

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL –  
ESTRUTURAS/PPGEC**

**ROBERTO DOS SANTOS MONTEIRO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS  
NA OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**MACEIÓ/AL**

**2015**

ROBERTO DOS SANTOS MONTEIRO

ESTUDO DA INFLUENCIA DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS  
NA OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia  
Gomes

Coorientadora: Prof. Karoline Alves de Melo  
Moraes

Maceió/AL

2015

**Catlogação na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade**

M775e Monteiro, Roberto dos Santos.

Estudo da influência de diferentes composições de agregados na obtenção e caracterização do concreto autoadensável / Roberto dos Santos Monteiro. – Maceió, 2015.  
105 f. : il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.

Coorientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2015.

Bibliografia: f. 95-101.

Anexos: 102-105.

1. Concreto - Composição de agregados. 2. Concreto – Resistência.  
3. Concreto autoadensável. I. Título.

CDU: 624.012.4



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS NA  
OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**ROBERTO DOS SANTOS MONTEIRO**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 28 do mês de maio do ano de 2015.

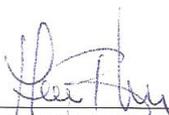
Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**

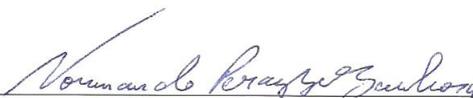
Orientador – PPGEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Karoline Alves de Melo Moraes**

Coorientadora - CTEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima**

PPGEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa**

UFPB

*Este trabalho é dedicado primeiramente a Deus em seguida a toda minha família, aos meus orientadores, além de àqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento do mesmo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela oportunidade, saúde, paz e pela alegria nas vitórias conquistadas, sendo esta uma das mais importantes na minha carreira profissional e satisfação pessoal.

Ao Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) que assim como na graduação, tem me acolhido contribuindo de modo integral na minha formação.

Agradeço aos meus orientadores, Paulo César Correia Gomes e Karoline Alves Melo Moraes, pela confiança, sabedoria, dedicação, pelo constante incentivo e pelo estabelecimento de uma fácil e harmoniosa relação professor - aluno.

Sem dúvida alguma agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estrutura (PPGEC), pelo compromisso e diretas contribuições ao longo do curso.

A CAPES pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa do mestrado;

Aos projetos UNIVERSAL/2012 e PROCAD/CASADINHO 552300/2011, pelo apoio financeiro no desenvolvimento da pesquisa.

A minha mãe Eliene Maria dos Santos Monteiro, ao meu pai José Lucio Monteiro, e minha irmã Renata dos Santos Monteiro, por sempre terem me apoiado, em todos os momentos de minha vida. Agradeço ainda a minha esposa e a todos os familiares que, dentro de suas possibilidades, complementaram esse apoio.

Aos meus amigos graduandos, mestrandos e doutorandos: Alexandre Machado, Osvaldo Ferreira, Cledson André, Thabatta Araújo, Tassyano Feitosa, Everton Mendes, Gyuliana, Natalia, Gustavo e a todos os colegas do Grupo de Pesquisa MECOEFICON, pelo apoio.

Agradeço ainda aos Técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais do CTEC/UFAL Jonas, Henrique, Sr. Cícero, Sr. Fábio, Valdemir e em especial a Girlei.

Por fim o meu agradecimento todo especial aos amigos que muito colaboraram para esta realização Flabeu e Sidcley.

## RESUMO

Diante dos avanços tecnológicos na ciência do concreto surgiram os chamados concretos especiais e, dentre estes, pode-se citar o concreto autoadensável (CAA), desenvolvido no Japão, na década de 1980. Este concreto é atualmente considerado um dos maiores avanços na tecnologia do concreto tendo em vista as suas inúmeras vantagens (diminuição do tempo da obra, diminuição da mão de obra de concretagem, melhora o ambiente de trabalho, melhora a qualidade e durabilidade da estrutura e etc.). A obtenção do CAA requer métodos de dosagens diferentes dos aplicados em concretos convencionais. Dentre essas diferenças se destacam a determinação das composições de agregados e a adição de materiais finos e aditivos químicos. Em se tratando da determinação da composição de agregados o método da massa unitária vem sendo aplicado em CAA. Entretanto é comum sua utilização em combinações binárias, já para combinações ternárias e quaternárias é bastante limitado. Neste sentido, foram analisadas diferentes combinações e composições de agregados, determinadas pelo método da massa unitária e do índice de vazios, na obtenção e caracterização de CAA. Para isso, inicialmente procurou-se padronizar os procedimentos de execução do método. Utilizou-se dois tipos de agregados miúdos e graúdos naturais com diferentes características físicas, sendo produzidas 9 composições distintas, sendo quatro binárias, quatro ternárias e uma quaternária. Para cada composição foi formulado um CAA, tomando como base a dosagem em estudos prévios. As propriedades de autoadensabilidade do concreto foram analisadas através dos ensaios de espalhamento, funil V e caixa L. No estado endurecido a resistência à compressão foi determinada. Os resultados mostraram que os diferentes procedimentos de execução do método não apresentaram divergências. O método da massa unitária mostrou-se eficiente na determinação de composições de agregado para atendimento ao CAA. Para um mesmo volume e composição de pasta (cimento, água, aditivos e adições) a composição quaternária foi a mais eficiente no atendimento às propriedades de autoadensabilidade e resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Composição de agregados. Massa unitária. Índice de vazios. Concreto autoadensável. Resistência a compressão.

## ABSTRACT

In the face of technological advances in concrete science emerged so-called special concretes and, among these, the self-compacting concrete (SCC), developed in Japan in the 1980s. This concrete is currently considered one of the greatest advances in concrete technology in view of its numerous advantages (decrease of construction duration, decrease of concreting labor, improvement of the working environment, improvement of the quality and durability of structures etc.). The production of SCC requires different mix design methods related to those applied for conventional concrete. Among these differences are highlighted the determination of the aggregate compositions and the addition of fine materials and chemical admixtures. In the case of determining the aggregate composition, the method of unit mass has been applied in SCC. However, it is common the use of this method in binary combinations, but for ternary and quaternary combinations it is quite limited. Thus, this work aimed to analyze the influence of different combinations and compositions of aggregates, determined by the method of unit mass and void ratio, to obtaining and characterization of SCC. For this, initially the procedures of the method was standardized. It was used two types of natural fine and coarse aggregates with different physical characteristics. It was produced 9 different aggregate compositions, four binary, ternary and quaternary four. For each composition, one SCC was formulated, based on previous dosage studies. The selfcompactability properties of the concrete were analyzed by spreading, V funnel test and L box test. In case hardened state the compressive strength was determined. The results showed that different methods of execution procedures showed no differences. The method of unit mass proved to be efficient in determining aggregate compositions to supply the SCC. For the same volume and paste composition (cement, water, chemical and mineral admixtures) the quaternary composition was the most efficient in meeting the properties of selfcompactability and compressive strength.

Keywords: Aggregate composition. Unit mass. Void ratio. Self-compacting concrete. Mechanical properties. Compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Macroestrutura do concreto.....	20
Figura 2 – Efeito da variação do tamanho de partículas.....	24
Figura 3 – Representação gráfica dos pontos da curva de referência de Faury.....	26
Figura 4 – Aproximação da curva real à curva de referência de Faury (situação 1).....	27
Figura 5 – Aproximação da curva real à curva de referência de Faury (situação 2).....	28
Figura 6 – Aproximação da curva real à curva de referência de Faury (situação 3).....	29
Figura 7 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo (Japão).....	37
Figura 8 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo (Japão - vista 2).....	38
Figura 9 – Túnel construído em Yokohama (Japão).....	38
Figura 10 – Ponte sobre o rio Guamá, Belém –PA.....	40
Figura 11 – Elevado Daniel Berg, Belém-PA.....	40
Figura 12 – Aérea da Arena Pernambuco (PE).....	41
Figura 13 – Comparação de composição de CAA com CCV.....	47
Figura 14 – Bloqueio por ocorrência do fenômeno do arco.....	48
Figura 15 – Faixa granulométrica de agregados para CAA.....	50
Figura 16 – Funil V abertura circular e retangular.....	55
Figura 17 – Caixa L.....	55
Figura 18 – Combinações binárias.....	62
Figura 19 – Combinações ternárias.....	63
Figura 20 – Combinação quaternária.....	64

Figura 21 – Curva granulométrica dos agregados miúdos.....	67
Figura 22 – Curva granulométrica dos agregados.....	68
Figura 23 – Massa unitária e índice de vazios obtido a partir da aplicação dos diferentes procedimentos.....	69
Figura 24 – Índices de vazios.....	72
Figura 25 – Curvas granulométricas das composições binárias.....	73
Figura 26 – Curvas granulométricas das composições ternárias.....	74
Figura 27 – Curva granulométrica da composição quaternária.....	74
Figura 28 – Concreto CAFB12.....	78
Figura 29 – Concreto CAFB19.....	79
Figura 30 – Concreto CAGB12 – espalhamento.....	79
Figura 31 – Concreto CAGB19.....	80
Figura 32 – Concreto CAFB12B19.....	81
Figura 33 – Concreto CAGB12B19.....	82
Figura 34 – Concreto CAFAGB12B19.....	83
Figura 35 – Resistência a compressão média.....	84
Figura 36 – Concreto CAGB12.....	85
Figura 37 – Concreto CAFAGB19.....	86
Figura 38 – Concreto CAFAGB12B19.....	86
Figura 39 – Concreto CAGB12 - 35% de pasta.....	87
Figura 40 – Concreto CAFAGB19 -35% de pasta.....	88
Figura 41 – Resistencia média a compressão aos 28 dias.....	90

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das adições utilizadas para obtenção de CAA.....	42
Quadro 2 – Ensaio para aferição da trabalhabilidade.....	51
Quadro 3 – Normas para ensaios de CAA no estado fresco.....	51
Quadro 4 – Aplicação do concreto quanto a classe de espalhamento.....	52
Quadro 5 – Aplicação do CAA quanto a classe de viscosidade plástica.....	53
Quadro 6 – Ensaio e normas utilizados na caracterização dos agregados.....	59
Quadro 7 – Nomenclatura das combinações propostas.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de A e de B da curva de referência de Faury.....	27
Tabela 2 – Percentual de agregados para determinação da composição de agregados com menor índice de vazios.....	33
Tabela 3 – Motivos que levaram a escolha do CAA.....	36
Tabela 4 – Parâmetros comumente utilizados para obtenção de CAA.....	45
Tabela 5 – Distribuição granulométrica de agregados para CAA.....	49
Tabela 6 – Faixa de valores para os parâmetros dos testes de caracterização das propriedades de fluxo adotados pela EFNARC (2002).....	52
Tabela 7 – Classificação do CAA através das propriedades no estado fresco.....	52
Tabela 8 – Relações paramétricas para dosagem de CAA.....	65
Tabela 9 – Propriedades granulométricas dos agregados.....	67
Tabela 10 – Composições de agregados comumente utilizadas para obtenção de CAA.....	70
Tabela 11 – Apresentação das composições de agregados e das propriedades Físicas.....	70
Tabela 12 – Composição da pasta de cimento por m <sup>3</sup> de concreto.....	75
Tabela 13 – Composição dos agregados.....	75
Tabela 14 – Apresentação das relações paramétricas para dosagem de CAA.....	75
Tabela 15 – Parâmetros de dosagem dos agregados para atendimento as composições de CAA.....	76
Tabela 16 – Propriedades de autoadensabilidade do concreto no estado fresco.....	77
Tabela 17 – Resultados do teor de agregado graúdo nas propriedades do CAA no estado fresco.....	83

Tabela 18 – Análise de autoadensabilidade do concreto no estado fresco.....	85
Tabela 19 – Propriedade do concreto no estado fresco.....	87
Tabela 20 – Resultados obtidos nos ensaios do CAA com diferentes composições de agregados e volume de pasta.....	89
Tabela 21 – Resumo de todos os resultados obtidos.....	91

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Relevância.....	16
1.3	Estrutura do trabalho.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	20
2.1	Métodos teóricos e experimentais para composição de agregados.....	20
2.2	Método curva de referência de Faury.....	25
2.3	Método do empacotamento compressível.....	30
2.4	Método experimental baseado no índice de vazios.....	31
2.5	Concreto auto-andensável.....	34
2.5.1	Materiais utilizados para CAA.....	41
2.5.1.1	Aditivos e adições.....	42
2.5.1.2	Agregados.....	43
2.5.1.3	Aglomerante.....	44
2.5.2	Métodos de dosagem.....	45
2.5.3	Composições de agregados.....	47
2.5.4	Ensaio no estado fresco.....	50
2.5.4.1	Ensaio de espalhamento.....	53
2.5.4.2	Ensaio do Fusil V.....	54
2.5.4.3	Caixa L.....	55
2.5.5	Propriedade no estado endurecido.....	56
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	59
3.1	Seleção os materiais.....	59

<b>3.2</b>	<b>Procedimento do método da massa unitária e do índice de vazios.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3</b>	<b>Determinação das combinações dos agregados.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>Determinação das composições de agregados.....</b>	<b>64</b>
<b>3.5</b>	<b>Análise das composições.....</b>	<b>65</b>
<b>3.6</b>	<b>Formulações e produções dos concretos.....</b>	<b>65</b>
<b>3.7</b>	<b>Propriedades do concreto.....</b>	<b>66</b>
3.7.1	Estado fresco.....	66
3.7.2	Resistência à compressão.....	66
<b>3.8</b>	<b>Otimização da pasta de cimento.....</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANALISES.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos agregados.....</b>	<b>67</b>
4.1.1	Método experimental da massa unitária e do índice de vazios.....	68
4.1.2	Composições de agregados.....	70
4.1.3	Análise das composições de agregados.....	73
4.1.4	Formulações dos concretos.....	75
4.1.5	Propriedades dos concreto obtidos no estado fresco.....	76
4.1.6	Resistência à compressão.....	84
4.1.7	Otimização do volume de pasta.....	84
4.1.7.1	CAA com 38% de pasta.....	84
4.1.7.2	CAA com 35% de pasta.....	87
4.1.8	Resistência à compressão.....	89
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES.....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material constituído basicamente pela mistura de pelo menos um material aglomerante, sendo comumente utilizado o cimento Portland (CP), agregados miúdo e graúdo, que podem ser naturais ou não, e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais cujo objetivo é conferir ao produto final uma determinada propriedade ou melhorar alguma já existente. De acordo com a literatura atual, o concreto é o segundo material de construção mais consumido no mundo, ficando atrás apenas da água.

Sendo um dos materiais mais utilizados na construção civil, o concreto tem sido objeto de pesquisas durante décadas e, como resultado, pode-se mencionar o surgimento dos chamados concretos especiais tais como o Concreto de Alta Resistência (CAR), o Concreto Celular, o Concreto Leve, o Concreto Auto Adensável (CAA), o Concreto Projetado, entre outros.

Dentre os materiais constituintes do concreto, os agregados chegam a representar aproximadamente 80% do peso e 20% do custo do produto final.

Observa-se que as características dos agregados tais como densidade, forma, textura, resistência ao esmagamento, reatividade com os álcalis do cimento, massa unitária e distribuição granulométrica apresentam influência nas propriedades dos concretos, quer seja no estado fresco, quer seja no estado endurecido. As características dos agregados contribuem significativamente nos concretos em termos de massa específica, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional.

No início do século XX, a partir da ideia de que composições granulométricas com distribuição contínua promovem melhores propriedades a concretos e argamassas, deu-se início aos estudos de empacotamento das partículas. Dentro deste contexto, Füller e Thompson (1907) comprovaram que a distribuição granulométrica dos agregados apresenta influência significativa na trabalhabilidade, na compacidade e conseqüentemente na resistência à compressão de concretos e argamassas.

No que diz respeito aos agregados a distribuição granulométrica deve ser de tal modo que permita obter misturas com máxima compacidade, ao mesmo tempo em que seja compatível com o elemento a ser moldado. Para Daminieli (2013), o

melhor empacotamento das partículas promoverá misturas mais econômicas, uma vez que demandará menor consumo de pasta.

De acordo com Salvador Filho (2007), o melhor empacotamento das partículas ocorre quando os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente menores resultando em composições que dão origem a concretos ou argamassas com maior densidade.

Atualmente existem métodos para dosagem de concretos em que uma de suas etapas consiste na obtenção de uma composição de agregados que apresente a melhor distribuição granulométrica (melhor continuidade) ou o melhor empacotamento das partículas, como é o caso do método da curva de referência de Faury, o método experimental baseado no menor índice de vazios e o Método do Empacotamento Compressível (MEC) apresentado por Larrard (1999).

Neste trabalho não foi realizada aplicação do método da curva de referência de Faury, tendo em vista que até o momento não há registro de aplicação do referido método para obtenção de CAA bem como não foi aplicado o MEC uma vez que, de acordo com a literatura disponível, trata-se de um método complexo que depende de fenômenos reais que devem ser simulados computacionalmente e, segundo Vogt (2010), o MEC baseia-se no empacotamento de monodispersões além do que, de acordo com Fennis (2006 apud DAMINELI, 2013), a aplicação do MEC resulta em misturas com baixa fluidez.

Ressalta-se que alguns métodos de dosagem do concreto, tais como Bolomey, Joiseu e Faury, tomam como referência uma curva granulométrica ideal para a composição de agregados tal curva deve representar a melhor continuidade das partículas (DÍAS, 1998).

Diante do exposto, ressalta-se a importância do estudo de métodos de composições granulométricas de agregados, tendo em vista que estas composições devem garantir que as características desejadas para os concretos sejam de fato alcançadas. Tal estudo torna-se ainda imprescindível quando se tratam de concretos especiais como o CAA e o CAD uma vez que estes concretos exigem propriedades distintas dos concretos convencionais.

O CAA é um tipo de concreto especial que se distingue dos concretos convencionais (CCV) pela sua capacidade de ocupar os espaços vazios sem a necessidade de vibração mecânica e sem apresentar segregação mesmo em elementos densamente armados. Portanto, trata-se de um material que apresenta

equilíbrio entre fluidez, viscosidade e resistência à segregação. Para tanto, sua dosagem, comparada à dos CCV, exige maior controle, sendo aplicados métodos distintos de composição e mistura, além de fazer uso de maior quantidade de material fino e menor quantidade de agregado graúdo. Outro diferencial está na maior exigência da utilização de aditivo superplastificante e/ou modificador de viscosidade.

Koehler (2007) acrescentam que a utilização deste tipo de concreto apresenta significativas implicações na maneira de especificar, produzir e lançar. Sendo uma das exigências para obtenção de um concreto com propriedades de autoadensabilidade a adequada seleção dos materiais e dosagem das misturas.

## **1.1 Objetivos**

### ✓ Geral

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise sobre a influência de diferentes combinações e composições de agregados, determinadas pelo método da massa unitária e do índice de vazios, na obtenção e caracterização de CAA.

### ✓ Específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- i. Apresentar uma abordagem sobre métodos de composição de agregados para obtenção de CAA;
- ii. Propor uma padronização do procedimento de mistura de agregados para determinação da composição de agregados com menor índice de vazios;
- iii. Verificar a aplicabilidade do método da massa unitária na determinação de composições de agregados para obtenção de CAA;

## **1.2 Relevância**

Observa-se que os avanços tecnológicos na construção civil têm conduzido o surgimento de novas técnicas e procedimentos construtivos, visando maior

economia para os construtores, maior durabilidade das estruturas e melhor conforto para os usuários.

Na década de 1980 surgiu no Japão o chamado CAA, este por sua vez trata-se de uma inovação na tecnologia do concreto, sendo capaz de dispensar uma das etapas de sua aplicação – o adensamento. Tal concreto surgiu da necessidade de eliminar ou minimizar falhas ocorridas na etapa do adensamento, uma vez que o mesmo é dosado de modo a apresentar fluidez, viscosidade e resistência à segregação suficiente para preencher todos os espaços vazios dos moldes onde será lançado, sem que haja aplicação de energia mecânica, principalmente em estruturas densamente armadas ou de difícil acesso. Outra vantagem observada na utilização deste material é a capacidade de incorporar materiais finos pozolânicos como metacaulim e sílica ativa ou fíler como resíduos minerais tais como Resíduo do Beneficiamento do Mármore e do Granito (RBMG) entre outros, à sua composição.

Há registros da aplicação do CAA fora do Japão no início da década de 1990. Registra-se nesta mesma época vários estudos que tem o CAA como objeto de pesquisas. Tais pesquisas envolvem a busca pelo conhecimento de suas características no estado endurecido bem como no estado fresco. Outras pesquisas apresentam como foco o estudo de sua composição, seja através da incorporação de novos materiais seja na otimização de métodos de dosagens.

As características, propriedades e métodos de composição dos agregados exercem significativa influência nas características e propriedades dos concretos. Em se tratando de CAA, por exemplo, para obtenção de suas propriedades no estado fresco, observa-se em sua composição, maior demanda de materiais finos e menor consumo de agregado graúdo.

Para este tipo especial de concreto foram desenvolvidos métodos de dosagem específicos, dentre os quais podem ser citados os métodos de: Okamura, Ozawa, Maekawa e Ouchi; Petersson Bilberg e Van; Modelo do Empacotamento Compressível (MEC); Su et al.; Saak et al.; Repette-Melo; Tutikian; EFNARC; Gomes, Gettu e Agulló (GOMES; BARROS, 2009).

De acordo com Gomes e Barros (2009), apesar de distintos, os métodos de dosagem de CAA tem em comum seus fundamentos e princípios baseados no empirismo.

Alguns métodos de dosagem de CAA, partem do princípio da otimização da pasta separadamente da otimização do esqueleto granular, sendo estas etapas

independentes e complementares que, segundo Gomes e Barros (2009), esta ideia tem sido adotada para obtenção de concreto de alta resistência (CAR) por autores tais como: Larrard (1999); Mehta e Aïtcin (1990), Mindess (1994); Toralles-Carbonari et al. (1996). Estes métodos consideram que além da forma, a distribuição granulométrica dos agregados influencia no empacotamento das partículas e, conseqüentemente, no índice de vazios

Os métodos de dosagem de CAA, propostos por: Petersson, Bilberg e Van; Su et al.; Gomes, Gettu e Agulló, consistem em determinar um menor volume de pasta a partir de uma composição granulométrica com menor índice de vazios. Neste sentido, no que se refere a otimização do esqueleto granular, esta é realizada com base nas recomendações ou da Norma Mercosul NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) ou nas recomendações da norma americana C29/C29M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 1986).

Embora tenham sido observados resultados positivos na obtenção de concretos tais como CAA e CAD, a partir de método que tem como princípio a otimização da pasta e do esqueleto granular, até o presente momento não foi definido um padrão nos procedimentos de mistura dos agregados para determinação da composição granulométrica que apresente o menor índice de vazios. Neste sentido, um dos objetivos deste trabalho é propor uma padronização destes procedimentos. Para tanto, foram adotados como base os trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Alagoas por: Lisbôa (2004), que teve como objetivo principal estudar a produção do CAA, utilizando o RBMG como adição mineral; Cavalcanti (2006), que analisou algumas propriedades do CAA no estado endurecido e; Barros (2008), que analisou algumas propriedades de durabilidade do CAA obtido com incorporação de RBMG.

