1 fazendo a verificação dos resíduos (Tabela 4), de acordo com a equação 1, é possível considerar consistentes os resultados.

Tabela 4 – Análise dos resíduos do modelo gerado para variável *Flow* (pastas com PCA)

| Pontos | Simplex 1 | | |
|---------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | Observado | Previsto | Resíduos |
| 1 | 20,42 | 20,43 | -0,01 |
| 2 | 17,60 | 17,53 | 0,07 |
| 3 | 18,82 | 18,92 | -0,10 |
| 4 | 18,81 | 18,98 | -0,17 |
| 5 | 19,73 | 19,67 | 0,06 |
| 6 | 19,88 | 18,23 | 1,65 |
| 7 | 19,59 | 18,77 | 0,82 |
| 8 | 20,15 | 19,33 | 0,83 |
| 9 | 19,64 | 18,60 | 1,04 |
| 10 | 19,90 | 18,95 | 0,95 |

Observa-se na Tabela 4 que apenas 2 (dois) dos 10 (dez) pontos experimentais, apresentaram resíduos acima do limite de tolerância, definido para a região de auto adensabilidade, dessas misturas, que é de 1,00 cm, sendo assim, os modelos foram considerados satisfatórios para a representação da variável *flow*.

APÊNDICE 7 (b) – Análise estatística das pastas com PCA (variável T115)

Os dados de tempo de espalhamento (T_{115}) foram inseridos no *estatistic* 8.0 para verificar a correlação e obter os coeficientes (Tabela 1) a fim de gerar um modelo de regressão.

Tabela 1 - Sumário dos coeficientes da variável T115 para as pastas com PCA

| Factor | SIMPLEX 1 – Rsqr =,9742; Adj:,9674 MS Residual =,0816426 | | | | | | SIMPLEX 2 - Rsqr=,9223; Adj:,902; MS Residual=,0937079 | | | | | |
|-----------|---|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | Coeff. | Std. Err. | t (23) | p | -95% | 95% | Coeff. | Std. Err. | t (23) | p | -95% | 95% |
| (A)C1 | 1,165 | 0,040 | 28,930 | 0,000 | 1,082 | 1,249 | 1,173 | 0,065 | 18,158 | 0,000 | 1,039 | 1,306 |
| (B)C2 | 2,413 | 0,040 | 59,890 | 0,000 | 2,329 | 2,496 | 2,296 | 0,065 | 35,546 | 0,000 | 2,162 | 2,429 |
| (C)C3 | 1,754 | 0,040 | 43,536 | 0,000 | 1,671 | 1,837 | 2,216 | 0,065 | 34,310 | 0,000 | 2,082 | 2,350 |
| AB | -0,238 | 0,197 | -1,209 | 0,239 | -0,645 | 0,169 | 0,171 | 0,316 | 0,543 | 0,592 | -0,481 | 0,824 |
| AC | -0,631 | 0,197 | -3,206 | 0,004 | -1,038 | -0,224 | -1,294 | 0,316 | -4,101 | 0,000 | -1,947 | -0,641 |
| BC | -3,294 | 0,197 | -16,737 | 0,000 | -3,701 | -2,887 | -2,810 | 0,316 | -8,903 | 0,000 | -3,462 | -2,157 |
| ABC | -2,744 | 1,111 | -2,470 | 0,021 | -5,043 | -0,446 | 1,379 | 1,781 | 0,774 | 0,447 | -2,305 | 5,064 |

Observando os dados da tabela 1, identifica-se uma ótima correlação para o modelo cúbico espacial, adotado para o simplex 1 e 2, com Rsqr na ordem de 0,97 e 0,92, respectivamente. As interações entre as variáveis AB no simplex 1 e ABC no simplex 2, não são expressivas estatisticamente, o que pode ser observado analisando o diagrama de Pareto (Figura 1 e 2), que representa graficamente a intensidade dessas interações.

Figura 1 - Diagrama de Pareto referente ao simplex 1

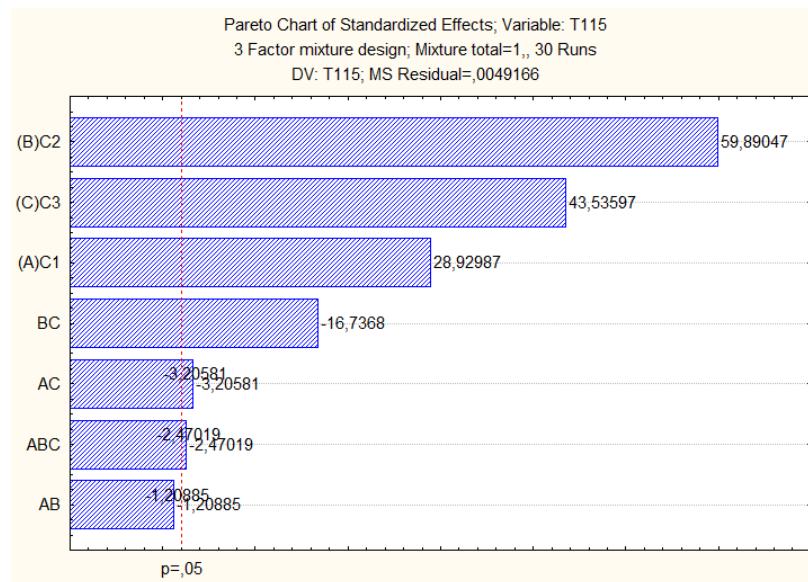
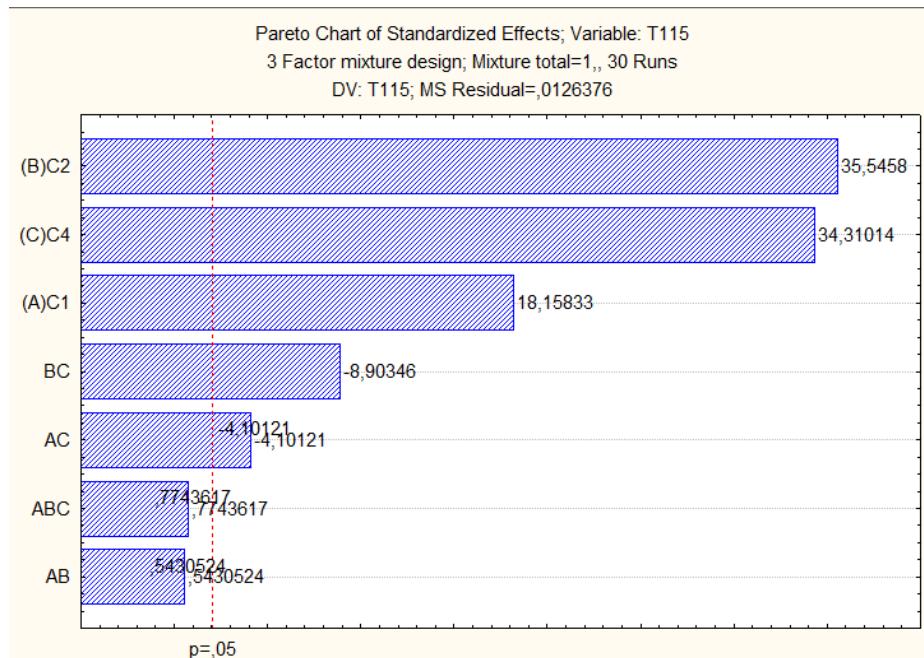


Figura 2 - Diagrama de Pareto referente ao simplex 2



Com base nos coeficientes gerado pelos resultados do experimento (Tabela 1), têm-se as seguintes equações de regressão, para o simplex 1 e simplex 2, respectivamente:

