

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

**AVALIAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA  
OTIMIZAÇÃO DE ESQUELETO GRANULAR EM ATENDIMENTO À  
AUTOADENSABILIDADE DE CONCRETOS**

Cássia Vanessa Albuquerque de Melo

MACEIÓ  
2019

CÁSSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO

AVALIAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA  
OTIMIZAÇÃO DE ESQUELETO GRANULAR EM ATENDIMENTO À  
AUTOADENSABILIDADE DE CONCRETOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Materiais da Universidade Federal de  
Alagoas, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Doutora em Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo César Correia  
Gomes.

MACEIÓ

2019

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- M528a Melo, Cássia Vanessa Albuquerque de.  
Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos / Cássia Vanessa Albuquerque de Melo. – 2019.  
246 f. : il.
- Orientador: Paulo César Correia Gomes.  
Tese (doutorado em Materiais) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Materiais. Maceió, 2019.
- Bibliografia: f. 210-218.  
Apêndices: f. 219-246.
1. Parâmetro de graduação de agregados. 2. Agregados (Concreto). 3. Concreto autoadensável. I. Título.

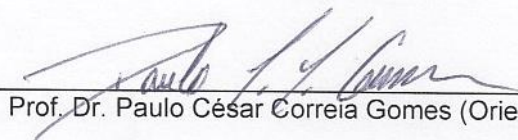
CDU: 666.972.12

**Cássia Vanessa Albuquerque de Melo**

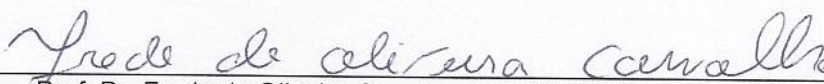
**Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 22 de novembro de 2019.

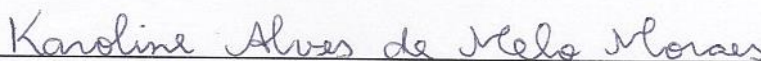
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes (Orientador - PPGMATERIAIS/UFAL)



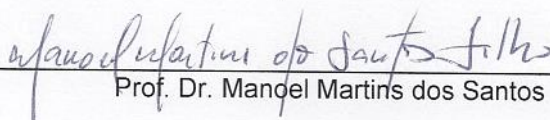
Prof. Dr. Frede de Oliveira Carvalho (CTEC/UFAL)



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karoline Alves de Melo Moraes (CTEC/UFAL)



Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (UFPE)



Prof. Dr. Manoel Martins dos Santos Filho (IFAL)



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, Aba, por todas as lições. Honras e Louvores!

Agradeço imensamente ao Professor Paulo César Correia Gomes, incentivador, orientador e amigo, pela escolha do tema da pesquisa, pelas constantes reuniões e auxílio na elaboração da tese e de artigos científicos para congressos e revistas.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Materiais (PPGMateriais), Fabiane Caxico, Rusiene Monteiro e Antônio Osimar, pelas orientações e apoio.

O meu obrigada aos professores do Centro de Tecnologia (CTEC), Karoline Alves, Sílvia Beatriz, Frede de Oliveira, Roberto dos Santos, João Carlos Barbirato e tantos outros professores pelas conversas e os aprendizados de valor inestimável.

Agradeço ao professor William Fagner, à pesquisadora Catarina Nogueira e aos colegas do Laboratório de Computação, Ciência e Visualização (LCCV), pela disponibilidade e dedicação nas etapas de construção de artigos científicos para congresso e revista.

Aos amigos, que serão sempre lembrados pelo apoio e força, em especial os doutorandos Alexandre Nascimento, Karlisson e Osvaldo; os mestrandos Andressa e Emerson Souza, e demais mestrandos com que convivi; os graduandos Lucas Oliveira, Ricardo, Alysson, Gustavo, Bruno Pereira, Hugo, Karla Camila e os demais alunos de iniciação científica do Grupo de Pesquisa MECOEFICON, que contribuíram para a pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais, Marcos Wanderley, João, Valdemir, Jonas, Tássis, Cícero, Flabel e Sidicley, que auxiliaram na parte experimental e na solução de problemas comuns de laboratório. São pessoas amigas que tornaram as atividades mais alegres.

À minha filha, Thalita Maria, amor da minha vida, e pelo apoio que recebi daqueles que nos ajudaram a tornar a distância menos difícil. Só para registrar: não a vi aprendendo a andar de patins e os dentes caíram nas horas em que eu não estava por perto.

Obrigada aos meus familiares (tios, tias, primos, irmãs), em especial a minha mãe, Maria José, que é plena no compartilhamento e na força que passa para todos. Muitas vezes tive que explicar o motivo da ausência, algo difícil em todos os anos de doutorado.

Agradeço aos corredores pela força e motivação. Poderia citar os nomes, mas não caberia nesta página a minha admiração e gratidão.

À Fapeal – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas – pelo apoio financeiro vinculado ao Projeto de Apoio a Pesquisa com o título: *“Modelagem e otimização de composições de agregados para obtenção de concreto autoadensável com e sem agregados reciclados”*, com o número do processo 60030 001263/2017.

Agradeço à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pela concessão da bolsa de doutorado.

Às empresas MARMOGRAN Mármore e Granito e BASF Construction Chemicals Brasil, pela doação dos materiais.

Agradeço também ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelas bolsas de estudos aos alunos de iniciação científica que se dedicaram aos estudos desenvolvidos no grupo MECOEFICON, como os direcionados para esta Tese.

Agradeço a todos os membros da banca de qualificação e de defesa de tese pelas contribuições e sugestões que contribuíram de forma muito importante para o trabalho.

*Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.*

*(Ayrton Senna)*

## RESUMO

MELO, C. V. A. de. Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos. 2019. Tese (Doutorado em Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, UFAL, Maceió.

O concreto autoadensável (CAA) é um material compósito constituído pelas fases pasta e esqueleto granular, sendo a primeira obtida pela dosagem da relação água/cimento, adições e aditivos, que garantem a fluidez entre os agregados; na segunda, são formuladas composições dos agregados, visando o melhor desempenho das propriedades de autoadensabilidade. A teoria de empacotamento dos grãos dos agregados, que relacionam o menor índice de vazios com a melhor distribuição granulométrica e menor volume de pasta, tem sido aplicada para obtenção da otimização de composições de agregados para CAA. Contudo, não têm sido identificados estudos que tenham comprovado que uma composição de agregados com maiores concentrações de partículas miúdas e graúdas, em uma distribuição contínua, apresentem uma menor distância entre si, proporcionando-se um arranjo granular com maior índice de vazios, contribuindo para melhores desempenhos no estado fresco do CAA. Assim, o presente estudo tem como objetivo propor parâmetros de graduação de agregados, a fim de otimizar estas composições, avaliando distribuições granulométricas de agregados graúdos e miúdos, buscando-se um empacotamento “ideal” para CAA. Para o atendimento ao proposto, foram determinados os seguintes parâmetros de graduação de agregados: predominância de diâmetros de partículas (PDP), coeficiente de uniformidade (CU) e porcentagem de agregado graúdo (PAG). Diferentes composições de agregados dos tipos binária, ternária e quaternária, baseadas no menor índice de vazios foram desenvolvidas, utilizando-se agregados naturais, industriais e reciclados de concreto. Além disso, foram analisados distintos esqueletos granulares para CAA obtidos na literatura. Na produção dos concretos, a composição da pasta de cimento manteve-se fixa. O desempenho no estado fresco foi avaliado a partir de métodos de ensaios de espalhamento (*slump flow*), viscosidade plástica aparente ( $t_{500}$ ), caixa L e funil V, de modo a associar os resultados obtidos aos parâmetros de graduação. Destas, apenas as medições dos diâmetros de espalhamento (SF), tempo de funil-V (VF) e habilidade de passagem (HP) foram as variáveis de resposta. A garantia das propriedades no estado endurecido foi obtida a partir dos métodos de ensaio de resistência à compressão, módulo de elasticidade tangente inicial e índices físicos do concreto, tais como absorção de água, índice de vazios do concreto e massa específica real. No geral, tanto distribuições granulométricas contínuas quanto descontínuas atenderam às propriedades do CAA, com PAG em torno de 50 %. Atendidos PGA e parâmetros de autoadensabilidade, a proposta de zonas granulométricas superior e inferior para os grupos G12 e G19 foi mais uma contribuição que possibilitou estabelecer um domínio para originar demais composições de agregados para CAA. Na aplicação estatística dos parâmetros com a técnica estatística Análise de Componentes Principais (ACP), os resultados apresentaram evidências significativas em relação à interpretação da variabilidade dos dados das misturas de CAA englobando-se as seis variáveis referentes aos parâmetros de graduação (PDP, CU e PAG) e às variáveis de resposta (SF, VF e HP). Um indicativo de maior descontinuidade e maior razão de predominância de diâmetro das partículas graúdas e miúdas afetaram, de forma negativa, a uniformidade das misturas. Por fim, baseado no estabelecimento das relações entre as seis variáveis pode-se fazer a proposição dos seguintes intervalos de PDP e CU:  $6 < PDP < 25$ ;  $9 < CU < 23$ . As relações entre os PGA e as zonas granulométricas propostas serviram como indicadores de desempenho das misturas de CAA no estado fresco, com garantia do desempenho no estado endurecido.

Palavras-chave: *composições de agregados, parâmetros de graduação, empacotamento de partículas, concreto autoadensável.*

## ABSTRACT

MELO, C. V. A. de. Evaluation and determination of parameters for granular skeleton optimization in compliance with self-compactability of concrete. 2019. Tese (Doutorado em Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, UFAL, Maceio.

Self-compacting concrete (SCC) is a composite material consisting by paste and granular skeleton phases, being the first obtained by measuring the water / cement ratio, additions and additives, which ensure flowability between aggregates. In the second, the compositions of the aggregates are formulated aiming at the best performance of self-compactability properties. The packing theory of aggregate grains, which relate the lowest void content with the best particle size distribution and lower paste volume, has been applied to obtain the optimization of aggregate compositions for SCC. However, no studies have been identified that have shown that a composition of aggregates with larger concentrations of small and large particle sizes, in a continuous distribution, have a smaller distance from each other, providing a granular arrangement with higher voids content, contributing, to this, for better performance in the fresh state of SCC. Thus, the present study aims to propose aggregate grading parameters in order to optimize these compositions by evaluating particle size distributions of large and fine aggregates, seeking to “ideal” packing for SCC. To meet the proposed, the following aggregate grading parameters (PGA) were determined: particle diameter predominance (PDP), uniformity coefficient (CU) and coarse aggregate percentage (PAG). Different binary, ternary and quaternary aggregate compositions based on the lowest void content were developed using natural, industrial, and concrete recycled aggregates. In addition, different SCC granular skeletons obtained in the literature were analyzed. In the production of concretes, the composition of the cement paste remained fixed. Fresh performance was evaluated using slump flow, apparent plastic viscosity ( $t_{500}$ ), box L and funnel V test methods in order to associate the results obtained with the grading parameters. Of these, only the scattering diameter (SF), V-funnel time (VF) and passing ability (HP) measurements were response variables. Assurance of hardened properties was obtained from the test methods of compressive strength, initial tangent modulus of elasticity e physical indices of the concrete such as water absorption and concrete voids and real specific gravity. In general, the continuous particle size distributions predominated in meeting SCC properties, with a PAG of around 50%. In the statistic application of the parameters with the statistical technique Principal Component Analysis (PCA), the results showed significant evidence regarding the interpretation of the variability of the data of SCC mixtures encompassing the six variables referring to the grading parameters (PDP, CU and PAG) and the response variables (SF, VF and HP). An indication of a higher discontinuity and predominance ratio of large and small particles negatively affected the uniformity of the mixtures. Finally, based on the establishment of relationships between the six variables, the following PDP and CU intervals can be proposed:  $6 < PDP < 25$ ;  $9 < CU < 23$ . The relationships between the PGA and the proposed particle size zones served as performance indicators of the fresh SCC mixtures, with guaranteed of the performance in the hardened state.