Observa-se que os trabalhos referenciados, utilizaram na obtenção dos concretos, além do RBMG como adição mineral, composições binárias de agregados graúdo e miúdo, determinadas através do método da maior massa unitária e do menor índice de vazios. Neste sentido, como forma de ampliar o conhecimento foram obtidos concretos também a partir de composições ternária e quaternária.

Com relação ao método da curva de referência de Faury, cabe ressaltar que trata-se de um método bastante difundido na Europa, com maior destaque em Portugal. Tal método, conforme citado anteriormente, teve sua aplicação testada e

eficientemente comprovada na obtenção de CAR através dos trabalhos de Almeida (1999) e Gomes (2005). No entanto, até o presente não consta na literatura registros de sua aplicação na obtenção de CAA.

Tutikian e Dal Molin (2008) citam que o estudo envolvendo CAA é uma das áreas da tecnologia do concreto com grande potencial de desenvolvimento. Pesquisadores de vários países têm concentrado seus esforços em busca de maiores conhecimentos a respeito do CAA, estando, pois, este trabalho, inserido dentro de um contexto atual e de grande relevância na engenharia civil.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está dividido em 6 seções: na primeira seção é apresentada uma breve introdução, justificativa, os objetivos e a relevância do tema; a seção 2 apresenta uma revisão da literatura onde são abordados os temas que tratam sobre os métodos de composição de agregados da curva de referência de Faury, MEC e sobre o método experimental do menor índice de vazios, método este utilizado para o desenvolvimento deste trabalho; na seção 3 são apresentados os materiais e os métodos utilizados na realização deste trabalho; a seção 4 apresenta os resultados obtidos a partir das análises dos experimentos realizados para elaboração deste trabalho; na seção 5 são apresentadas as considerações finais e na seção 6 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção apresenta uma revisão literária sobre métodos de composição de agregados para obtenção de concretos bem como apresenta uma abordagem sucinta sobre o CAA e mais detalhadamente sobre os métodos de dosagens e composições de agregados desenvolvidos para sua obtenção.

### 2.1 Métodos teóricos e experimentais para composição de agregados

Tanto o concreto como a argamassa podem ser definidos como composições de agregados envolvidos com pasta de cimento, podendo conter aditivos, a depender das características de desempenho que se deseje obter.

Para Freitas Junior (2013) o concreto pode ser definido como uma estrutura heterogênea e complexa, macroscopicamente dividida em duas fases - fase pasta ou matriz e fase agregados. A Figura 1 ilustra essa definição.

**Figura 2 – Macroestrutura do concreto**



Fonte: Freitas Junior (2013)

A matriz é composta pela pasta hidratada de cimento enquanto que os agregados, materiais geralmente inertes e rígidos, servem para compor o esqueleto granular (FORMAGINI, 2004). Neville e Brooks (2013, p. 2), citam que “as propriedades do concreto são regidas pelas propriedades das duas fases, bem como pelas interfaces entre elas”.

Birsh e Shakhmenko (1998) relatam que numa mistura de concreto, o volume de agregado corresponde a cerca de 60% a 90% do volume total da mistura e que, o tipo de agregado, suas dimensões e distribuição de suas partículas, afetam a

trabalhabilidade do concreto, como também, propriedades mecânicas tais como permeabilidade, durabilidade e custo.

Segundo Santos (2008), numa mistura de concreto, a distribuição granulométrica influencia no teor de vazios e na densidade de empacotamento de suas partículas constituintes e, de acordo com Neville e Brooks (2013), o volume de pasta contido nas argamassas ou concretos deve ser suficiente para envolver os grãos de agregados e preencher os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas. Neste sentido, Daminieli (2013, p. 41) afirma que “em um sistema de partículas granulares, a mobilidade é proporcional ao afastamento dos grãos por um fluido em fase contínua”.

Não são recentes os estudos que propõem formulações matemáticas para a determinação de composição de agregados visando otimizar a obtenção de concretos e argamassas. Segundo Carneiro (1999), tais formulações têm como base, estudos apresentados por Füller e Thompson em 1907, sendo este considerado o pioneiro nos estudos que propõem a construção de uma curva granulométrica ideal, utilizada como referência para obter a máxima compacidade do concreto.

Pileggi (2001) cita que Powers desenvolveu uma pesquisa cujo objetivo foi determinar o melhor proporcionamento dos materiais a partir dos conceitos de densidade de empacotamento de partículas.

Os métodos conceituados na continuidade das partículas, obtida a partir das construções de curvas granulométricas, tem como propósito determinar a mistura mais compacta que apresente o mínimo de permeabilidade, sem prejuízo na trabalhabilidade requerida (CARNEIRO, 1999).

Assim, o método apresentado por Carneiro (1999) tem como base os estudos apresentados por Furnas (1931), sendo, portanto, obtidas as curvas granulométricas a partir da equação do somatório de uma progressão geométrica (PG) conforme mostra a Equação 1.

$$S_n = \frac{A \cdot (1 - P_r^n)}{(1 - P_r)} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$S_n$  – Somatório dos termos de uma progressão geométrica;

A – primeiro termo do somatório, correspondente à quantidade de material retido na peneira de abertura máxima, logo abaixo da peneira de abertura máxima característica;

$P_r$  – razão entre as quantidades em massa retidas em cada peneira. Não podendo o valor de  $P_r$  ser igual a 1;

n - número de constituintes da P.G. Carneiro (1999, p. 62) considera “cada fração granulométrica dos aglomerantes e do agregado como um constituinte da argamassa”.

Considerando  $S_n=100$  obtém-se a Equação 2, utilizada para determinar o primeiro termo do somatório, sendo os demais determinados a partir da equação 3.

$$A = 100 \cdot \left( \frac{1-P_r^n}{1-P_r} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

$$A_{n+1} = A_n \times P_r \quad (\text{Equação 3})$$

Embora o método proposto por Carneiro (1999) seja um método para dosagem de argamassas, o mesmo conceito pode ser estendido para dosagem de concretos como no trabalho de Moraes (2010).

Observa-se, contudo, que a aplicação do método proposto por Carneiro (1999) não resulta apenas numa única composição de agregados, mas sim numa sequência de composições, sendo necessário, portanto, determinar alguns critérios para a correta escolha entre as possíveis misturas obtidas.

Neste aspecto, pode-se recorrer ao método experimental baseado no menor índice de vazios, ou seja, dentre as composições obtidas através da aplicação do método em tela, a composição ótima será aquela que apresentar o menor índice de vazios. Dessa forma, o referido método pode ser visto como uma otimização do método experimental baseado no menor índice de vazios.

Para casos mais particulares, como o do CAA, outros critérios podem ser adotados, tais como análise de parâmetros específicos como os apresentados por Gomes e Barros (2009).

De acordo com Díaz (1998) e Santos (2008) outros estudos que foram desenvolvidos para dosagem de concreto tais como os de Bolomey, Joiseu e Faury determinam, em uma de suas etapas, uma curva granulométrica dos agregados, de

modo a representar a máxima compacidade ou densidade de empacotamento do esqueleto granular, visando obter a melhor continuidade das partículas. Neste contexto, define-se como composição ótima aquela em que, a mistura apresenta o melhor empacotamento das partículas e como consequência a menor porcentagem de vazios.

Neville e Brooks (2013) citam que a importância em se determinar uma composição granulométrica ótima de agregados para misturas de concretos, primeiramente está relacionada com a trabalhabilidade requerida e, para que se obtenha alta resistência é necessário obter um adensamento máximo.

Por composição granulométrica ótima de agregados pode-se entender como aquela que apresenta melhor distribuição das partículas e, em relação à continuidade das misturas, Metha e Monteiro (2008) definem como sendo aquela que confere ao concreto no estado fresco melhor trabalhabilidade e no estado endurecido menor quantidade de poros proporcionando maior ganho de resistência mecânica.

Ressalta-se ainda que, segundo Chen et al. (2003 apud MELO, 2005), misturas granulométricas descontínuas podem ocasionar maior demanda de cimento, redução de fluidez e formação de vazios entre as partículas de agregados de maior dimensão, além de que, de acordo com Neville (1997), podem também resultar em concretos com maior tendência à segregação.

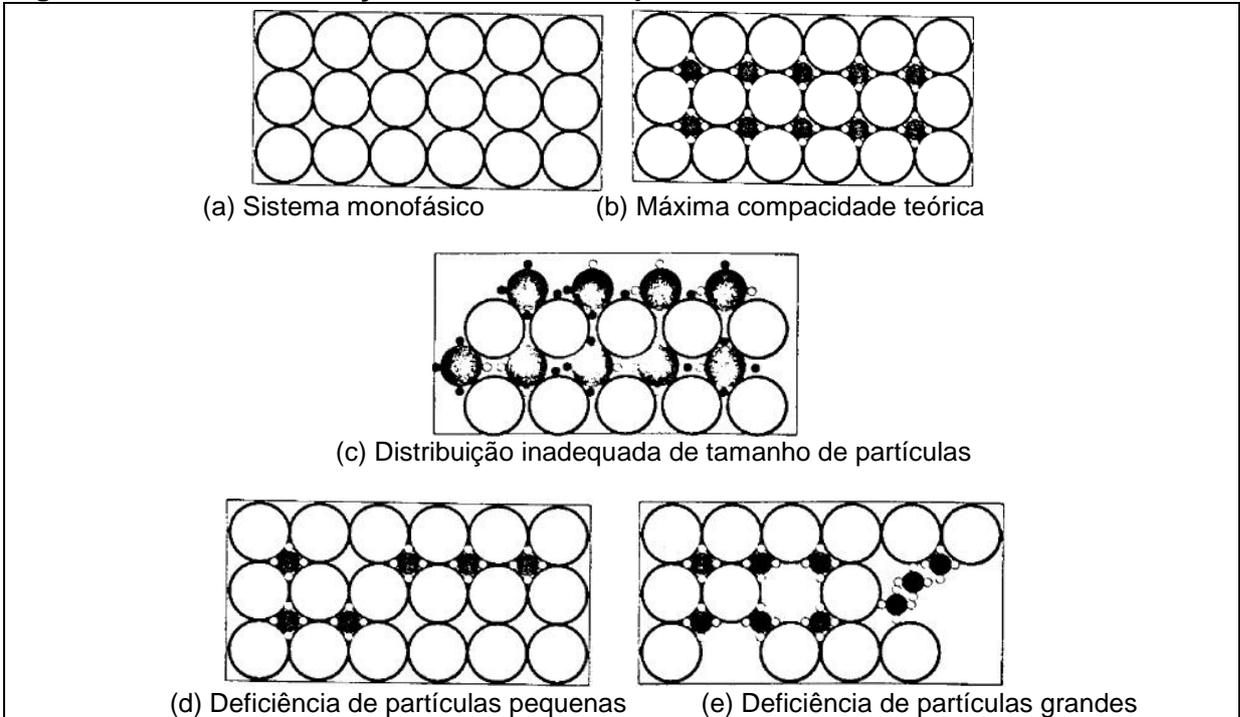
Para Pileggi (2001) define-se como sendo um mistura com bom empacotamento aquela em que se obtém o menor índice de vazios intergranulares, demandando o menor consumo de fluido possível e garantindo maior mobilidade das partículas.

MCGeary (1961 apud OLIVEIRA et al. 2000, p. 119) cita que “empacotamentos densos são de interesse na tecnologia dos concretos, cerâmicas estruturais, eletrônicas, nucleares, metalurgia do pó entre outros”, enquanto que a produção de revestimentos isolantes térmicos exige empacotamento de baixa densidade. O mesmo autor define o estudo de empacotamento de partículas como sendo:

O problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente. (OLIVEIRA et al., 2000, p.119).

As Figuras 2a, 2b, 2c, 2d e 2e ilustram o efeito do número de faixas com diferentes tamanhos de partículas na eficiência de empacotamento.

**Figura 3 – Efeito da variação do tamanho de partículas**



Fonte: Oliveira, 2000.

Para Neville e Brooks (2013), na prática, não é possível determinar uma mistura granulométrica ideal de agregados, hipótese essa sustentada pela interação entre fatores que influenciam diretamente na trabalhabilidade da mistura, tais como área superficial do agregado, o volume relativo ocupado pelo agregado, a tendência à segregação e a quantidade de finos da mistura.

Contudo, estes mesmo autores enfatizam “a importância de determinar uma granulometria que possibilite a obtenção de uma trabalhabilidade razoável, com mínima segregação, de maneira a obter um concreto resistente e econômico” (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 67).

Para Neville e Brooks (2013), de modo geral, existem basicamente dois meios para determinar misturas de agregados para obtenção de concretos e argamassas – sejam eles através de formulações matemáticas que, descrevem curvas granulométricas ideais ou, através de métodos práticos e teóricos que determinam o valor do empacotamento das partículas. Dentro deste contexto, entre os métodos para determinação da curva granulométrica ideal, podem ser citados os métodos de:

Füller, Graf, Faury, Bolomey, Joiseu e Rissel. (BIRSH; SHAKHMENKO, 1998); (CARNEIRO, 1999); (NEPOMUCENO, 1999).

No entanto, Díaz (1998), cita que dentre os métodos de composição de agregados, o método experimental baseado no menor índice de vazios tem se mostrado como o mais confiável, apresentando resultado satisfatório para qualquer tipo de concreto.

Para atendimento ao estudo realizado, nesta seção são abordados alguns métodos que determinam composições ótimas de agregados para CAD, dentre estes, o método de Faury (NEPOMUCENO, 1999) e o método experimental baseado no menor índice de vazios. Este último, por sua vez, conforme apresentado nos itens anteriores já vem sendo utilizado para determinação de composições de agregados visando seu atendimento as dosagens de CAA. Conforme mencionado anteriormente, esta seção também apresentam uma abordagem teórica no que diz respeito ao CAA.

## **2.2 Método curva de referência de Faury**

Os métodos de dosagens de concreto largamente difundidos na Europa são baseados em curvas de referência, como os métodos de Bolomey, Joiseu e Faury, sendo este último, de acordo com Nepomuceno (1999) aplicado em maior escala em Portugal.

Assim como o método de Bolomey e Joiseu, o método de Faury é de natureza empírica que tem como objetivo:

[...] fornecer uma curva granulométrica das partículas sólidas do betão que, tendo em vista a natureza dos inertes, a trabalhabilidade pretendida, os meios de colocação, o efeito de parede e a presença de armaduras, conduz à maior compacidade do betão endurecido (NEPOMUCENO, 1999, p.11).

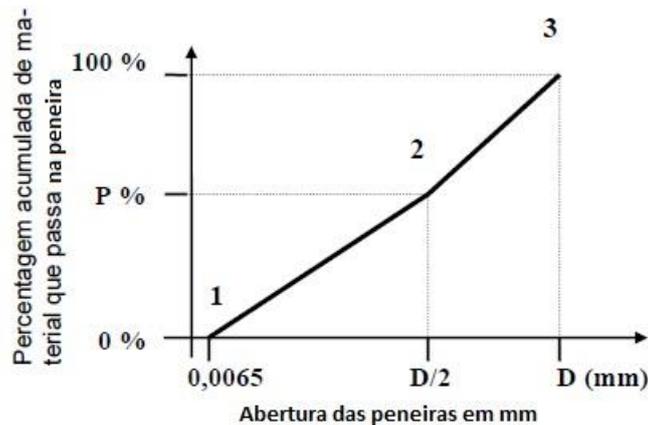
Portanto, conforme mencionado anteriormente, trata-se de um método empírico para dosagem de concretos, normalmente convencionais, no entanto, autores como Almeida (1990) e Gomes (2005) comprovaram sua eficácia na dosagem de concretos de alto desempenho (CAD) com elevada resistência.

De modo geral o método é constituído por duas etapas, onde na primeira são determinados os materiais que compõem da pasta e na segunda determina-se a composição dos agregados.

A dosagem dos agregados é obtida a partir da construção de uma curva granulométrica teórica, utilizada como referência cuja construção deve atender algumas características dos agregados. Tal curva é constituída por três pontos que descrevem dois segmentos de reta, representados num gráfico, onde as ordenadas e as abscissas tem o significado habitual das curvas granulométricas.

O eixo das abscissas deve estar na escala proporcional à  $\sqrt[5]{D}$ , onde D é a abertura das malhas das peneiras em milímetros, o mesmo não acontecendo para o eixo das ordenadas onde a escala é linear. Os pontos que descrevem a curva granulométrica de referência de Faury estão representados graficamente na Figura 3.

**Figura 4 – Representação gráfica dos pontos da curva de referência de Faury**



Fonte: Nepomuceno,1999, p.48.

O ponto  $P(D/2)$  é determinado pela Equação 4.

$$P\left(\frac{D}{2}\right) = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D}-0,75} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

A, B – são parâmetros que dependem da natureza dos agregados, do meio de lançamento e da consistência do concreto apresentados na Tabela 1.

R – raio médio do molde, em mm;

D – máxima dimensão do inerte em mm;

$P(D/2)$  – percentagem do material sólido total que passa na peneira de abertura  $D/2$ .

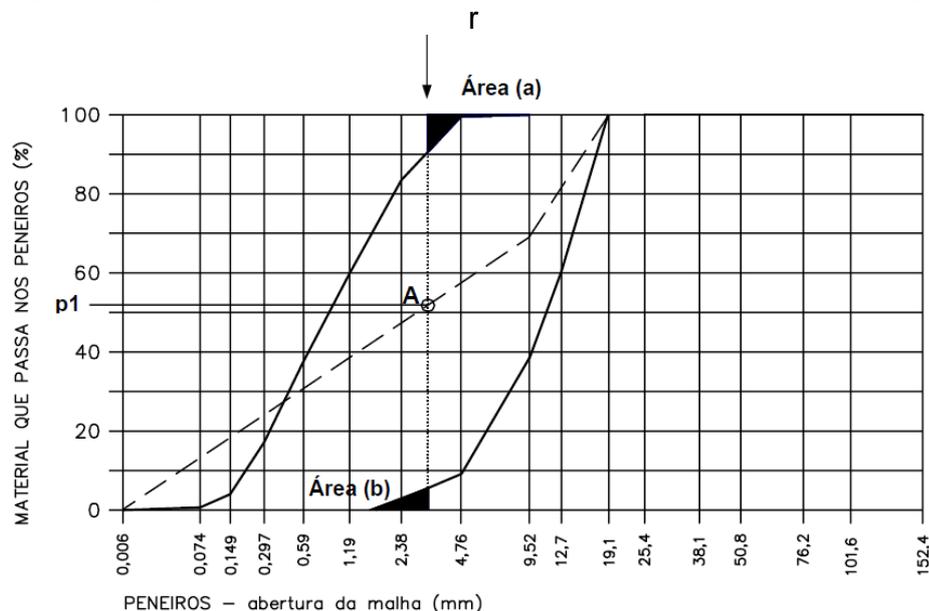
Tabela 1 – Valores de A e de B da curva de referência de Faury

Trabalhabilidade	Meios de lançamento	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos agregados			
		Agregado miúdo rolado		Agregado miúdo britado	
		Agregado graúdo rolado	Agregado graúdo britado	Agregado graúdo britado	
Terra úmida	Vibração muito potente e possível compressão	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Sem compactação	32	34	38	2

Fonte: Coutinho (1988 apud NEPOMUCENO 1999, p. 49)

Constroem-se no mesmo gráfico da curva de referência de Faury, as curvas granulométricas referentes aos agregados graúdos e miúdos que deverão compor o concreto. Considerando, portanto, uma composição binária de agregados, observam-se as possíveis situações, conforme ilustradas nas Figuras 4, 5 e 6.

Figura 5 – Aproximação da curva real à curva de referência de Faury (situação 1)

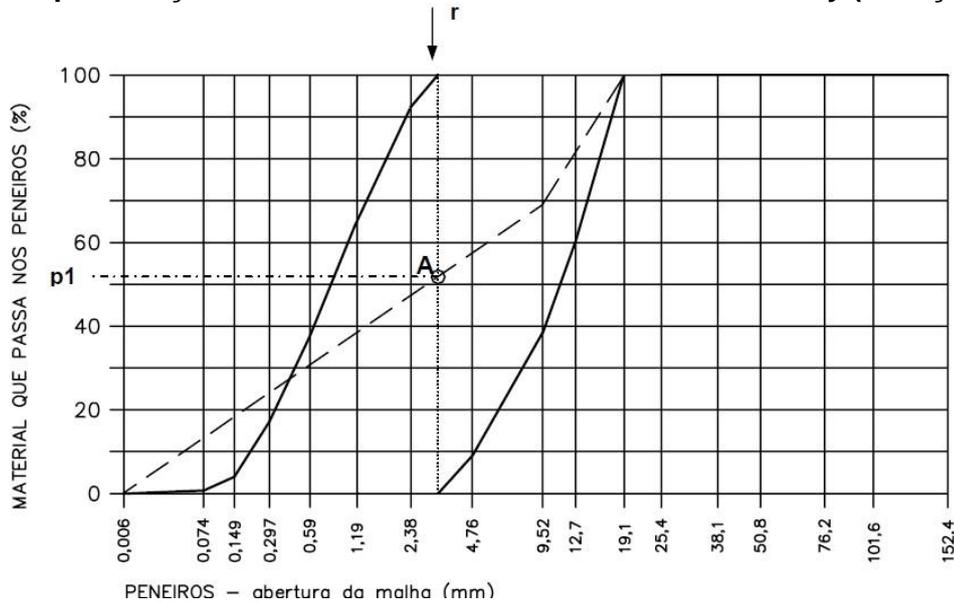


Fonte: Nepomuceno, 1999, p.51.

De acordo com Nepomuceno (1999), a situação ilustrada na Figura 4 é a que ocorre com maior frequência, além de ser a mais desejável, tendo em vista a continuidade da curva granulométrica final. Nessa figura, a linha vertical “r” e as

linhas das curvas granulométricas delimitam as regiões de área “a” e “b”, de modo que estas sejam iguais. O ponto “A” é a interseção entre a curva de referência e a linha vertical “r” e, sua projeção horizontal determina a porcentagem “p1”.

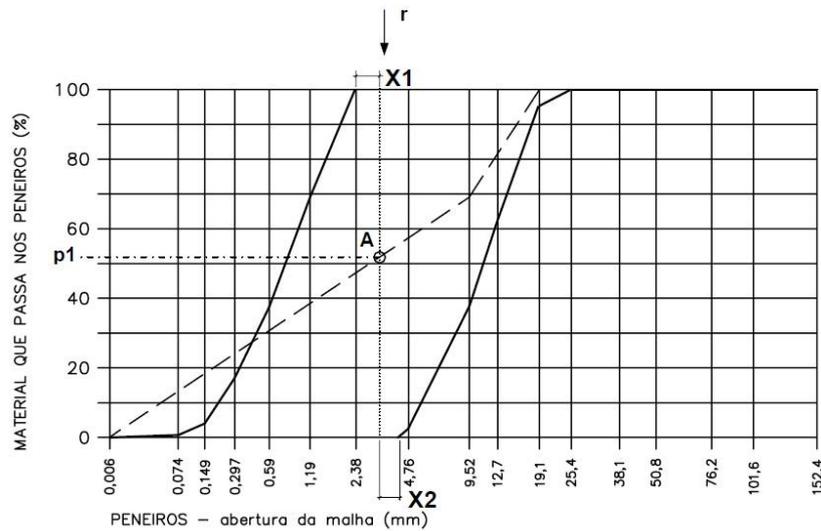
**Figura 6 – Aproximação da curva real à curva de referência de Faury (situação 2)**



Fonte: Nepomuceno, 1999, p.52.