Equação 1: $1,17x_1 + 2,41x_2 + 1,15x_3 - 0,63x_1x_3 - 3,29x_2x_3 - 2,74x_1x_2x_3$

$$\text{Equação 2: } 1,17x_1 + 2,30x_2 + 2,22x_3 - 1,29x_1x_3 - 2,81x_2x_3$$

Após a análise das interações e da correlação entre os dados do simplex, segue-se com a avaliação dos modelos que é feita através da análise de variância. Essa análise é feita, conforme os dados da ANOVA (Tabela 2), que apresenta os resultados, por modelo estatístico, para o T_{115} dos simplex 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2 – ANOVA para variável T_{115} no modelo cúbico espacial para as pastas com PCA

| Model | SIMPLEX 1 | | | | | SIMPLEX 2 | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------|
| | SS Effect | df Effect | MS Effect | SS error | MS | SS Effect | df Effect | MS Effect | SS error | MS |
| Linear | 1,949 | 2,000 | 0,974 | 2,429 | 0,090 | 3,376 | 2,000 | 1,688 | 2,995 | 0,111 |
| Quadratic | 2,286 | 3,000 | 0,762 | 0,143 | 0,006 | 0,839 | 3,000 | 0,280 | 2,156 | 0,090 |
| Special Cubic | 0,030 | 1,000 | 0,030 | 0,113 | 0,005 | 0,000 | 1,000 | 0,001 | 2,155 | 0,094 |
| Total Adjusted | 4,378 | 29,000 | 0,151 | | | 6,370 | 29,000 | 0,220 | | |

Observando os dados da tabela 2, constata-se que no simplex 2, devido às interações entre as três variáveis ser desprezível e o resíduo entre os dois modelos tender a ser nulo, torna-se desnecessário a análise de variância, tendo em vista que a solução nula é trivial. Já para o simplex 1, segue com a análise de variância para verificar se o ponto situado no centroide da região simplex é mesmo necessário para a análise estatística.

$$F_{T115} \frac{(SSErr,I - SSErr,II)/d}{MSErr,II} = \frac{(0,143 - 0,113)/1}{0,005} = 6,000$$

Para fechar a análise, é preciso incluir as parcelas da falta de ajuste e do erro puro, representado pela ANOVA (Tabela 3). Para o simplex 1 da variável T_{115} , evidencia-se que a falta de ajuste não é estatisticamente significativa, pois os valores de F são inferiores aos valores críticos da distribuição F para 95% de confiança 6,302 $> 2,60$, e 0,407 $< 3,10$ para o T_{115} do simplex 2, se configurando como falta de ajuste.

Tabela 3 – ANOVA incluindo a falta da variável T_{115} para as pastas com PCA

| Source | SIMPLEX 1 | | | | | SIMPLEX 2 | | | | |
|-----------------------|-----------|-------|-------|---------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | SS | df | MS | F | p | SS | df | MS | F | p |
| Model | 4,265 | 6,00 | 0,711 | 144,570 | 0,000 | 4,215 | 6,00 | 0,703 | 7,497 | 0,000 |
| Total Error | 0,113 | 23,00 | 0,005 | | | 2,155 | 23,00 | 0,094 | | |
| Lack of Fit | 0,055 | 3,00 | 0,018 | 6,302 | 0,003 | 0,124 | 3,00 | 0,041 | 0,407 | 0,749 |
| Pure Error | 0,058 | 20,00 | 0,003 | | | 2,031 | 20,00 | 0,102 | | |
| Total Adjusted | 4,378 | 29,00 | 0,151 | | | 6,370 | 29,00 | 0,220 | | |

Como a falta de ajuste identificada por meio do teste F, foi significativa, para o simplex 2, segue com a análise dos resíduos, tabela 4, entre os resultados previstos de acordo com a equação 2, que define o modelo cúbico para mistura de três componentes do simplex 2 e os resultados obtidos no experimento.

Tabela 4 - Análise dos resíduos do modelo gerado para variável T_{115} das pastas com PCA

| Pontos | SIMPLEX 2 | | | Pontos | SIMPLEX 2 | | |
|--------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|
| | Observado | Previsto | Resíduos | | Observado | Previsto | Resíduos |
| 1 | 1,18 | 1,16 | 0,02 | 6 | 1,54 | 2,07 | -0,53 |
| 2 | 2,28 | 2,38 | -0,1 | 7 | 1,48 | 1,76 | -0,29 |
| 3 | 2,23 | 1,75 | 0,47 | 8 | 1,42 | 1,61 | -0,19 |
| 4 | 1,75 | 1,77 | -0,02 | 9 | 1,76 | 1,93 | -0,17 |
| 5 | 1,4 | 1,46 | -0,06 | 10 | 1,44 | 0,79 | 0,65 |

APÊNDICE 8 (a) – Resultados da estatística do CAA no estado fresco MK

| Effect Estimates; Var.:Slump Flow; R-sqr=.94004; Adj.:.88008; MS Residual=8,988095 | | | | | | | | | | |
|--|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 75,9286 | 1,133143 | 67,00704 | 0,000007 | 72,3224 | 79,5347 | 75,9286 | 1,133143 | 72,3224 | 79,53474 |
| (a)M | -20,5 | 2,998015 | -6,83786 | 0,006401 | -30,041 | -10,959 | -10,25 | 1,499008 | -15,0205 | -5,47949 |
| (b)B/A | -0,5 | 2,998015 | -0,16678 | 0,878153 | -10,041 | 9,041 | -0,25 | 1,499008 | -5,0205 | 4,52051 |
| 1 By 2 | -1,5 | 2,998015 | -0,50033 | 0,651241 | -11,041 | 8,041 | -0,75 | 1,499008 | -5,5205 | 4,02051 |

| Effect Estimates; Variável: Slump Flow T500; R-sqr=.87899; Adj.:.75798; MS Residual=.2907143 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 2,707143 | 0,203791 | 13,28394 | 0,000922 | 2,05859 | 3,355696 | 2,707143 | 0,203791 | 2,05859 | 3,355696 |
| (a)M | 2,5 | 0,539179 | 4,63668 | 0,018902 | 0,78409 | 4,215909 | 1,25 | 0,26959 | 0,392045 | 2,107955 |
| (b)B/A | 0,25 | 0,539179 | 0,46367 | 0,674456 | 1,46591 | 1,965909 | 0,125 | 0,26959 | -0,73296 | 0,982955 |
| 1 By 2 | 0,15 | 0,539179 | 0,2782 | 0,798931 | 1,56591 | 1,865909 | 0,075 | 0,26959 | -0,78296 | 0,932955 |

| Effect Estimates; Var.: Anel J; R-sqr=.94501; Adj.:.89002; MS Residual=10,08036 | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 72,7857 | 1,200021 | 60,65369 | 0,000001 | 68,9667 | 76,6047 | 72,7857 | 1,200021 | 68,9667 | 76,60472 |
| (a)M | -22,75 | 3,174958 | -7,16545 | 0,005599 | -32,8541 | -12,6459 | -11,375 | 1,587479 | -16,4271 | -6,32293 |
| (b)B/A | -0,75 | 3,174958 | -0,23622 | 0,828469 | -10,8541 | 9,3541 | -0,375 | 1,587479 | -5,4271 | 4,67707 |
| 1 By 2 | -1,25 | 3,174958 | -0,39371 | 0,720112 | -11,3541 | 8,8541 | -0,625 | 1,587479 | -5,6771 | 4,42707 |

| Effect Estimates; Variável: Funil V; R-sqr=.7799; Adj.:.55979; MS Residual=11,65846 | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 8,77429 | 1,29054 | 6,798925 | 0,006506 | 4,6672 | 12,88136 | 8,774286 | 1,29054 | 4,66721 | 12,88136 |
| (a)M | 11,03 | 3,414448 | 3,23039 | 0,048202 | 0,1637 | 21,8963 | 5,515 | 1,707224 | 0,08185 | 10,94815 |
| (b)B/A | 0,84 | 3,414448 | 0,246013 | 0,821543 | 10,0263 | 11,7063 | 0,42 | 1,707224 | 5,01315 | 5,85315 |
| 1 By 2 | 1,25 | 3,414448 | 0,366091 | 0,73859 | -9,6163 | 12,1163 | 0,625 | 1,707224 | 4,80815 | 6,05815 |