**Keywords:** aggregates compositions, grading parameters, particles packing, self-compacting concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Forma de distribuição granulométrica de partículas e seu efeito no empacotamento: (a) monodispersão; (b) polidispersão .....	32
Figura 2.2 - Distribuição a) bimodal; b) polimodal .....	34
Figura 2.3 - Curvas de distribuições granulométricas .....	34
Figura 2.4 - Curvas de combinações de agregados bem graduadas e mal graduadas <i>versus</i> porcentagem retida.....	36
Figura 2.5 - Representação de dois tipos de esqueleto granular .....	36
Figura 2.6 - Distribuição com predominância de partículas (a) pequenas e (b) grandes e (c) distribuição contínua.....	37
Figura 2.7 - Efeito de parede nas fronteiras do misturador .....	39
Figura 2.8 - Mistura binária com interação parcial: efeito de parede .....	39
Figura 2.9 - Mistura binária: (a) mistura sem interação; (b) mistura com interação parcial e efeito de afastamento .....	40
Figura 2.10 - Representação bidimensional das combinações de diferentes tamanhos de partículas: (a) uniforme; (b) bimodal $D_M \gg D_S$ ; (c) trimodal $D_L \gg D_M \gg D_S$ ; (d) bimodal ( $D_L \sim D_S$ ) .....	40
Figura 2.11 - Empacotamento de misturas de partículas de formatos: esférico e irregular.....	41
Figura 2.12 - Efeito parede em: a) poros maiores na interface (em azul) – relação $D_L/D_S = 3,5$ ; b) poros menores na interface (em azul) – relação $D_L/D_S = 10$ .....	42
Figura 2.13 - Razão $D_L/D_S$ dos tamanhos de partículas para misturas bimodais com máximo empacotamento .....	43
Figura 2.14 - Relação de diâmetros entre miúdo e gráudo em uma mistura binária .....	43
Figura 2.15 - Empacotamento regular de discos bidispersos.....	44
Figura 2.16 - Representação da teoria da variação do índice de vazios em sistemas binários .....	46
Figura 2.17 - Representação dos vazios e agregados em um recipiente.....	47
Figura 2.18 - Método de Asharf e Noor: PRI das composições das faixas 5-10-14-18 e 5-10-18-22 .....	50
Figura 2.19 - Compacidade da composição de agregados, estado solto, de uma composição binária .....	51
Figura 3.1 - Representação esquemática de unidades móveis sólidas imersas entre as linhas de fluxo: (a) no líquido; e as perturbações causadas por (b) uma partícula com pequeno diâmetro; (c) uma partícula com maior diâmetro; (d) e um aglomerado de pequenas partículas .....	58
Figura 3.2 - Representação esquemática da distância média de separação entre partículas ( $D$ ) vista entre partículas: (a) em contato sem nenhum fluido entre elas e (b) distanciadas pelo fluido .....	59
Figura 3.3 - Imagem de empacotamento máximo: (a) em misturas comuns e (b) em CAA ....	59
Figura 3.4 - Método proposto por Okamura e Ozawa .....	63
Figura 3.5 - Método proposto por Gomes.....	66
Figura 3.6 - Reografia para CAA.....	73
Figura 3.7 - Composições dos agregados das misturas de CAA do estudo de Monteiro <i>et al.</i> (2015), (a) com B12, (b) B19, (c) B12 e B19.....	77

Figura 3.8 - Curvas de composições de agregados para CAA do estudo de Nanthagopalan e Santhanam (2012).....	80
Figura 3.9 - Curvas de composições de agregados do estudo de Farokhzad <i>et al.</i> (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017).....	82
Figura 3.10 - Curva de composições de agregados dos estudos de Cavalcanti (2006).....	84
Figura 3.11 - Curva de composições de agregados dos estudos de Melo (2005).....	85
Figura 3.12 - Curva de composições de agregados dos estudos de Gomes (2002).....	86
Figura 4.1 – Esquema da aplicação da análise de componentes principais.....	93
Figura 4.2 - Representação geométrica de duas componentes principais.....	94
Figura 4.3 – Projeção espacial dos dados aleatórios (a) no plano e (b) em uma componente principal.....	95
Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.....	97
Figura 5.2 - RBMG: a) com torrões úmidos antes de posto na estufa; b) com torrões secos após a estufa; c) submetido ao apiloamento e e) após ser peneirado na peneira de abertura 300 micrômetros.....	101
Figura 5.3 - Granulometrias do cimento CP II Z-32 e do RBMG.....	101
Figura 5.4 - Difratoograma de uma amostra de RBMG.....	103
Figura 5.5 - Tipos de quarteador de agregados (a) graúdos e (b) miúdos.....	105
Figura 5.6 - Representação das (a) dimensões de um grão e (b) representação das formas dos grãos.....	107
Figura 5.7 - Representação gráfica para determinação dos vazios da composição de agregados.....	109
Figura 5.8 - (a) Cone de Abrams, (b) a placa-base para a determinação de espalhamento do CAA e as marcas de referência $t_{200}$ e $t_{500}$ e (c) placa-base.....	111
Figura 5.9 - Classes de viscosidade plástica aparente $t_{500}$ (a) IEV 0; b) IEV 1; c) IEV 2 e d) IEV 3.....	112
Figura 5.10 - Caixa L.....	113
Figura 5.11 - Funil V (a) vista em planta; (b) vista frontal e (c) vista lateral.....	114
Figura 5.12 - Prensa AMSLER do LEMA/UFAL de 200 tf (a) Equipamento de registro de carga e (b) máquina de ensaio de resistência.....	116
Figura 5.13 - Ensaio de módulo de elasticidade estático.....	117
Figura 5.14 - Esquema da geometria do cilindro concêntrico e o vane do reômetro ICAR... ..	119
Figura 5.15 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos: areias média, grossa e industrial.....	122
Figura 5.16 - Distribuições granulométrica dos agregados graúdos britados B12 e B19.....	123
Figura 5.17 - Frequências das formas dos grãos.....	125
Figura 5.18 - Índices de forma dos grãos das pedras britadas obtidas das pedreiras (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.....	126
Figura 5.19 - Comparativo do índice de forma dos agregados das quatro pedreiras (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.....	128
Figura 5.20 - Distribuição granulométrica do agregado reciclado miúdo.....	129
Figura 5.21 - Distribuições granulométricas do agregado reciclado graúdo.....	130
Figura 5.22 - Índices de forma dos grãos do agregado graúdo reciclado de concreto.....	131

Figura 5.23 - Tensão de cisalhamento dos concretos do estudo base com 40 % de pasta: a) CMB12, b) CMB19; c) CGB12; d) CGB19; e) CMGB12; f) CMGB19; g) CMB12B19; h) CGB12B19; i) CMGB12B19 .....	134
Figura 5.24 - Espalhamento dos concretos: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12, (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19 e (i) CMGB12B19 .....	137
Figura 5.25 - Habilidade passante dos concretos: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12, (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19 e (i) CMGB12B19.....	139
Figura 5.26 - Ensaio <i>Sump Flow</i> do concreto CMc0.6B12: Espalhamento (a); borda (b) .....	140
Figura 5.27 - Ensaio <i>Slump flow</i> das misturas de concretos com segregação no centro (1) e nas bordas (2): (a) CAIB12, (b) CAIB12D1, (c) CAIB12D2, (d) CAId1B12 e (e) CARMARG12 .....	141
Figura 5.28 - Ensaio <i>Slump flow</i> das misturas de concretos com segregação no centro (1) e nas bordas (2): mistura de concreto AId2B12 .....	143
Figura 5.29 - Ensaio <i>L-box</i> das misturas de concretos: (a) CAIB12, (b) CAIB12D1, (c) AIB12D2, (d) CAId1B12 e (e) CARMARG12.....	143
Figura 5.30 - Ensaio <i>L-box</i> da mistura de concreto CAId2B12.....	145
Figura 5.31 - Curvas de composições de agregados desenvolvidas na 1ª etapa.....	154
Figura 5.32 - Curvas de composições de agregados com areia industrial (AI) desenvolvidas na 1ª etapa.....	158
Figura 5.33 - Curva de composição de agregados reciclados de concreto desenvolvida na 1ª etapa.....	159
Figura 6.1 - Gráfico das contribuições de partículas finas, intermediárias e grossas nas composições de agregados: (a) naturais e industriais que atenderam e (b) não atenderam a autoadensabilidade, e (c) industriais que não atenderam .....	165
Figura 6.2 - Exemplificações de cálculos de PDP: (a) MB12, (b) AIB12.....	168
Figura 6.3 - Curvas de composições binárias de distribuição: a) contínua AIB12 mod e descontínuas AId1B12 mod, b) descontínuas: AId2B12 mod e AId3B12 mod, c) descontínua: AId4B12 mod e AIB12D1, d) contínuas: Mc1B12C1 e Mc2B12C1, e) contínuas: Mc3B12C1 e Mc4B12C1 e f) contínuas: ARMARG12, ARMARG12-45 mod e ARMARG12-50 mod .....	176
Figura 6.4 - Ensaio <i>Slump flow</i> dos CAA com detalhes do espalhamento (a) e da borda (b): CAId1B12 mod (1), CAId2B12 mod (2), CAId3B12 mod (3), CAId4B12 mod (4), CAIB12D1 mod (5), CAIB12 mod (6), CARMARG12-45 mod (7) e CARMARG12-50 mod (8).....	180
Figura 6.5 - Ensaio <i>L-box</i> dos CAA: CAId1B12 mod (1), CAId2B12 mod (2), CAId3B12 mod (3) e CAId4B12 mod (4), CAIB12D1 mod (5), CAIB12 mod (6), CARMARG12-45 mod (7) e CARMARG12-50 mod (8).....	183
Figura 6.6 - Ensaio <i>Slump flow</i> dos CAA com detalhes do espalhamento (a) e da borda (b): CMc1B12C1 (1), CMc2B12C1 (2), CMc3B12C1 (3) e CMc4B12C1 (4).....	184
Figura 6.7 - Ensaio <i>L-box</i> dos CAA: CMc1B12C1, CMc2B12C1, CMc3B12C1 e CMc4B12C1 .....	185
Figura 6.8 - Zonas granulométricas de composições de agregados do grupo G12 para CAA191	

Figura 6.9 - Zona granulométrica de composições de agregados do grupo G19 para CAA ..	192
Figura 6.10 - Zona granulométrica de composições de agregados (grupo G12) não condizentes para CAA .....	193
Figura 6.11 - Zona granulométrica de composições de agregados do grupo G19 não condizentes para CAA .....	194
Figura 7.2 - <i>Scree plot</i> dos autovalores explicando as proporções de variação derivadas de cada componente principal para o grupo G12 .....	197
Figura 7.3 - Planos fatoriais contendo a composição das CP com as variáveis originais para o grupo G12 com (a) CP 1 e CP 2, e (b) CP 1 e CP 3 .....	198
Figura 7.4 - Projeções espaciais da ordenação dos vetores das variáveis para (a) CP 1 e CP 2, e (b) CP 1 e CP 3, e de dispersão (c) e (d) dos escores das amostras nestas projeções .....	200
Figura A 1 - Ajuste de curvas experimental e teórica de empacotamento, com 40 % de teor de pasta, dos concretos produzidos com agregados naturais: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12; (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19, (i) CMGB12B19, (j) CMc1B12C1, (l) CMc2B12C1, (m) CMc3B12C1, (n) CMc4B12C1, (o) CMc0.6B12C1 e (p) CARMARG12-45 ....	227
Figura A 2 - Ajuste de curvas experimental e teórica de empacotamento, com 40 % de teor de pasta, dos concretos produzidos com areia industrial: (a) CAIB12, (b) CAId1B12, (c) CAId2B12; (d) CAIB12D1, (e) CAIB12D2, (f) CAIB212 mod, (g) CAId1B12 mod, (h) CAId2B12 mod, (i) CAId3B12 mod, (j) CAId4B12 mod, (l) CAIB12D1 mod, (m) CARMARG12 – 45 mod e (n) CARMARG12 - 50 mod.....	229



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade para composições de CAA obtidas por diferentes autores .....	76
Tabela 3.2 - Análise de composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade para composições de CAA obtidas por diferentes autores .....	88
Tabela 5.1 - Características físicas dos agregados miúdos.....	123
Tabela 5.2 - Características físicas dos agregados graúdos britados.....	124
Tabela 5.3 - Índice de forma pelo método do paquímetro.....	125
Tabela 5.4 - Descrição estatística dos índices de forma das pedras britadas ¾”, ½” e 1” ....	128
Tabela 5.5 - Propriedades físicas dos agregados miúdo e graúdo reciclados de concreto ....	130
Tabela 5.6 - Concretos com diferentes composições de agregados aplicadas e teor de pasta de 40 %/ m <sup>3</sup> de concreto .....	132
Tabela 5.7 - Dosagem das misturas de concreto com areia industrial (AI) e com agregados reciclados (ARC) .....	133
Tabela 5.8 - Propriedades no estado fresco das misturas aplicadas .....	136
Tabela 5.9 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos com as composições da 1ª etapa .....	148
Tabela 5.10 - Correlação entre q e R <sup>2</sup> com as composições desenvolvidas na 1ª etapa.....	151
Tabela 5.11 - Composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições para CAA da 1ª etapa .....	161
Tabela 6.1 - Comparativos de parâmetros de graduações de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições da literatura .....	171
Tabela 6.2 - Comparativos de parâmetros de graduações de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições desenvolvidas no estudo.....	172
Tabela 6.3 - Composições de agregados industriais modificadas .....	175
Tabela 6.4 - Composições de agregados naturais e reciclados modificadas .....	175
Tabela 6.5 - Composições de agregados com proporções e agregados distintos .....	179
Tabela 6.6. - Dosagem de concretos com distintas composições de agregados contendo areia industrial .....	180
Tabela 6.7 - Propriedades de autoadensabilidade dos concretos.....	186
Tabela 6.8 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos com composições modificadas.....	187
Tabela 6.9 - Correlação entre q e R <sup>2</sup> com as composições modificadas de CAA .....	189
Tabela 7.1 - Número de componentes principais (CP), autovalores ( $\lambda_i$ ) e percentual da variância explicada de cada componente e proporção acumulada (%) pelos componentes para o grupo G12 .....	197
Tabela 7.2 - Composição das componentes principais com as variáveis originais para o grupo G12 .....	200
Tabela 7.3 - Proposta de parâmetros de graduação das composições de agregados para o grupo G12 .....	203
Tabela 8.1 – Recomendações para formulação de composições de CAA.....	209

Tabela A 1 - Composições de agregados com um agregado graúdo do estudo de Monteiro et al. (2015).....	219
Tabela A 2 - Composições de agregados com dois agregados graúdos do estudo de Monteiro et al. (2015).....	219
Tabela A 3 - Composições de agregados do estudo de Nanthagopalan e Santhanam (2012)	220
Tabela A 4 - Composições de agregados do estudo de Farokhzad et al. (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017).....	221
Tabela A 5 - Composições de agregados do estudo de Cavalcanti (2006).....	222
Tabela A 6 - Composições de agregados do estudo de Melo (2005) .....	222
Tabela A 7 - Composições de agregados do estudo de Gomes (2002) .....	223
Tabela A 8 - Composições de agregados com um agregado graúdo (B12 ou B19).....	224
Tabela A 9 - Composições de agregados com dois agregados graúdos (B12 e B19) .....	225
Tabela A 10 - Composições de agregados contendo AI e B12 .....	225
Tabela A 11. Composição de agregados reciclados contendo ARM e ARG, sem modificação .....	226
Tabela A 12 - Dados das composições de concreto do grupo G12 .....	232
Tabela A 13 - Matriz das coordenadas das composições dos experimentos nas CP para o grupo G12 .....	233
Tabela A 14 - Matriz de coordenadas das variáveis para o grupo 12.....	234