A Figura 5 representa a situação 2, construída de maneira análoga à Figura 4, no entanto a reta “r” juntamente com as linhas das curvas granulométricas não mais delimitam uma região. Uma das extremidades da reta deve coincidir com o fim de uma das curvas granulométricas, enquanto que a outra extremidade deve encerrar o início da outra curva granulométrica, nesse caso as áreas serão nulas (NEPOMUCENO, 1999).

**Figura 7 – Aproximação da curva real á curva de referência de Faury (situação 3)**



Fonte: Nepomuceno, 1999, p.52.

A situação 3, ilustrada na Figura 6, é a menos desejável, uma vez que a curva granulométrica resultante apresenta-se descontínua, tendo em vista a falta de uma gama de partículas. Particularmente neste caso a reta vertical é traçada de modo que as distancias  $x_1$  e  $x_2$  entre as curvas granulométricas sejam iguais (NEPOMUCENO, 1999).

Embora as situações supracitadas e representadas graficamente se refiram a misturas binárias, estes mesmos conceitos podem ser aplicados para outros tipos de misturas, sendo necessário, portanto, traçar mais de uma reta vertical e, conseqüentemente, mais pontos de interseção, sendo estes os intervalos percentuais de determinadas partículas sólidas.

Uma vez construídas as curvas granulométricas e a curva de referência, obtém-se os percentuais de agregados que deverão inicialmente compor a mistura, no entanto, faz-se necessário realizar um ajuste destes valores. Para isso é necessário conhecer o módulo de finura da curva real e determinar o módulo de finura da curva de referência de Faury, este último é definido através da determinação do parâmetro " $a$ ", dado pela Equação 5 a partir do qual se obtém valores tabelados para o módulo de finura da curva de Faury (Anexo A).

$$a = A + \frac{B}{R - 0,75} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

a é o parâmetro para determinação do módulo de finura da curva de Faury; A, B, R e D são os mesmos parâmetros já definidos para o traçado da curva de Faury na Equação 4.

O módulo de finura da curva real é calculado através da Equação 6.

$$MF_{real} = \sum \frac{MF_{ag} \times \%Ag}{100} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$MF_{real}$  é o módulo de finura da curva real;

$MF_{ag}$  é o módulo de finura do agregado;

$\%Ag$  é o percentual do agregado na mistura.

O módulo de finura da curva real é ajustado alterando os percentuais de agregados de modo que a soma de seus percentuais não se altere.

Salienta-se que até a realização deste trabalho não foi encontrado na literatura nenhuma aplicação do método de Faury na dosagem de CAA.

### 2.3 Método do empacotamento compressível

Com base nos métodos de dosagem de concretos existentes, observa-se necessidade de se determinar o melhor empacotamento dos componentes sólidos constituintes do concreto.

De acordo com Gomes e Barros (2009) os métodos de dosagens de concreto são baseados em procedimentos empíricos, sendo portanto, limitados ao uso de poucos materiais. Ainda segundo Gomes e Barros (2009, p.79), esses métodos “não abordam critérios de formulação da mistura granular e fornecem como produto final um material heterogêneo de baixo ou moderado desempenho”.

Larrard (1999) construiu uma teoria que tem como objetivo solucionar a questão de empacotamento de misturas secas em todos componentes utilizados na dosagem do concreto, teoria essa que deu origem ao MEC que segundo Silva (2004) trata-se de uma versão aprimorada de outros modelos de empacotamento desenvolvidos pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Gomes e Barros (2009) citam que, Larrard (1999) em sua formulação teórica solucionou a questão de empacotamento das partículas sólidas constituintes da mistura de concreto sendo possível obter concretos com maior compacidade da mistura granular, menor risco à segregação, maior desempenho com baixa relação água/cimento, além de tornar o concreto mais coeso e com baixa porosidade.

Ressalta-se que no MEC os materiais são caracterizados por toda distribuição de tamanho de partícula como também é considerada a interação entre as partículas.

A aplicação do MEC divide-se em duas etapas onde na primeira é determinado o empacotamento virtual ( $\gamma$ ) e na segunda determina-se o empacotamento real (C).

De acordo com Miranda (2008), como não é possível determinar o empacotamento de misturas a partir do empacotamento virtual ( $\gamma$ ), então na segunda etapa do MEC determinam-se correlações entre a compacidade virtual e a compacidade real. Para correlacionar a compacidade virtual ( $\gamma$ ) e a real (C) utiliza-se um índice K, denominado índice de compactação, determinado em função do método utilizado para se determinar o empacotamento real. Nesse sentido, quanto maior o índice K, mais próximo o empacotamento real está do virtual.

Gomes e Barros (2009) definem a compacidade virtual de empacotamento de uma mistura granular monodispersa como sendo a máxima compacidade possível de ser obtida através do empilhamento dos grãos um a um.

## **2.4 Método experimental baseado no índice de vazios**

Neville e Brooks (2013) citam que a importância em se determinar uma composição granulométrica ótima de agregados para misturas de concretos, primeiramente está relacionada com a trabalhabilidade requerida e, para que se obtenha alta resistência é necessário obter um adensamento máximo.

A composição de agregados que apresenta melhor distribuição das partículas é denominada de ótima. Metha e Monteiro (2008) definem como sendo aquela que confere ao concreto no estado fresco melhor trabalhabilidade e no estado endurecido menor quantidade de poros proporcionando maior ganho de resistência mecânica.

Chen et al (2003 apud MELO, 2005), citam que misturas granulométricas descontínuas podem ocasionar maior demanda de cimento, redução de fluidez e formação de vazios entre as partículas de agregados de maior dimensão, além de que, de acordo com Neville (1997), podem também resultar em concretos com maior tendência à segregação.

É importante lembrar que, segundo Díaz (1998), para determinar a composição ótima de agregados para obtenção de concretos e argamassas, o método experimental baseado na porcentagem de vazios de mistura de agregados graúdos e miúdos, tem se mostrado o mais preciso.

Dentro deste contexto, observa-se que alguns métodos de dosagem de CAA, tais como os de Petersson, Bilberg e Van; Su et al; Gomes, Gettu e Agulló tem como uma de suas etapas, a aplicação do método do índice de vazios para determinar a composição de agregados que deverá compor a dosagem do concreto (GOMES e BARROS, 2009).

No que diz respeito à determinação do volume de vazios, tem-se como ponto de partida a determinação da massa unitária dos agregados graúdo e miúdo ou misturas destes, tanto no estado solto como no estado compactado. Os procedimentos utilizados pelos pesquisadores são baseados nas orientações da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

No entanto, para determinar a melhor composição de agregados faz-se necessário realizar ensaios com misturas de variadas proporções dos seus materiais constituintes, ou seja, é necessário variar a composição granular da mistura, sendo considerada ótima aquela que apresentar maior massa unitária que, como consequência, deverá resultar também na mistura que apresenta menor porcentagem de vazios.

Neste sentido Díaz (1998) sugere que, em se tratando de agregados naturais é suficiente variar os percentuais dos agregados constituintes das misturas de acordo com a Tabela 2.

**Tabela 2 – Percentual de agregados para determinação da composição de agregados com menor índice de vazios**

AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
%	%
35	65
40	60
45	65
50	50
55	45

Fonte: Díaz, 1998.

A massa específica da mistura é determinada através da equação 7 e o índice de vazios através da Equação 8.

$$M_{em} = \frac{M_{e_a} \times \%A + M_{e_b} \times \%B}{100} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\%V = \frac{M_{em} - M_u}{M_{em}} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$M_{em}$  – Massa da mistura;

$M_{e_a}$  – Massa específica do agregado A;

$M_{e_b}$  – Massa específica do agregado B;

$\%A$  – Porcentagem de agregado A na mistura;

$\%B$  – Porcentagem do agregado B na mistura.

$\%V$  – Porcentagens de vazios na mistura;  $M_u$  – Massa unitária da mistura.

Quanto as recomendações normativas para determinação do índice de vazios e da massa unitária de agregados a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) cita duas possibilidades sendo estas com ou sem compactação do material. Contudo, como a referida norma não objetiva a investigação da composição com menor índice de vazios ou maior massa unitária, o que se observa é que alguns autores utilizam procedimentos distintos para determinação da composição do esqueleto granular com base no mesmo método experimental.

Portanto, dentre os métodos citados, o método experimental e o método do empacotamento compressível são métodos que, de acordo com a literatura atual, podem ser aplicados satisfatoriamente na determinação da composição de agregados para obtenção de vários tipos de concretos, inclusive concretos com propriedades de autoadensabilidade.

Quanto ao método de Faury, apesar de bastante difundido no continente europeu, tem-se registro na literatura de sua aplicação na obtenção de CAD com elevada resistência, contudo no que diz respeito a obtenção de CAA, até a elaboração deste trabalho, não há registros de sua aplicação.

## **2.5 Concreto auto-andensável**

O CAA surgiu como uma solução alternativa para os problemas oriundos da má compactação do concreto, tendo em vista que, sua mistura deve apresentar fluidez necessária de modo que possa viabilizar o seu lançamento e espalhamento sem o efeito de vibração (FORMAGINI, 2005). Para Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA é um avanço tecnológico com grande potencial de desenvolvimento, uma vez que as características desse tipo de concreto promovem diferentes propriedades e com isso novas oportunidades.

Este concreto foi desenvolvido na Universidade de Tóquio, no Japão, na década de 80 do século XX. Embora, Collepardi (2001 apud MANUEL, 2005) afirma ter feito uso de concreto com propriedades de autoadensabilidade já nas décadas de 70 e 80 do século XX. No entanto, para Nunes (2001) e Takada (2004) atribui-se a descoberta do CAA ao Professor Hajimi Okamura que, diante das patologias observadas nas estruturas de concreto armado executadas no Japão, apresentou um concreto com propostas inovadoras, dentre estas, a capacidade de se moldar nas formas, ocupando todos os espaços vazios sem a necessidade da aplicação de energia mecânica e, sem a ocorrência de segregação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

No Japão é comum o uso de elevadas taxas de armadura na confecção de elementos em concreto armado (MELO, 2005). Além disso, com a modernização na arquitetura, verifica-se o surgimento de estruturas cada vez mais complexas e, desta forma, os fatores supramencionados, associados à falta de mão de obra qualificada, motivaram a descoberta do CAA.

Dentre as propriedades do CAA destaca-se sua resistência à segregação e sua capacidade de preencher os espaços vazios das formas e de se autoadensar sem que para isso haja necessidade de vibração mecânica.

Para Koehler (2007) e Tutikian e Dal Molin (2008), o uso do CAA tem apresentado ganhos significativos, diretos e indiretos, dentre os quais podem ser citados:

- a) Promove maior produtividade uma vez que seu lançamento ocorre de maneira mais rápida além de dispensar a etapa do adensamento;
- b) Melhora o ambiente de trabalho através da redução dos ruídos oriundos dos equipamentos utilizados para compactação e adensamento do concreto fresco, uma vez que estes passam a não ser mais necessários; com isso há também redução nos casos de acidentes do trabalho, e melhora das condições de concretagem nos grandes centros urbanos e em períodos noturnos, além de locais próximos a escolas e hospitais;
- c) Reduz o custo da construção, uma vez que, com a eliminação da etapa do adensamento, há redução da mão-de-obra, tempo de execução e de equipamentos;
- d) Melhora o acabamento final da superfície e reduz a necessidade de reparos em defeitos tais como a formação de “bicheiras”;
- e) Pode melhorar a durabilidade das estruturas devido à facilidade de adensamento, eliminando também o surgimento de grandes vazios oriundos da má vibração;
- f) Em alguns casos pode promover melhoria na resistência do concreto no estado endurecido;
- g) Permite grande liberdade de formas e dimensões; o CAA preenche fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- h) Permite concretagens em peças de seções reduzidas;
- i) Pode ser considerado sustentável uma vez que é possível adicionar em sua composição altos teores de resíduos industriais como cinza volante, escória de alto forno, Resíduo do Beneficiamento do Mármore e do Granito (RBMG) ou cinza da casca de arroz.

Estudos realizados por Domone (2006 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) apontaram os principais motivos que levaram à escolha do CAA como material construtivo no período compreendido entre 1993 e 2003, conforme apresentado na tabela 3 em ordem de grau de importância.

**Tabela 3 – Motivos que levaram a escolha do CAA**

GRAU DE IMPORTANCIA	MOTIVAÇÃO
1	Vantagens técnicas do material quando comparada ao CCV
2	Questões de ordem econômica, tendo em vista que a aplicação do CAA permite reduzir o número de trabalhadores e/ou o tempo de execução
3	Por se tratar de um material inovador

Fonte: Domone (2006 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008)

Segundo Ouchi (1999 apud KOEHLER, 2007), Okamura identificou a primeira oportunidade da aplicação do CAA em 1986, no entanto, o primeiro protótipo utilizando este concreto foi produzido em 1988.

Para Domone (2003 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), a primeira aplicação de CAA se deu em 1993 no Japão numa concretagem in loco das colunas e das paredes de um edifício.

O CAA teve boa aceitação em obras de países europeus (GOMES, 2002). Impulsionado principalmente pelas indústrias de pré-moldados e em obras de reparos e reforços estruturais (OKAMURA; OUCHI, 1999 apud CAVALCANTI, 2006), registra-se ainda na década de 90 do século XX, um aumento no consumo de CAA. Tutikian e Dal Molin (2008) apresentam uma série de fatores que elevaram o consumo de CAA impulsionados pelas indústrias de pré-moldados conforme segue:

- ✓ Em aplicações de concreto in loco, caso ocorra falha total na etapa do adensamento, isto pode conduzir a um processo de demolição total do elemento podendo acarretar outros problemas ao sistema estrutural, fato este não observado na indústria de pré-moldados, uma vez que é necessário descartar o elemento;
- ✓ por se tratar de um setor da construção civil tecnologicamente mais evoluído, este apresenta um melhor controle dos seus custos como também um entendimento sobre os mesmos (PACIOS, 2005 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008);

- ✓ a indústria de pré-moldados normalmente produz concretos com elevadas resistências, sendo este, portanto um fator que viabiliza o alcance das propriedades de autoadensabilidade;
- ✓ a dinâmica de um canteiro de obras por vezes dificulta a adoção de controle de qualidade complexo que, no caso do concreto autoadensável, estes são extremamente necessários.

Diante do supracitado, Cavalcanti (2006) cita que no Japão a parcela de CAA que corresponde à produção de pré-fabricados é de 0,55% enquanto que em relação ao concreto usinado o CAA corresponde a 0,15%.

Ainda assim até o presente, a literatura tem restringido o uso do CAA em aplicações de elementos geometricamente complexos ou densamente armados (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

De acordo com as referências atuais destacam-se a aplicação de CAA:

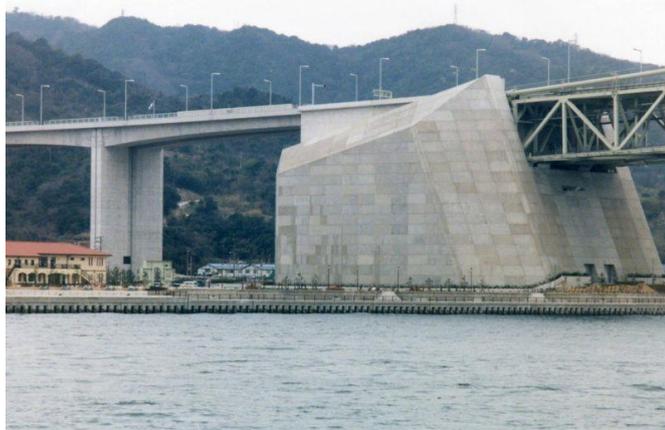
- Na construção da ponte Akashi Kaikyo (Figuras 7 e 8), no Japão, onde em apenas dois blocos de ancoragem foram consumidos cerca de 500.000 m<sup>3</sup> de CAA. Graças à tecnologia do CAA, o prazo de entrega foi reduzido em aproximadamente 3 meses (OKAMURA, 1997 apud GOMES, 2002).

**Figura 8 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo (Japão)**



Fonte: Cavalcanti, 2006.

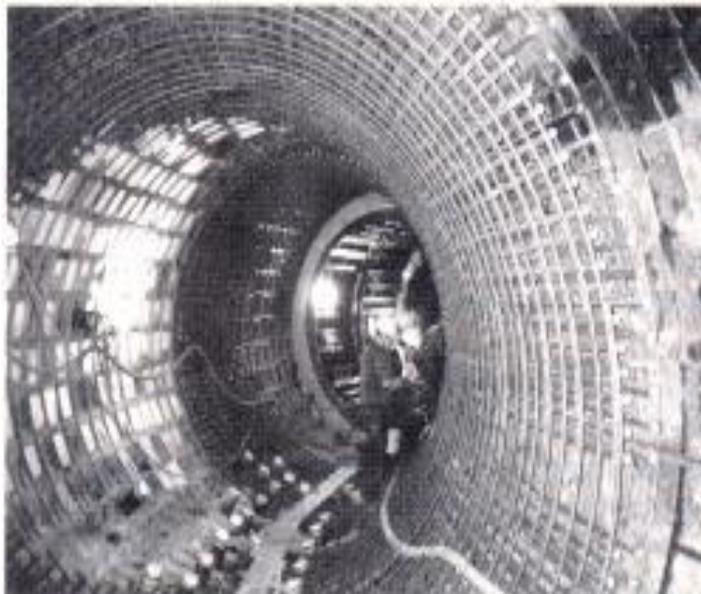
**Figura 9 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo (Japão - vista 2)**



Fonte: Cavalcanti, 2006.

- No preenchimento das paredes de um túnel construído em Yokohama no Japão (Figura 9), com três metros de diâmetro e um quilômetro de comprimento, nele foram utilizadas duas camadas de aço protendido, sobre o qual a cobertura fora realizada em CAA, numa aplicação de 40 m<sup>3</sup> (TAKEUCHI et al., 1994 apud GOMES; BARROS, 2009). Ainda no Japão, foi utilizado CAA na execução de grandes tanques para gases liquefeitos.

**Figura 10 – Túnel construído em Yokohama (Japão)**



Fonte: Gomes (2002 apud CAVALCANTI, 2006)

- Fora do Japão, de acordo com Billberg (1999 apud LISBÔA, 2004), a primeira aplicação de CAA ocorreu na construção de três pontes no ano de 1998 na Suécia.

- Sciaraffia (2003) apud Cavalcanti (2006) cita que há registros da utilização de CAA na construção de um túnel no Chile, com aproximadamente 6.000 m de extensão, diâmetros variando entre 2,5 m e 3,0 m e com profundidade média de 9 m.
- Em Milão na Itália, utilizou-se CAA numa fundação de um cais para sustentação de um moinho cujas dimensões eram de 14 m de comprimento, 10<sup>o</sup>m de largura e 4 m de profundidade (PARIS et al., 2003, apud CAVALCANTI, 2006).
- No Brasil, pode-se citar a aplicação de CAA numa construção de um edifício residencial na Cidade de Goiânia-Goiás em 2004 (GEIYER, 2005 apud TUTIKIAN, 2007) e de acordo com Paumgartten (2010) ainda em Goiânia foi utilizado CAA nas obras de ampliação do Shopping Flamboyant.
- Em São Paulo, segundo Paumgartten (2010), no ano de 2008 o CAA foi aplicado na obra de um condomínio residencial. Segundo o autor a opção pelo CAA promoveu redução no tempo de lançamento e redução no número de colaboradores. Ainda em São Paulo aplicou-se CAA nas obras do Metrô. Na ocasião foram lançados 8.000 m<sup>3</sup> numa laje moldada in loco, sendo 600 m<sup>3</sup> aplicados nas regiões de engaste da laje com as paredes dos poços (PAUMGARTTEN, 2010).
- Em Belém-PA, de acordo com Construbase (2010) citado por Paumgartten (2010), foi utilizado CAA na execução das estacas submersas da ponte sobre o rio Guamá (figura 10), nas vigas do elevado Daniel Berg (Figura 11).

**Figura 11 – Ponte sobre o rio Guamá, Belém –PA.**



Fonte: Construbase (2010 apud PAUMGARTTEN, 2010).

**Figura 12 – Elevado Daniel Berg, Belém-PA**



Fonte: Paumgarten, 2010.

- Na Cidade do Recife, capital pernambucana, de acordo com Andrade et al (2013), foi aplicado o CAA na obra da Arena Pernambuco (Figura 12). Esta obra consumiu aproximadamente 58.000 m<sup>3</sup> de concreto, sendo 40% deste total correspondente a CAA (ANDRADE, et. al., 2013).

**Figura 13 – Aérea da Arena Pernambuco (PE)**



Fonte: Andrade et al., 2013.

Segundo Andrade et. al. (2013) a opção pelo CAA se deu por conta das elevadas taxas de armadura, a necessidade de redução no tempo de lançamento e adensamento, além de redução no tempo de execução das estruturas em concreto armado.

Cabe salientar que o CAA ainda apresenta aplicação reduzida devido ao fato de poucos profissionais possuírem as condições e técnicas de produção além de apresentar maior custo quando comparado à aplicação dos chamados concretos convencionais (CCV).

### 2.5.1 Materiais utilizados para CAA

Os materiais constituintes do CAA são os mesmos utilizados na produção de concretos convencionais, ou seja, sua obtenção se dá a partir de uma mistura devidamente dosada de agregado miúdo, agregado graúdo, cimento Portland e água, no entanto visando alcançar as propriedades particulares deste concreto faz uso de adições minerais e/ou modificadores de viscosidade além de ser imprescindível a incorporação de aditivo superplastificante.

No CAA a fase pasta é responsável por determinar os aspectos reológicos tais como fluidez, coesão, consistência e outras propriedades relacionadas às características do concreto no estado fresco. Neste contexto, Carbonari et al. (2003 apud FERREIRA; DINIZ 2007, p. 2) citam que:

O comportamento reológico da pasta é influenciado, entre outras, por variáveis como: o consumo e o tipo de adição mineral, a relação água/cimento, o tipo de cimento, a dosagem e o tipo de superplastificante, e o tempo e a sequência de mistura [...].

#### 2.5.1.1 Aditivos e adições

Para Roncero (2000), nos dias atuais, os aditivos representam um material essencial para obtenção de concreto, principalmente em se tratando de concretos especiais de elevado desempenho, uma vez que estes devem apresentar melhores propriedades mecânicas e durabilidade, o que é possível alcançar tais objetivos através da incorporação tanto de aditivos químicos ou adições minerais, como também o uso de técnicas especiais de produção.

Os conhecidos aditivos superplastificantes são materiais com capacidade de promover significativa redução no consumo de água em misturas de concreto e, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), esta redução chega a ser de três a quatro vezes superior em relação à ação dos aditivos redutores de água normais.

Além dos superplastificantes, devido as propriedades exigidas para o CAA no estado fresco, comumente, podem ser utilizadas adições minerais inertes, pozolânicas ou hidráulicas (TUTIKIAN; DAL MOLIN 2008), cuja finalidade é promover e manter a coesão dos componentes além de contribuir na resistência à segregação (EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING FOR CONCRETE, 2005). As adições, segundo a EFNARC (2005), são classificadas de acordo com a sua capacidade reativa em presença de água, conforme mostra o Quadro 1.

**Quadro 1 – Classificação das adições utilizadas para obtenção de CAA**

<b>TIPO I</b>	Inerte ou semi-inerte	Fíler calcário, dolomita, etc
<b>TIPO II</b>	Pozolânicos	Sílica ativa, Cinza volante
	Hidráulicos	Escória de alto forno

Fonte: Baseado na EFNARC (2005, p.15).