| Effect Estimates; Variável: Caixa L; R-sqr=.96372; Adj.:.92743; MS Residual=.0004226 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 0,822857 | 0,00777 | 105,9007 | 0,000002 | 0,798129 | 0,847585 | 0,822857 | 0,00777 | 0,798129 | 0,847585 |
| (a)M | -0,175 | 0,020558 | -8,5126 | 0,003405 | -0,24042 | -0,10958 | -0,0875 | 0,010279 | -0,12021 | -0,05479 |
| (b)B/A | -0,055 | 0,020558 | -2,6754 | 0,075343 | -0,12042 | 0,010424 | -0,0275 | 0,010279 | -0,06021 | 0,005212 |
| 1 By 2 | 0,005 | 0,020558 | 0,2432 | 0,823519 | -0,06042 | 0,070424 | 0,0025 | 0,010279 | -0,03021 | 0,035212 |

| Effect Estimates; Variável: Resistência à Segregação; R-sqr=.95688; Adj.:.91376; MS Residual=1,079556 | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 3,53286 | 0,392711 | 8,99606 | 0,0029 | 2,2831 | 4,78264 | 3,53286 | 0,392711 | 2,28307 | 4,78264 |
| (a)M | -7,665 | 1,039017 | -7,37717 | 0,00515 | -10,9716 | -4,35838 | -3,8325 | 0,519508 | -5,48581 | -2,17919 |
| (b)B/A | 2,485 | 1,039017 | 2,39168 | 0,096595 | -0,8216 | 5,79162 | 1,2425 | 0,519508 | -0,41081 | 2,89581 |
| 1 By 2 | -2,635 | 1,039017 | -2,53605 | 0,084973 | -5,9416 | 0,67162 | -1,3175 | 0,519508 | -2,97081 | 0,33581 |

APÊNDICE 8 (b) – Resultado da estatística do CAA no estado fresco PCA

| Effect Estimates; Variável: Slump Flow ; R-sqr=.94131; Adj.:88263; MS Residual=49,05952 | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 62,250 | 0,250 | 249,000 | 0,000 | 61,174 | 63,326 | 62,250 | 0,250 | 61,174 | 63,326 |
| (a)M | -48,500 | 0,500 | -97,000 | 0,000 | -50,651 | -46,349 | -24,250 | 0,250 | -25,326 | -23,174 |
| (b)B/A | -2,500 | 0,500 | -5,000 | 0,038 | -4,651 | -0,349 | -1,250 | 0,250 | -2,326 | -0,174 |
| 1 By 2 | -1,500 | 0,500 | -3,000 | 0,095 | -3,651 | 0,651 | -0,750 | 0,250 | -1,826 | 0,326 |

| | Effect Estimates; Variável: Slump Flow T500; R-sqr=.1096; Adj.:0; MS Residual=22,386 | | | | | | | | | |
|--------------|--|----------|--------|-------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 1,438 | 0,353 | 4,076 | 0,055 | -0,080 | 2,955 | 1,438 | 0,353 | -0,080 | 2,955 |
| (a)M | -2,875 | 0,705 | -4,076 | 0,055 | -5,910 | 0,160 | -1,438 | 0,353 | -2,955 | 0,080 |
| (b)B/A | 0,025 | 0,705 | 0,035 | 0,975 | -3,010 | 3,060 | 0,013 | 0,353 | -1,505 | 1,530 |
| 1 By 2 | -0,025 | 0,705 | -0,035 | 0,975 | -3,060 | 3,010 | -0,013 | 0,353 | -1,530 | 1,505 |

| | Effect Estimates; Variável: ANEJ J; R-sqr=.94536; Adj.:8907; MS Residual=46,77 | | | | | | | | | |
|--------------|--|----------|----------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 59,625 | 0,144 | 413,094 | 0,000 | 59,004 | 60,246 | 59,625 | 0,144 | 59,004 | 60,246 |
| (a)M | -49,250 | 0,289 | -170,607 | 0,000 | -50,492 | -48,008 | -24,625 | 0,144 | -25,246 | -24,004 |
| (b)B/A | -1,250 | 0,289 | -4,330 | 0,049 | -2,492 | -0,008 | -0,625 | 0,144 | -1,246 | -0,004 |
| 1 By 2 | -0,750 | 0,289 | -2,598 | 0,122 | -1,992 | 0,492 | -0,375 | 0,144 | -0,996 | 0,246 |

| | Effect Estimates; Variável: FUNIL V; R-sqr=.05385; Adj:0 ; MS Residual=271,6285 | | | | | | | | | |
|--------------|---|----------|--------|-------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 3,405 | 3,777 | 0,902 | 0,462 | -12,846 | 19,656 | 3,405 | 3,777 | -12,846 | 19,656 |
| (a)M | -6,810 | 7,554 | -0,902 | 0,462 | -39,311 | 25,691 | -3,405 | 3,777 | -19,656 | 12,846 |
| (b)B/A | 0,000 | 7,554 | 0,000 | 1,000 | -32,501 | 32,501 | 0,000 | 3,777 | -16,251 | 16,251 |
| 1 By 2 | 0,000 | 7,554 | 0,000 | 1,000 | -32,501 | 32,501 | 0,000 | 3,777 | -16,251 | 16,251 |

| | Effect Estimates; Variável: Caixa L (H2/H1); R-sqr=.7598; Adj.:51959 ; MS Residual=.0931143; | | | | | | | | | |
|--------------|--|----------|---------|-------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 0,470 | 0,008 | 61,537 | 0,000 | 0,437 | 0,503 | 0,470 | 0,008 | 0,437 | 0,503 |
| (a)M | -0,940 | 0,015 | -61,537 | 0,000 | -1,006 | -0,874 | -0,470 | 0,008 | -0,503 | -0,437 |
| (b)B/A | 0,000 | 0,015 | 0,000 | 1,000 | -0,066 | 0,066 | 0,000 | 0,008 | -0,033 | 0,033 |
| 1 By 2 | 0,000 | 0,015 | 0,000 | 1,000 | -0,066 | 0,066 | 0,000 | 0,008 | -0,033 | 0,033 |

| | Variável: Resistência à Segregação (%); R-sqr=.81257; Adj.:62513 MS Residual=6,101243 | | | | | | | | | |
|--------------|---|----------|---------|-------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/interc. | 4,573 | 0,137 | 33,303 | 0,001 | 3,983 | 5,164 | 4,573 | 0,137 | 3,982 | 5,164 |
| (a)M | -8,908 | 0,275 | -32,433 | 0,001 | -10,090 | -7,726 | -4,454 | 0,137 | -5,045 | -3,863 |
| (b)B/A | -0,023 | 0,275 | -0,085 | 0,940 | -1,205 | 1,158 | -0,012 | 0,137 | -0,603 | 0,579 |
| 1 By 2 | -0,023 | 0,275 | -0,085 | 0,940 | -1,205 | 1,158 | -0,012 | 0,137 | -0,603 | 0,579 |