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Distribuições granulométricas: (a) Representação da estrutura granular; (b) representação estatística .....	33
Quadro 2.2 - Resumo de coeficientes de distribuição do modelo Alfred aplicado em diferentes concretos.....	56
Quadro 3.1 - Parâmetros de referência para dosagem de CAA.....	61
Quadro 3.2 - Propriedades no estado fresco de algumas misturas de concreto autoadensável	70
Quadro 3.3 - Aspectos que influenciam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do CAA .....	72
Quadro 5.1 - Caracterização química do CP II Z-32.....	100
Quadro 5.2 - Granulometria do RBMG #300 $\mu\text{m}$ .....	102
Quadro 5.3 - Comparativos de análise química do RBMG.....	102
Quadro 5.4 - Característica do aditivo químico.....	103
Quadro 5.5 - Ensaio e normas utilizadas para a caracterização dos agregados .....	104
Quadro 5.6 - Série de peneiras normais e intermediárias utilizadas na distribuição granulométrica.....	105
Quadro 5.7 - Classificação da forma dos grãos .....	107
Quadro 5.8 - Classes de espalhamento obtidas no ensaio de <i>Slump flow</i> .....	111
Quadro 5.9 - Classes de viscosidade plástica aparente $t_{500}$ .....	111
Quadro 5.10 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV).....	112
Quadro 5.11 - Classes de habilidade passante pela caixa-L .....	113
Quadro 5.12 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V .....	114
Quadro 5.13 - Proposta de classificação dos concretos em função da porosidade e da absorção de água.....	117
Quadro 5.14 - Ensaio realizados na caracterização dos concretos produzidos.....	118

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- A: Absorção do concreto
- AI: Areia industrial
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACP: Análise de componentes principais
- ARM: Agregado reciclado miúdo
- ARG: Agregado reciclado graúdo
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*
- a/c: Relação água/cimento
- B12: pedra britada com  $D_{\text{máx}}$  de 12,5 mm
- B19: pedra britada com  $D_{\text{máx}}$  de 19,0 mm
- CAA: Concreto autoadensável
- CC: Concreto convencional
- CV: Coeficiente de variação
- CIPM: *Compaction-Interaction Packing Model*
- CPM: *Compressible Packing Model*
- CPFT: Porcentagem acumulada de partícula
- CP: Componente principal
- CP II Z: Cimento Portland composto pozolânico
- CSR: Classe de tamanhos de abertura
- CU: Coeficiente de Uniformidade
- $D_L$ : diâmetro da maior (do inglês, *large*) partícula
- $D_s$ : diâmetro da menor (do inglês, *small*) partícula
- $D_M$ : diâmetro intermediário da partícula
- $D_{g,\text{médio}}$ : Diâmetro médio de partículas grossas
- $D_{p,\text{médio}}$ : Diâmetro médio de partículas pequenas
- $D_p$ : diâmetro da partícula
- DG – C: Distribuição granulométrica contínua
- DG – D: Distribuição granulométrica descontínua
- DPGM: Distância de separação de partículas graúdas e miúdas
- d1: partículas de maior tamanho
- d2: partículas de menor tamanho
- IEV: Índice de estabilidade visual
- IF: Índice de forma

Iv: Índice de vazios  
Ivc: Índice de vazios do concreto  
E<sub>g</sub>: Extensão granulométrica  
E<sub>ci</sub>: Módulo de elasticidade estático  
EMMA: *Elkem Material Mix Analyser*  
*f/c*: Relação fíler/cimento  
F: areia fina  
f<sub>ck</sub>: Resistência à compressão axial  
*f\**: *fillers*  
G: Areia grossa  
G12: Grupo G12  
G19: Grupo G19  
HPC: High performance concrete  
HP: Habilidade de passagem  
mDPGM: menor distância de separação de partículas  
MDPGM: maior distância de separação de partículas  
MEC: Método de empacotamento compressível  
MEP: Método de empacotamento  
M: Areia média  
MF: Módulo de finura  
η: Viscosidade plástica  
PAG: Porcentagem de agregado graúdo  
PGA: Parâmetro de graduação de agregados  
PDP: Predominância de diâmetro de partículas  
PR: Parâmetros de referência  
PRI: Porcentagem retida individual  
q: coeficiente de distribuição  
RBMG: Resíduo de beneficiamento de mármore e granito  
ρ<sub>r</sub>: Massa específica real  
SP: Superplastificante  
SF: Ensaio de escoamento  
*V<sub>ag</sub>*: Volume de agregado graúdo  
*V<sub>am</sub>*: Volume de agregado miúdo  
*V<sub>at</sub>*: Volume total de agregado  
*V<sub>c</sub>*: Volume de concreto

VF: Viscosidade plástica aparente pelo funil-V

VS: Viscosidade plástica aparente pelo  $t_{500}$

$\tau_0$ : Tensão de escoamento

$t_{500}$ : Tempo de fluidez ao alcançar o diâmetro de 500 mm

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xv
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	xvi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>1.1 Considerações Iniciais</b> .....	21
<b>1.2 Justificativa</b> .....	24
<b>1.3 Objetivos</b> .....	27
<b>1.4 Metodologia da Pesquisa</b> .....	27
<b>1.5 Limitações e Contribuições do Estudo</b> .....	28
<b>1.6 Estrutura do Trabalho</b> .....	29
<b>2 ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS</b> .....	31
<b>2.1 Aspectos relacionados à Distribuição Granulométrica das Partículas e sua Influência no Empacotamento</b> .....	31
<b>2.2 Conceituações e Modelos de Empacotamento de Partículas</b> .....	47
2.2.1 Modelo de Furnas .....	52
2.2.2 Modelo de Andreasen .....	53
2.2.3 Modelo de Alfred .....	54
<b>3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)</b> .....	57
<b>3.1 Definição e caracterização do CAA</b> .....	57
<b>3.2 Métodos de Dosagem de CAA</b> .....	61
<b>3.3 Propriedades Reológicas do CAA</b> .....	68
<b>3.4 Avaliação de composições de agregados</b> .....	74
<b>4 TÉCNICA MULTIVARIADA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS</b> .....	91
<b>4.1 Interpretação de Componentes Principais</b> .....	93
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	97
<b>5.1 Seleção e Métodos de Caracterização</b> .....	100
5.1.1 Características dos materiais .....	100
5.1.2 Formulação e produção do CAA .....	107
4.1.2.1. Composição de agregados .....	108
5.1.3 Propriedades de autoadensabilidade .....	110
5.1.4 Propriedades no estado endurecido .....	115

5.1.5	Avaliação dos CAA pelo método de empacotamento (MEP) .....	120
<b>5.2</b>	<b>Análise dos Resultados Obtidos</b> .....	<b>122</b>
5.2.1	Caracterização dos agregados.....	122
5.2.2	Dosagem do CAA.....	131
5.2.3	Propriedades de autoadensabilidade.....	133
5.2.4	Propriedades no estado endurecido .....	147
5.2.5	Empacotamento de partículas pelo modelo de Alfred.....	150
<b>5.3</b>	<b>Avaliação Qualitativa dos Parâmetros de Composições de Agregados para CAA</b> .....	<b>153</b>
<b>5.4</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>162</b>
<b>6</b>	<b>DETERMINAÇÃO E APLICAÇÃO DE PARÂMETROS DE GRADUAÇÃO DE AGREGADOS PARA CAA</b> .....	<b>164</b>
<b>6.1</b>	<b>Formulação do PDP para Aplicação do Parâmetro de Predominância</b> .....	<b>165</b>
<b>6.2</b>	<b>Aplicação dos PGA nas Composições de Agregados Avaliadas</b> .....	<b>169</b>
<b>6.3</b>	<b>Aplicação dos PGA nas Composições de Agregados Modificadas</b> .....	<b>174</b>
6.3.1	Dosagem do CAA com as composições modificadas .....	179
6.3.2	Propriedades de autoadensabilidade.....	180
6.3.3	Propriedades do estado endurecido .....	186
<b>6.4</b>	<b>Aplicação do Modelo de Empacotamento de Partículas de Alfred</b> .....	<b>188</b>
<b>6.5</b>	<b>Zonas Granulométricas para as Composições de Agregados</b> .....	<b>190</b>
<b>6.6</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>194</b>
<b>7</b>	<b>AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS</b> .....	<b>196</b>
<b>7.1</b>	<b>Interpretação da relação entre os parâmetros de graduação de agregados para CAA</b> 196	
<b>7.2</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>203</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS S E SUGESTÕES DE TRABALHOS</b> .....	<b>204</b>
<b>8.1</b>	<b>Considerações Finais</b> .....	<b>204</b>
<b>8.2</b>	<b>Sugestões de Trabalhos</b> .....	<b>209</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>210</b>
	<b>APÊNDICE A – COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS DA LITERATURA</b> .....	<b>219</b>
	<b>APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL PELO MODELO DE ALFRED</b> .....	<b>227</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS</b> .....	<b>232</b>
	<b>APÊNDICE D – ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO</b> .....	<b>235</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o tema da pesquisa, sendo discutidas as razões que fomentaram a escolha do assunto, e justifica-se a sua contribuição ao desenvolvimento tecnológico da indústria do concreto. Ainda são descritos os objetivos, as premissas e hipóteses da pesquisa, as limitações do estudo e a estrutura da tese.

### 1.1 Considerações Iniciais

Na Engenharia dos Materiais, avanços tecnológicos de materiais não convencionais têm surgido e contribuído com inúmeros benefícios para o atendimento das exigências do mercado. Especificamente, na Engenharia Civil, o amplo uso de materiais cimentícios avançados, como concretos especiais, tem sido uma realidade, unindo-se melhores desempenhos no estado fresco e endurecido, especificamente, o concreto autoadensável (CAA). Este se trata de um tipo de concreto não convencional amplamente conhecido e aplicado em países como o Japão e a Europa pela modernização e complexidade de estruturas de concreto armado (GOMES, 2002; OKAMURA; OUCHI, 2003; MELO, 2005; GOMES; BARROS, 2009).

Desde o início dos anos 90, o CAA tem sido aplicado na construção de pontes, edifícios e túneis (UMA *et al.*, 2017). Por isso, é importante que este material cimentício seja dosado de forma adequada para a obtenção correta da proporção de seus constituintes, tais como cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, aditivos e adições minerais. Os agregados, particularmente, são materiais que conferem ao concreto um maior volume por metro cúbico, maior resistência e durabilidade (ASHRAF; NOOR, 2013; STROEVEN; STROEVEN, 1999), entretanto, quando adicionados à pasta de cimento, é desejável que seja em quantidade máxima de partículas sólidas tanto quanto possível (CHATEAU, 2012). Em concretos autoadensáveis (CAA), o volume de de agregados representa em torno de 59 a 68 % da mistura de concreto (SU *et al.*, 2001).

Aliada à necessidade da redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, a emissão de CO<sub>2</sub>, ao consumo de adição mineral (fíler) e ao emprego de aditivos químicos, os agregados e o próprio concreto têm se destacado no estudo de empacotamento de partículas sobre a importância de pesquisas de novos materiais cimentícios (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008), dando-se ênfase à busca de alternativas estratégicas, como a aplicação de modelos de empacotamento de partículas (GRAZIA *et al.*, 2019). No tocante à questão do estudo de proporções dos agregados, de forma a reduzir a porosidade intergranular (DAMINELI, 2013; ORDOÑEZ, 2015), o que se busca é promover um menor volume de pasta, sem afetar,

negativamente, o comportamento do concreto no estado fresco e seu desempenho no estado endurecido. No referido estado, de acordo com Stroeven *et al.* (2009), os grãos formam a estrutura de uma rede espacial múltipla-conectada, obtendo uma estrutura granular, na maioria das vezes, dura e rígida, sendo os vazios preenchidos pela pasta de cimento. Suas propriedades químicas têm pouco efeito nas propriedades reológicas do concreto, ao contrário de suas propriedades físicas (densidade de empacotamento, forma, dimensão dos grãos) (JIAO *et al.*, 2017).

Tais questões mostram como o avanço tecnológico do concreto e a aplicação de teorias de empacotamento de partículas têm sido amplamente discutidos, haja vista a possibilidade de desenvolver misturas de concreto mais sustentáveis, cujo principal intuito é reduzir a quantidade de cimento por metro cúbico de concreto (FENNIS; WALRAVEN, 2012; MOOSBERG-BUSTNES, 2004). Estes autores fortalecem os conceitos de sustentabilidade, o que tem demonstrado que o empacotamento de partículas tem sido uma tecnologia eficiente e que tem evoluído ao longo dos anos no que tange à investigação de misturas granulares.

Nesse panorama tecnológico do concreto têm sido constantemente publicados trabalhos a respeito do empacotamento de partículas, nos quais vários modelos experimentais e numéricos, de certa forma complexos, têm sido discutidos, devido à contribuição desta teoria (CHATEAU, 2012; LONDERO *et al.*, 2017).

Entretanto, críticas a respeito da formulação de composições de agregados combinados e o não uso de determinadas frações granulométricas, devido ao surgimento de lacunas (*gaps*) e a reduzida porcentagem de partículas intermediárias entre miúdo e graúdo, têm dado uma maior ênfase na granulometria de agregados combinados (ASHRAF; NOOR, 2013).