É comum em muitas partes do mundo o uso de subprodutos industriais como fonte primária de adições minerais no concreto, contribuindo dessa forma para a preservação do meio ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Neste contexto, Lisboa (2004) e Cavalcanti (2006) analisaram os efeitos da incorporação de resíduo do mármore e do granito (RBMG) como adição mineral na obtenção de CAA. A utilização deste material resultou em concretos com propriedades de autoadensabilidade satisfatórias, justificando-se o incentivo de seu uso, uma vez que

promove a minimização dos impactos ambientais decorrentes da disposição irregular dos resíduos.

Em relação à incorporação de aditivos modificadores de viscosidade e adições, Koehler (2007) classificam os métodos de dosagem de CAA em três categorias, em uma delas observa-se o uso de elevado volume de materiais finos e baixa relação água/cimento; uma segunda categoria apresenta baixo conteúdo de materiais finos, maior relação água/cimento e a incorporação de aditivo modificador de viscosidade; e, uma terceira categoria que apresenta moderado conteúdo de materiais finos e moderada relação água/cimento.

O emprego de agentes modificadores de viscosidade em mistura de CAA não é imprescindível, no entanto, sua incorporação em conjunto com superplastificantes de última geração permite obter misturas estáveis e de grande fluidez. Para tanto, sua dosagem e compatibilidade deve ser determinada a partir de ensaios prévios (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

#### 2.5.1.2 Agregados

Referente à obtenção de CAA, não há distinção normativa para os agregados que são aplicados em misturas de CCV, porém para Isaia (2010) é fundamental conhecer a classificação dos agregados bem como a determinação de suas principais propriedades e especificações limites de aceitabilidade, com vistas a obter melhor qualidade seja qual for a obra de engenharia.

Tendo em vista as características e propriedades exigidas para o CAA, de acordo com a European Federation of National Associations Representing for Concrete (2005), é recomendável limitar a dimensão máxima do agregado na faixa de 12 mm a 20 mm, enquanto que para Koehler (2007) deve-se utilizar agregados com dimensão máxima característica compreendida entre 8 mm e 13 mm.

Essa recomendação deve-se ao fato de que agregados com maiores dimensão afetam negativamente propriedades como fluidez e habilidade passante do CAA. Contudo, de acordo com Gomes e Barros (2009), há relatos de obtenção de CAA com agregado graúdo de dimensão máxima característica de 40 mm.

Além da limitação da dimensão máxima característica do agregado graúdo, Barros e Gomes (2009) citam que o volume de agregado graúdo comumente empregado em misturas de CAA encontra-se compreendido entre 28% e 35% do

volume de concreto. Com isso, o consumo de agregado graúdo está compreendido entre  $750 \text{ kg/m}^3$  e  $950 \text{ kg/m}^3$ , enquanto que o volume de agregado miúdo encontra-se compreendido entre 40% e 50% do volume de argamassa com proporções aproximadas de  $710 \text{ kg/m}^3$  a  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Observa-se que as misturas de CAA comumente apresentam volume inferior de agregados quando comparadas com as misturas de CCV.

Okamura (1997) recomenda que o volume de agregado miúdo seja fixado em 40% do volume de argamassa, enquanto que para o agregado graúdo este valor é fixado em 50% do volume de sólidos presentes na mistura.

### 2.5.1.3 Aglomerante

Um das exigências para obtenção do CAA é a incorporação de uma grande quantidade de materiais finos, de modo a garantir maior coesão e evitar a segregação do agregado graúdo na mistura de concreto. As misturas de CAA demandam maior volume de pasta quando comparadas às misturas de CCV, o que conseqüentemente pode elevar o custo deste material.

A literatura tem apresentado uma faixa média de consumo de cimento compreendido entre  $350 \text{ kg/m}^3$  e  $550 \text{ kg/m}^3$  para obtenção das propriedades de autoadensabilidade (KHAYAT; HU; MONTY, 1999; EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING FOR CONCRETE, 2005; GOMES, 2002; WESTERHOLM, 2003; LISBÔA, 2004). No entanto, Gomes e Barros (2009) chamam a atenção para quando o consumo de cimento ultrapassa a taxa de  $500 \text{ kg/m}^3$ , citando que nestes casos devem ser tomados maiores cuidados devido ao surgimento de possíveis problemas relacionados à retração.

Com isso, Gomes e Barros (2009) recomendam o consumo de cimento, a depender do tipo de adições utilizadas nas misturas, na faixa de  $200 \text{ kg/m}^3$  a  $450 \text{ kg/m}^3$ .

Diante do supracitado, a Tabela 4 apresenta parâmetros de dosagem de CAA indicados pela European Federation of National Associations Representing for Concrete, 2005).

**Tabela 4 – Parâmetros comumente utilizados para obtenção de CAA**

Constituinte	kg/m <sup>3</sup>	Litros/m <sup>3</sup>
Finos	380 - 600	
Pasta		300 - 380
Água	150 - 210	150 - 210
Agregado graúdo	750 - 1000	270 - 360
Agregado miúdo	Conteúdo de volume balanceado a partir de outros constituintes, tipicamente 48% - 55% da massa total de agregados.	
Relação água/cimento (em volume)		0,85 – 1,10

Fonte: Baseado na EFNARC, 2005.

### 2.5.2 Métodos de dosagem

Para Tutikian e Dal Molin (2008), a dosagem do CAA era vista como sendo um ponto crítico, uma vez que os métodos existentes foram propostos antes da incorporação de materiais como aditivos de últimas gerações como, por exemplo, os superplastificantes à base de policarboxilatos. Cavalcanti (2006) cita que os métodos de dosagem do CAA não são fundamentados simplesmente nas suas características de fluidez, mas também devem considerar sua capacidade de passar por entre obstáculos sem que ocorra bloqueio ou segregação.

Em relação aos métodos de dosagem para confecção do CAA, estes diferem dos métodos adotados para obtenção do CCV e, com isso, desde sua descoberta são vários os estudos que têm sido desenvolvidos com foco na otimização e padronização dos procedimentos de dosagem do CAA.

Atribui-se a Okamura o primeiro método de dosagem de CAA. Tal método parte do princípio de que, para efeito de dosagem, o concreto possui duas fases: a fase agregado graúdo e a fase argamassa. Desde então, a partir de novos estudos, outros métodos de dosagem de CAA tem surgido, tais como Peterson, Billberg e Van; Su et al.; Repette Mello; Tutikian; Tutikian e Dal Molin (2008); EFNARC; Saak et al e Gomes, Gettu e Agulló (GOMES; BARROS, 2009).

Para a European Federation of National Associations Representing for Concrete (2005), são várias as instituições acadêmicas, fabricantes de aditivos, usinas de concreto, empresas de pré-moldados e companhias contratadas que têm tido como foco estudos voltados para a dosagem de CAA e neste sentido tem desenvolvido seus próprios métodos de dosagem.

Alguns métodos dividem a dosagem do CAA em duas etapas independentes conforme suas fases: dosagem da pasta e a dosagem do agregado. Dentro deste contexto podem ser citados os métodos de Gomes, Gettu e Aguló, Peterson, Bilberg

e Van; Su et al; Tutikian e Dal Molin. Tais métodos fazem uso do método experimental baseado no menor índice de vazios cujos procedimentos são referenciados na NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) ou na norma americana C29/C29 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1986) para definir a dosagem do esqueleto granular que deverão compor o CAA.

A aplicação do método de Peterson, Bilberg e Van visa determinar o menor consumo de pasta de acordo com o espaçamento disponível nas formas, visando, portanto, a eliminação de bloqueios (GOMES; BARROS, 2009).

O método de Su et al. (2001 apud GOMES; BARROS, 2009) faz uso das recomendações normativas constantes na norma americana C29/C29 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1986) com o propósito de determinar o índice de vazios de uma quantidade de agregados previamente determinada e com isso preencher os vazios existentes entre as partículas dos agregados não compactados com pasta de cimento. Neste método a quantidade de agregados é determinada através de formulações matemáticas utilizando o conceito de fator de empacotamento.

Gomes e Barros (2009) citam que o método proposto por Tutikian e Dal Molin utiliza vários conceitos como os apresentado por O'Reilly (1992) na determinação do empacotamento granular máximo e o conceito do efeito contêiner apresentado por Larrard (1999) para a escolha dos materiais.

Uma das etapas do referido método consiste em determinar um mistura composta por dois materiais cujo índice de vazios seja o mínimo possível entre eles. Cabe ressaltar que o método prevê o empacotamento de todas as partículas sólidas constituintes do concreto.

O método de Gomes, Gettu e Aguló (2002; 2003 apud GOMES; BARROS, 2009) prevê que o comportamento do fluxo do concreto é governado pelas características de fluidez e viscosidade da pasta. Esse mesmo conceito, segundo Gomes e Barros (2009) foi adotado por outros autores em outros métodos para determinação para CAR tais como: Larrard (1999); Mehta e Aïtcin (1990); Mindess (1994); Toralles-Carbonari et al. (1996) e no caso do CAA este mesmo conceito tem sido aplicado nos métodos proposto por Nan Su et al. (2001); Saak et al. (2001) e Smemplass e Mørtzell (2001).

### 2.5.3 Composições de agregados

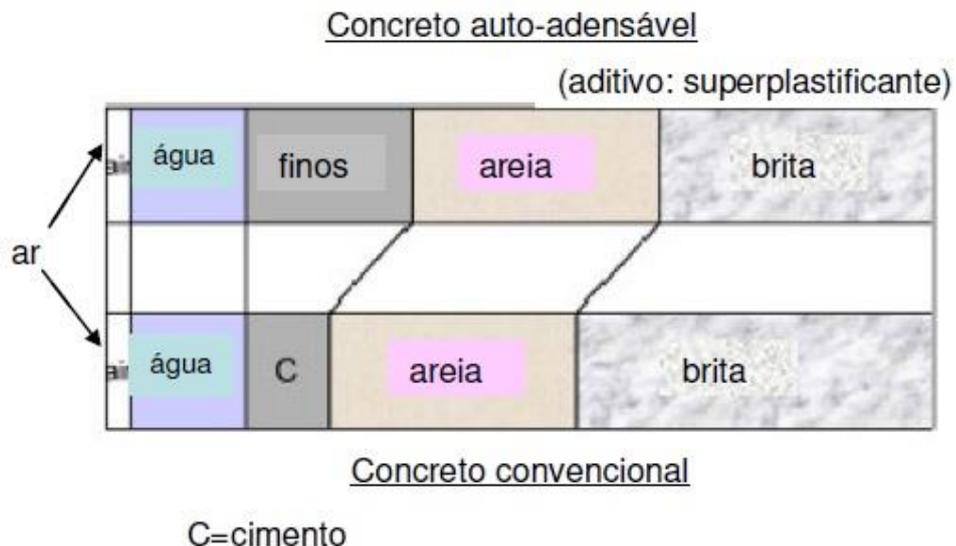
Mehta e Monteiro (2008) definem a composição granulométrica como sendo o arranjo das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, comumente expressa em percentuais acumulados, maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma determinada série de peneiras. Dentre os motivos pelos quais se deve conhecer esta característica do agregado, de acordo com Helene e Terzian (1992) está o fato de esta propriedade influenciar diretamente na qualidade dos concretos interferindo em propriedades tais como: compactidade e resistência.

Outra observação que justifica a necessidade de se conhecer a granulometria e a dimensão do agregado está no fato de que estas características influenciam diretamente na trabalhabilidade e no custo do produto final. Além disso, Mehta e Monteiro (2008) citam que agregados com granulometria contínua produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

De acordo com a European Federation of National Associations Representing of Concrete (2005), o CAA é um material que apresenta desempenho diferenciado pelo melhor empacotamento do esqueleto granular e como consequência menor quantidade de vazios.

Em composições de CAA, em comparação com as de CCV, observa-se significativa diferença nas quantidades de materiais que constituem as misturas, como ilustrado na Figura 13.

**Figura 14 – Comparação de composição de CAA com CCV**



Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi, 2003.

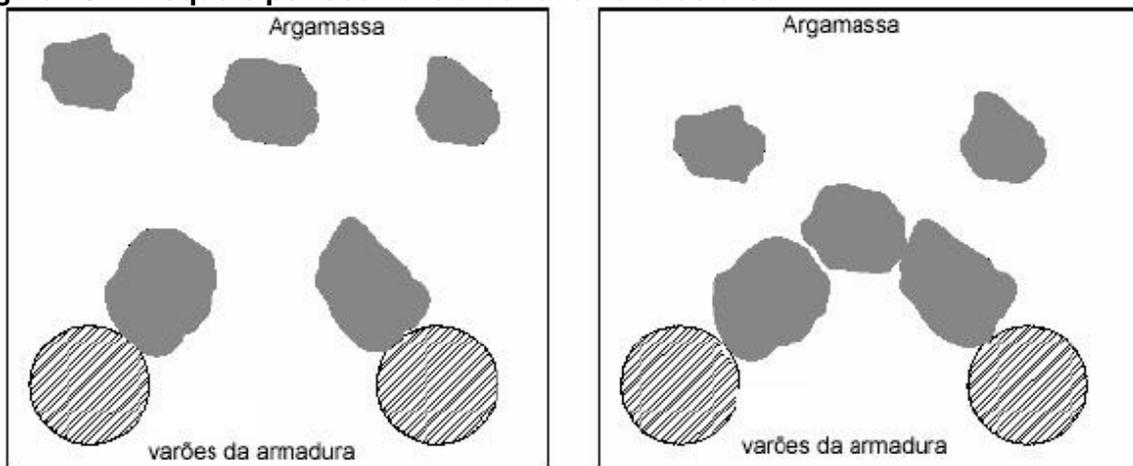
Nota-se através da Figura 13 que as misturas de CAA possuem maior quantidade de materiais finos e menor volume de agregado graúdo do que as misturas de CCV. Isso ocorre devido à necessidade de conferir ao concreto maior estabilidade e boa resistência à segregação. Gomes e Barros (2009, p. 52) reforçam a teoria ao afirmar que:

CAA deve conter baixo volume de agregado graúdo, entre 28% e 35 % do volume de concreto, e uma relação de peso agregado graúdo/concreto de 32% a 40%, com proporções aproximadas de 750 kg/m<sup>3</sup> a 920 kg/m<sup>3</sup>. O volume de agregado miúdo varia entre 40% e 50% do volume de argamassa, com proporções aproximadas de 710 kg/m<sup>3</sup> a 900 kg/m<sup>3</sup>.

Elevados volumes de agregado graúdo em misturas de concreto promovem maior ocorrência de colisões e contato entre partículas de agregados ocasionando, desta forma, aumento de tensão interna no momento em que o concreto flui. Neste sentido um dos requisitos para as dosagens de CAA devem apresentar baixo volume de agregado graúdo.

Nesse contexto a propriedade de resistência à segregação do concreto é influenciada diretamente pela distribuição das partículas dos agregados (MANUEL, 2005) e CAA com baixa resistência a segregação pode resultar em baixa deformabilidade, bloqueio, ocorrência do arco (Figura 14), alta retração por secagem e resistência à compressão não uniforme (NUNES, 2001).

**Figura 15 – Bloqueio por ocorrência do fenômeno do arco**



Fonte: Nunes, 2001.

Para Gomes e Barros (2009), por esqueleto granular entende-se como sendo a composição entre agregados miúdos e graúdos que, de acordo com O'Reilly (1998 apud GOMES; BARROS, 2009); Petersson et al. (1996); Toralles e Carbonari et al.

(1996), pode ser definida considerando a densidade da mistura dos agregados com menor teor de vazios.

Observa-se que é comum a utilização de composições binárias de agregados na obtenção de CAA como nos trabalhos de Andrade et al. (2013); Araújo e Diniz (2007); Assié et al. (2006); Cavalcanti (2006); Lisboa (2004); Manuel, (2005); Sangalli et al. (2013); Silva, Alves e Azevedo (2013); Silva et al. (2013); Sonebi (2009).

Entretanto, encontra-se disponível na literatura contemporânea trabalhos que fazem menção à utilização de composições ternárias como nos trabalhos de Coelho e Carbonari (2013); Moraes (2010) e Tutikian (2007), e com menor frequência a aplicação de composições quaternárias como no trabalho de Melo (2005) e Leite (2007).

Melo (2005) enfatiza a importância de serem adotadas medidas criteriosas na escolha de agregados para a obtenção de CAA, como o espaçamento entre as armaduras sendo a distribuição granulométrica o fator mais relevante a ser avaliado. Melo (2005) obteve, a partir da literatura (BUI et al., 2002; GOMES, 2002; GUEZAL; KHAYAT, 2002; NUNES, 2001; RAVINDRARAJAH, 2003) uma faixa granulométrica como referência para a composição de CAA conforme mostra a Tabela 5.

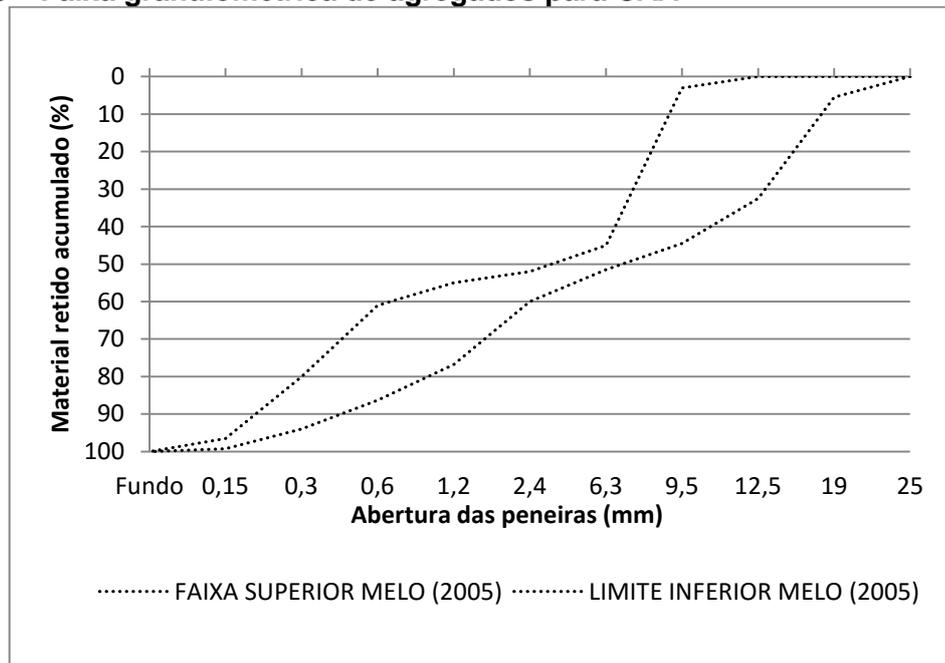
**Tabela 5 – Distribuição granulométrica de agregados para CAA**

Peneira (mm)	% Retida acumulada	
	Mínimo	Máximo
38	0,0	0,0
25	0,0	0,0
19,5	5,5	0,0
12,5	32,5	0,0
9,5	44,5	3,0
4,8	51,5	45,0
2,4	60,0	52,0
1,2	76,8	55,0
0,6	86,3	61,0
0,3	94,0	80,0
0,15	99,3	96,5

Fonte: Melo, 2005.

A Figura 15 representa a faixa granulométrica delimitada a pelas distribuições granulométricas apresentadas na Tabela 5.

**Figura 16 – Faixa granulométrica de agregados para CAA**



Fonte: Melo, 2005.

#### 2.5.4 Ensaios no estado fresco

Para ser classificado como autoadensável o concreto deve ser capaz de fluir por entre as armaduras, preencher os vazios das fôrmas sem a necessidade de vibração mecânica além de e apresentar boa resistência à segregação, não ocorrendo, portanto, surgimento de bolhas de ar ou falhas de concretagem, sem que para isso seja necessária a aplicação de energia mecânica (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Dentro deste contexto Paumgarten (2010, p.18) cita que:

Quando o concreto escoar dentro da fôrma atravessando obstáculos, não deve segregar. Pode-se observar que, uma mistura pode estar aparentemente coesa e quando lançada apresentar segregação. Portanto, se faz justo a utilização dos ensaios no estado fresco para se constatar que não é apresentada nenhuma segregação.

Devido às suas particularidades, com o intuito de serem analisadas as propriedades de auto adensabilidade do concreto, foram desenvolvidos ensaios específicos para a análise das propriedades do CAA conforme mostra o Quadro 2.

**Quadro 2 – Ensaio para aferição da trabalhabilidade**

Ensaio	Propriedade avaliada
Espalhamento	Habilidade de fluir e preencher os espaços
Anel Japonês	Habilidade de fluir entre obstáculo
Funil V	Habilidade de fluir entre obstáculo
Caixa L	Habilidade de fluir entre obstáculo
Caixa U	Habilidade de fluir entre obstáculo
Orimet	Habilidade de fluir entre obstáculo
Anel J	Habilidade de fluir entre obstáculo
Tubo U	Capacidade de resistência segregação
GTM	Capacidade de resistência a segregação

Fonte: Baseado no EFNARC, 2002.

Atualmente, tanto nacionalmente como internacionalmente, alguns desses ensaios já são normalizados, como mostrado no quadro 3.

**Quadro 3 – Normas para ensaios de CAA no estado fresco**

ORIGEM	NORMA	DESCRIÇÃO
Americana	ASTM C 1611-09b	Ensaio do espalhamento
	ASTM C 1621-09b	Ensaio do anel J
	ASTM C 1610-06a	Ensaio de resistência à segregação
	ASTM C 1712-09	Ensaio de resistência à segregação
Europeia	EN 12350-8 (2010)	Ensaio do espalhamento
	EN 12350-9 (2010)	Ensaio do funil V
	EN 12350-10 (2010)	Ensaio da caixa L
	EN 12350-11 (2010)	Ensaio de resistência a segregação
	EN 12350-12 (2010)	Ensaio do anel J
Brasil	NBR 15823-1 (2010)	Classificação, controle e aceitação
	NBR 15823-2 (2010)	Ensaio de espalhamento
	NBR 15823-3 (2010)	Ensaio do anel
	NBR 15823-4 (2010)	Ensaio da caixa L
	NBR 15823-5 (2010)	Método do funil V
	NBR 15823-6 (2010)	Ensaio de resistência à segregação

Fonte: ASTM, 2009; EFNARC, 2010 e ABNT, 2010.

A Tabela 6 apresenta valores de referência recomendados pela norma europeia (EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING FOR CONCRETE, 2002), enquanto que na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de referência recomendados pela norma brasileira.

**Tabela 6 – Faixa de valores para os parâmetros dos testes de caracterização das propriedades de fluxo adotados pela EFNARC (2002)**

Propriedades	Ensaio	Unidade	Faixas típicas dos parâmetros	
			Mínimo	Máximo
Capacidade de preenchimento de formas	Espalhamento Cone Abrams	mm	650	800
	T <sub>50cm</sub> Cone Abrams	seg.	2	5
	Funil V	seg.	6	12
	Orimet	seg.	0	5
Capacidade de passagem por obstáculos	Caixa em L	(h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )	0,8	1,0
	Caixa em U	(h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> ) mm	0	30
	Caixa de preenchimento	%	90	100
	Orimet c/ anel de armaduras	mm	0	10
Resistência à segregação	GTM	%	0	15
	Funil V em T <sub>5 minutos</sub>	seg.	0	+3

Fonte: Lisboa, 2004.