APÊNDICE 8 (c) – Resultado da estatística do CAA no estado fresco FC

| Effect Estimates; Variável: <i>Slump Flow</i> ; R-sqr=,94833; Adj:,89667 ; MS Residual=35,84226; | | | | | | | | | | |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 63,375 | 1,233221 | 51,3898 | 0,000378 | 58,0689 | 68,6811 | 63,375 | 1,233221 | 58,0689 | 68,6811 |
| (1)M | -44,25 | 2,466441 | -17,9408 | 0,003092 | -54,8622 | -33,6378 | 22,125 | 1,233221 | -27,4311 | -16,8189 |
| (2)B/A | -3,75 | 2,466441 | -1,5204 | 0,267784 | -14,3622 | 6,8622 | -1,875 | 1,233221 | -7,1811 | 3,4311 |
| 1 by 2 | 1,25 | 2,466441 | 0,5068 | 0,662644 | -9,3622 | 11,8622 | 0,625 | 1,233221 | -4,6811 | 5,9311 |

| Effect Estimates; Variável: <i>Slump Flow T500</i> ; R-sqr=,27454; Adj:,0 ; MS Residual=21,51557 | | | | | | | | | | |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 2,3625 | 0,585947 | 4,03194 | 0,056363 | -0,15862 | 4,88362 | 2,3625 | 0,585947 | -0,15862 | 4,883624 |
| (1)M | -4,725 | 1,171893 | -4,03194 | 0,056363 | -9,76725 | 0,31725 | 2,3625 | 0,585947 | -4,88362 | 0,158624 |
| (2)B/A | 1,025 | 1,171893 | 0,87465 | 0,473999 | -4,01725 | 6,06725 | 0,5125 | 0,585947 | -2,00862 | 3,033624 |
| 1 by 2 | -1,025 | 1,171893 | -0,87465 | 0,473999 | -6,06725 | 4,01725 | 0,5125 | 0,585947 | -3,03362 | 2,008624 |

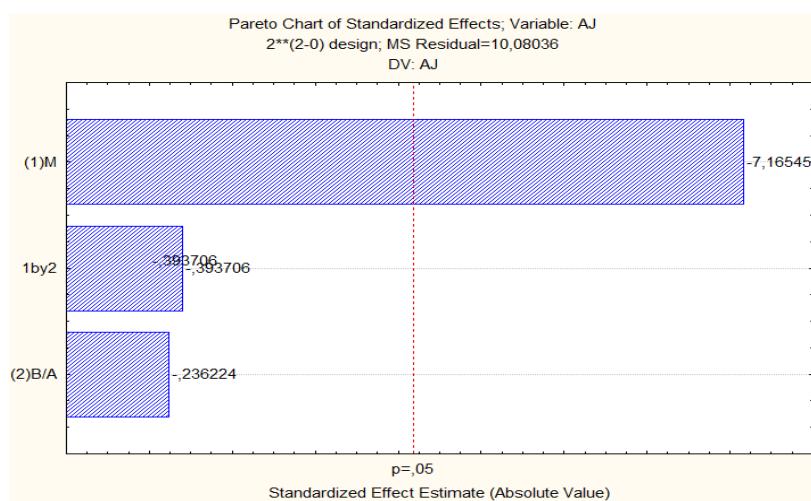
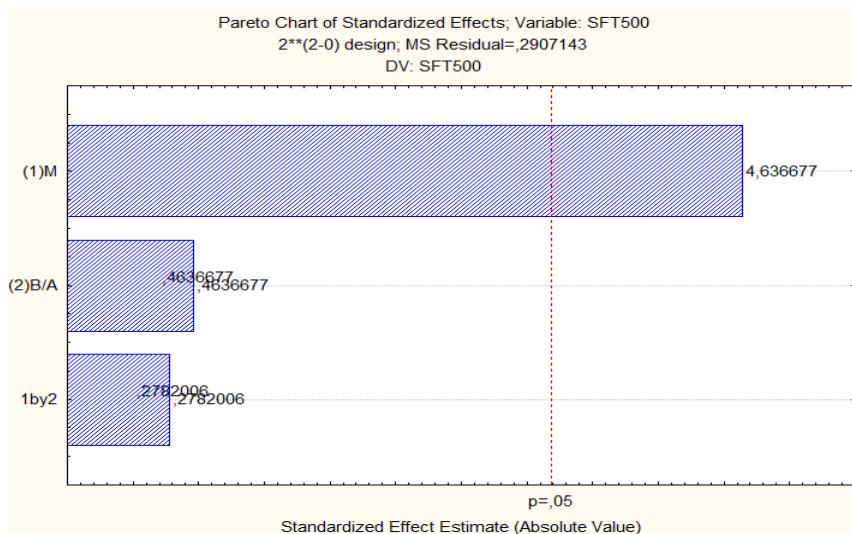
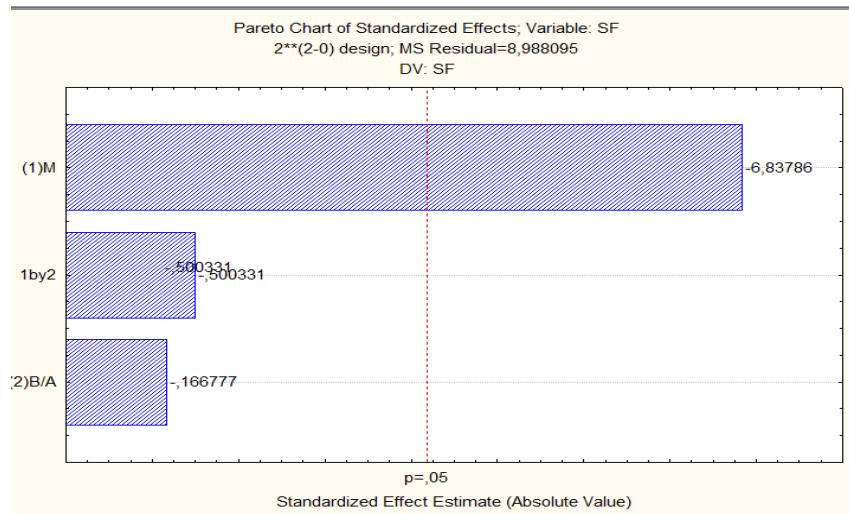
| Effect Estimates; Variável: ANEL J; R-sqr=,94934; Adj:,89868; MS Residual=40,39286, | | | | | | | | | | |
|---|--------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|----------|---------|---------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 59,75 | 0,75 | 79,6667 | 0,000158 | 56,523 | 62,977 | 59,75 | 0,75 | 56,523 | 62,977 |
| (1)M | -47,5 | 1,5 | -31,6667 | 0,000996 | -53,954 | -41,046 | -23,75 | 0,75 | -26,977 | -20,523 |
| (2)B/A | -3,5 | 1,5 | -2,3333 | 0,144814 | -9,954 | 2,954 | -1,75 | 0,75 | -4,977 | 1,477 |
| 1 by 2 | 1,5 | 1,5 | 1 | 0,42265 | -4,954 | 7,954 | 0,75 | 0,75 | -2,477 | 3,977 |