Na busca por um sistema granular mais empacotado, a distribuição granulométrica contínua, na qual o tamanho de partículas aumenta de forma proporcional, aproxima os distintos tamanhos de grãos miúdos e graúdos. Essas distribuições são conhecidas como distribuições polimodais contínuas. No caso da ausência ou da baixa frequência de alguma dimensão de grãos, tem-se as distribuições polimodais descontínuas, afastando os distintos tamanhos dos grãos, podendo haver a dominância de determinadas dimensões de partículas que dificultem o desempenho no estado fresco (CARNEIRO *et al.*, 2001; FARIAS; PALMEIRA, 2010). Nesse aspecto, são escassos os estudos publicados acerca da influência da dominância de dimensões dos grãos de agregados na melhora da trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas do CAA. As pesquisas que existem não se concentram em avaliar a dominância de determinadas frações granulométricas nem tampouco a distância de separação das predominâncias de partículas graúdas e miúdas em distribuições contínuas e descontínuas de composições de agregados.

Um método experimental consolidado na determinação de composições de melhores empacotamentos de agregados que busca minimizar o índice de vazios é o método da maior massa unitária, sendo comprovada a sua eficiência pelos pesquisadores (TORALLES-CARBONARI, 1999; SU *et al.*, 2001; GOMES, 2002, TUTIKIAN, 2007, NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2012). Entretanto, a otimização empírica e puramente experimental dos constituintes do concreto pode não fornecer proporções ótimas quando muitos parâmetros são envolvidos. De fato, muitos métodos de dosagem reconhecem o problema do estudo das proporções dos componentes do concreto e têm sugerido a medida da densidade de empacotamento de um sistema granular ou o ajuste de curvas de composições ótimas de agregados (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

Modelos numéricos como de empacotamento de Alfred, sendo este um aprimoramento de modelos precedentes (Fuller, Andreasen e Andersen), têm sido aplicados em CAA por Su *et al.* (2001), Brouwers; Radix (2005), Cavaliere *et al.* (2016).

Modelos analíticos têm se destacado como ferramentas capazes de obter conjuntos granulares polidispersos compostos por  $n$  classes de tamanhos de grãos, buscando-se um sistema granular com menores índices de vazios, como exemplo o método de empacotamento compressível (MEC) ou CPM (do inglês, *compressible packing model*), desenvolvido por De Larrard (1999). Entretanto, de modo geral, apresentam limitações, como representatividade dos tamanhos, mesclas e formas dos grãos e uso de expressões matemáticas complexas, para que, assim, possibilite obter uma dosagem adequada do concreto, haja vista a crescente evolução desse compósito e de seus materiais componentes. Fennis (2011) sugere o modelo *Compaction-Interaction Packing Model* (CIPM), sendo este um modelo aprimorado que apresenta boa representatividade de agregados britados, distribuição dos grãos e empacotamento.

Neste cenário, busca-se obter composições de agregados que, quando combinados, contribuam para o alcance das propriedades requeridas no estado fresco e garantam as propriedades no estado endurecido a um menor índice de vazios possível, haja vista que o concreto autoadensável (CAA) contém um maior espaço interpartículas comparado a um concreto de uma estrutura granular mais compacta. Essa possibilidade de redução de espaços vazios no sistema granular remete à graduação de composições de agregados com um empacotamento “ideal” de agregados e ao mínimo volume de pasta.

Uma densidade máxima de empacotamento de composições de agregados nem sempre é favorável à mobilidade do CAA. Quantificar esse parâmetro é um desafio, tendo em vista que alguns métodos têm sido propostos baseados na maior densidade, entretanto, esta proposta tem levado a um elevado volume de pasta para alcançar os parâmetros de autoadensabilidade. A

formulação proposta para este tipo de concreto deve ser direcionada para um empacotamento que não seja o máximo, mas que se baseie na redução do teor de vazios que favoreça o menor teor de pasta e, ao mesmo tempo, a mobilidade, sem prejudicar as propriedades mecânicas e de durabilidade.

Partindo da premissa de que há uma tendência de proximidade de diâmetros de grãos mesclados de um determinado esqueleto granular para concreto autoadensável, pode-se definir a questão da pesquisa: “A distância entre os tamanhos de partículas graúdas e miúdas, contidas em elaboradas composições de agregados, é menor, à medida que os diâmetros dos grãos se aproximam, elevando-se o índice de vazios?”

Dada a premissa acima, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

- Composições de agregados mais favoráveis para a obtenção de CAA são do tipo polimodal contínua, com empacotamento e escoamento adequados, a partir da formulação de curvas granulométricas com frações granulométricas combinadas;
- Composições granulométricas contínuas resultam em menores distâncias entre os diâmetros dos grãos dos agregados graúdos e miúdos e aumenta o índice de vazios, ao contrário das descontínuas em que essa distância é maior e o índice de vazios menor.

## **1.2 Justificativa**

Atualmente, tem-se dado ênfase ao estudo das fases agregado e pasta de cimento de CAA para que conhecimentos acerca do desempenho da mistura no estado fresco, em suas devidas aplicações, possam ser analisados separadamente. Tratando-se da fase agregado, estudos a respeito do empacotamento têm sido foco de muitas pesquisas, com a visão de reduzir o índice de vazios e contribuir com melhores propriedades do concreto.

Especificamente, é sobre a fase granular que um foco maior necessita ser dado, de forma que se torne possível a maximização, ou seja, a otimização da composição de agregados, especialmente porque é o que representa uma maior quantidade no volume de concreto. Por outro lado, tem-se o questionamento sobre o tipo de distribuição granulométrica mais adequada para cada aplicação, pois vale ressaltar que a combinação de agregados, com diferentes granulometrias, pode originar ausência ou baixa quantidade de frações intermediárias importantes para manutenção da estabilidade da mistura. A questão da estabilidade da mistura é vista de forma que seja evitada a segregação e o bloqueio do fluxo, sendo estes fatores tão importantes para o CAA.

Estudos experimentais sobre empacotamento de partículas somados a estudos teóricos têm ressaltado a questão da otimização da fase esqueleto granular, que condiz com a redução do índice de vazios a partir da determinação de proporções adequadas de agregados, entretanto tem-se observado que um menor índice de vazios tem sido foco de estudos que buscam melhorias de propriedades mecânicas; e com relação à autoadensabilidade não se tem visto discussão a respeito da influência de diâmetros de partículas aproximados no aumento de tal propriedade.

Como ressaltado no item anterior, modelos experimentais e numéricos ajudam a avaliar o empacotamento de agregados, sendo possível verificar quais parâmetros de composições de agregados governam o desempenho do concreto e como a variação desses parâmetros podem afetar as suas propriedades, uma vez que diferentes tamanhos de grãos, quando da sua interação granular, podem resultar em efeitos positivos ou negativos na estabilidade dimensional, na trabalhabilidade, na resistência e na durabilidade. A respeito da dimensão máxima de agregados, os autores Esmailkhanian *et al.* (2014) destacam que o principal fator que torna o concreto menos estável, quando a dimensão máxima do agregado aumenta, é a menor força de arrasto exercida pela argamassa sobre os agregados graúdos. A esse respeito, é recomendável estabelecer um controle maior das dimensões de partículas graúdas e miúdas, para que haja um equilíbrio eficiente da predominância desses grãos na mistura.

A tentativa de desenvolver materiais ecoeficientes tem estimulado o desenvolvimento de novas pesquisas, responsáveis por descobertas inovadoras de tecnologias na área de misturas de concreto, e o estudo do esqueleto granular é uma de suas abordagens. Com relação ao cimento Portland, um dos materiais de custo bastante elevado, Fennis e Walraven (2012) explicam que, em 2011, a produção anual foi estimada em 3,4 bilhões de toneladas, sendo responsável por 7% da emissão de CO<sub>2</sub> em todo o mundo. Esta questão é um outro foco dado ao estudo específico da fase pasta.

Ensaio experimentais têm sua importância na definição do desempenho dos materiais estudados, entretanto, quando se pretende realizar uma quantidade maior de experimentos no laboratório, a verificação dos resultados acaba demandando recursos maiores (materiais, mão-de-obra e financeiros), além de um maior tempo de execução de testes e análise dos vários fatores envolvidos. Unir experimentos físicos e numéricos permite reduzir significativamente trabalhos experimentais.

Além dos aspectos acima relacionados, tem-se visto que em concretos de alto desempenho (do inglês, *High Performance Concrete - HPC*), são desenvolvidos vários atributos, tais como resistência, durabilidade, trabalhabilidade e estabilidade dimensional,

enquadrando-se o concreto autoadensável, um derivado do HPC, a ser tratado no presente estudo (OKAMURA; OUCHI, 2003). O concreto autoadensável é um concreto altamente trabalhável, que não segrega e não necessita de qualquer compactação mecânica (WONG *et al.*, 2013), sendo primeiramente desenvolvido em 1988, no Japão, pelo Professor Hajime Okamura, para o alcance da durabilidade de estruturas de concreto e redução do barulho durante a concretagem, principalmente em áreas sísmicas (OKAMURA; OUCHI, 2003; ASHISH; VERMA, 2018). Okamura e Ouchi (Op. cit.) foram alguns dos pioneiros no desenvolvimento do CAA, cujo método é também conhecido como Método Japonês, conforme Brouwers e Radix (2005). Este tipo de concreto tem sido foco de inúmeras investigações em institutos e universidades de vários países, inclusive no Brasil.

Atributos supracitados são alcançados com numerosos experimentos, que muitas das vezes levam à combinação de agregados de forma otimizada, mas que ainda buscam reduzir a quantidade de pasta de cimento, haja vista que o CAA requer um maior volume de pasta em relação ao concreto convencional. Neste aspecto, pesquisas têm apresentado os intervenientes que afetam a estabilidade dimensional do concreto e o empacotamento de partículas (ESMAEILKHANIAN, *et al.*, 2014; KHAYAT *et al.*, 2000). Assim, esforços têm sido empregados na busca de dosagens de CAA que, ao mesmo tempo, garantem um desempenho adequado nas propriedades do estado fresco e abranjem o empacotamento de partículas. É por meio da junção das teorias de empacotamento do sistema de partículas sólidas e reologia do concreto autoadensável que se busca alcançar esse desafio.

Tona-se essencial, diante do exposto, defender neste trabalho que o projeto granulométrico de composições de agregados, considerando-se as variações das modalidades, bimodais ou polimodais, dessas composições, afeta as propriedades do CAA, sendo necessário unir o conhecimento do desempenho reológico e mecânico do concreto, com configurações otimizadas dos agregados, visando, principalmente, a obtenção de características de autoadensabilidade. Propriedades mecânicas (resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, entre outros) e durabilidade, são conseqüências alcançadas ao atingir o objetivo principal.

Como se busca obter parâmetros de graduação a partir do estudo de esqueletos granulares que possibilite alcançar a autoadensabilidade do CAA e garantir as propriedades referentes ao estado endurecido, este estudo buscou averiguar informações a respeito dos parâmetros de composições de agregados, admitindo-se distribuições granulométricas contínuas e descontínuas e a teoria do empacotamento de partículas, de forma a determinar a influência da

predominância de determinados tamanhos de partículas. Sendo de suma importância, estes parâmetros necessitam de um estudo aprofundado para uma melhor quantificação.

### 1.3 Objetivos

Propõe-se como objetivo principal avaliar composições de agregados para concreto autoadensável por meio do efeito de suas distribuições granulométricas e de fatores que influenciam o empacotamento de partículas, a fim de propor parâmetros de graduação de agregados que possibilitem otimizá-las.

Para o alcance do objetivo principal, os objetivos específicos são os seguintes:

- avaliar a adequação de métodos experimentais para obter composições binárias, ternárias e quaternária, com diferentes granulometrias de agregados, a fim de obter composições de agregados com melhores empacotamentos;
- identificar qualitativamente os parâmetros relacionados ao empacotamento das composições de agregados empregados nas dosagens de CAA que influenciam no alcance da autoadensabilidade;
- fundamentar quantitativamente estes parâmetros focando na predominância das frações das partículas dos agregados graúdos e miúdos e nas distribuições polimodais;
- propor zonas granulométricas superior e inferior para composições de agregados que atendem aos critérios de autoadensabilidade;
- verificar a eficiência da técnica multivariada aplicada em estudo de concreto, avaliando as variáveis relacionadas à formulação do CAA e sua autoadensabilidade.

### 1.4 Metodologia da Pesquisa

A pesquisa se desenvolveu em quatro fases: levantamento do estado da arte, desenvolvimento do estudo numérico-experimental, a análise dos resultados e discussões, finalizando com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Com o levantamento do estado da arte foi possível elaborar uma revisão bibliográfica (abrangendo os Capítulos 2, 3 e 4), para que, então, fossem obtidos conhecimentos construídos até os dias atuais sobre o concreto autoadensável, englobando as particularidades pertinentes aos métodos de dosagem e aos critérios de autoadensabilidade. Também foram abordados os conceitos e definições sobre o tema de empacotamento de partículas, de modo a conhecer, principalmente no que diz respeito aos fatores relativos ao esqueleto granular dos agregados,

entre outros aspectos que interferem nas propriedades do estado fresco e endurecido. Tendo-se o conhecimento dos estudos encontrados na literatura, procurou-se referenciá-los aos resultados encontrados.

Consistindo de uma pesquisa de caráter numérico-experimental, englobando estudos e ensaios de laboratório de composições de concreto (cujos detalhes da metodologia encontram-se nos Capítulos 5, 6 e 7), o estudo abrangeu a avaliação de composições de agregados, a fim de determinar parâmetros de graduação de agregados (PGA) que pudessem otimizá-las para aplicação em concreto autoadensável, assegurando-se maior fluidez e estabilidade.

Para a consecução da análise e interpretação da representatividade dos PGA e das respostas dos ensaios de autoadensabilidade dos concretos, utilizou-se uma técnica estatística multivariada, aplicando-se composições avaliadas e modificadas) no estudo, juntamente com as retiradas da literatura.