**Tabela 7 – Classificação do CAA através das propriedades no estado fresco**

ENSAIO	REFERÊNCIA NORMATIVA	CLASSIFICAÇÃO NBR 15823 – parte 1 (ABNT, 2010)	
Determinação do espalhamento (método do cone de Abrams)	NBR 15823 – parte 2 (ABNT, 2010)	SF1	550 mm – 650 mm
		SF2	660 mm – 750 mm
		SF3	760 mm – 850 mm
Determinação da viscosidade (método do Funil V)	NBR 15823 – parte 5 (ABNT, 2010)	VF1	< 9 seg
		VF2	9 seg a 25 seg
Determinação da habilidade passante (método da Caixa L)	NBR 15823 – parte 4 (ABNT, 2010)	PL1	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> ≥ 0,8 (2 barras)
		PL2	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> < 0,8 (3 barras)

Fonte: Baseado na ABNT. NBR 15823, 2010 partes 1, 2, 4 e 5.

A NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) recomenda para cada classe de CAA uma determinada aplicação conforme mostrado nos Quadros 4 e 5.

**Quadro 4 – Aplicação do concreto quanto a classe de espalhamento**

CLASSE DO ESPALHAMENTO	APLICAÇÃO	EXEMPLO
SF1	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre Concreto auto-adensável bombeado Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto-adensável	Lajes Revestimento de túneis Estacas, certas fundações profundas
SF2	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Paredes, vigas, pilares e outras
SF3	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Pilares-parede Paredes diafragma Pilares

Fonte: ABNT. NBR 15823, 2010.

**Quadro 5 – Aplicação do CAA quanto a classe de viscosidade plástica**

ENSAIO	CLASSE DA VISCOSIDADE PLÁSTICA APARENTE	APLICAÇÃO	EXEMPLO
FUNIL V	VF1	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
	VF2	Adequado a para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ocorrer na superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e interrupções ou demora entre sucessivas camadas	Vigas, pilares e outras
CAIXA L	PL1	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 800 mm a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de Fundação
	PL2	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados

Fonte: ABNT. NBR 15823, 2010.

Os ensaios mais usuais para determinação das propriedades de autoadensabilidade os quais foram empregados na realização deste trabalho, são abordados mais detalhadamente nos próximos itens.

#### 2.5.4.1 Ensaio de espalhamento

De acordo com Gomes e Barros (2009), o ensaio do espalhamento foi padronizado no Japão em 1990. É um dos mais utilizados por sua facilidade e pelo fato de os aparatos necessários para sua realização serem os mesmos utilizados no teste do abatimento do tronco de cone para CCV. Este ensaio tem como objetivo verificar a capacidade de preenchimento do CAA através de sua relação com a fluidez (GOMES; BARROS, 2009).

De modo similar ao ensaio do abatimento do tronco de cone do concreto, o ensaio do espalhamento consiste em preencher o cone de Abrams apoiado sobre uma superfície metálica plana e nivelada, no entanto sem a compactação do material. Em seguida, ergue-se lenta e verticalmente o tronco de cone, permitindo desta forma que o concreto se espalhe sobre a superfície, geralmente assumindo forma circular. Durante o ensaio registra-se o tempo em que o concreto atinge o diâmetro de abertura de 500 mm ( $T_{50}$ ) e, ao fim do espalhamento aferem-se duas medidas perpendiculares entre si do concreto espalhado.

Os materiais utilizados para a realização do ensaio são basicamente um cone de Abrams; um cronômetro com precisão de 0,1 segundo, uma chapa de aço quadrada cujo comprimento deve ser de aproximadamente 1 m e espessura de 2 mm. A chapa metálica deve estar marcada em seu centro com um círculo de raio igual a 500 mm.

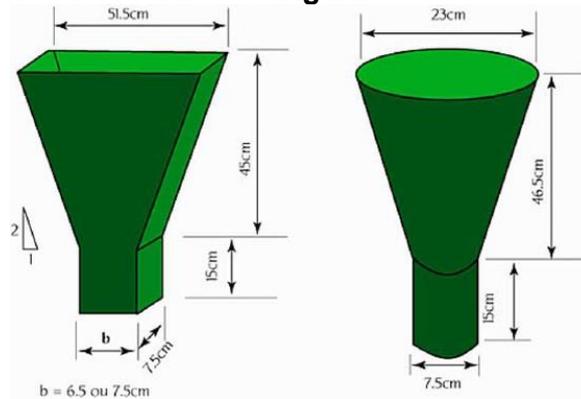
#### 2.5.4.2 Ensaio do Funil V

O ensaio do funil foi desenvolvido na Universidade de Tóquio no Japão e tem como princípio básico verificar o tempo necessário para que um determinado volume de concreto (aproximadamente 10 litros) flua totalmente passando por uma abertura localizada na parte inferior do funil, através unicamente da ação do próprio peso (GOMES; BARROS, 2009). Ainda segundo os autores, um tempo curto de esvaziamento do funil implica como sendo favorável à capacidade de fluxo com possibilidades de ocorrência de bloqueio e segregação, enquanto um tempo elevado implica alta viscosidade.

Para a realização deste ensaio é necessário dispor dos seguintes equipamentos:

- ✓ Funil em forma de V com dimensões conforme mostra a Figura 16.

**Figura 17 – Funil V abertura circular e retangular**

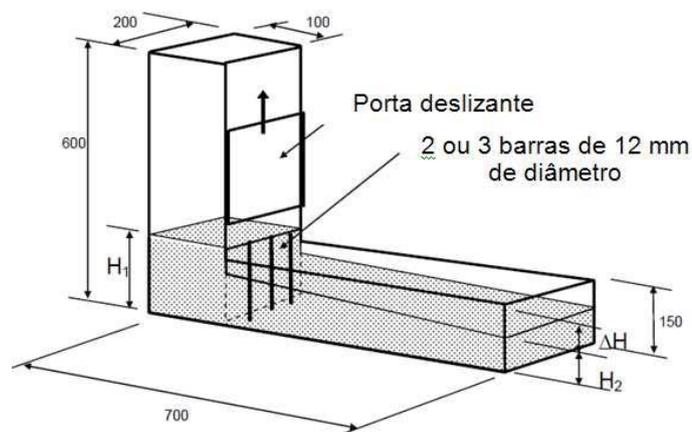


Fonte - Gomes (2002 apud TUTIKIAN; MOLIN, 2008)

### 2.5.4.3 Caixa L

O ensaio da caixa L (Figura 17) tem como objetivo analisar a fluidez do concreto juntamente com sua capacidade de passar por entre obstáculos sem que ocorra perda de coesão. Segundo Gomes e Barros (2009), este ensaio foi utilizado inicialmente por Peterson et. al. (1996), Sedran e Larrard (1999) e por Bertos e Grauers (1999).

**Figura 18 – Caixa L**



Todas as dimensões em milímetros

Fonte: EFNARC (2005 apud FOCHS, 2011).

A ocorrência de bloqueio pode ser observada visualmente uma vez que nesse caso, forma-se uma camada elevada retida por trás das armaduras.

### 2.5.5 Propriedade no estado endurecido

O concreto pode ser entendido como qualquer produto ou massa, obtido a partir do uso de um meio cimentante, sendo esse meio, na maioria das vezes, constituído por cimento hidráulico e água. Contudo, além de poderem ser utilizados vários tipos de cimento na confecção de concretos, podem compor a mistura, materiais pozolânicos tais como “cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras” (NEVILLE; BROOKS, 2013).

No que se refere à relação entre os componentes constituintes do concreto, Neville e Brooks (2013) mencionam três possibilidades, são elas:

1. o meio cimentício é considerado o principal material de construção. Nesse caso, os agregados são considerados apenas como materiais de enchimento. Cabe ressaltar que, apesar dos referidos autores mencionarem este possível entendimento entre a relação dos materiais constituintes do concreto, os mesmos afirmam que esta deve ser rejeitada, tendo em vista que os agregados não desempenham apenas papel de enchimento numa mistura de concreto;
2. os agregados graúdos são vistos como pequenos blocos de alvenaria unidos por argamassa, ou seja, pela mistura de cimento hidratado e agregados miúdos;
3. o concreto é constituído por duas fases, a matriz ou pasta de cimento e a composição de agregados. Dentro desse contexto, as propriedades do concreto são regidas pelas propriedades das duas fases, assim como, pelas interfaces entre elas.

A definição 3 (três) é a que tem sido adotada ao longo de todo este trabalho de pesquisa.

Neville (1997) cita que, no estado endurecido, o agregado não influencia apenas na resistência do concreto, uma vez que o uso de agregados com propriedades indesejáveis pode não somente produzir concretos de baixa resistência como também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

Por fim, ainda de acordo com Neville e Brooks (2013), o concreto é considerado um bom material quando suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido, são satisfatórias. Isto significa que, de modo geral, no estado fresco o concreto deve apresentar coesão e consistência suficientes para que seja transportado, lançado e adensado com os meios disponíveis no canteiro de obras sem que ocorra segregação da mistura; já no estado endurecido, a principal exigência diz respeito à resistência à compressão, que deve atender aos parâmetros especificados em projeto.

Cabe ressaltar que, a propriedade de resistência à compressão do concreto relaciona-se com outras propriedades tais como: massa específica, impermeabilidade, durabilidade, resistência à abrasão, resistência a impacto, resistência à tração e resistência a sulfatos, entre outras.

Campos (2013) afirma que as normas nacionais e internacionais referenciam a propriedade de resistência à compressão do concreto como a mais analisada em termos de controle tecnológico, tendo em vista a simplicidade de execução.

Numa mistura de concreto de massa específica normal, a porosidade contida na matriz e na zona de transição são os principais fatores que determinam a sua resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A relação água/cimento é o principal fator considerado na determinação da resistência à compressão do concreto, no entanto, não se devem descartar fatores tais como adensamento, condições de cura, tipos e teores dos demais constituintes do concreto, uma vez que estes também afetam tal propriedade.

Em concretos especiais é mais notória a influência dos agregados na resistência à compressão. Observa-se que, em concretos convencionais (CCV) a argamassa presente na mistura apresenta resistência inferior à do agregado graúdo, no entanto, em se tratando de concretos de alto desempenho (CAD), de acordo com Aïtcin (1997), a resistência à compressão das argamassas contida na mistura pode atingir a mesma ordem grandeza ou até mesmo superar a resistência do agregado.

Geyer e Sena (2002) observam que CAA e CCV com fator água/cimento na faixa de 0,3 a 0,4 apresentam valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade muito próximos.

Contudo, Santos et. al. (2013) citam que, no estado endurecido, a microestrutura e a interface agregado/pasta do CAA tendem a ser mais densas quando comparadas às dos CCV. Isso acontece, de acordo com Barros et al. (2006)

apud Santos et al (2013), porque no CAA há uma concentração maior de partículas finas presentes na interface, produzindo desta forma maior resistência à penetração de cloretos e gases, gerando também maior aderência às armaduras.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção detalha os materiais e os métodos utilizados para a realização deste trabalho. Trata-se de um trabalho experimental que tem como referência o estudo desenvolvido por Cavalcanti (2006).

Inicialmente, a partir do estudo de uma combinação binária de agregados definiu-se um procedimento padrão para determinar composições granulométrica com menor índice de vazios. Definido tal procedimento foram determinadas novas composições de agregados, variando-se entre as possíveis combinações obtidas a partir dos materiais que são apresentados nesta seção. Além disso foram confeccionados concretos visando as propriedades de autoadensabilidade cujos materiais e métodos de obtenção são apresentados nesta seção.

#### 3.1 Seleção os materiais

Os materiais utilizados na realização deste trabalho foram dois tipos de agregado graúdo natural de origem granítica e dois tipos de agregado miúdo natural de origem quartzosa, com distintas características físicas; cimento Portland CP II F 32; aditivo químico superplastificante à base de policarboxilato e resíduo do processo de corte de blocos de mármore e granito.

Sendo os agregados identificados da seguinte forma:

AF – areia fina cuja dimensão máxima característica é 1,2 mm;

AG – areia grossa cuja dimensão máxima característica é 2,4 mm

B12 – agregado graúdo cuja dimensão máxima característica é 12,5 mm;

B19 – agregado graúdo cuja dimensão máxima característica é 19,0 mm

Os agregados foram caracterizados conforme as recomendações normativas apresentadas no Quadro 6.

**Quadro 6 – Ensaio e normas utilizados na caracterização dos agregados**

Ensaio	Normalização
Massa específica do agregado miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa específica do agregado graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2003)
Massa unitária estado solto NM 45	Método C da NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Absorção de água do agregado miúdo	NBR NM 50 (ABNT, 2001);
Absorção de água do agregado graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2003);
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica e Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Procedimento do método da massa unitária e do índice de vazios

O método da massa unitária e do índice de vazios, conforme apresentado na revisão de literatura, é um método bastante utilizado para a obtenção de concretos especiais tais como o CAD e o CAA, contudo, observa-se sua aplicabilidade na obtenção de qualquer tipo de concreto. No entanto, é importante ressaltar que não há um procedimento padrão que norteie o ensaio, deste modo verificou-se a necessidade de avaliar alguns procedimentos aplicados no método e, a partir desta definir uma padronização do método para obtenção da composição de agregados com menor índice de vazios, tendo em vista que até o momento não há uma padronização.

O método experimental da massa unitária e do índice de vazios utilizados nessa pesquisa tem como referência o método C da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), a norma americana C29/C29M (ASTM, 1986), bem como a metodologia proposta por Gomes e Barros (2009).

Neste sentido, foram analisados dois procedimentos distintos: um com aproveitamento de materiais (CAM), e o outro sem aproveitamento de materiais (SAM). Em ambos os procedimentos os agregados são misturados a seco e em diferentes proporções por fim afere-se as massas para cada mistura utilizando-se um recipiente de volume conhecido.

No procedimento SAM, as proporções de agregados (A%:B%) são definidas previamente e a análise de cada composição ocorre de modo independente sendo o material utilizado em cada medição posteriormente descartado. Já no procedimento CAM, inicialmente fixa-se a massa de um dos agregados, o que corresponderá a 100%, esse por sua vez deve ser mais do que suficiente para preencher o volume usado nas medições. Fazendo, portanto, com que essa massa represente proporções menores, (100% - 0%) na mistura de interesse. Dessa forma, a cada composição definida, a massa do agregado que antes correspondia a 100%, embora permaneça inalterada, corresponderá a um valor inferior a 100%, neste sentido dever-se-á crescer e variar a massa do outro agregado de modo a obter uma composição previamente determinada para aferição de sua massa e do índice de vazios. Com isso pretende-se propor uma padronização do procedimento de modo a otimizar o processo.

Os itens i, ii e iii apresentam os distintos procedimentos experimentais analisados.

- i) Procedimento SAM: este procedimento consiste em realizar uma nova mistura para cada composição de agregados, sendo estas descartadas a cada aferição das massas unitárias;
- ii) Procedimento CAM: este procedimento consiste em fixar a massa de um dos agregados e variar a massa do outro para obtenção das composições desejadas. Desta forma foi denominado de CAM<sub>m</sub> o procedimento cujo agregado miúdo teve sua massa fixada e CAM<sub>g</sub> o procedimento cujo agregado graúdo teve sua massa fixada.
- iii) A variação da massa do agregado para cada mistura foi determinada de acordo com a equação 9.

$$MB = \frac{\%B \times MA}{\%A} \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo:

MB a massa de agregado B que deve estar contido na mistura;

MA a massa de agregado A contida na mistura;

%B a porcentagem representativa da massa de B que deverá estar contida na mistura;

%A a porcentagem representativa da massa de A presente na mistura.

Para aplicação desses procedimentos algumas observações fazem-se necessárias:

- ✓ Tanto no procedimento SAM como no CAM, para as aferições das massas unitárias foi utilizado um recipiente de geometria prismática de base quadrada com capacidade volumétrica de 5 dm<sup>3</sup>;
- ✓ No procedimento SAM o volume de material utilizado em cada ponto do ensaio foi o correspondente a 150% da capacidade volumétrica do recipiente utilizado para a aferição das massas;
- ✓ As quantidades de materiais a serem utilizados nos ensaios foram previamente determinadas de acordo com o procedimento a ser utilizado;

- ✓ De modo a minimizar o consumo de materiais foram analisadas as composições sugeridas por Díaz (1998), conforme mostrado na Tabela 2 do item 2.4;
- ✓ A partir das recomendações da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) foram determinadas as massas unitárias e calculados os índices de vazios, ambos representados graficamente.

Por fim, foi realizado um estudo comparativo entre os resultados obtidos através da aplicação dos diferentes procedimentos.

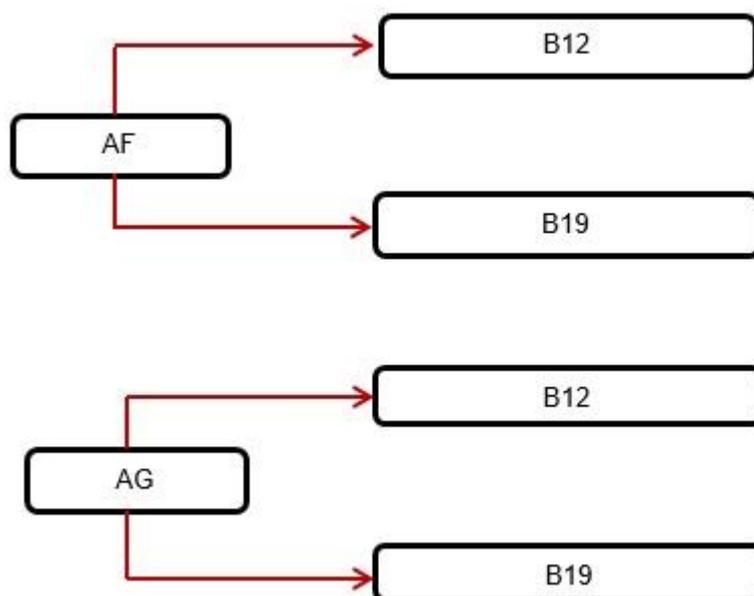
### 3.3 Determinação das combinações dos agregados

A partir dos agregados, cuja caracterização é apresentada no apresentados no item 4.1 e a definição do procedimento para determinação do composição ótima, foram determinadas 11 combinações, entre essas: seis binárias, quatro ternárias e uma quaternária. De modo geral o empacotamento dos agregados foi realizado dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro de partículas.

#### a) Combinações binárias

Foram definidas as combinações binárias conforme mostra a Figura 18.

**Figura 19 – Combinações binárias**

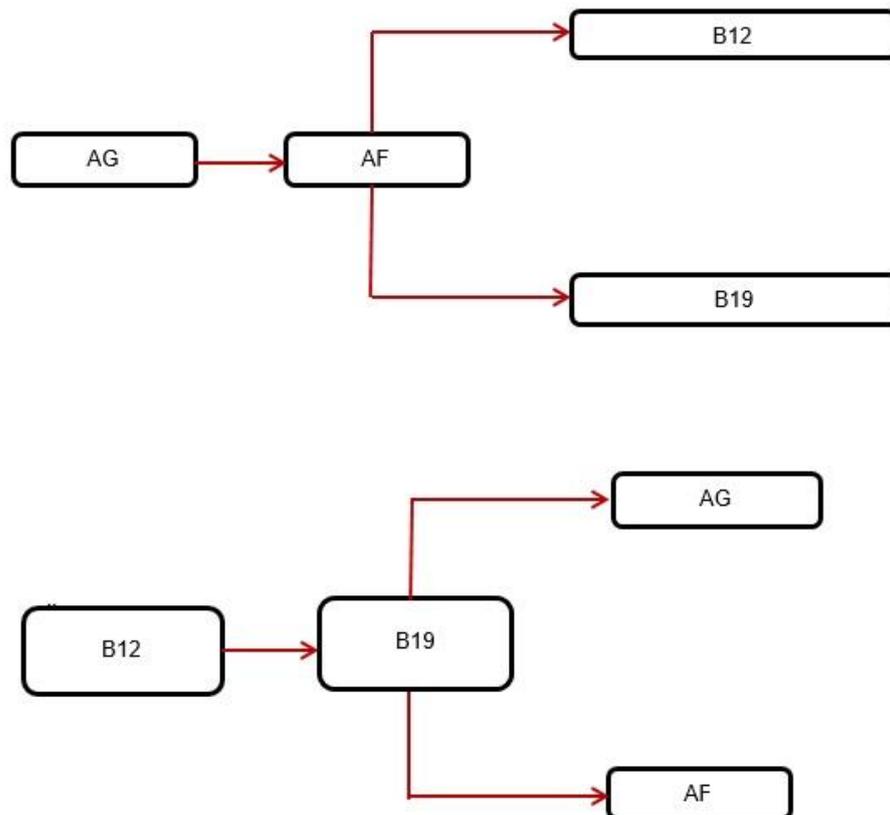


Fonte: Elaborada pelo autor.

### b) Combinações ternárias

Para as combinações ternárias, nos casos em que existiam dois agregados miúdos e um agregado graúdo, primeiramente definiu-se a composição ótima entre os agregados miúdos. Posteriormente, a composição binária resultante foi combinada com o agregado graúdo. Portanto, para cada agregado graúdo foi definida uma composição ternária. De maneira análoga realizou-se o empacotamento das combinações ternárias contendo dois agregados graúdos e um agregado miúdo conforme é mostrado na Figura 19.

**Figura 20 – Combinações ternárias**



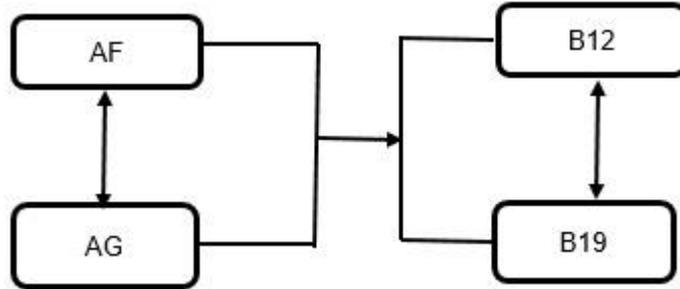
Fonte: Elaborada pelo autor.

### c) Combinação quaternária

A composição quaternária foi definida de maneira análoga as apresentadas anteriormente, sendo esta resultante da composição de todos os agregados (AFAGB12B19). Desta forma, a composição quaternária foi determinada a partir da combinação de composições binárias ótimas, sejam estas obtidas a partir da mistura

de agregados graúdos e a partir da mistura de agregados miúdos (AFAG + B12B19) conforme ilustra a Figura 20.

**Figura 21 – Combinação quaternária**



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.4 Determinação das composições de agregados

Uma vez definidas as combinações dos agregados bem como o procedimento para determinação das composições foram determinadas as composições de agregados para cada combinação (4 binárias, 4 ternárias e 1 quaternária). O método baseado no índice de vazios seguiu o procedimento  $CAM_{ag}$  apresentado no item 3.2.

Salienta-se que os agregados foram misturados dois a dois de modo que cada mistura, mesmo sendo ternária ou quaternária, foi realizada como sendo misturas binárias. O Quadro 7 apresenta a nomenclatura das combinações propostas.