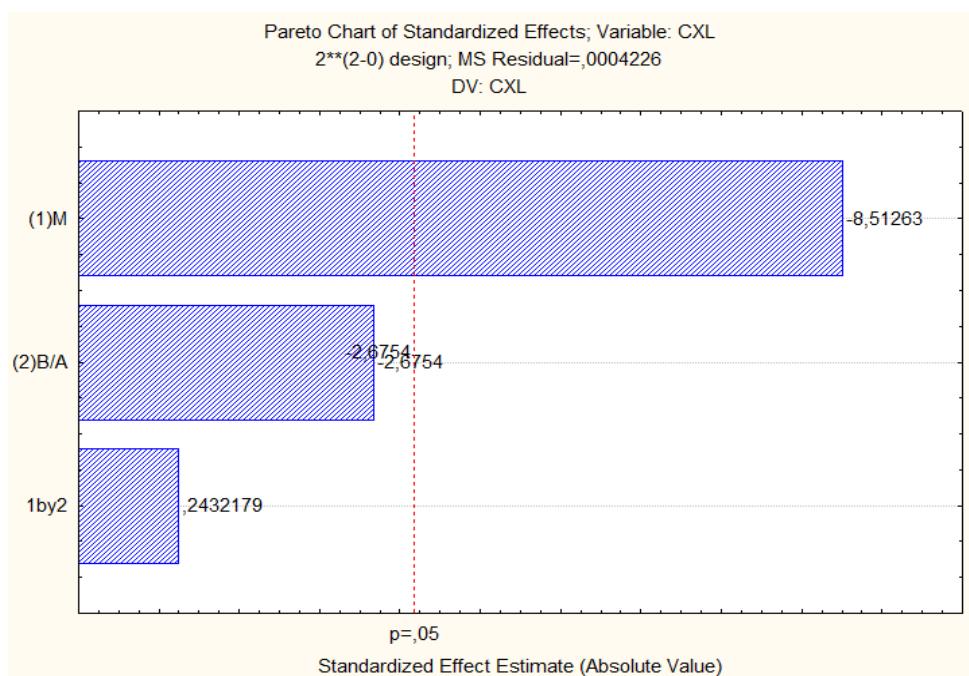
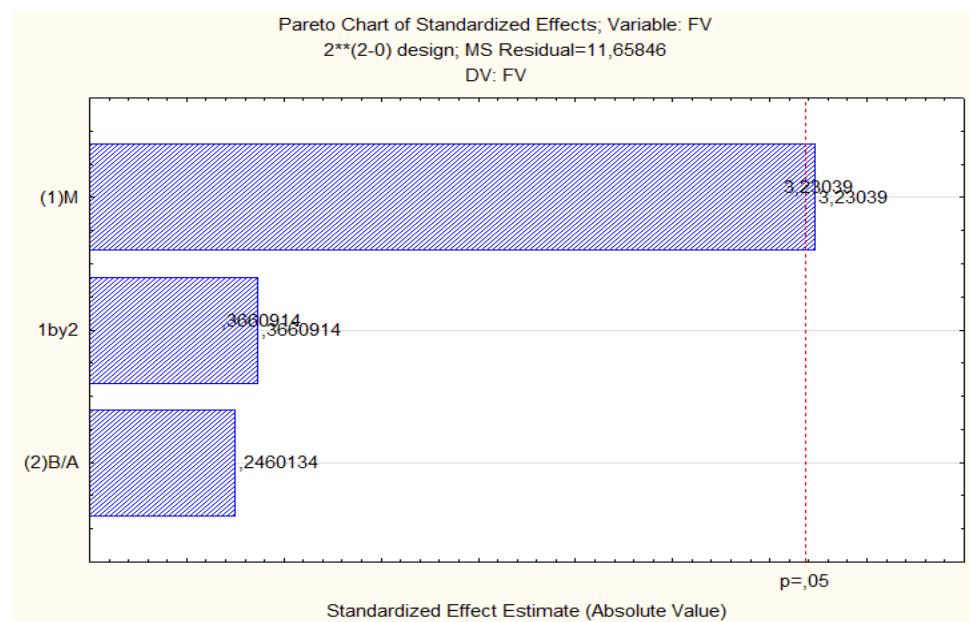
| Effect Estimates; Variável: Funil V; R-sqr=,16311; Adj:,0 ; MS Residual=199,2719; | | | | | | | | | | |
|---|--------|----------|----------|---------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 5,3225 | 2,398762 | 2,21885 | 0,15672 | -4,9985 | 15,64354 | 5,3225 | 2,398762 | -4,9985 | 15,64354 |
| (1)M | 10,645 | 4,797524 | -2,21885 | 0,15672 | -31,2871 | 9,99708 | 5,3225 | 2,398762 | -15,6435 | 4,99854 |
| (2)B/A | 1,265 | 4,797524 | 0,26368 | 0,81671 | -19,3771 | 21,90708 | 0,6325 | 2,398762 | -9,6885 | 10,95354 |
| 1 by 2 | -1,265 | 4,797524 | -0,26368 | 0,81671 | -21,9071 | 19,37708 | 0,6325 | 2,398762 | -10,9535 | 9,68854 |

| Effect Estimates; Variável: Caixa L (H2/H1); R-sqr=,77136; Adj:,54271 ; MS Residual=,0882417; | | | | | | | | | | |
|---|--------|----------|----------|----------|---------|----------|--------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 0,4725 | 0,01893 | 24,9608 | 0,001601 | 0,39105 | 0,553948 | 0,4725 | 0,01893 | 0,391052 | 0,553948 |
| (1)M | -0,945 | 0,037859 | -24,9608 | 0,001601 | -1,1079 | -0,7821 | 0,4725 | 0,01893 | -0,55395 | -0,39105 |
| (2)B/A | -0,005 | 0,037859 | -0,1321 | 0,907019 | -0,1679 | 0,157896 | 0,0025 | 0,01893 | -0,08395 | 0,078948 |
| 1 by 2 | 0,005 | 0,037859 | 0,1321 | 0,907019 | -0,1579 | 0,167896 | 0,0025 | 0,01893 | -0,07895 | 0,083948 |