A seqüência do trabalho contemplou o desenvolvimento de novos estudos experimentais de esqueletos granulares para CAA, tendo como base a configuração quantitativa das variáveis estudadas e do embasamento estatístico.

Dessa forma, a busca para atender aos objetivos e às hipóteses da pesquisa foi assentada num amplo conjunto de conhecimentos obtidos dos resultados desta pesquisa, com embasamento da revisão bibliográfica.

## **1.5 Limitações e Contribuições do Estudo**

Dada à complexidade do tema de pesquisa, este trabalho limita-se a avaliar composições de agregados para aplicação em concreto autoadensável. A principal questão que deve ser ressaltada é a proporção dos materiais que compõem o sistema granular e os aspectos que contribuem para a estabilidade do concreto. Na prática, são constatados vários fatores que interferem nesse desempenho, como a granulometria, o tamanho, a combinação dos agregados e, nestes aspectos, tem-se dado maior atenção. Entretanto, esta pesquisa não abordou aspectos relativos à forma dos grãos dos agregados e composição da pasta. Admite-se que a composição da pasta seja fixa para que possa reduzir o número de variáveis a serem investigadas.

Ademais, é necessário levar em consideração que o estudo do empacotamento de partículas pode trazer contribuições em diversas propriedades do concreto, que serão obtidas como consequência, em destaque a menor porosidade, maior massa específica aparente e a maior resistência.



Por outro lado, cabe ressaltar que este trabalho é de caráter experimental e numérico, recorrendo-se a análises numéricas como maneira de auxiliar na simulação de composições de agregados.

Como contribuições, de forma geral, este trabalho pretende: promover o entendimento do desempenho de misturas de CAA, no estado fresco e endurecido, quanto à influência de distribuições granulométricas de diferentes combinações de agregados; aprimorar o conhecimento adquirido em estudos prévios, focando no estudo experimental e numérico das composições de agregados de distribuições contínuas e descontínuas, nas predominâncias de diâmetros de partículas de agregados graúdo e miúdo (PDP) e nas características das misturas de concreto no estado fresco, contribuindo para a minimização do consumo de cimento e para a maximização da autoadensabilidade.

Ainda, como contribuição, tem-se a aplicação de um método estatístico para o estabelecimento de correlações entre as propriedades mensuradas.

## **1.6 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho de tese encontra-se organizado em oito capítulos, incluindo este primeiro capítulo, além das referências bibliográficas e dos apêndices.

No Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, os objetivos que se pretende alcançar, a justificativa, as limitações do estudo, bem como a metodologia da pesquisa a ser empregada, a qual está detalhada no Capítulo 4.

No Capítulo 2 descreve-se a revisão bibliográfica sobre o estudo do empacotamento de partículas, apresentando-se os conceitos principais a serem abordados no estudo. Neste, é apresentada uma breve discussão sobre os métodos experimentais de composições de agregados e modelos de empacotamento de partículas com suas particularidades.

No Capítulo 3 também apresenta a revisão bibliográfica abordando-se as considerações sobre o concreto autoadensável, os métodos de dosagem e as abordagens relativas à obtenção do esqueleto granular. Além disso, apresenta-se uma avaliação de composições de agregados para CAA com base em estudos da literatura, relacionando-os com os parâmetros de autoadensabilidade das misturas.

No Capítulo 4 é apresentada a revisão da literatura a respeito da técnica multivariada Análise de Componentes Principais (PCA).

No Capítulo 5 contém o programa experimental, englobando os métodos e a caracterização dos materiais empregados. É também apresentada a avaliação de composições

de agregados para CAA desenvolvidas na primeira etapa do programma experimental do trabalho. Este capítulo apresenta, de forma subjetiva e introdutória, a avaliação de parâmetros de composições de agregados, englobando as composições aplicadas na primeira etapa do trabalho.

O Capítulo 6 abrange as etapas 2 e 3 do programa experimental. Primeiramente, determina-se os parâmetros de graduação de agregados que foram avaliados no capítulo anterior, formulando-se, numericamente, o parâmetro de predominância de diâmetros de partículas (PDP) e o coeficiente de uniformidade (CU) das composições avaliadas e, posteriormente, aplica-se os PGA nas composições modificadas. Neste capítulo ainda são propostas zonas granulométricas de composições de agregados desenvolvidas com agregados graúdos de dimensões máximas características de 12,5 e 19,0 mm.

No Capítulo 7, apresenta-se uma avaliação estatística dos PGA por meio da técnica multivariável Análise de Componentes Principais, a fim de interpretar as relações entre os PGA e os parâmetros de autoadensabilidade.

No Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais, além de sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o trabalho apresenta as referências bibliográficas e, na sequência, os Apêndices, nos quais estão os dados complementares do estudo. Também é apresentado um artigo publicado em um periódico.

## 2 ESTUDO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Neste capítulo, são descritos sucintamente os fundamentos de empacotamento de partículas sólidas num sistema granular, buscando-se elucidar como a distribuição granulométrica, os vazios entre os grãos e o próprio tamanho das partículas afetam o arranjo granular e a mobilidade dos grãos, tomando-se como base referências encontradas na literatura. Ainda são discutidas a atuação do meio fluido neste sistema e a relação de diâmetro das partículas. São tratados, também, alguns modelos de empacotamento de partículas desenvolvidos para auxiliar na determinação de misturas de frações com maiores densidades de empacotamentos.

A presença de um fluido em um sistema granular é responsável por dar mobilidade e promover o afastamento dos grãos. De fato, um sistema de grãos sem fluido não tem mobilidade e, havendo contato entre os grãos deste sistema, os vazios intergranulares não estão preenchidos, justamente pelo fato de os grãos não serem cubos perfeitamente empilhados (DE LARRARD, 1999). Inserindo-se um fluido gradativamente no sistema, segundo Vogt (2010), este cobre primeiro a área superficial dos grãos e depois preenche os vazios intergranulares; por fim, passa a afastá-los quando ocorre de o volume ser maior do que os vazios, em fase contínua. É justamente pela necessidade de aplicar um mínimo teor de fluido necessário para dar mobilidade aos grãos, que surge a teoria do empacotamento de partículas (PILEGGI *et al.*, 2003). Ainda assim, o teor de agregados influencia na trabalhabilidade do concreto, o que pode interferir na fluidez da mistura com a redução do volume de pasta (BROUWERS; RADIX, 2005).

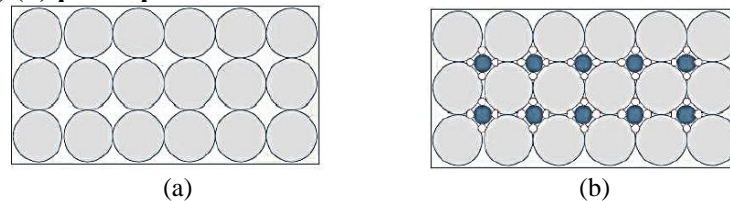
### 2.1 Aspectos relacionados à Distribuição Granulométrica das Partículas e sua Influência no Empacotamento

Como é foco do presente trabalho estudar composições de agregados com distintas distribuições granulométricas, faz-se necessário abordar as terminologias que tratam destas distribuições e de tamanhos de partículas, as quais são utilizadas ao longo do trabalho. Neste item, o uso do termo “mistura”, considerado por alguns autores (DÌAZ, 1998; GOMES, 2002; MANGULKAR; JAMKAR, 2013), quer dizer “composição”, obtendo-se, assim, modalidades de acordo com a combinação de partículas que se pretende estudar, de forma a resultar em um sistema binário, ternário, quaternário, ou de mais combinações de agregados, a fim de obter o empacotamento de partículas.

a) Monodispersão: refere-se às partículas de um único tamanho, tanto esféricas como não esféricas. É impossível produzir, na prática, uma monodispersão (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Também chamada de distribuição granulométrica estreita, em uma monodispersão a distribuição contém maiores espaços vazios entre as partículas (PILEGGI, 2001), Figura 2.1a. Em se tratando de partículas com diâmetros aproximados, e ainda não esféricas, reduz-se ainda mais o empacotamento (OLIVERIA *et al.*, 2000).

b) Polidispersão: é uma mistura de duas ou mais monodispersões ou tamanhos discretos (OLIVEIRA *et al.*, 2000). É o que leva a obter distribuições granulométricas mais amplas, nas quais partículas menores preenchendo os espaços vazios, possibilitam aumentar a densidade de empacotamento e, por conta disso, reduzir a quantidade de água da mistura (PILEGGI, 2001), Figura 2.1b.

**Figura 2.1 - Forma de distribuição granulométrica de partículas e seu efeito no empacotamento: (a) monodispersão; (b) polidispersão**



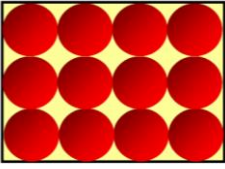
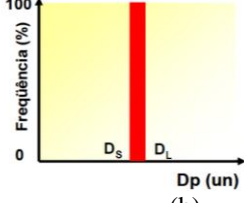
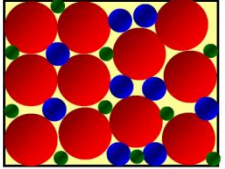
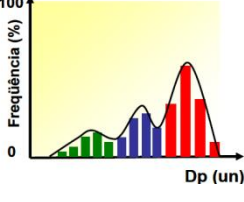
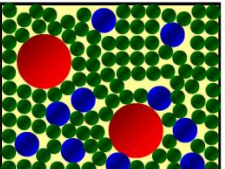
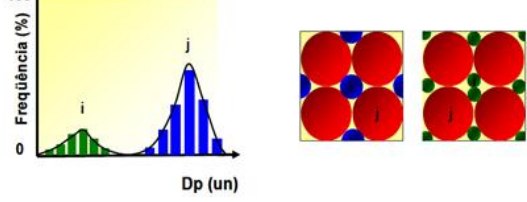
Fonte: Pileggi (2001)

c) Tamanhos discretos: trata-se de uma faixa granulométrica, cujo empacotamento é superior ao de uma monodispersão. Refere-se a todas as partículas pertencentes a uma estreita faixa granulométrica, ou pertencentes a uma classe única em um analisador de partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

d) Modalidade: significa o número de monodispersões ou tamanhos discretos em uma polidispersão. Uma mistura com duas monodispersões, por exemplo, é denominada bimodal; com três, trimodal e, com mais de três, polimodal (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Pode-se falar, também, de extensão granulométrica,  $E_g = D_L/D_S$  (na qual  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula;  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula e  $D_P$  é o diâmetro da partícula), para cada tipo de distribuição, classificando-as da forma ilustrada no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1 - Distribuições granulométricas: (a) Representação da estrutura granular; (b) representação estatística**

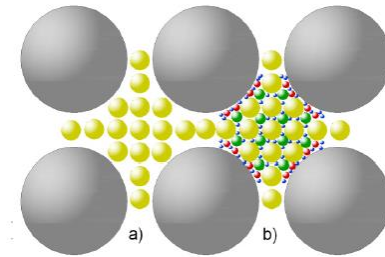
1.1 Monodispersão de partículas.	1.2 Distribuição monomodal de partículas.
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>
1.3 Polimodal assimétrica crescente	1.4 Polimodal simétrica
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>
1.5 Polimodal assimétrica decrescente	1.6 Polimodal descontínua
 <p>(a)</p>	 <p>(a)</p> <p>(b)</p>

Fonte: Mendes (2008) adaptado de Funk; Dinger (1994)

No Quadro 2.1, nota-se a monodispersão de partículas (em 1.1), com  $E_g$  entre 1,16 e 2,0; a distribuição monomodal de partículas (em 1.2) com  $E_g > 2$  (esta difere da monodispersão pela extensão granulométrica); e polimodais (de 1.3 a 1.6), subdividindo-se em: polimodais contínuas (de distribuição assimétrica crescente, de distribuição simétrica e de distribuição assimétrica decrescente); e polimodais descontínuas. Estas últimas se caracterizam pela ausência de uma população de partículas. Quanto maior for  $E_g$ , maior tende a ser o empacotamento da distribuição (FUNK; DINGER, 1994 *apud* MENDES, 2008).

Uma distribuição polimodal é obtida por meio de um projeto granulométrico em que são inseridas uma maior quantidade de granulometrias de partículas de uma mistura, fazendo com que ocorra a diminuição dos vazios entre as partículas grandes pela inserção de partículas menores, resultando na diminuição da porosidade intergranular em tamanho e em volume (DAMINELI, 2013). Entre as distribuições do tipo bimodal, Figura 2.2 a, e polimodal, Figura 2.2 b, por exemplo, constata-se uma distinção de tamanhos de partículas e quantidades de vazios (Figura 2.2).

**Figura 2.2 - Distribuição a) bimodal; b) polimodal**

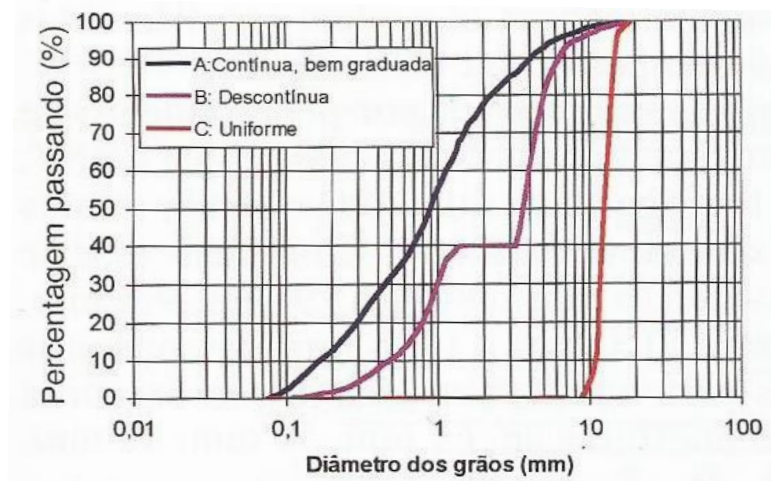


Fonte: Damineli (2013)

Estudos a respeito dos tamanhos ou dimensões de partículas, considerando agregados miúdo e grúdo, podem ser encontrados em várias publicações (CASTRO *et al.*, 2009; LEÓN; RAMÍREZ, 2010). Geralmente se dão em análises gráficas de distribuições granulométricas de agregados, as quais podem ser apresentadas em curvas de porcentagem retida individual e em curvas de porcentagem retida acumulada.