**Quadro 7 – Nomenclatura das combinações propostas**

NOMENCLATURA		COMBINAÇÃO
<b>BINÁRIA</b>	AFB12	AF + B12
	AFB19	AF + B19
	AGB12	AG + B12
	AGB19	AG + B19
<b>TERNÁRIA</b>	AFAGB12	(AF + AG) + B12
	AFAGB19	(AF + AG) + B19
	AFB12B19	AF + (B12 + B19)
	AGB12B19	AG + (B12 + B19)
<b>QUATERNÁRIA</b>	AFAGB12B19	(AF + AG) + (B12 + B19)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Análise das composições

Definidas as composições de agregados, foram construídas as curvas da distribuição granulométrica para cada composição de agregado obtida, conforme descrito na NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Uma vez definidas as composições de agregados, foi realizado um estudo comparativo dessas composições com algumas relações paramétricas para dosagem de CAA (Tabela 8) e com a faixa granulométrica baseada nos estudos de Melo (2005) apresentada no item 2.5.3.

**Tabela 8 – Relações paramétricas para dosagem de CAA**

COMBINAÇÃO	RELAÇÃO PARAMÉTRICA DAS COMPOSIÇÕES OBTIDAS				
	Vag/Vat	Vag	Vam/Varg	Mag/m <sup>3</sup>	Mam/m <sup>3</sup>
	%	%/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
<b>REFERÊNCIA</b>	44 – 64	28 - 38	40 - 50	700 - 900	750 - 950

Fonte: Gomes e Barros (2009).

### 3.6 Formulações e produções dos concretos

Foram determinadas 09 (nove) composições de agregados, uma para cada combinação (quatro binárias, quatro ternárias e uma quaternária), conforme apresentado nos itens 3.3 e 3.4 a partir do método do menor índice de vazios.

Foram definidos portanto, 09 combinações de agregados para a obtenção de CAA. Definiu-se, uma única composição para a pasta de cimento composição da pasta de cimento com base nos estudos de Cavalcanti (2006). Inicialmente fixou-se o volume de pasta de cimento por metro cúbico de concreto em 40%, tendo ainda como referência os estudos de Cavalcanti (2006).

Para cada formulação de concreto foi confeccionado um volume equivalente a 20 litros de mistura, cuja produção se deu em betoneira com capacidade para 120 litros, seguindo a seguinte sequência:

- ✓ primeiramente, foram misturados em betoneira por tempo equivalente a 30 segundos a areia, a brita e a água de absorção dos agregados;
- ✓ em seguida foram adicionados o cimento e o RBMG aos agregados e misturados por 30 segundos;

- ✓ posteriormente adicionou-se a água correspondente a uma relação fixa equivalente a 80% do volume total da água da amassamento e misturou-se por 5,5 minutos;
- ✓ por fim foram adicionados o aditivo superplastificante e o restante da água (subtraída as correções) sendo portanto, tais materiais misturados durante 2 minutos.

### **3.7 Propriedades do concreto**

#### **3.7.1 Estado fresco**

As propriedades do CAA no estado fresco foram analisadas a partir do ensaio do espalhamento, do funil V e da caixa L (com três barras), disponíveis no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Alagoas.

#### **3.7.2 Resistência à compressão**

Para cada traço de concreto foram moldados 3 corpos de provas cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura sem compactação. Estes foram desmoldados após 24 horas em seguida foram mantidos imersos em água por 28 dias e rompidos em prensa hidráulica para verificação de sua resistência à compressão.

### **3.8 Otimização da pasta de cimento**

A partir da análise dos resultados dos ensaios no estado fresco (espalhamento, funil V e da caixa L), foram selecionadas as composições dos concretos que apresentaram melhores resultados entre as composições de agregados referente as combinações (binária, ternária e quaternária) para avaliar o seu desempenho com um menor volume de pasta. A formulação foi ajustada reduzindo o volume de pasta para 38% e 35%, tomando como referência as recomendações na literatura que define o volume de pasta para CAA de 35% a 42%. Para os concretos com estes volumes de pasta foram realizados os ensaios do espalhamento, funil V e caixa L, além da resistência à compressão.

## 4 RESULTADOS E ANALISES

### 4.1 Caracterização dos agregados

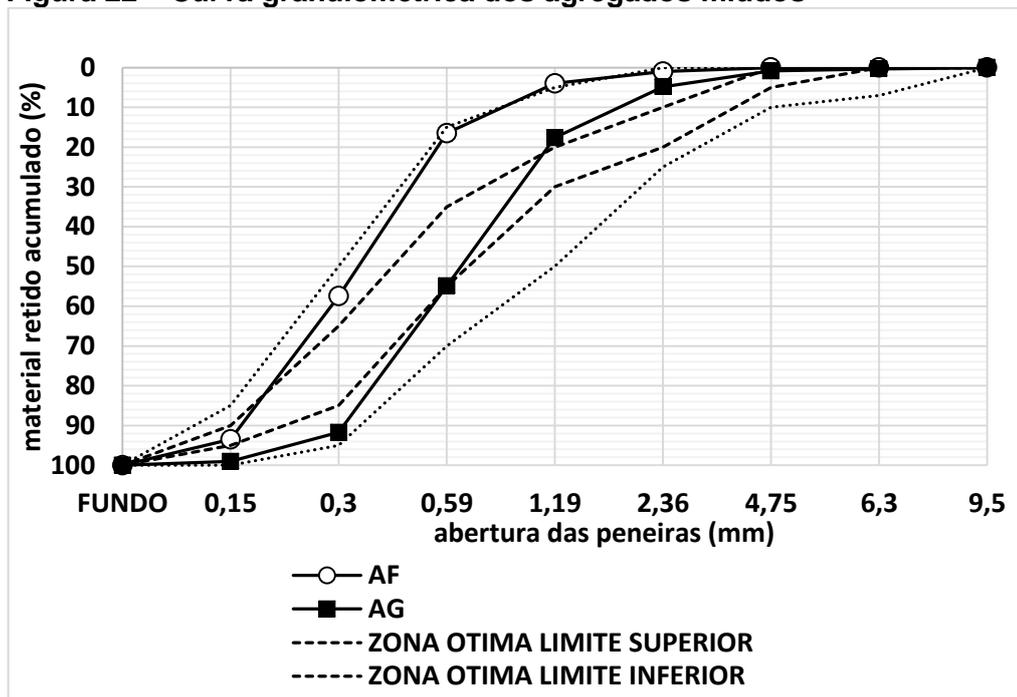
A Tabela 9 apresenta a caracterização dos agregados graúdos e miúdos, enquanto que nas Figuras 21 e 22 representam-se as curvas granulométricas dos agregados graúdos e miúdos utilizados na elaboração deste trabalho.

**Tabela 9 – Propriedades granulométricas dos agregados**

Ensaio	B12	B19	AG	AF
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,67	2,63	2,62
Massa unitária-estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,38	1,42	1,44	1,53
Absorção (%)	1,01	0,67	1,00	1,20
Índice de forma	2,25	2,40	-	-
Índices granulométricos				
Dimensão máxima característica (mm)	12,50	19,00	2,36	1,20
Módulo de finura	6,07	6,78	2,69	1,73

Fonte: Elaborada pelo autor.

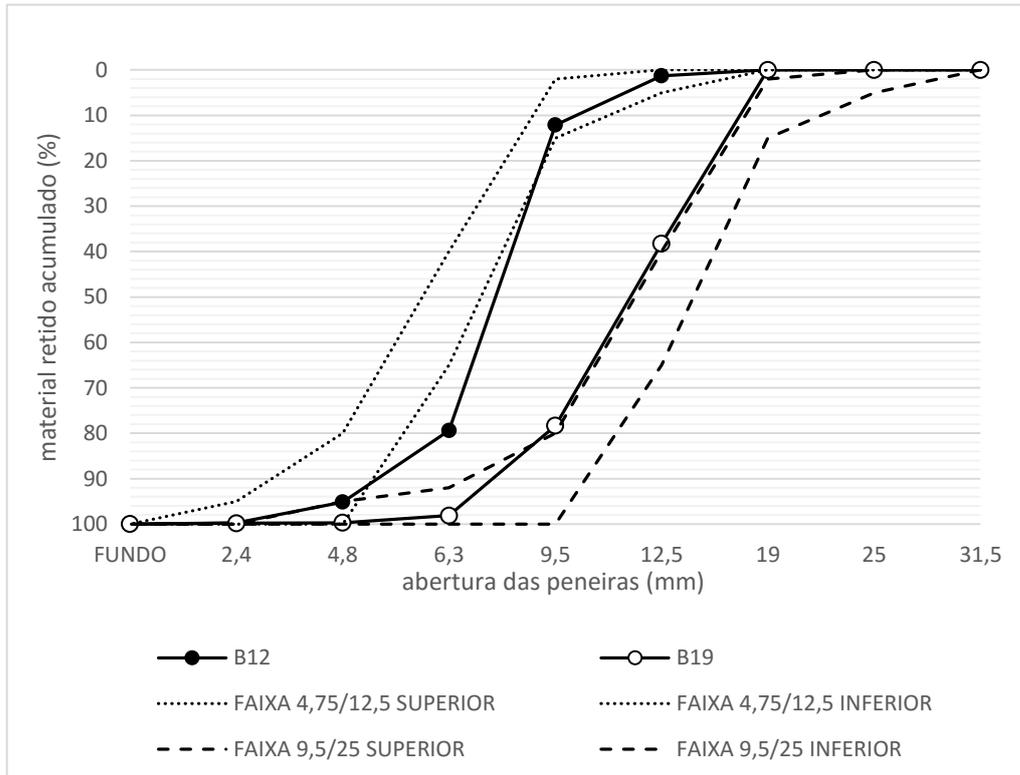
**Figura 22 – Curva granulométrica dos agregados miúdos**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 21 mostra que a distribuição granulométrica dos agregados miúdos encontram-se dentro da zona utilizável, no entanto, muito próxima do limite superior desta zona definida pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

**Figura 23 – Curva granulométrica dos agregados**



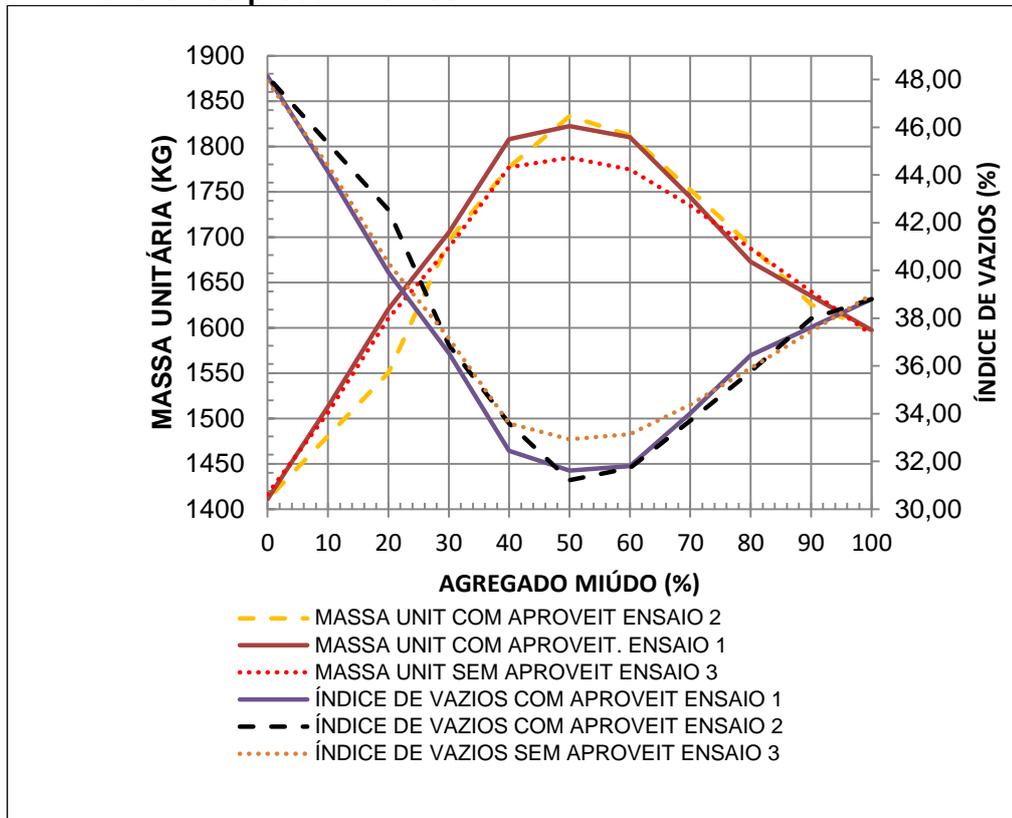
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra que o agregado graúdo B12 com dimensão máxima característica de 12,5 mm apresenta parte de suas partículas dentro da faixa que compreende os limites da zona definida por norma 4,75mm/12,5 mm enquanto que o agregado B19 gradualmente na faixa 9,5mm/25mm. Neste aspecto pode-se afirmar que os resultados obtidos a partir da caracterização dos materiais mostraram que os mesmos se enquadram nos parâmetros comumente encontrados na literatura no que se refere à confecção de CAA.

#### 4.1.1 Método experimental da massa unitária e do índice de vazios

Esta etapa teve como objetivo definir o procedimento para determinação da composição com menor índice de vazios a partir da aplicação do método da massa unitária. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 23.

**Figura 24 – Massa unitária e índice de vazios obtido a partir da aplicação dos diferentes procedimentos**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se, portanto, que em ambos os procedimentos analisados não houve divergência no que diz respeito a composição ótima dos agregados. Os valores referentes aos menores índices de vazio e maior massa unitária, para a mesma combinação ocorreram sempre para composições constituída por 50% de agregado miúdo e 50% de agregado graúdo conforme ilustrado na Figura 23.

Desta forma os resultados obtidos neste trabalho atendem uma das recomendações da European Federation of National Associations Representing for Concrete (2002), quando esta recomenda que em se tratando da composição de agregados para obtenção de CAA, o percentual ótimo de agregado miúdo está compreendido entre 40% e 50%. Além disso, tais resultados ratificam o que as revisões bibliográficas tem comumente apresentado como composições ótimas de agregados, conforme se pode observar na Tabela 10.

**Tabela 10 – Composições de agregados comumente utilizadas para obtenção de CAA**

AUTOR	COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS	AGREGADO GRAÚDO (%)	AGREGADO MIÚDO (%)
LISBOA (2004)	Binária	52,5	47,5
MELO (2005)	Quaternária	47	53
CAVALCANTI (2006)	Binária	50	50
MORAES (2010)	Ternária	46	54
TUTIKIAN e PACHECO (2012)	Quaternária	48	52

Fonte: Lisboa, 2004; Melo, 2005; Cavalcanti, 2006; Moraes, 2010) e Tutikian e Pacheco, 2012.

No que se refere ao consumo de materiais, salienta-se que o procedimento CAM demandou menor consumo comparado ao procedimento SAM.

Para o método baseado no índice de vazios não foram observadas grandes diferenças no que diz respeito aos resultados da composições ao variar o procedimento, no entanto, nota-se que o procedimento CAM demanda menor consumo de materiais quando comparado ao procedimento SAM. Além disso, observou-se que o procedimento CAMag exigiu menor esforço físico para homogeneização das misturas, tendo em vista que está fora realizada manualmente.

#### 4.1.2 Composições de agregados

A Tabela 11 apresenta um resumo geral contendo as composições com menores índices de vazios e maior massa unitária obtidas a partir do procedimento definido no item 3.2 para as combinações de agregados definidas no item 3.4.

**Tabela 11 – Apresentação das composições de agregados e das propriedades físicas**

NOMECLATURA	COMPOSIÇÃO				PROPRIEDADES FÍSICAS	
	AF (%)	AG (%)	B12 (%)	B19 (%)	IV (%)	MU $\text{kg/m}^3$
<b>AFB12</b>	45	0	55	0	30,1	1866,3
<b>AFB19</b>	45	0	0	55	27,6	1917,0
<b>AGB12</b>	0	50	50	0	34,7	1743,5
<b>AGB19</b>	0	45	0	55	31,3	1822,4
<b>AFAGB12</b>	23	27	50	0	33,6	1767,7
<b>AFAGB19</b>	23	27	0	50	30,9	1822,9
<b>AFB12B19</b>	45	0	25	30	31,9	1804,5
<b>AGB12B19</b>	0	40	27	33	32,6	1796,3
<b>AFAGB12B19</b>	22	28	22	28	32,1	1803,4
<b>LEGENDA</b>	IV – Índice de vazios MU – Massa unitária					

Fonte: Elaborada pelo autor

A composição ótima da combinação AFB12, apresentou índice de vazios igual a 30,1% superior a composição ótima da combinação AFB19 (27,6%) que resultou na composição com menor índice de vazios entre todas as demais combinações analisadas.

A composição ótima da combinação AGB12 constituída por 50% de agregado miúdo e 50% de agregado graúdo, foi a que resultou na composição com maior índice de vazios (34,7%) para uma massa unitária igual a 1743,5 kg/m<sup>3</sup>.

Realizando a combinação AGB19, para a composição ótima constatou-se uma redução no consumo de agregado graúdo para 45% do total de agregados, além de ter resultado em menor índice de vazios igual a 31,3%. Isso é uma indicação de que o agregado miúdo preencheu melhor os espaços entre os agregados graúdos.

Fazendo, portanto, uma combinação ternária com dois agregados graúdos (B12B19) e o agregado miúdo AG, obteve-se para o menor índice de vazios um valor próximo aos já encontrados nas composições binárias, no entanto, observa-se maior demanda de agregado graúdo (60%), não sendo satisfatório para a obtenção de CAA, tendo em vista que esta composição pode resultar em bloqueio e segregação do material.

Em relação à combinação AGB12B19, mantendo a mistura binária entre os agregados graúdos (B12B19) e substituindo o agregado miúdo AG pelo AF na composição, resulta que o valor do índice de vazios sofre variação insignificante de 32,6% para 31,9%, observa-se também uma redução na porcentagem de agregado graúdo em 5% (em massa) quando comparada à composição AGB12B19.

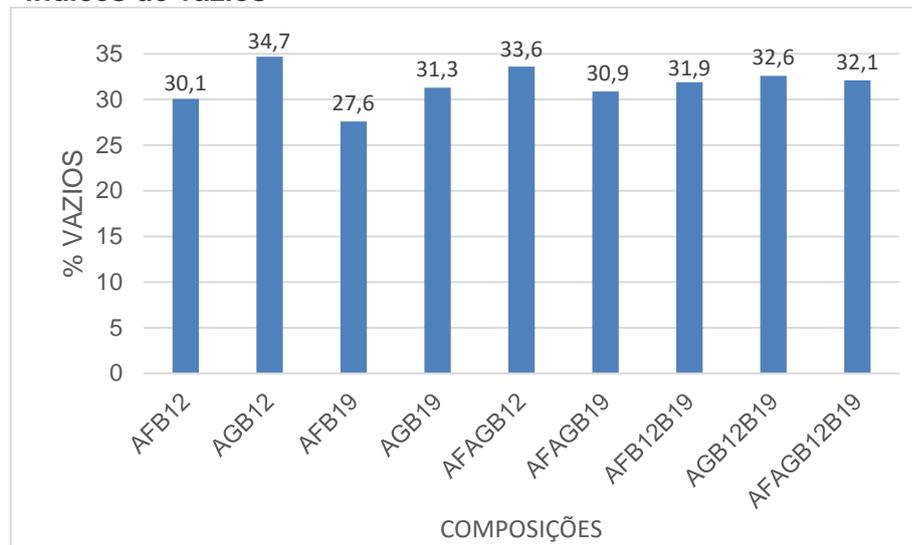
A composição ternária obtida a partir da combinação binária AFAG com incremento do agregado graúdo B12 apresentou melhor equilíbrio no conteúdo em massa dos materiais (50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo), no entanto, resultou num aumento do índice de vazios em relação às composições ternárias apresentadas anteriormente (33,6%).

Entre as combinações ternárias, a composição AFAGB19, foi a que apresentou melhores resultados tanto no que concerne ao índice de vazios (30,9%) quanto às proporções de agregados na mistura (50% de agregado graúdo; 50% de agregado miúdo). Este fato vem a comprovar que o agregado miúdo apresenta melhor facilidade de preenchimento dos vazios do agregado graúdo de maior dimensão.

A composição quaternária obtida a partir de duas outras composições binárias (AFAG + B12B19) manteve a relação de 50% de agregado graúdo para 50% de agregado miúdo, resultando num índice de vazios de 32,1%.

A Figura 24 apresenta os índices de vazios obtidos nos ensaios.

**Figura 25 – Índices de vazios**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos índices de vazios, exceto pelas composições ótimas obtidas pelas combinações AFB19 e AGB12, não se observam grandes variações nos resultados. Neste sentido, considerando apenas o índice de vazios e a massa unitária, a melhor composição de agregados é a composição binária AFB19, e a menos favorável é também uma composição binária composta por 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo denominada AGB12.

Dentre as combinações estudadas destaca-se também a composição obtida a parti da combinação AGB12B19 por ter exigido uma maior quantidade em massa de agregado graúdo. Observou-se ainda que 3 das composições estudadas resultaram em 45% em massa de agregado miúdo e, do total de misturas analisadas, 4 apresentaram relação em massa entre agregado graúdo e miúdo de 50% com índices de vazios variando entre 31,5% e 34,7%.

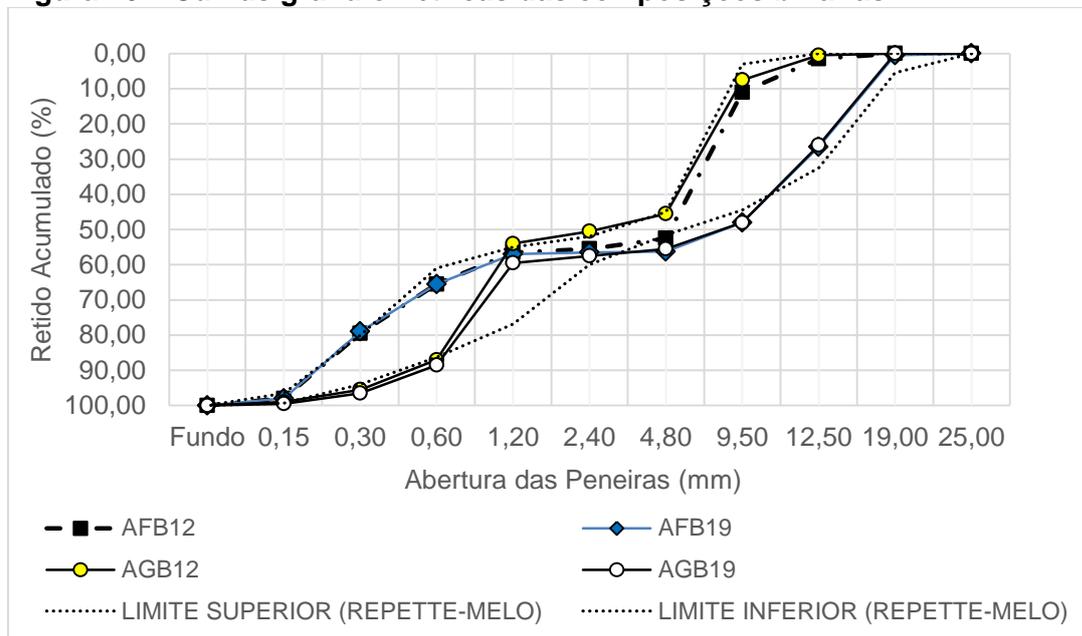
Entre as composições binárias observa-se que para uma mesma relação entre agregado miúdo e agregado graúdo (45% / 55%) as misturas AFB19 e AFB12 apresentaram variação relativamente significativa no que corresponde aos índices de vazios 27,6% e 30,1% respectivamente. O ocorrido pode ser justificado no fato de

que o agregado miúdo apresenta maior facilidade de preencher os vazios entre os agregados graúdos com maior dimensão.