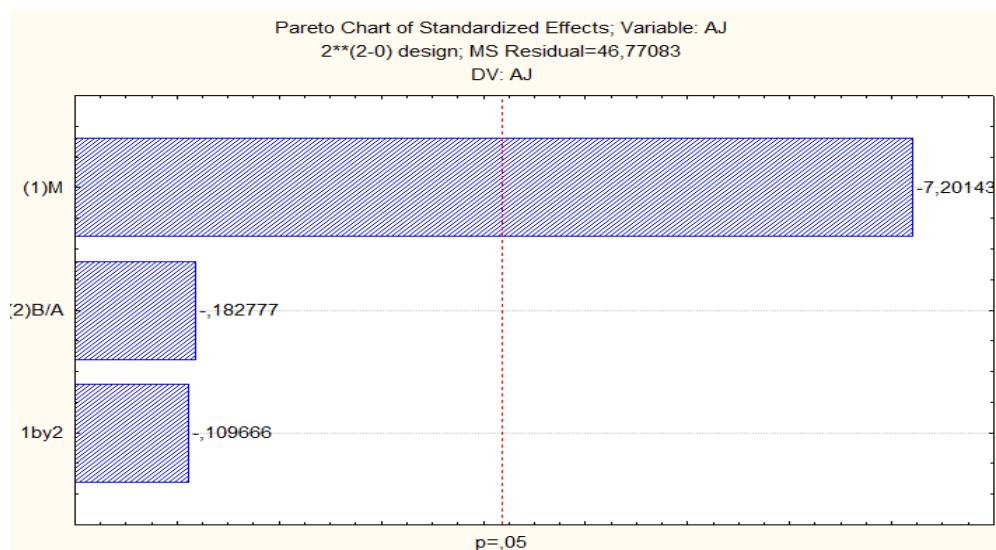
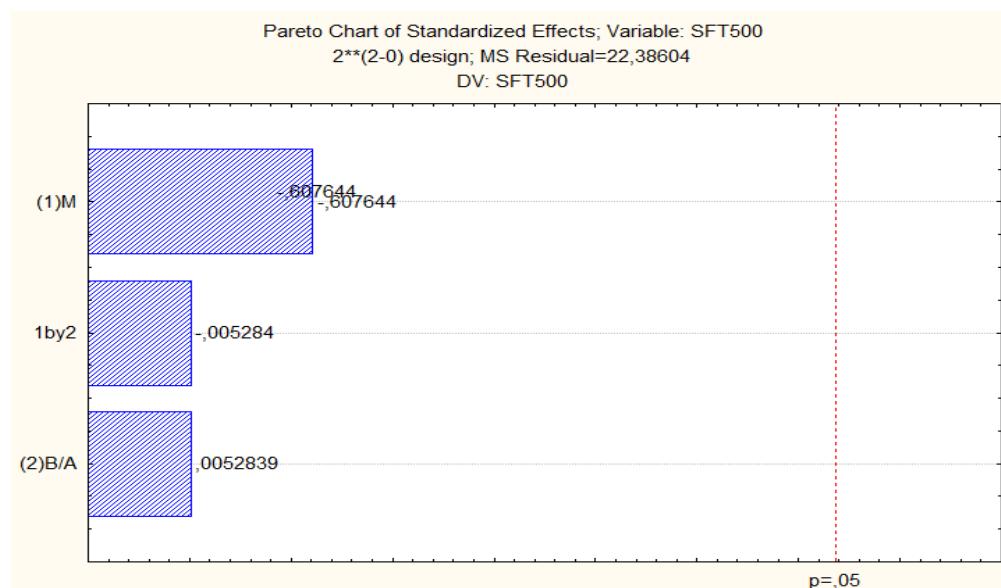
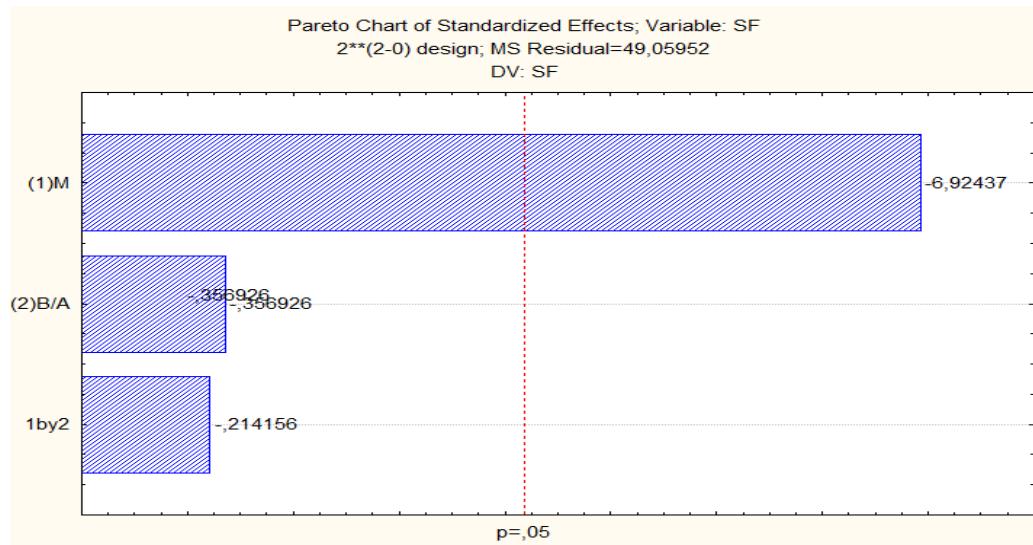
| Effect Estimates; Variável:Resistência à Segregação (%); R-sqr=,93754; Adj:,87509; MS Residual=,6934055; | | | | | | | | | | |
|--|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 2,7128 | 0,361234 | 7,50987 | 0,017273 | 1,15856 | 4,26708 | 2,71282 | 0,361234 | 1,15856 | 4,26708 |
| (1)M | -5,4256 | 0,722468 | -7,5098 | 0,017273 | -8,5341 | -2,3171 | -2,7128 | 0,361234 | -4,2670 | -1,1585 |
| (2)B/A | 0,94564 | 0,722468 | 1,3089 | 0,320747 | -2,1628 | 4,05417 | 0,47282 | 0,361234 | -1,0814 | 2,02708 |
| 1 by 2 | -0,9456 | 0,722468 | -1,3089 | 0,320747 | -4,0541 | 2,16289 | -0,4728 | 0,361234 | -2,0270 | 1,08144 |

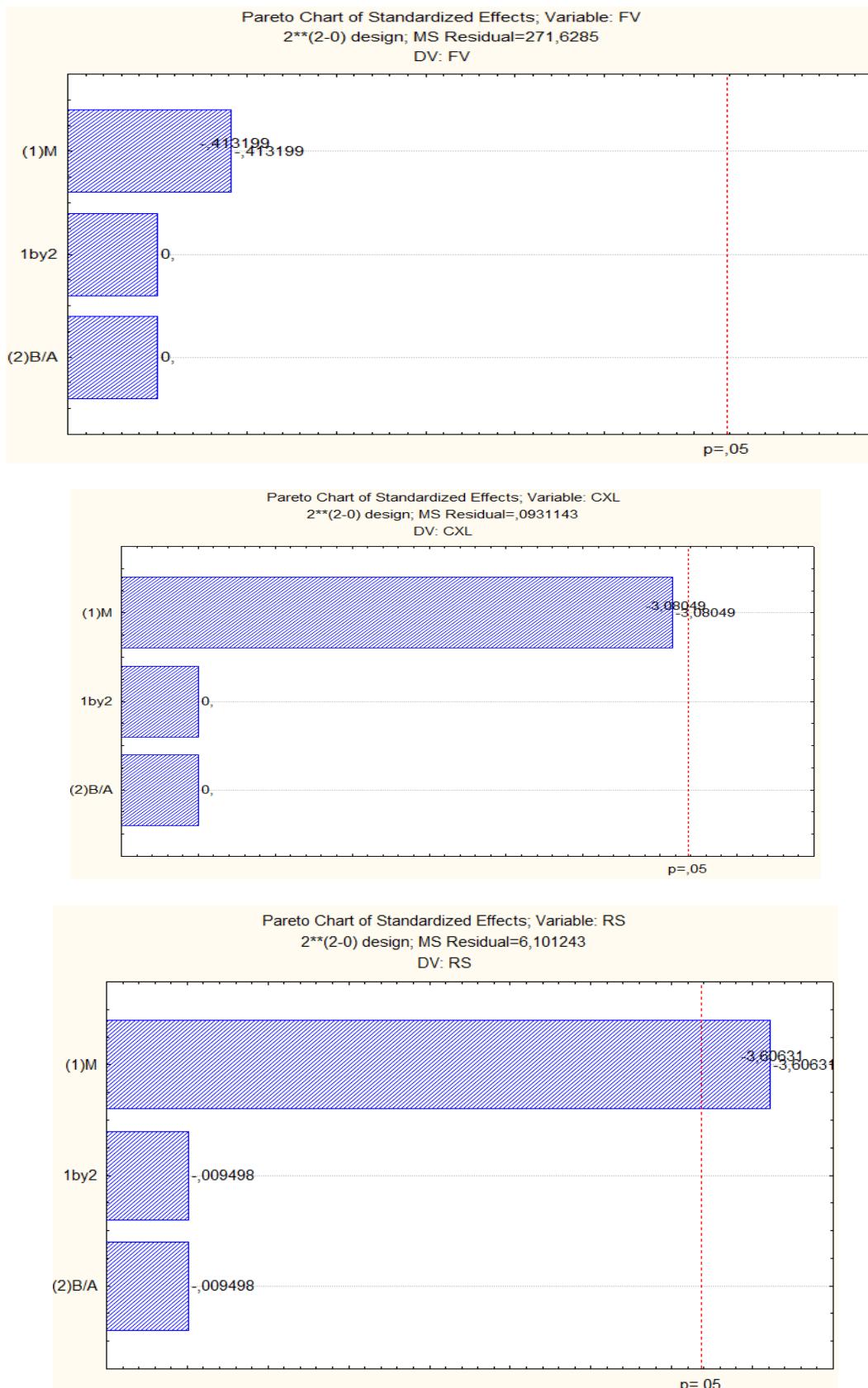
APÊNDICE 9 (a) – Diagrama de Pareto para o CAA (MK) no estado fresco