Em geral, as distribuições granulométricas de agregados se subdividem em: uniforme, contínua e descontínua (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; FARIAS; PALMEIRA, 2010), conforme visto na Figura 2.3.

**Figura 2.3 - Curvas de distribuições granulométricas**



Fonte: Farias e Palmeira (2010)

A distribuição granulométrica uniforme ocorre da maioria das partículas pertencerem apenas a uma faixa granulométrica, com o menor diâmetro aproximadamente igual a metade do diâmetro máximo, sendo a curva granulométrica mais alongada na vertical em forma de “S”. Esta deve ser evitada quando se pretende alcançar um maior preenchimento dos vazios e obter maior trabalhabilidade (CARNEIRO *et al.*, 2001).

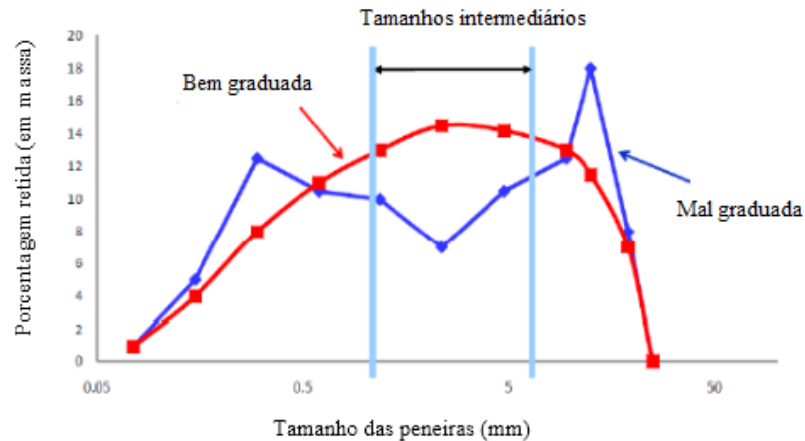
No tipo de distribuição granulométrica contínua, o tamanho das partículas aumenta de forma proporcional, o que resulta em uma continuidade. Em outras palavras, é aquela que seu projeto granulométrico é formado por grãos com diâmetros aproximados, ou seja, todos os diâmetros intermediários, desde um valor mínimo até um valor máximo são incluídos, sendo visivelmente observada a suavidade da curva, em forma de “S”, mais alongada na vertical (FARIAS; PALMEIRA, 2010; DAMINELI, 2013).

Na distribuição granulométrica descontínua (“*gap graded*”) ocorre a ausência de determinado tamanho de partículas em determinados intervalos, cuja curva apresenta um patamar horizontal devido à essa ausência em uma fração granulométrica (OLIVEIRA *et al.*, 2000, FARIAS; PALMEIRA, 2010); ou seja, é caracterizada pela formação de “*gaps*” em seu projeto granulométrico, cujos grãos possuem diâmetros mais distantes entre si. Esses “*gaps*”, conforme Daminelli (2013) são causados propositadamente pela falta de grãos de determinados diâmetros. Malewar *et al.* (2017) foram mais enfáticos ao afirmarem que uma graduação do tipo *gap graded* é aquela que contém uma percentagem pequena de agregados na faixa de tamanho médio, resultando em uma curva com um plano (*flat*) nesta faixa. Constata-se que não há um consenso sobre a quantificação da percentagem dos tamanhos das partículas nos intervalos em que ocorre a descontinuidade.

É possível que problemas de qualidade final do concreto ocorram em composições de agregados de distribuições descontínuas, conforme Tutikian (2007). O mesmo autor comenta que se deve buscar distribuições mais contínuas possível, pelo fato de lacunas entre as frações granulométricas favorecerem o surgimento de segregação do concreto. De Larrard (1999) demonstra que a redução da segregação é favorecida pela granulometria contínua, por menores diferenças entre tamanhos entre as partículas e pelo maior empacotamento. Mehta e Monteiro (2014) também concordam que agregados de distribuição contínua, considerando aquela que não apresenta grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partículas, favorecem a trabalhabilidade do concreto.

A respeito de misturas descontínuas ou mal graduadas, referidas como “*gap-graded*” *mixtures*, e de misturas contínuas ou bem graduadas de concreto sustentável, conhecidas como “*well-graded*” *mixtures*, Anson-Cartwright (2011) relata que estas últimas apresentaram boas distribuições de agregados, incluindo, também, agregados de tamanhos intermediários compreendidos entre # 2,36 mm e #9,5mm, obtidas de forma otimizada, enquanto que as primeiras foram formadas com composições binárias de areia fina (40 %) e agregado graúdo de  $D_{máx} = 19$  mm (60 %). Como vantagem, este autor conseguiu reduzir o teor de pasta de cimento até 16 % sem comprometer o desempenho do concreto, Figura 2.4.

**Figura 2.4 - Curvas de combinações de agregados bem graduadas e mal graduadas versus percentagem retida**

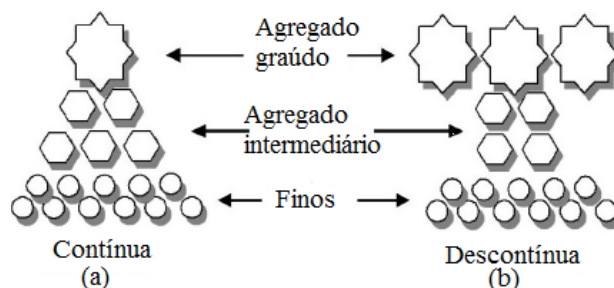


Fonte: Adaptado de Anson-Cartwright (2011)

Malewar *et al.* (2017) também concordam que uma melhor graduação é caracterizada por conter todas as frações de agregados nas proporções requeridas, apresentando, ainda, menor índice de vazios.

De acordo com Santos *et al.* (2015), as duas diferentes abordagens de esqueleto granular – distribuições contínua e descontínua -, apresentaram desempenhos no estado fresco bastante peculiares quando se percebeu as diferentes quantidades de partículas miúdas, de agregados intermediários e de agregados graúdos. Ambas podem conter uma maior quantidade de agregados miúdos, entretanto, pode ocorrer uma menor contribuição de agregados intermediários e uma proporção média de agregados graúdos em distribuições descontínuas (Figura 2.5 b), o contrário das contínuas (Figura 2.5 a).

**Figura 2.5 - Representação de dois tipos de esqueleto granular**



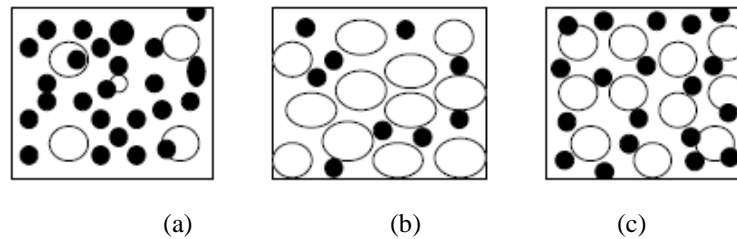
Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2015)

Quando combinados dois ou mais tipos de agregados, a distribuição de tamanhos de partículas tem-se mostrado um método bastante utilizado no estudo de composições de agregados que, muitas das vezes, estabelece uma relação de agregados miúdos e graúdos de



forma otimizada (DÍAZ, 1998; BILLBERG, 1999; GOLTERMANN *et al.*, 1997; CARNEIRO *et al.*, 2001). Essa busca pela otimização de uma composição granulométrica, por procurar determinar a melhor composição de agregados que atinje um menor volume de vazios, depara-se com características intrínsecas de cada agregado que, por serem diferentes, resultam em composições distintas, como os exemplos citados por Carneiro *et al.* (2001), ilustrados na Figura 2.6.

**Figura 2.6 - Distribuição com predominância de partículas (a) pequenas e (b) grandes e (c) distribuição contínua**



Fonte: Carneiro *et al.* (2001)

Como a ideia é de que em um conjunto de partículas haja tamanhos diferentes de grãos, é notório, nos exemplos ilustrados na Figura 2.6, a predominância de diferentes partículas no sistema granular em cada uma das três distintas composições de agregados. Contudo, o arranjo granulométrico pode ser tal que uma maior continuidade da mistura possa ser obtida ou não, gerando distribuições descontínuas. Representa-se em (a) a predominância de partículas pequenas; em (b) a predominância de partículas grandes; e em (c) uma representação bem melhor distribuída de uma hipotética composição, admitindo-a como composição ideal, com menor índice de vazios (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Um parâmetro utilizado na mecânica dos solos, chamado de coeficiente de uniformidade (CU), conforme Nanthagopalan e Santhanam (2012), Farokhzad *et al.* (2016), permite expressar quão bem graduados são os tamanhos de partículas. Analisando diferentes graduações de agregados para concretos aplicados em pavimentação, Neptune (2008) constatou que o coeficiente de uniformidade mostrou-se ser um parâmetro preponderante nos efeitos das graduações estudadas. Nos estudos de diferentes proporções de agregados combinados, os autores mencionados observaram que quanto maior o valor de CU calculado (adimensional), maior a densidade de empacotamento dos agregados. CU é calculado por meio da Equação (2.1).

$$CU = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}}, \quad (2.1)$$

na qual  $D_{60\%}$  é o diâmetro da peneira pela qual passam 60 % de partículas; e  $D_{10\%}$  é o diâmetro da peneira que permite passar 10 % de partículas.

Embora o parâmetro CU possibilite identificar a uniformidade de agregados, segundo afirmação de Farokhzad *et al.* (2016), o aumento do tamanho máximo de agregados causa a redução deste parâmetro e a instabilidade no concreto. Sob este ponto de vista, observa-se que há a possibilidade de ocorrer a instabilidade do CAA com a maior distância dos tamanhos de partículas graúdas e miúdas que, apesar de diminuir-se o índice de vazios, causa uma dificuldade de interação entre as partículas grandes e pequenas.

Na literatura científica, existem várias recomendações a respeito do diâmetro e da proporção de agregados miúdos e graúdos. Como o estudo de uma composição de agregados depende do tipo de concreto, é preciso atentar não apenas as frações granulométricas preenchidas pelos grãos do agregado, mas também com relação ao diâmetro máximo e às porcentagens de cada tipo de agregado contidas na composição. Um caso particular é o concreto autoadensável, cuja dimensão e proporção do agregado graúdo devem ser menores (OKAMURA; OUCHI, 2003; GOMES, 2002).

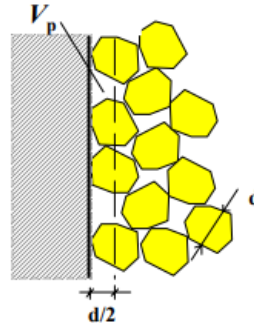
Os tamanhos das partículas são uma característica fundamental na distribuição granulométrica. Para se obter o conhecimento do tipo de distribuição granulométrica de cada agregado utilizado em uma mistura, normalmente são usadas peneiras com aberturas de diâmetros menores que os indicados nas normas brasileiras, tais como NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009), para ensaios de granulometria. Uma maior precisão de uma curva granulométrica discreta é obtida quando um maior número de peneiras for utilizado no ensaio (DAMINELLI, 2013; FARIAS; PALMEIRA, 2010). As peneiras da série normal obedecem a uma progressão geométrica de razão 2:1 e ficam igualmente espaçadas em um gráfico logarítmico (FARIAS; PALMEIRA, 2010). Não apenas 2:1, mas a progressão geométrica pode ser  $\sqrt{2}:1$  ou  $\sqrt[4]{2}:1$ , que se refere à razão de classe de tamanhos de abertura (CSR).

O empacotamento pode ser melhorado pela razão entre os diâmetros das partículas envolvidas. Como se trata da definição de uma extensão granulométrica que varia conforme a classificação dos tamanhos das partículas, é possível obter um máximo empacotamento por distribuições polimodais, contínuas ou descontínuas, a partir do conhecimento das frações granulométricas definidas pelas diferentes malhas de aberturas de peneiras sucessivas. Por ser a classificação dos tamanhos dos grãos uma variável discreta, pode-se definir um eficiente empacotamento quanto maior for o número de partículas preenchendo os vazios (CINCOTTO *et al.*, 2012).

Portanto, em uma distribuição monomodal, por exemplo, a porosidade é bem maior, principalmente se essa distribuição for interrompida pela parede de um recipiente, no qual a porosidade será acrescentada nesta região, dando-se o nome de *efeito de parede*. Este efeito pode ocorrer tanto no contato com a parede do recipiente como entre partículas de mesma dimensão e entre partículas maiores e bem menores.

De Larrard (1999) ao abordar o estudo das interações entre partículas, também considerou o efeito de interação parcial devido à proximidade dos grãos, isto é, quando o diâmetro  $d_1$  dos grãos não resultou muito maior que o diâmetro  $d_2$  ( $d_1 \geq d_2$ ). Pode-se observar, na Figura 2.7, que o efeito de parede na superfície de um recipiente promove menor densidade de empacotamento, zona na qual ocorre a perturbação, em virtude dos vazios existentes.