#### 4.1.3 Análise das composições de agregados

As Figuras de 25 a 27 representam as distribuições granulométricas das distintas composições de agregados em comparação com a faixa granulométrica da composição de agregados para obtenção de CAA sugerida por Melo (2005) apresentada no item 2.5.3.

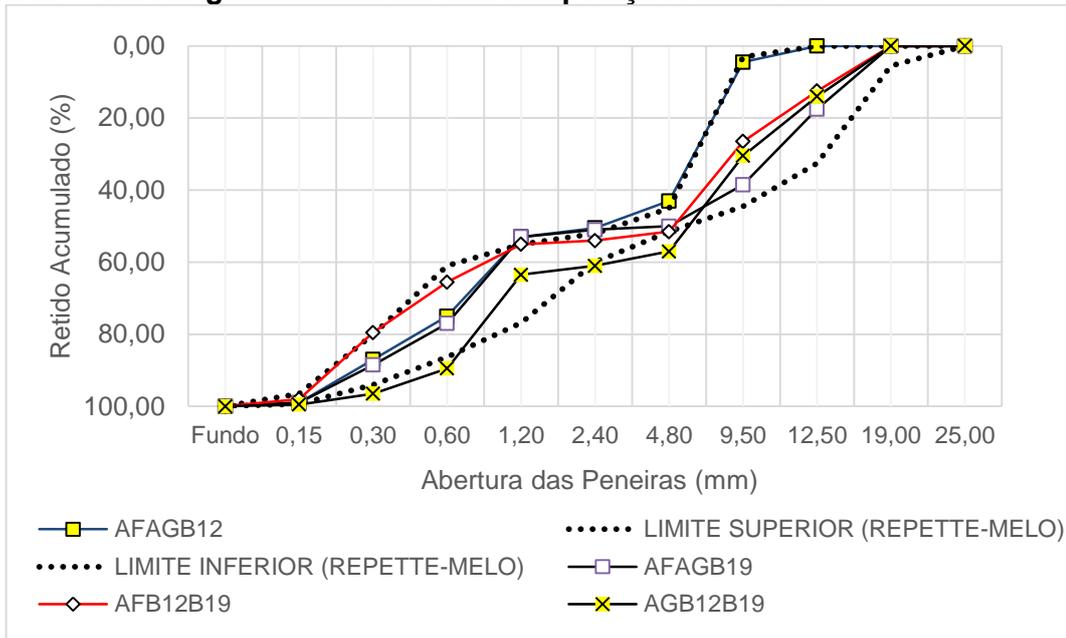
**Figura 26 – Curvas granulométricas das composições binárias**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as composições binárias ficaram dentro da faixa granulométrica sugerida por Melo (2005).

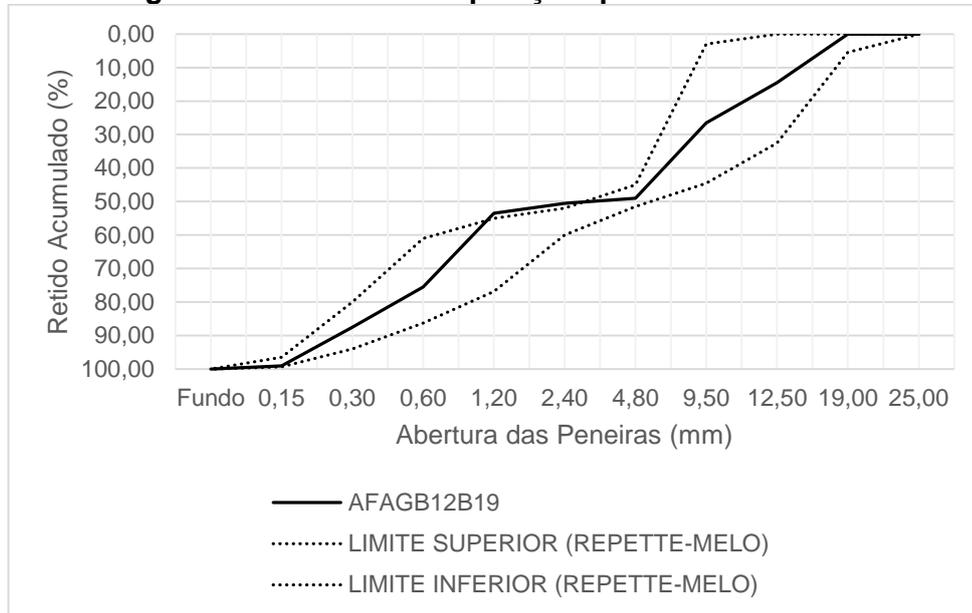
**Figura 27 – Curvas granulométricas das composições ternárias**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre as combinações ternárias observa-se que a composição AGB12B19 encontra-se parcialmente fora da faixa granulométrica sugerida por Melo (2005).

**Figura 28 – Curva granulométrica da composição quaternária**



Fonte: Elaborada pelo autor.

De maneira análoga, a composição quaternária apresentou-se completamente dentro dos limites da faixa sugerida por Melo (2005).

Lisboa (2004) e Cavalcanti (2006) utilizaram combinação binária entre agregados equivalentes as utilizadas neste trabalho para obtenção de CAA. Os

referidos autores aplicaram o método do menor índice de vazios para determinação da relação ótima entre agregados graúdo e miúdo resultando numa mistura de 50% de agregado miúdo e 50% de agregado graúdo sendo o índice de vazios correspondente à 32%.

#### 4.1.4 Formulações dos concretos

Obtidas as composições de agregados, foram formuladas 9 composições de concreto cujo consumo dos materiais constituintes são apresentados nas tabelas 12 (composição da pasta) e 13 (esqueleto granular), considerando-se um volume de pasta de 40% em relação ao volume de concreto.

**Tabela 12 – Composição da pasta de cimento por m<sup>3</sup> de concreto**

CIMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	RBMG (kg/m <sup>3</sup> )	ÁGUA (kg/m <sup>3</sup> )	ADITIVO (kg/m <sup>3</sup> )
400	200	200	7,97

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 13 – Composição dos agregados**

NOMENCLATURA	COMBINAÇÃO DO MATERIAL (kg/m <sup>3</sup> )			
	AF	AG	B12	B19
AFB12	723	-----	881	-----
AFB19	716	-----	-----	873
AGB12	-----	801	801	-----
AGB19	-----	717	-----	874
AFAGB12	368	432	800	
AFAGB19	365	429		794
AFB12B19	717	-----	399	478
AGB12B19	-----	639	432	527
AFAGB12B19	351	446	351	446

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nas relações paramétricas para dosagem de CAA (Tabela 14) apresentadas por Gomes e Barros (2009), foram realizadas as análises das composições, conforme mostrado na Tabela 15.

**Tabela 14 – Apresentação das relações paramétricas para dosagem de CAA**

Relação	Intervalo
Volume de agregado graúdo (%m <sup>3</sup> ) [Vag/m <sup>3</sup> ]	28 - 38
Massa de agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> ) [Mag/m <sup>3</sup> ]	700 - 900
Volume de agregado graúdo/Volume total de agregados [Vag/Vat]	0,44 – 0,64
Massa de agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> ) [Mam/m <sup>3</sup> ]	750 - 950
Volume de agregado miúdo/Volume de argamassa (%) [Vam/m <sup>3</sup> ]	40 - 50

Fonte: Baseado em Gomes e Barros (2009)

**Tabela 15 – Parâmetros de dosagem dos agregados para atendimento as composições de CAA**

COMBINAÇÃO	RELAÇÃO PARAMÉTRICA DAS COMPOSIÇÕES OBTIDAS				
	Vag/Vat	Vag	Vam/Varg	Mag/m <sup>3</sup>	Mam/m <sup>3</sup>
		%/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
AFB12	0,54	32	44	881	723
AFB19	0,55	33	44	873	716
AGB12	0,49	30	47	801	801
AGB19	0,55	33	44	874	717
AFAGB12	0,54	33	44	801	801
AFAGB19	0,50	30	43	794	794
AFB12B19	0,54	33	41	877	717
AGB12B19	0,59	36	38	959	639
AFAGB12B19	0,49	30	46	797	797
<b>REFERÊNCIA</b>	0,44 – 0,64	28 - 38	40 - 50	700 - 900	750 - 950

Fonte: Elaborada pelo autor.

Diante do exposto, observa-se que a massa de agregado graúdo por metro cúbico de concreto deve estar compreendida entre 750 kg/m<sup>3</sup> e 950 kg/m<sup>3</sup> e a massa de agregado miúdo por metro cúbico de concreto entre 700 kg/m<sup>3</sup> e 900 kg/m<sup>3</sup>. Diante do exposto a combinação AGB12B19 apresentou valor superior para o agregado graúdo (959 kg/m<sup>3</sup>) e valor inferior para o agregado miúdo (639 kg/m<sup>3</sup>). O parâmetro que relaciona o volume de agregado miúdo pelo volume de argamassa (Vam/arg) também não foi atendido ficando abaixo da faixa de referência (40% e 50%).

Para as demais combinações, em termos de composições de agregados, observa-se que as mesmas atendem as recomendações propostas para obtenção de CAA.

#### 4.1.5 Propriedades dos concretos obtidos no estado fresco

Conforme descrito no item 3.7.1 foram realizados para cada concreto os ensaios do espalhamento, funil V e Caixa L, cujos resultados obtidos são apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 – Propriedades de autoadensabilidade do concreto no estado fresco**

COMPOSIÇÃO DE CONCRETO	ESPALHAMENTO		FUNIL V		CAIXA L	
	(mm)		TEMPO (seg)		h/H	
CAFB12	685		22		0,5 (bloqueio)	
CAFB19	750		16		0,8	
CAGB12	740		12		1	
CAGB19	790		6		Bloqueio	
CAFAGB12	750		6,5		1	
CAFAGB19	815		4		1	
CAFB12B19	790		4,5		1	
CAGB12B19	785		6		Bloqueio	
CAFAGB12B19	765		6		1	
REFERENCIA NBR 15823 (ABNT, 2010)	SF1	550 - 650	VF1	< 9	PL	≥ 0,8
	SF2	650 - 750				
	SF3	760 - 850	VF2	9 a 25		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre as nove composições de agregados determinadas para as formulações dos concretos, quatro são constituídas por 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo, sendo uma combinação binária (AGB12), duas ternárias (AFAGB12 e AFAGB19) e a quaternária (AFAGB12B19); quatro são constituídas por 55% de agregado graúdo e 45% de agregado miúdo, sendo três binárias (AFB12, AFB19, AGB19) e uma ternária (AFB12B19) e apenas 1 constitui-se por 60% de agregado graúdo e 40% de agregado miúdo (AGB12BB19). Esta última foi a que demandou consumo em massa de agregado graúdo 6% acima do intervalo recomendado por Gomes e Barros (2009).

Observou-se que os concretos constituídos por composições com proporção em massa de 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo apresentaram os melhores resultados nos ensaios realizados. Dos quatro concretos formulados a partir desta combinação apenas a composição ternária AFAGB12 embora não tenha apresentado bloqueio na caixa L, registrou-se a ocorrência de segregação e exsudação já no ensaio do espalhamento. As demais composições apresentaram segregação e/ou exsudação no espalhamento e/ou bloqueio na caixa L. Observou-se ainda que, os concretos obtidos a partir de composições ternárias contendo dois tipos de agregado graúdo foram os que apresentaram maiores problemas de exsudação e segregação além de bloqueio.

Com relação ao índice de vazios não foi possível estabelecer uma relação entre o este com as propriedades de autoadensabilidade e resistência dos concretos.

A Figura 28-a mostra o ensaio do espalhamento no concreto CAFB12 onde, através deste, não foi observado qualquer indicio de exsudação ou segregação. A mistura apresentou-se com boa coesão e bem homogênea, no entanto, no ensaio da caixa L (Figura 35-b) registra-se a ocorrência de bloqueio.

**Figura 29 – Concreto CAFB12**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 29-a mostra o espalhamento do concreto CAFB19 e a figura 29-b mostra o ensaio da caixa L onde, embora a relação  $h/H$  do ensaio da caixa L atenda ao requisito da NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), registrou-se a ocorrência de bloqueio. A composição de agregados que originou esta mistura de concreto foi a que resultou no menor índice de vazios (27,6%).

De acordo com a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), o concreto CAFB19 é adequado para aplicação da maioria das aplicações correntes sendo classificado como SF2.

**Figura 30 – Concreto CAFB19**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora o esqueleto granular que constituiu o concreto CAGB12 (Figura 30) tenha sido aquele que apresentou maior índice de vazios entre as demais composições de agregados analisadas (34,7%), o concreto CAGB12 apresentou boas características e propriedades de autoadensabilidade sendo bastante, homogênea, com moderada fluidez e viscosidade.

A Figura 30 mostra o espalhamento do concreto CAGB12.

**Figura 31 – Concreto CAGB12 – Espalhamento**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tomando como referência a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), o concreto CAGB12, pelos resultados obtidos no ensaio do espalhamento, é classificada como SF2 enquanto que pelo tempo de

escoamento no funil-V a mistura é classificada como VF2, em ambos os casos recomenda-se seu uso para a maioria das aplicações correntes.

Através do ensaio do espalhamento realizado no concreto CAGB19, observou-se ocorrência de exsudação e segregação (Figura 31), além de bloqueio na caixa L.

**Figura 32 - Concreto CAGB19**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

No ensaio do funil-V as misturas com composição ternária foram as que apresentaram menor tempo de escoamento, variando entre 4 segundos e 6,5 segundos. De acordo com a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) e a European Federation of National Associations Representing for Concrete (2005) esta classe de viscosidade plástica aparente indica que tais concretos exigem melhor controle de exsudação e segregação, fato este comprovado pelos resultados obtidos. De acordo com a European Federation of National Associations Representing for Concrete (2005), Misturas de concreto que apresentam tempo de escoamento no funil V-inferior ou igual a 8 segundos, normalmente possuem difícil controle da exsudação e segregação.

O concreto CAFB12B19 (Figura 32) quanto a medida obtida no ensaio do espalhamento (790 mm) classifica-se como SF 3, portanto, segundo a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) este concreto é adequado para aplicação em elementos estruturais com elevada taxa de armadura além de elementos com forma arquitetônica complexa. Para esta classe de concreto,

a referida norma destaca que o mesmo seja confeccionado com agregado graúdo de dimensão máxima característica inferior a 12,5 mm, possivelmente para evitar segregação, exsudação e bloqueio como ocorrido no ensaio da caixa da L (Figura 33-b).

**Figura 33 – Concreto CAFB12B19**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 33 mostra os ensaios do espalhamento e da caixa L, realizados no concreto CAGB12B19. Observou-se que apesar de ter apresentado, no ensaio do espalhamento abertura dentro das recomendações definidas por norma (790 mm) a ocorrência de exsudação e segregação além de bloqueio na caixa L. Estas ocorrências são previstas pela NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) para concretos com baixo tempo de fluidez no funil V (inferior a 9 segundos).

**Figura 34 – Concreto CAGB12B19**

a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 34 apresenta os ensaios para verificação das propriedades de autoadensabilidade realizados no concreto CAFAGB2B19 com 40% do volume de pasta em relação ao volume de concreto.

O concreto apresentou boa abertura no ensaio do espalhamento (765 mm), sendo classificado pela NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) como SF2, podendo ser aplicado na execução da maioria dos elementos correntes tais como paredes, pilares e vigas. O tempo de fluidez no funil, inferior a 9 segundos, indica que este concreto é adequado para confecção de elementos estruturais com elevada taxa de armadura e embutidos. Embora não tenha ocorrido quaisquer indício de segregação ou exsudação a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) cita que concretos com tempo inferior a 9 segundos no ensaio do Funil V exigem maior controle desses fenômenos.

**Figura 35 – Concreto CAFAGB12B19**

a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 17 apresenta um resumo dos resultados dos índices de vazios com as suas devidas composições de agregados e os resultados obtidos no estudo das propriedades do concreto no estado fresco.

**Tabela 17 – Resultados do teor de agregado graúdo nas propriedades do CAA no estado fresco**

<b>NOMENCLATURA DOS CONCRETOS</b>	<b>ÍNDICE DE VAZIOS</b>	<b>% AG. GRAÚDO</b>	<b>AG/AF (%)</b>	<b>ESPAL.</b>	<b>FUNIL V</b>	<b>Caixa L</b>
CAFB12	30,1%	30%	55/45	685	22	0,5
CAFB19	27,6%	33%	55/45	750	16	0,8
CAGB12	34,7%	32%	50/50	740	12	1
CAGB19	31,3%	33%	55/45	790	6	----
CAFAGB12	33,6%	30%	50/50	815	4	1
CAFAGB19	30,9%	30%	50/50	750	6,5	1
CAFB12B19	32,2%	32%	55/45	790	4	1
CAGB12B19	32,6%	36%	60/40	785	6	-----
CAFAGB12B19	32,1%	30%	50/50	765	6	1

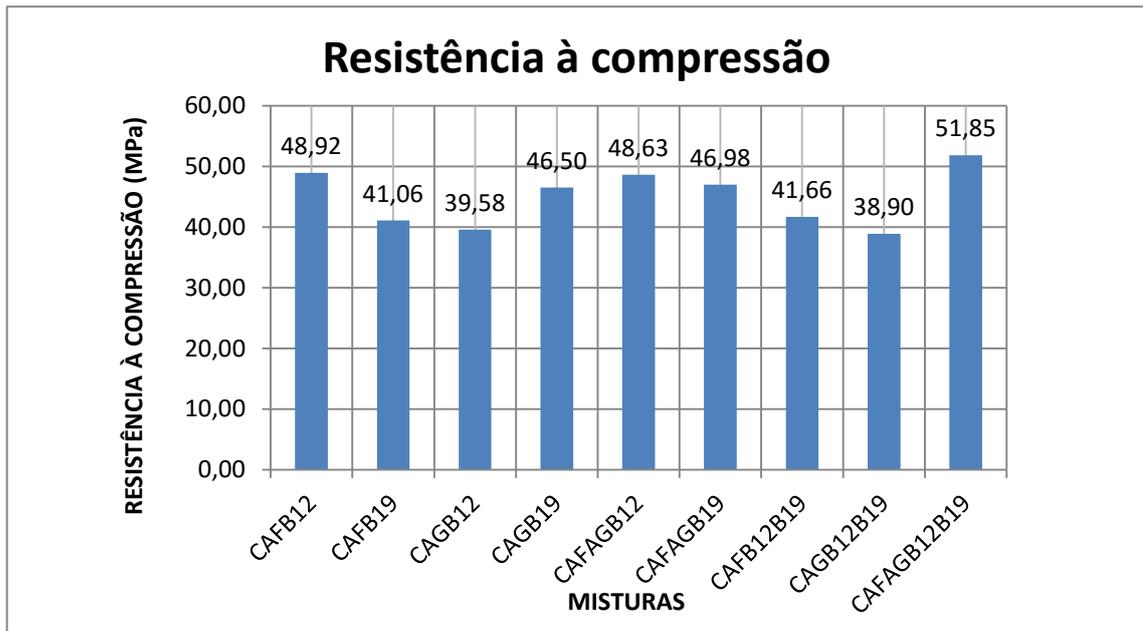
Fonte: Elaborada pelo autor.

O volume de agregado graúdo nas misturas em relação aos volume de concretos variou entre 30% e 36%. Observou-se que as misturas com teor de agregado graúdo acima de 32% apresentaram exsudação, segregação ou bloqueio, independente da dimensão máxima característica do agregado graúdo ou do índice de vazios.

#### 4.1.6 Resistência à compressão

A Figura 35 apresenta a resistência à compressão média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com as distintas misturas de concreto. Foram realizados ensaios em 3 corpos de provas por mistura de concreto.

**Figura 36 – Resistência a compressão média**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Salienta-se portanto, que não houve alteração na composição da pasta de cimento, sendo, portanto, a resistência à compressão influenciada principalmente pelas características dos agregados e pela composição do esqueleto granular.

O concreto CAFAGB12B19 foi o que apresentou melhor propriedade de resistência à compressão aos 28 dias (51,85 MPa) enquanto que as misturas constituídas de composições ternárias apresentaram os menores valores.

#### 4.1.7 Otimização do volume de pasta

##### 4.1.7.1 CAA com 38% de pasta

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos nos ensaios do espalhamento, funil V e caixa L nos concretos obtidos com volume de 38% de pasta.

**Tabela 18 – Análise de autoadensabilidade do concreto no estado fresco**

CONCRETO	ESPALHAMENTO			FUNIL V	CAIXA L		
	MEDIDA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)	MÉDIA (mm)	TEMPO (seg)	H (mm)	h (mm)	h/H
<b>CAGB12</b>	700	630	665	17	140	95	0,7
<b>CAFAGB19</b>	800	700	750	16	160	100	0,8
<b>CAFAGB12B19</b>	750	690	720	12	90	90	1

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 43 representa a abertura do concreto (mistura CAGB12) após o ensaio do espalhamento e da caixa L. Os resultados foram totalmente satisfatórios sem ocorrência de segregação ou exsudação dos materiais. De acordo com a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), pela abertura do espalhamento obtido nesta mistura este concreto é classificado como SF 2 (aberturas compreendida entre 660 mm e 750 mm) e pelo ensaio da caixa L é classificado como PL 2 podendo ser então aplicado na maioria dos elementos estruturais (parede, vigas, pilares entre outras) com espaço entre as barras das armaduras entre 60 mm e 80 mm.

**Figura 37 – Concreto CAGB12**

a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 37 representa a abertura do concreto após o ensaio do espalhamento da mistura de concreto obtida a partir da combinação AFAGB19 e da caixa L. De acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010) este CAA é classificado quanto ao espalhamento como SF 2 e pelo ensaio da caixa L como PL 2, portanto indicada para aplicação na maioria dos elementos estruturais com espaçamento entre as barras de 60 mm e 80 mm. Nesta mistura já observa-se um leve indício de exsudação.

**Figura 38 – Concreto CAFAGB19**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 38 representa o ensaio do espalhamento e da caixa L, a partir da mistura obtida a partir da composição AFAGB12B19. Esta mistura apresentou menor tempo no funil, sem sinais de exsudação ou segregação, sua abertura no ensaio do espalhamento e a relação  $h/H$  permite classifica-lo, de acordo com a NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), como SF 2 e PL 2 indicado para quaisquer tipo de elemento estrutural com espaçamento entre as armaduras de 60 mm a 80 mm.

**Figura 39 – Concreto CAFAGB12B19**



a) espalhamento



b) caixa L

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.7.2 CAA com 35% de pasta

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados nos concretos obtidos com volume de 35% de pasta.