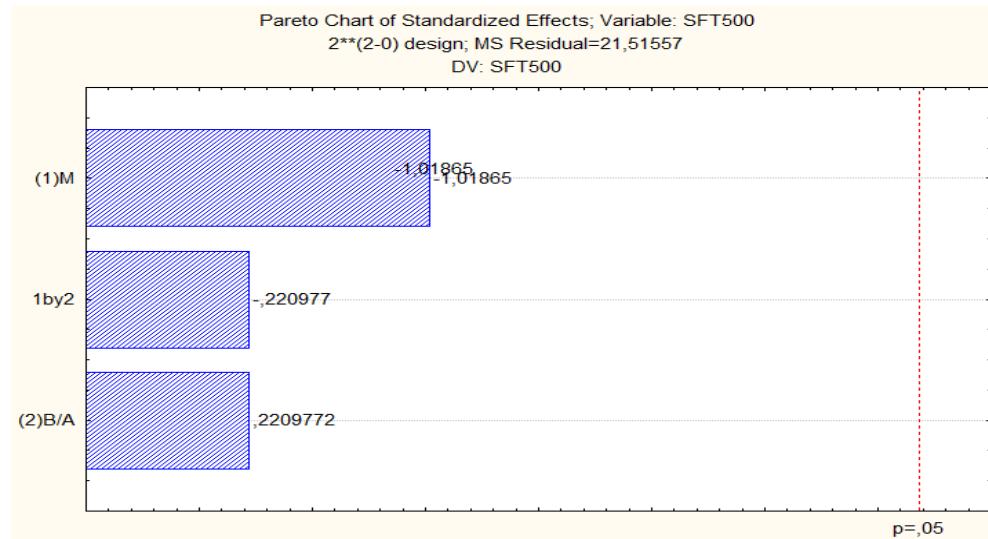
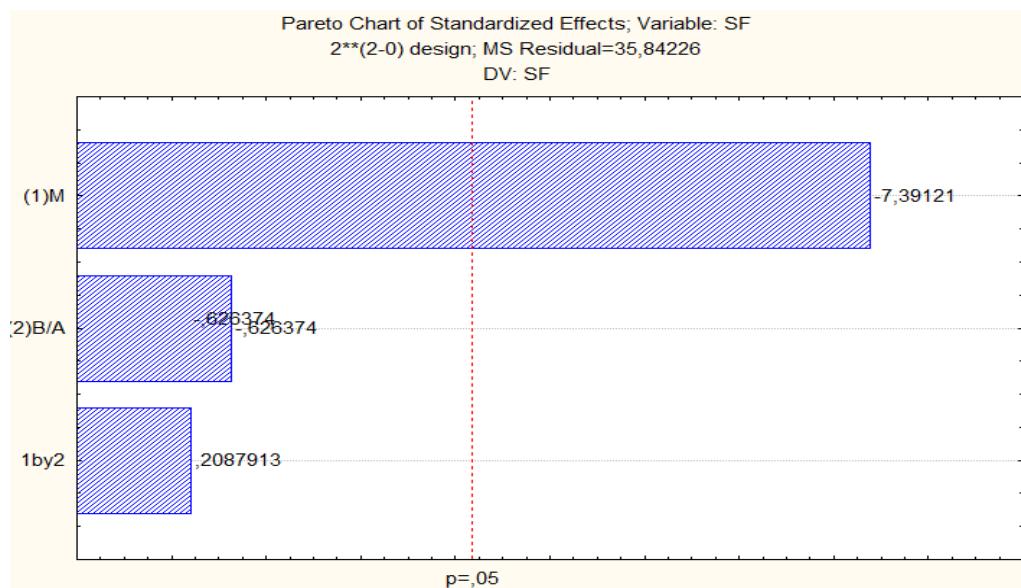


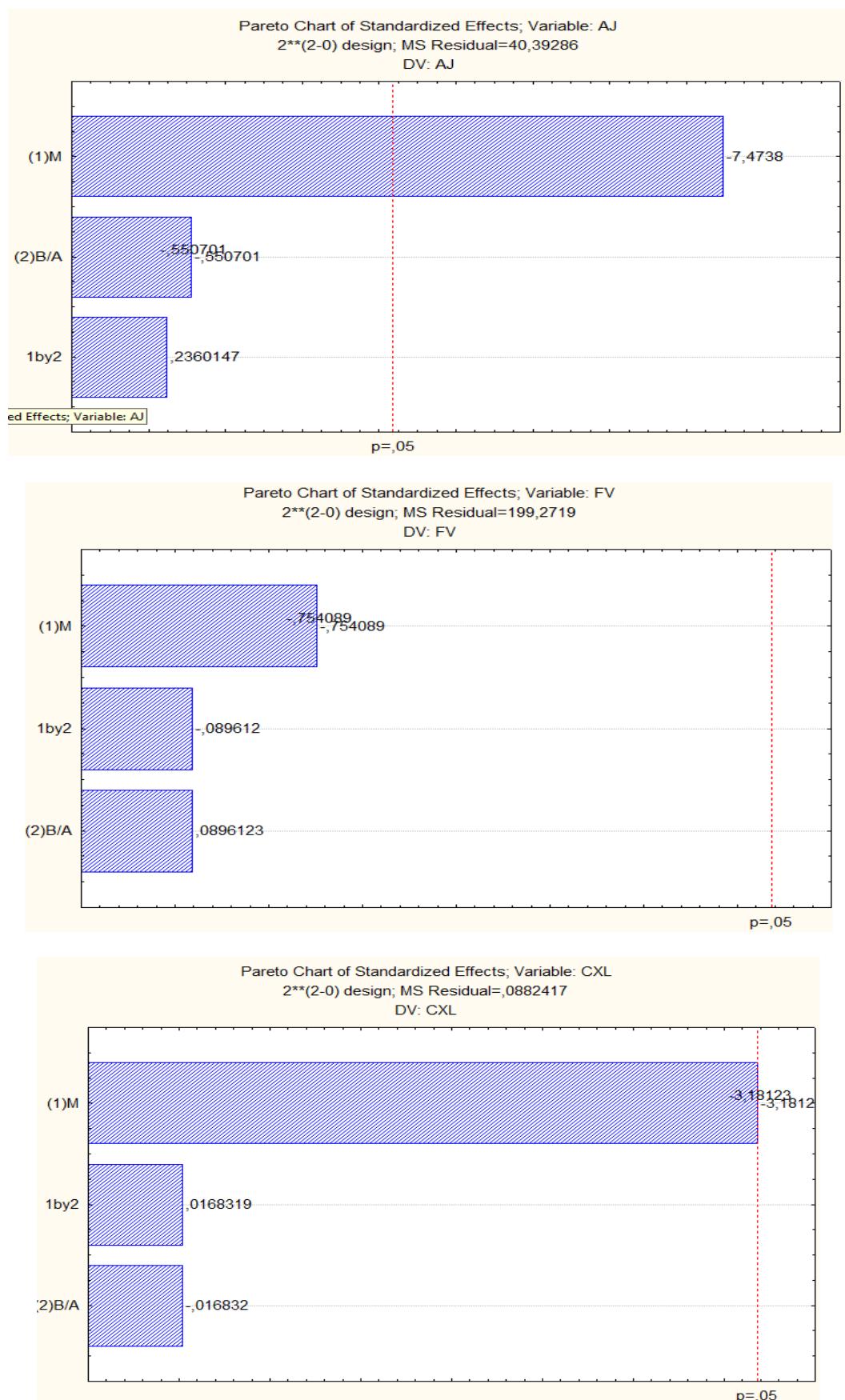
APÊNDICE 9 (b) – Diagrama de Pareto para o CAA (PCA) no estado fresco