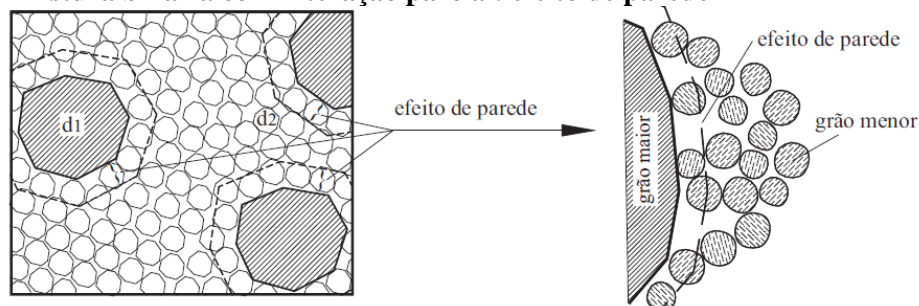
**Figura 2.7 - Efeito de parede nas fronteiras do misturador**



Fonte: De Larrard (2009)

Outra situação em que ocorre o efeito de parede, com interação parcial, é quando um grão de diâmetro  $d_1$  (partículas de maior tamanho) é adicionado a uma mistura granular na qual o diâmetro  $d_2$  (partículas de menor tamanho) é dominante, surgindo-se uma quantidade de vazios na zona de contato das duas classes (Figura 2.8) (DE LARRARD, 1999; FORMAGINI, 2005). Nesta região de interface, na qual o grão maior pode ser comparado a uma parede de um recipiente, tem-se o contato entre as partículas graúdas e miúdas, resultando em uma menor densidade de empacotamento.

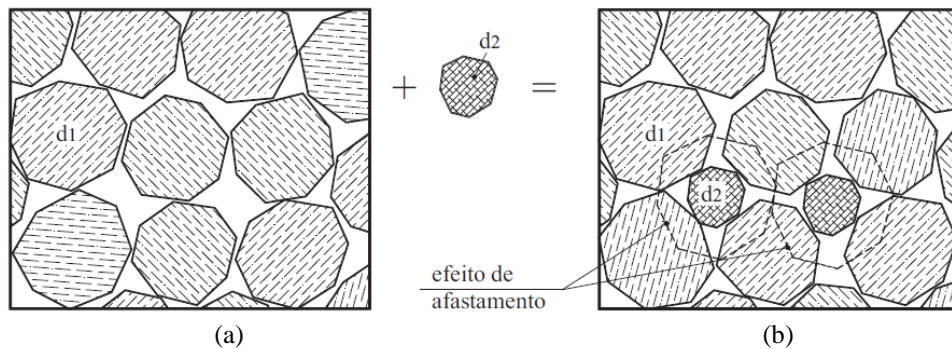
**Figura 2.8 - Mistura binária com interação parcial: efeito de parede**



Fonte: Formagini (2005)

O efeito da inserção de grãos menores ( $d_2$ ) em uma mistura granular, em que os grãos maiores ( $d_1$ ) dominantes são deslocados quando os primeiros são adicionados, é visto na Figura 2.9. Devido ao rearranjo das partículas e a maior dimensão de  $d_2$ , comparado ao espaço vazio entre as de dimensão  $d_1$ , pode-se gerar o surgimento de maiores vazios. Por isso, denominado efeito de afastamento dos grãos dominantes.

**Figura 2.9 - Mistura binária: (a) mistura sem interação; (b) mistura com interação parcial e efeito de afastamento**

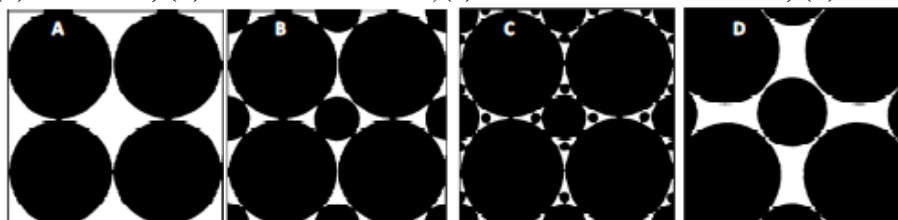


Fonte: Formagini (2005)

Rebmann (2016) afirma que o efeito de afastamento dos grãos é maior quanto mais próximos forem os diâmetros das partículas. Significa dizer que, se a máxima densidade de empacotamento for um critério, é possível que o diâmetro da partícula não seja apropriado e promova deslocamento do arranjo primário.

Apresenta-se na Figura 2.10 uma representação de distintos empacotamentos de arranjos de partículas, nos quais discos de tamanhos iguais representam uma distribuição uniforme (Figura 2.10a), os de tamanhos intermediários ( $D_M$ ) preenchem os poros entre os discos maiores ( $D_L$ ) sem alteração do arranjo inicial (Figura 2.10b), em um sistema ternário, discos ainda menores ( $D_S$ ) preenchem os poros com mesmo espaçamento (Figura 2.10c) e, na Figura 2.10d, uma ilustração do deslocamento promovido pelo tamanho não apropriado de uma partícula de tamanho intermediário ( $D_M$ ) que, ao invés de aumentar, reduziu a densidade de empacotamento.

**Figura 2.10 - Representação bidimensional das combinações de diferentes tamanhos de partículas: (a) uniforme; (b) bimodal  $D_M \gg D_S$ ; (c) trimodal  $D_L \gg D_M \gg D_S$ ; (d) bimodal ( $D_L \sim D_S$ )**



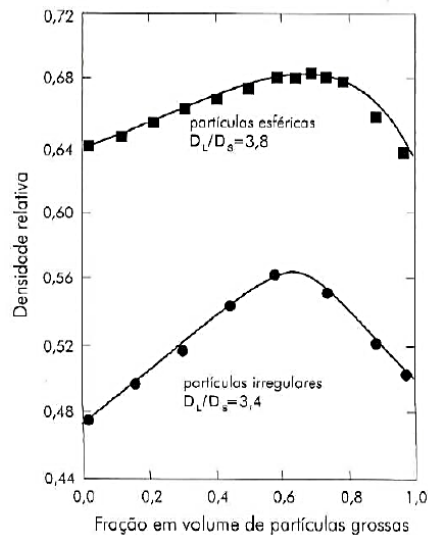
Fonte: Adaptado de German (1989) *apud* Riva (2010)

Com a distribuição dos tamanhos dos agregados em tamanhos discretos, tem-se a divisão dos grãos em grupos (frações granulométricas), necessários para definir a composição de uma mistura de partículas e para determinar suas proporções (CHATEAU, 2012).

O empacotamento de partículas é diretamente controlado pela distribuição de tamanho de partículas de um material granular, sendo importante para todos os sistemas particulados (DINGER; FUNK, 1997). Como ocorre em composições bimodais, por exemplo, ilustradas na

Figura 2.11, as distribuições formadas por partículas selecionadas em um processo continuado apresentam um ponto máximo de densidade. Possuem a mesma proporção entre as partículas maiores ( $D_L$ ) e menores ( $D_s$ ), entretanto seus valores de densidade mostram-se distintos pela influência da irregularidade das partículas.

**Figura 2.11 - Empacotamento de misturas de partículas de formatos: esférico e irregular**



Fonte: Oliveira *et al.* (2000)

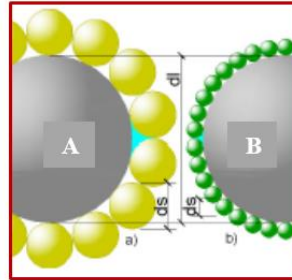
Nesse sentido, tem-se a questão do empacotamento mais denso em misturas de agregados obtidos com a maior relação de tamanhos entre as partículas maiores e menores, em misturas binárias. Sendo pequena esta relação de tamanhos, a densidade de empacotamento é reduzida devido ao efeito de bloqueio e de parede. É ilustrado na

Figura 2.11 o efeito da proximidade das partículas, resultando em poros maiores quando a razão  $D_L/D_s = 3,4$  (empacotamento de esferas de vidro trituradas) e poros menores quando esta razão é igual a 3,8 (empacotamento binário de esferas). A diferença está apenas na taxa de crescimento da densidade relativa de empacotamento, embora o pico ocorra na mesma composição de partículas grandes e pequenas, aproximadamente.

O efeito da redução da densidade relativa é aumentado em distribuições granulométricas contínuas, quando se torna menor a diferença entre diâmetro das partículas, Figura 2.12

(DAMINELI, 2013; MOOSBERG-BUSTNES *et al*, 2004). Nesse aspecto, o estudo da relação determinada em diferentes composições de agregados constitui-se em uma área empírica.

**Figura 2.12 - Efeito parede em: a) poros maiores na interface (em azul) – relação  $D_L/D_S = 3,5$ ; b) poros menores na interface (em azul) – relação  $D_L/D_S = 10$**

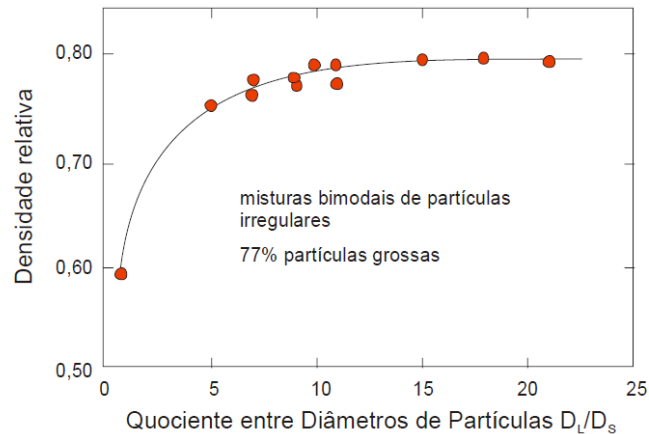


Fonte: Daminieli (2013)

Damineli (2013) chegou a concluir que a distribuição granulométrica do tipo polimodal com faixas granulométricas descontínuas é tida como um bom projeto granulométrico, constatando-se que esta distribuição diminui a porosidade do sistema e a maior relação ( $D_L/D_S > 10$ ), tende a minimizar o efeito de parede, ou seja, para os quocientes maiores que dez, há uma tendência de aumentar a densidade relativa. Entretanto, o autor ainda ressalta a importância de observar o limite do quociente ( $D_L/D_S$ ), pois, apesar de não haver impedimento do fluxo entre as partículas, o sistema tende a segregar devido à dificuldade de haver transferência de movimento entre elas. Por outro lado, De Larrard (1999) demonstra que deve ser evitada a descontinuidade em curvas granulométricas, pela tendência à segregação do concreto.

Graficamente, na Figura 2.13 é notória a possibilidade de otimização da densidade de empacotamento, elevando-se o seu valor em misturas binárias de partículas não esféricas, pela razão  $D_L/D_S$ , por meio do controle da distribuição granulométrica. Para um bom projeto granulométrico, do tipo polimodal descontínuo, as relações próximas a 6,5, segundo Daminieli (2013) e Pileggi (2001), tendem a ser as mais indicadas.

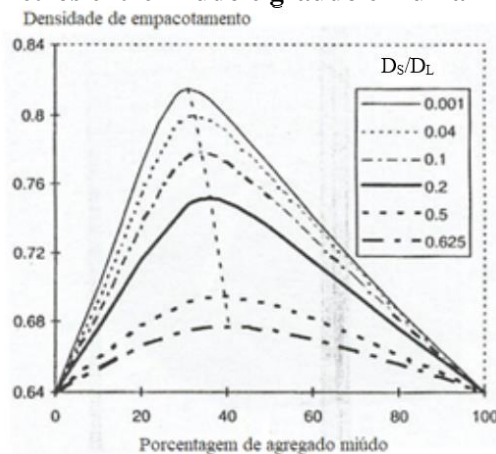
**Figura 2.13 - Razão  $D_L/D_S$  dos tamanhos de partículas para misturas bimodais com máximo empacotamento**



Fonte: German (1992) *apud* Pileggi (2001)

Do ponto de vista de De Larrard (1999), se a relação  $D_S/D_L$  ( $D_S$ , diâmetro máximo da menor partícula e  $D_L$  diâmetro máximo da maior partícula) for menor, maior será o empacotamento da mistura, diminuindo a interação parcial resultante de efeito de parede e de afastamento. Nota-se, na Figura 2.14, que a composição binária possui maior empacotamento quando  $D_S/D_L = 0,001$  (ou seja,  $D_L/D_S = 1000$ ), havendo uma relação ótima de grãos miúdos ( $\gamma_2$ ), para o empacotamento dos grãos graúdos e miúdos.

**Figura 2.14 - Relação de diâmetros entre miúdo e graúdo em uma mistura binária**



Fonte: De Larrard (1999)

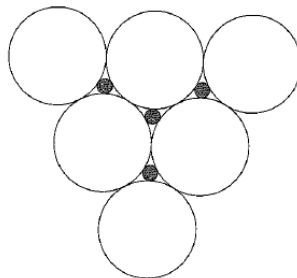
Ao contrário do que se tem proposto para CAA, cujas recomendações da literatura declaram ser menores os diâmetros dos agregados graúdos, os quais tendem a se aproximar das partículas menores, De Larrard (1999) afirma que os diâmetros das partículas menores e maiores devem ser mais distantes possíveis para maior empacotamento das partículas. Este

procedimento de empacotamento, em que um maior índice de compactação é aplicado, apenas pode ser visto para a obtenção de uma compacidade maior (TUTIKIAN, 2007). Porém, fica a questão da maior diferença entre diâmetros dos agregados graúdos e miúdos não favorecer as propriedades do concreto fresco, devido à ausência de grãos de uma determinada faixa granulométrica de agregados. O referido pesquisador argumenta que, apesar de não ser aconselhável, apresenta o maior empacotamento dos grãos. Este autor constatou a influência da aproximação dos diâmetros dos grãos no efeito de afastamento devido à interação parcial, o que promoveu maior índice de vazios em suas composições estudadas.