**Tabela 19 – Propriedade do concreto no estado fresco**

CONCRETO	ESPALHAMENTO			FUNIL V	CAIXA L		
	MEDIDA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)	MÉDIA (mm)	TEMP (seg)	H (mm)	h (mm)	h/H
<b>CAGB12</b>	600	650	625	50	---	---	bloqueio
<b>CAFAGB19</b>	700	800	750	13	320	120	bloqueio
<b>CAFAGB12B19</b>	710	680	795	18	100	100	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 39 representa a abertura do concreto após o ensaio do espalhamento da mistura obtida pela composição AGB12, onde é possível observar que embora a abertura do espalhamento médio atenda as exigências normativas para o CAA classificado como SF 1, observa-se um tempo muito excessivo de escoamento no funil V e ocorrência de bloqueio na caixa L bem como um pequeno acúmulo de material no centro do material espalhado o que indica um início de segregação.

**Figura 40 – Concreto CAGB12 - 35% de pasta**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 40 representa a abertura do concreto após o ensaio do espalhamento da mistura (750) mm, obtida pela combinação AFAGB19, classificada pela NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) com

SF 2 porém, foi observado a ocorrência de exsudação no ensaio do espalhamento. No ensaio da caixa L ocorreu bloqueio do concreto e no ensaio do funil V o concreto demandou um tempo de escoamento equivalente a 6,5 segundos, comprovando a recomendações da literatura quando afirmam que concretos com tempo de escoamento inferiores a 9 segundos exigem maior controle de segregação e exsudação.

**Figura 41 – Concreto CAFAGB19 -35% de pasta**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da análise dos resultados é possível verificar que, para uma mesma composição granular, fator água/cimento e fator finos/cimento, é possível reduzir a demanda de pasta de cimento e ainda assim obter concretos com propriedades de autoadensabilidade satisfatórias. Neste sentido, constatou-se que concretos obtidos a partir da composição granular quaternária apresentou melhores propriedades de autoadensabilidade e resistência, possivelmente por apresentar uma melhor distribuição da composição dos agregados.

Os demais concretos formulados apresentaram maior sensibilidade no que se refere as propriedades de autoadensabilidade, em relação a redução do volume de pasta, tendo sido registrada a ocorrência de elevado tempo de escoamento no funil V, como no caso da composição binária AGB12 em que foi registrado 50 segundos, ocorrência de exsudação, segregação e principalmente bloqueio na caixa L.

Com base nos parâmetros da NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) para classificação e aplicação do CAA, o concreto pode ser classificado do seguinte modo, “A Tabela 20 apresenta um resumo

comparativo dos resultados obtidos nos ensaios em que se manteve fixa a composição granular, variando o teor de pasta na mistura”.

**Tabela 20 – Resultados obtidos nos ensaios do CAA com diferentes composições de agregados e volume de pasta**

TEOR DE PASTA	CONCRETO	ESPALHAMENTO MÉDIO	FUNIL V	CAIXA L
		(mm)	(seg)	h/H
35%	CAGB12	625	50	Bloqueio
	CAFAGB19	750	13	Bloqueio
	CAFAGB12B19	695	18	1
38%	CAGB12	665	17	0,7
	CAFAGB19	750	16	0,8
	CAFAGB12B19	720	12	1
40%	CAGB12	685	22	0,8
	CAFAGB19	750	6,5	1
	CAFAGB12B19	765	6	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

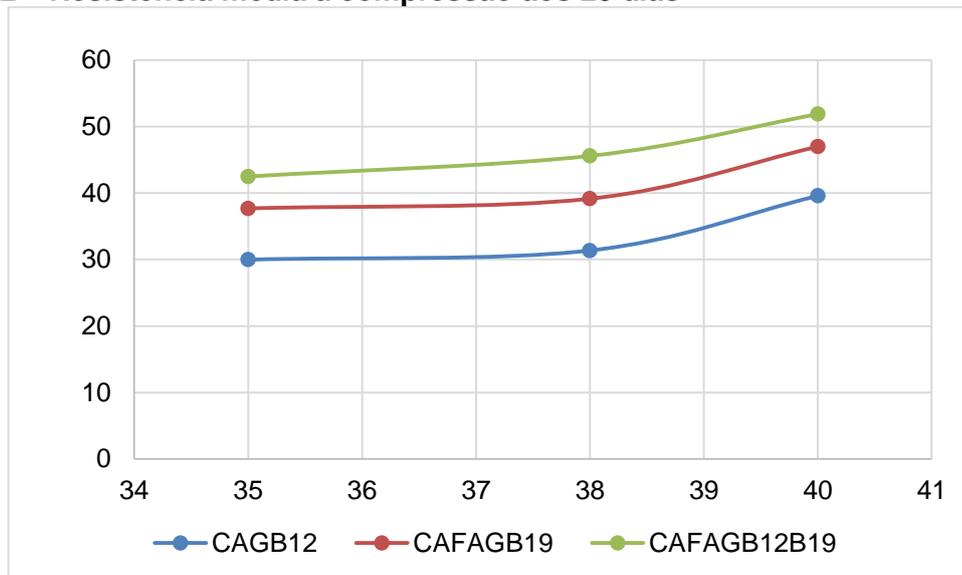
É importante salientar que não foi realizada quaisquer alteração na composição das pastas, a exceção do seu volume, portanto variou-se apenas o teor de agregados na mistura, mantendo fixa inclusive sua composição.

#### 4.1.8 Resistência à compressão

A Tabela 21 apresenta todos os resultados obtidos anteriormente incluindo a resistência a compressão dos traços de concreto.

Observa-se, que dentro das limitações dos ensaios realizados e dos materiais trabalhos, não foi possível estabelecer uma relação entre o índice de vazios das composições e as propriedades de autoadensabilidade e resistência dos concretos. Contudo, confirma-se a influência do volume de pasta nas propriedades de autoadensabilidade tendo em vista que os melhores resultados foram registrados para o maior volume trabalhado nesta dissertação (40%). Além disso, maiores volumes de pasta na mistura dos concretos determinou as maiores resistências à compressão o que justifica a facilidade da obtenção de CAA com elevada resistência à compressão. Este fato vem a comprovar o que diz a literatura quanto a relação agregado/cimento - quanto maior for esta relação, menores são os valores de resistência obtidos.

A Figura 41 apresenta o comportamento da resistência à compressão média com a variação do teor de pasta.

**Figura 42 – Resistência média a compressão aos 28 dias**

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se, portanto, que com o aumento do volume de pasta há também uma redução na relação agregado/cimento e, dentro deste contexto, analisando-se os resultados obtidos, pode-se inferir que, quanto maior a relação agregado/cimento, menores são os valores de resistência obtidos, resultado este já esperado, confirmando o que diz a literatura.

Tabela 21 – Resumo de todos os resultados obtidos

NOMENCLATURA DOS CONCRETOS	ÍNDICE DE VAZIOS	%AGREG GRAÚDO / %AGREG MIÚDO	TEOR DE PASTA (%)	ESPAL	FUNIL V	CAIXA L (h/H)	RESISTENCIA (MPa)
CAFB12	30,1%	55/45	40	685	22	0,5 (bloqueio)	48,92
CAFB19	27,6%	55/45	40	750	16	0,8 (bloqueio)	41,06
CAGB12	34,7%	50/50	40	740	12	1	39,58
			38	665	17	0,7 (bloqueio)	31,36
			35	625	50	bloqueio	29,98
CAGB19	31,3%	55/45	40	790	6	bloqueio	46,5
CAFAGB12	33,60%	50/50	40	815	4	1	48,63
CAFAGB19	30,90%	50/50	40	790	6	1	46,98
			38	750	16	0,8 (bloqueio)	39,15
			35	750	6,5	bloqueio	37,69
CAFB12B19	32,2%	55/45	40	790	4	1	41,66
CAGB12B19	32,6%	60/40	40	785	6	bloqueio	38,9
CAFAGB12B19	32,1%	50/50	40	765	6	1	51,85
			38	720	12	1	45,59
			35	695	18	1	42,49

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado demonstrou que para os materiais utilizados e para os ensaios empregados neste trabalho, o método experimental da maior massa unitária e do menor índice de vazios atendeu o propósito desejado – a obtenção de concretos com propriedades de autoadensabilidade, inclusive quando para uma mesma composição de agregados o volume de pasta fora reduzido. Além disso observou-se também que as composições de agregados obtidas não diferem de outras composições granulares utilizadas em outros trabalhos com outros materiais e mesmo a partir da aplicação de outros métodos.

Após a apresentação dos resultados e das análises realizadas na elaboração deste trabalho, observou-se ainda que:

Os procedimentos analisados para aplicação do método de determinação da composição de agregados a partir do menor índice de vazios não apresentou divergências nos resultados obtidos. Entretanto, sugere-se a padronização do método a partir da aplicação do procedimento CAM em que a massa do agregado com maior dimensão é fixada, conforme descrito no item 4.2 cujas conclusões são discutidas no item 5.1.1. Sugere-se também que, em se tratando de agregado natural, aplicar o método de determinação da composição de agregados utilizando as proporções de agregados sugeridas por Díaz (1998) com o intuito de reduzir consumo de materiais, tempo de execução e por demandar menor esforço físico do operador.

O método da massa unitária e do índice de vazios também mostrou-se eficiente na aplicação para determinação de composições ternárias e quaternárias.

Em relação a faixa granulométrica sugerida por Melo (2005) observou-se que todas as curvas granulométricas das composições obtidas atenderam ao intervalo sugerido.

No que diz respeito as propriedades de autoadensabilidade dos concretos com 40% de pasta foi observado o seguinte:

- ✓ concreto obtido a partir de composições com 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo (AGB12; CAFAGB19, CAFAGB12 e CAFAGB12B19) foram os que melhor atenderam as exigência do CAA;

- ✓ quanto ao ensaio do espalhamento, todos os concretos confeccionados atenderam as referências da NBR 15823 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010);
- ✓ apesar de a composição AGB12 ter sido que apresentou maior índice de vazios (34,7%) o concreto obtido a partir desta composição, entre as composições binárias, foi o único que atendeu aos parâmetros para um CAA;
- ✓ concretos obtidos a partir de composições ternárias com duas classes de agregados graúdos (AFB12B19 e AGB12B19) apresentaram segregação do material, enquanto que as misturas AFAGB12 e AFAGB19 apresentaram melhores resultados de autoadensabilidade;
- ✓ concretos obtidos a partir da composição quaternária (AFAGB12B19) apresentou resultado satisfatório em todos os ensaios de autoadensabilidade realizado;
- ✓ concretos obtidos a partir das composições que resultaram em volume de argamassa inferior a 70% em relação ao volume de concreto apresentaram exsudação ou segregação.

Quanto a otimização da pasta nos concretos, os resultados dos ensaios do concreto no estado fresco comprovaram a influência do volume de pasta nas propriedades do CAA, sendo melhores para maiores teor de pasta. Os resultados também mostraram que apenas a combinação quaternária atendeu aos parâmetros de autoadensabilidade para todos os volumes de pasta estudados (40%, 38% e 35%).

Dentre os ensaios executados, o da caixa L foi o que apresentou maior sensibilidade nos resultados.

Quanto a resistência a compressão aos 28 dias observou-se que esta foi significativamente influenciada pelo volume de pasta contido na mistura do concreto, neste sentido quanto maior o volume de pasta contido no concreto maior a resistência. Isto indica a maior facilidade de obtenção de CAA com elevada resistência.

Cabe ressaltar que neste trabalho a composição da pasta, em nenhuma dosagem dos concretos estudados foi alterada.

## 6 SUGESTÕES

Como realização de trabalhos futuros sugere-se avaliar o método da massa unitária e do índice de vazios para obtenção do CAA considerando outras propriedades e características dos agregados como por exemplo a superfície específica, além de:

- ✓ utilizar outros agregados, inclusive artificial, e outras combinações;
- ✓ buscar ou melhorar as propriedades de autoadensabilidade do concreto a partir do ajuste do aditivo superplastificante ou através da incorporação de outros materiais como por exemplo aditivo químico modificador de viscosidade;
- ✓ realizar outros ensaios do CAA no estado fresco e no estado endurecido como por exemplo ensaio do anel J e do tubo U, ensaio da caixa L com duas barras;
- ✓ aplicar outros métodos como o MEC e o método de Faury

## REFERENCIAS

- ALMEIDA, I. R. de. **Betões de alta resistência e durabilidade composição e características**. 1990. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico Departamento de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM C29/29M-92**: standard test method for unit weight and voids in aggregate. West Conshohocken, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 1611-09b**: standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ASTM C 1712-09**: standard test for rapid assessment of static segregation resistance of self-consolidating concrete using penetration test. West Conshohocken, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ASTM C 1621-09b**: standard test method for passing ability of selfconsolidating concrete by J-Ring. West Conshohocken, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ASTM C 1610-06a**: standard test method for static segregation of selfconsolidating concrete using column technique. West Conshohocken, 2009.
- ASSIÉ, S. et al. Durability properties of low-resistance self-compacting concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 58, n. 1, p. 1-7, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados graúdo: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 50**: agregados graúdo: determinação da absorção de água do agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregados graúdo: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: agregados graúdo: determinação da densidade, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7809**: agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ANDRADE, T. W. C. de O. et. al. Arena Pernambuco: comparativo entre CAA e CC em regiões de clima quente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. 2013. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

ARAÚJO, T. F.; DINIZ, F. E. G. Otimização do esqueleto de agregados para uso em concreto autoa-densáveis de alta resistência reforçados com alta taxas de fibras. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2007, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**: concreto auto-adensável: parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**: concreto auto-adensável: parte 2: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento: método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável: parte 4: determinação da habilidade passante: método da caixa-L. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável: parte 2: determinação da viscosidade: método do funil-V. Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, P. G. dos S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y; SHAH, S. Rheological model for self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 6, p. 549-559, 2002.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 213 f. Tese (Doutorado em Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CAVALCANTI, H. de J. D. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2006.

CINTRA, D. C. B. et al. Estudo de procedimentos de adensamento do concreto por vibradores de imersão em obras na Grande Vitória – ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. 2013. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

CAMPOS, C. A. **Aplicação de concreto auto-adensável em lajes moldadas in loco**: estudo de caso no setor de edificações. 2013. Monografia (Especialização em Gestão e Tecnologia na Construção Civil ) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

COELHO, L. L.; CARBONARI, B. T. Concreto autoadensável com agregados britados de basalto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes**: concretos reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

DÍAZ, V. O. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. Tradução Avelino Aparecido de Pádua, Leonel Tula Sanabria, Nelson Díaz Brito. São Paulo: Pini, 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12350-8:2010**: testing fresh concrete: part 8: self-compacting concrete: slump-flow. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-9:2010**: Testing fresh concrete – part 9: self-compacting concrete – v-funnel test. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-10:2010**: Testing fresh concrete – part 10: self-compacting concrete – l-box test. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-11:2010**: Testing fresh concrete – part 11: self-compacting concrete – sieve segregation test. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-12:2010**: Testing fresh concrete – part 12: self-compacting concrete – j-ring test. Brussels, 2010.

EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING FOR CONCRETE (EFNARC ). **The European guidelines for self-compacting concrete**: specification, production and use. Maio, 2005.

FERNANDEZ CÁNOVAS, M. **Patologia e terapia do concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

FERREIRA, L. de B.; DINIZ, F. E. G. **Otimização de pastas de cimento para concretos auto-adensáveis de alta resistência reforçados com elevadas taxas de fibra de aço ( $\geq 2\%$ )**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 15, 2007, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de alto desempenho**. 2005. 259 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FREITAS JUNIOR, J. de A. **Materiais de construção: a estrutura do concreto:** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, 2013. (Apostila de aula).

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 59, n. 2, p. 67-143, 1907.

GEYER, A. L. B.; SENA, A. **Avaliação do comportamento mecânico do concreto auto-adensável em comparação com o concreto convencional.** São Paulo: IBRACON, 2001.

GOMES, P. C. C. **Estudo de parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência.** 1995. Dissertação (Mestrado em)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139 p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1993. p. 349.

KHAYAT, K. H.; HU, C.; MONTY, H. **Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications.** In: First INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, **Estocolmo**, 1999. França: RILEM Publications, 1999. p, 143-152,

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

KOEHLER, E. P. **Aggregates in Self-Consolidating Concrete.** 2007. 414 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Faculty of the Graduate School, University of Texas at Austin, Austin, 2007.

LARRARD, F. de. **Concrete mixture-proportioning: a scientific approach, modern concrete technology** London: E & FN Spon, 1999. 421 p. (Serie Moden concrete technology)

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de mineral e da dimensão máxima característica do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável.** 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

- LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto auto adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e do granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- MANUEL, M. J. P. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis.** 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- MELLO, A. D. Boas vibrações para a sua obra. **Téchne**, São Paulo, Edição 29, jul. 1997.
- MELO, K. A. **contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário.** 2005. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- MEHTA, K. P.; MONTEIRO, J. M. P. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MIRANDA, C. R. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo:** processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química. 2008. .290 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável.** 2010. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- NEPOMUCENO, M. C. S. **Estudo da composição de betões.** prova de aptidão pedagógica e capacidade científica. Universidade da Beira Interior. Departamento de Engenharia Civil. Corvilhã. 1999.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NUNES, S. C. B. **Betão autocompactável:** tecnologia e propriedades. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001.
- OLIVEIRA, I. R. de et al. **Dispersão de empacotamento de partículas:** princípios e aplicações em aplicações cerâmico. São Paulo: Fazendo Artes, 2000.
- PAUMGARTTEN, M. D. V. **Concreto auto-adensável com materiais encontrados na região de Belém.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade da Amazonia, Belém. 2010.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 197 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

RAVINDRARAJAH, R. S.; SILADYI, D.; ADAMOPOUBOS, B. **Development of high-strength self-compacting concrete with reduced segregation potencial**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3<sup>st</sup>, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 530-539.

SALVADOR FILHO, José Américo Alves. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANGALLI, T. et. al. Confecção de concreto autoadensável com a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de granito e mármore. In: CONGRESSO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

SANTANA, L. B.; SILVA FILHO, A. F. **Adensamento do concreto**: análise do uso do vibrador de imersão. Salvador: Universidade Católica do Salvador, [2012].

SANTOS, C. C. N. **A influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto**. 2008. Tese. (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2008.

SANTOS, A. H. de A. et. al. Estudo teórico-experimental do comportamento mecânico do concreto auto-adensável. In: CONGRESSO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

SHAKHMENKO, G.; BIRSH, J. Concrete mix design and optimization. In: International PhD SYMPOSIUM IN ENGINEERING CIVIL, 2nd, 1998, Budapest. **Proceedings...** Budapest: Technical University of Budapest, 1998.

SILVA, A. S. R. da; ALVES, L. G. A.; AZEVEDO, R. V. de. Estudo para obtenção e produção de concretos autoadensáveis em Salvador-BA. In: CONGRESSO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

SILVA, O. C. F. da. et. al. Análise da resistência mecânica do concreto autoadensável: especificação dos materiais e método de produção. In: CONGRESSO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2013.

TAKADA, K. **Influence of admixtures and mixing efficiency on the properties of self compact concrete in the Netherlands**. Tesis (Doctoral). Delft University of Technology, The Netherlands. Delft. 2004. 220p.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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

VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete**: influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design. 2010. 155 f. Thesis (Doctoral) - School of Architecture and the Built Environment , Royal Institute of technology, Stockholm, 2010.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B. Influence of fines from crushed aggregate on micro-mortar rheology. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p.165-173, 2003.

## ANEXOS

**ANEXO A – Módulo de Finura de Faury para a Curva de Referência de Faury**  
(Continua)

Máxima dimensão do agregado	Valor de $\alpha$									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
203,20	7,14	7,09	7,04	6,98	6,93	6,88	6,83	6,78	6,73	6,68
152,40	6,90	6,85	6,80	6,75	6,70	6,65	6,60	6,55	6,50	6,45
101,60	6,61	6,56	6,52	6,47	6,42	6,37	6,32	6,27	6,22	6,18
76,20	6,35	6,30	6,25	6,21	6,16	6,11	6,07	6,02	5,97	5,92
50,80	6,03	5,98	5,94	5,89	5,85	5,80	5,76	5,71	5,67	5,62
38,10	5,76	5,72	5,67	5,63	5,58	5,54	5,49	5,45	5,40	5,36
25,40	5,40	5,36	5,32	5,28	5,24	5,19	5,15	5,11	5,07	5,03
19,10	5,12	5,08	5,04	5,00	4,96	4,92	4,87	4,83	4,79	4,75
12,70	4,74	4,70	4,66	4,62	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,39
9,52	4,39	4,35	4,32	4,28	4,24	4,20	4,17	4,13	4,09	4,05
6,35	4,03	4,00	3,96	3,93	3,89	3,86	3,82	3,79	3,75	3,72
4,76	3,72	3,69	3,65	3,62	3,58	3,55	3,52	3,48	3,45	3,41

**ANEXO A – Módulo de Finura de Faury para a Curva de Referência de Faury**  
(Continuação)

Máxima dimensão do agregado	Valor de $a$									
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
203,20	6,62	7,09	7,04	6,98	6,93	6,88	6,83	6,78	6,73	6,68
152,40	6,40	6,85	6,80	6,75	6,70	6,65	6,60	6,55	6,50	6,45
101,60	6,13	6,56	6,52	6,47	6,42	6,37	6,32	6,27	6,22	6,18
76,20	5,88	6,30	6,25	6,21	6,16	6,11	6,07	6,02	5,97	5,92
50,80	5,58	5,98	5,94	5,89	5,85	5,80	5,76	5,71	5,67	5,62
38,10	5,31	5,72	5,67	5,63	5,58	5,54	5,49	5,45	5,40	5,36
25,40	4,99	5,36	5,32	5,28	5,24	5,19	5,15	5,11	5,07	5,03
19,10	4,71	5,08	5,04	5,00	4,96	4,92	4,87	4,83	4,79	4,75
12,70	4,35	4,70	4,66	4,62	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,39
9,52	4,02	4,35	4,32	4,28	4,24	4,20	4,17	4,13	4,09	4,05
6,35	3,68	4,00	3,96	3,93	3,89	3,86	3,82	3,79	3,75	3,72
4,76	3,38	3,69	3,65	3,62	3,58	3,55	3,52	3,48	3,45	3,41

**ANEXO A – Módulo de Finura de Faury para a Curva de Referência de Faury**  
(Conclusão)

Máxima dimensão do agregado	Valor de $\alpha$									
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
203,20	7,14	7,09	7,04	6,98	6,93	6,88	6,83	6,78	6,73	6,68
152,40	6,90	6,85	6,80	6,75	6,70	6,65	6,60	6,55	6,50	6,45
101,60	6,61	6,56	6,52	6,47	6,42	6,37	6,32	6,27	6,22	6,18
76,20	6,35	6,30	6,25	6,21	6,16	6,11	6,07	6,02	5,97	5,92
50,80	6,03	5,98	5,94	5,89	5,85	5,80	5,76	5,71	5,67	5,62
38,10	5,76	5,72	5,67	5,63	5,58	5,54	5,49	5,45	5,40	5,36
25,40	5,40	5,36	5,32	5,28	5,24	5,19	5,15	5,11	5,07	5,03
19,10	5,12	5,08	5,04	5,00	4,96	4,92	4,87	4,83	4,79	4,75
12,70	4,74	4,70	4,66	4,62	4,58	4,54	4,50	4,46	4,42	4,39
9,52	4,39	4,35	4,32	4,28	4,24	4,20	4,17	4,13	4,09	4,05
6,35	4,03	4,00	3,96	3,93	3,89	3,86	3,82	3,79	3,75	3,72
4,76	3,72	3,69	3,65	3,62	3,58	3,55	3,52	3,48	3,45	3,41