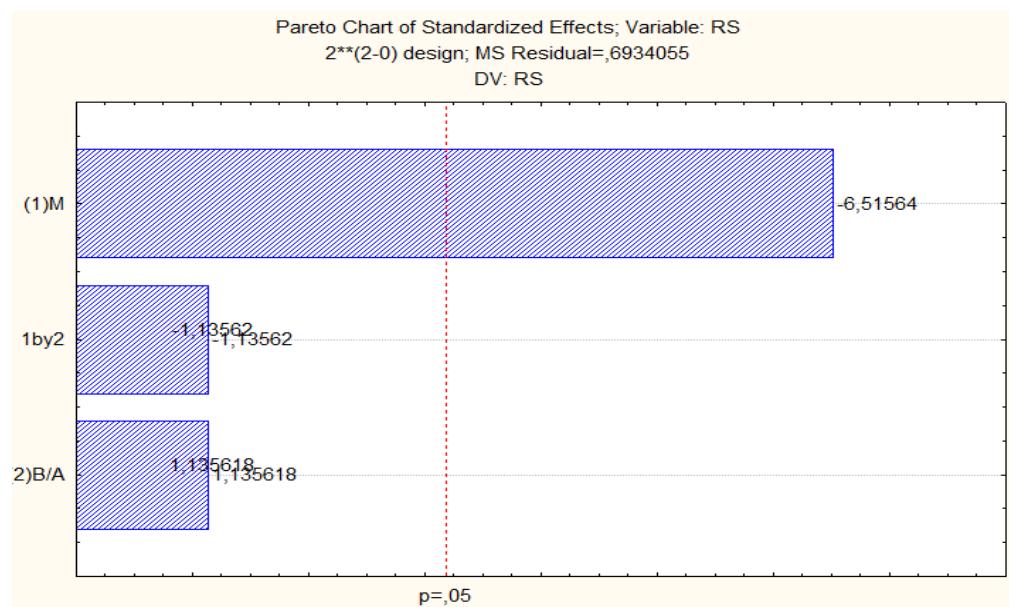




APÊNDICE 9 (c)– Diagrama de Pareto para o CAA (FC) no estado fresco







APÊNDICE 10 – Resultado da Análise Estatística da Resistência à Compressão do CAA

Tabela 1 - Resultados da Análise Estatística da Resistência à Compressão do CAA com Metacaulim

| Effect Estimates; Var.:RCMK; R-sqr=.75676; Adj.:.51351; MS Residual=4,036232 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 49,90429 | 0,759345 | 65,72019 | 0,000008 | 47,4877 | 52,32086 | 49,90429 | 0,759345 | 47,48771 | 52,32086 |
| (1)M | 0,105 | 2,009038 | 0,05226 | 0,961604 | -6,2887 | 6,49865 | 0,0525 | 1,004519 | -3,14433 | 3,24933 |
| (2)B/A | 1,635 | 2,009038 | 0,81382 | 0,475339 | -4,7587 | 8,02865 | 0,8175 | 1,004519 | -2,37933 | 4,01433 |
| 1 by 2 | -5,915 | 2,009038 | -2,9442 | 0,060306 | -12,3087 | 0,47865 | -2,9575 | 1,004519 | -6,15433 | 0,23933 |

Tabela 2 - Resultados da Análise Estatística da Resistência à Compressão do CAA com PCA

| Effect Estimates; Var.:RCCA; R-sqr=.66406; Adj.:.32813; MS Residual=10,40458 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 50,90714 | 1,219167 | 41,75567 | 0,00003 | 47,0272 | 54,78708 | 50,90714 | 1,219167 | 47,02721 | 54,78708 |
| (1)M | -0,46 | 3,225613 | -0,14261 | 0,895639 | -10,7253 | 9,80534 | -0,230 | 1,612807 | -5,36267 | 4,90267 |
| (2)B/A | -3,35 | 3,225613 | -1,03856 | 0,375362 | -13,6153 | 6,91534 | -1,675 | 1,612807 | -6,80767 | 3,45767 |
| 1 by 2 | -7,09 | 3,225613 | -2,19803 | 0,115384 | -17,3553 | 3,17534 | -3,545 | 1,612807 | -8,67767 | 1,58767 |

Tabela 3 - Resultados da Análise Estatística da Resistência à Compressão do CAA com Fíler

| Effect Estimates; Var.:RCFC; R-sqr=.91953; Adj.:.83905; MS Residual=10,40458 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 49,82286 | 0,620742 | 80,26334 | 0,000004 | 47,8474 | 51,79834 | 49,82286 | 0,620742 | 47,84738 | 51,79834 |
| (1)M | 3,10 | 1,64233 | 1,88756 | 0,155528 | -2,1266 | 8,32663 | 1,550 | 0,821165 | -1,06331 | 4,16331 |
| (2)B/A | 3,01 | 1,64233 | 1,83276 | 0,164217 | -2,2166 | 8,23663 | 1,505 | 0,821165 | -1,10831 | 4,11831 |
| 1 by 2 | -8,59 | 1,64233 | -5,23037 | 0,013598 | -13,8166 | -3,36337 | -4,295 | 0,821165 | -6,90831 | -1,68169 |

APÊNDICE 11 – Resultado da Análise Estatística da Velocidade de Pulso Ultrassônico do CAA

Tabela 1 - Resultados da Análise Estatística da Velocidade de Pulso Ultrassônico do CAA com Metacaulim

| Effect Estimates; Var.:VPMK; R-sqr=.72416; Adj.:.44832; MS Residual=1719,112 | | | | | | | | | | |
|--|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 4048,62 | 15,67123 | 258,3473 | 0 | 3998,747 | 4098,493 | 4048,62 | 15,67123 | 3998,747 | 4098,493 |
| (1)M | 75,5 | 41,46218 | 1,8209 | 0,166165 | -56,451 | 207,451 | 37,75 | 20,73109 | -28,226 | 103,726 |
| (2)B/A | -56,5 | 41,46218 | -1,3627 | 0,266255 | -188,451 | 75,451 | -28,25 | 20,73109 | -94,226 | 37,726 |
| 1 by 2 | 68,17 | 41,46218 | 1,6441 | 0,198692 | -63,781 | 200,121 | 34,085 | 20,73109 | -31,891 | 100,061 |

Tabela 2 - Resultados da Análise Estatística da Velocidade de Pulso Ultrassônico do CAA com PCA

| Effect Estimates; Var.:VPCA; R-sqr=.53902; Adj.:.07805; MS Residual=1718,073 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 4273,001 | 15,66649 | 272,7478 | 0 | 4223,144 | 4322,859 | 4273,001 | 15,66649 | 4223,144 | 4322,859 |
| (1)M | -70 | 41,44964 | -1,6888 | 0,189841 | -201,911 | 61,911 | -35 | 20,72482 | -100,956 | 30,956 |
| (2)B/A | 4 | 41,44964 | 0,0965 | 0,929207 | -127,911 | 135,911 | 2 | 20,72482 | -63,956 | 67,956 |
| 1 by 2 | -33,33 | 41,44964 | -0,8041 | 0,480151 | -165,241 | 98,581 | -16,665 | 20,72482 | -82,621 | 49,291 |

Tabela 3 - Resultados da Análise Estatística da Velocidade de Pulso Ultrassônico do CAA com Fíler

| Effect Estimates; Var.:VPFC; R-sqr=.65695; Adj.:.31389; MS Residual=942,3494 | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Effect | Std.Err. | t(2) | p | -95,00% | 95,00% | Coeff. | Std.Err. | -95,00% | 95,00% |
| Mean/Interc. | 4367,571 | 11,60264 | 376,429 | 0 | 4330,647 | 4404,496 | 4367,571 | 11,60264 | 4330,647 | 4404,496 |
| (1)M | 35,835 | 30,69771 | 1,1674 | 0,327414 | -61,859 | 133,529 | 17,917 | 15,34886 | -30,929 | 66,764 |
| (2)B/A | -48,495 | 30,69771 | -1,5798 | 0,212287 | -146,189 | 49,199 | -24,248 | 15,34886 | -73,094 | 24,599 |
| 1 by 2 | -42,165 | 30,69771 | -1,3736 | 0,263226 | -139,859 | 55,529 | -21,083 | 15,34886 | -69,929 | 27,764 |