Destaca-se, portanto, que as relações  $D_L/D_S$  tendem a ser menores que 10, para misturas de concreto com maiores empacotamentos. Quocientes abaixo de 6,5, de forma geral, enquadram-se no aspecto do aumento dos vazios e na diminuição do empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000), visto que as frações granulométricas mais próximas tendem a apresentar interação total das partículas (DE LARRARD, Op. Cit).

O esquema da Figura 2.15 permite mostrar a importância da discussão de misturas de partículas com diferentes tamanhos; do contrário, ao invés de aumentar a compacidade, misturas de partículas de tamanhos únicos (*mono-size*) promoveriam a redução do empacotamento das partículas.

**Figura 2.15 - Empacotamento regular de discos bidispersos**



Fonte: Chateau (2012)

As pequenas partículas em forma de disco, contidas na Figura 2.15, preenchem os vazios entre as partículas maiores sem interferir e distorcer o empacotamento original. Portanto, a densidade de empacotamento será maior quando todos os vazios forem preenchidos com partículas pequenas correspondentes a uma fração granulométrica adequada; do contrário, não seria suficiente se a fração dessas pequenas partículas fosse menor, pois resultaria em uma menor densidade de empacotamento. Além disso, uma maior proporção de partículas menores pode produzir uma menor densidade de empacotamento, devido ao excesso de partículas



pequenas necessárias para o preenchimento dos vazios, para obter o empacotamento ótimo (CHATEAU, 2012). A esse respeito, Moosberg-Bustnes *et al* (2004) são enfáticos ao declararem que um empacotamento ideal ocorre quando um maior volume relativo de cada fração de menor dimensão contribui em bons resultados não apenas na compacidade como também na trabalhabilidade.

A seleção de tamanhos adequados de partículas e o proporcionamento entre as quantidades desses tamanhos consistem, basicamente, no princípio do empacotamento de partículas, visando obter compactos com densidade controlada (McGEARY, 1961). De acordo com este autor, de forma geral, um empacotamento denso de partículas trata-se de uma estrutura de partículas grandes cujos interstícios são preenchidos por partículas menores, criando novos interstícios que serão preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente. Para se determinar o melhor empacotamento, é necessário buscar uma combinação entre partículas de forma a obter uma aproximação, ao máximo possível, de curvas granulométricas ideais a partir do uso de modelos de empacotamento.

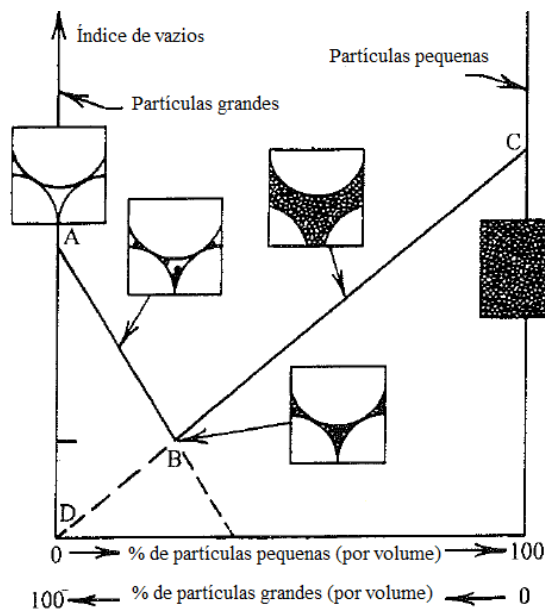
Em seus estudos, McGeary (Op. cit.) demonstrou empacotamentos com esferas em sistemas monomodais, bimodais e polimodais, garantindo uma relação entre tamanhos de pelo menos sete, cujas densidades máximas foram: a) entre 60 % e 64 % do volume total em sistemas monomodais (um só tamanho); b) 85% em sistemas bimodais (sistemas binários); c) 90 % em sistemas ternários; e d) acima de 95 % em sistemas quaternários. Na prática, sistemas granulares raramente são feitos completamente de partículas esféricas, podendo-se encontrar densidades de empacotamento entre 60 % e 64 % (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

As partículas finas do agregado têm um papel importante na movimentação do esqueleto granular. Quando ocorre a ausência destas partículas, repercute-se em uma acentuada dificuldade de movimentação destes materiais mais grossos. Já em excesso, a presença das partículas finas do agregado pode repercutir na diminuição da fluidez do concreto, requerendo um aumento na quantidade de água livre para afastamento das partículas. Portanto, pensando em maximizar a fluidez do concreto, faz-se necessário obter um teor ótimo de matriz (pasta + finos dos agregados) que deve estar presente na mistura do concreto (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Tal constatação também foi feita por Díaz (1998) ao esclarecer que ao inserir uma maior quantidade de agregados de menor dimensão em uma composição de agregados, influencia-se no aumento da quantidade de pasta de cimento, devido ao aumento da área de superfície específica.

Como existe uma infinidade de partículas de formatos irregulares, é praticamente impossível conseguir um máximo empacotamento de partículas de uma mistura, tendo em vista

que a não esfericidade perturba o arranjo das partículas, reduzindo a eficiência do empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2004). Entretanto, é possível obter uma razão entre partículas grandes e pequenas que configure um arranjo de partículas com maior empacotamento. É visto na Figura 2.16 o esquema da variação das porcentagens dos grãos maiores de 100 % até 100 % de grãos menores e o efeito da razão entre os tamanhos dos grãos maiores e menores, conforme Lade *et al.* (1998). Este procedimento e abordagem é o mesmo empregado em pesquisas desenvolvidas por Díaz (1998), Toralles-Carbonari (1999), Skarendahl e Petersson (2000), Gomes (2002), Lisboa (2004), Cavalcanti (2006), Tutikian (2007), Castro *et al.* (2009), Nanthagopalan e Santhanam (2012) e Monteiro *et al.* (2015), também referida na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006).

**Figura 2.16 - Representação da teoria da variação do índice de vazios em sistemas binários**



Fonte: Lade *et al.* (1998)

Conforme é ilustrado na Figura 2.16, uma mínima porcentagem de vazios é obtida para uma determinada razão entre partículas  $D_L/D_S$ , que resulte em uma maior massa unitária e, conseqüentemente, em uma maior densidade de empacotamento. É exatamente no encontro das duas linhas AB e BC, no qual todos os vazios entre as esferas maiores são preenchidos. Pesquisas que trataram desta questão mostram que tal densidade não é modificada para razões maiores que 7 (RIVA, 2005). Ayer e Soppet (1965) afirmam ser maiores que 20. No geral, isso ocorre devido às reduções na porcentagem de vazios serem menos pronunciadas.

Conforme visto, sempre existe uma quantidade ótima da combinação de partículas finas e grossas para reduzir os vazios e minimizar o efeito de afastamento (*loosening effect*) e o efeito

de parede (*wall effects*). Com o aumento da quantidade da areia mais fina, maior do que a quantidade ótima, reduz-se a densidade de empacotamento (GHODDOUSI *et al.*, 2014).

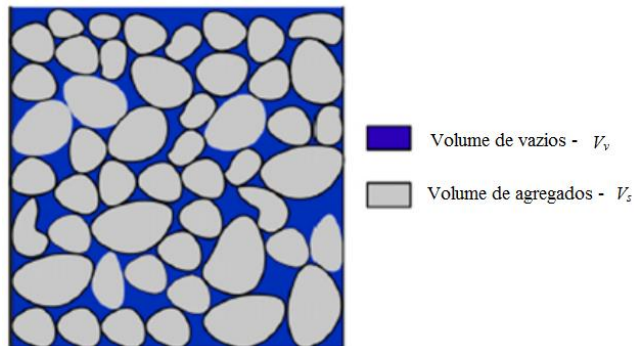
A seguir, serão descritos com mais detalhes, os aspectos condizentes ao empacotamento de partículas e a ilustração de alguns modelos.

## 2.2 Conceituações e Modelos de Empacotamento de Partículas

Uma vez que um dos objetivos desta pesquisa recai na identificação e análise de parâmetros de empacotamento de composições de agregados para CAA, são apresentados, neste item, algumas conceituações e modelos de empacotamento que apontam a relevância do estudo da otimização de misturas granulares.

Na literatura científica, são encontradas algumas definições de densidade de empacotamento, admitindo-se que o espaço preenchido pelas partículas não seja efetivamente ocupado ao serem inseridas em um recipiente, permanecendo alguns espaços vazios entre elas (Figura 2.17).

**Figura 2.17 - Representação dos vazios e agregados em um recipiente**



Fonte: Adaptado de Mostofinejad e Reisi (2012)

O empacotamento de partículas de agregado para concreto é o grau medido em termos de densidade de empacotamento das partículas sólidas. Para quantificar a densidade de empacotamento ( $\varphi$ ), Moutassem (2016), Mangulkar; Jamkar (2013), Kwan *et al.* (2014), Mostofinejad; Reisi (2012) e Chateau (2012), sugerem a Equação (.2.2, definida como a razão entre o volume de partículas sólidas ( $V_s$ ) e o volume aparente ocupado pelos agregados, incluindo os vazios ( $V_t$ ).

$$\varphi = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{V_s + V_v} \quad (.2.2)$$

A porosidade do sistema de partículas é obtida pela relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume total ( $V_t$ ), também conhecido como índice de vazios ( $e$ ) dado pela (2.3). Então, este é um parâmetro de medida da quantidade relativa de vazios em um dado volume de agregados (FARIAS; PALMEIRA, 2010).

$$e = \left( \frac{V_t - V_s}{V_s} \right) 100 \quad (2.3)$$

Modelos de empacotamento de partículas são citados neste trabalho, a título de apresentação da evolução dos modelos teóricos e matemáticos. Visando a aplicação do empacotamento de partículas em concretos, muitos pesquisadores já estudavam esta teoria desde o início do século XX, na tentativa de descobrir o efeito da distribuição granulométrica dos agregados sobre o empacotamento e, com isso, determinar uma curva granulométrica ideal para a devida aplicação em concretos (SHAKHMENKO; BIRSH, 1998; LONDERO *et al.*, 2017). Neste sentido, tem-se buscado, por meio desses modelos, o estudo e a obtenção de composições ótimas de concreto, pois a questão da possibilidade de obter conhecimentos rápidos e precisos sobre a melhor dosagem do concreto deixa a desejar quando apenas se recorre a testes de laboratório (SEDRAN; DE LARRARD, 1999). Entretanto, os modelos de empacotamento levam em consideração o formato esférico das partículas, o que não condiz com a realidade. A realização de ensaios experimentais é fundamental para proceder com investigações de desempenhos do concreto. Por isso, métodos experimentais não devem ser descartados, pois obtêm-se uma aproximação dos formatos dos grãos, e tem servido de base para análise comparativa dos resultados obtidos numericamente.

A aplicação dos conceitos de empacotamento de partículas não se restringe a um determinado tipo de concreto, pelo contrário, é um conceito amplamente utilizado na formulação de concreto autoadensável, de alto desempenho e convencional (GRAZIA *et al.*, 2019; GOMES; BARROS, 2009; FORMAGINI, 2005; DÍAZ; 1998) e estratégias promissoras têm sido desenvolvidas ao utilizar métodos computacionais para reduzir o consumo de ligantes, que utilizam de base analítica e numérica dos modelos de empacotamento (REBMANN, 2016). Sobre os modelos de empacotamento de partículas contínuas, ainda existe uma ausência de dados sobre a eficiência do seu uso para reduzir a quantidade de cimento Portland e, ao mesmo tempo, contribuam para melhores propriedades no estado fresco e endurecido, conforme Grazia *et al.* (2019).

Chateau (2012) afirma que o interesse pela teoria do empacotamento tem atingido diferentes áreas da engenharia, tais como indústrias de agregados, dos minerais, dos metais, dos solos, na área de farmácia (pós químicos), indústria de alimentos, entre outras, com suas partículas sólidas de formas e tamanhos diferenciados.

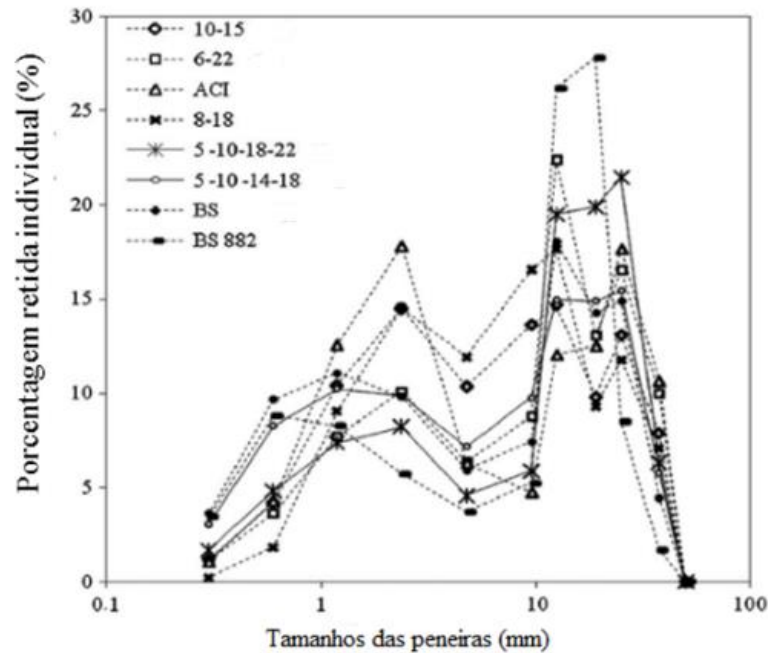
Estudos de empacotamento de partículas para o concreto iniciaram em 1892, pela primeira vez, por Féret (OLIVEIRA, 2013). Fuller-Tompson (1907), Furnas (1928), Andreasen (1930), Toralles-Carbonari (1996), Díaz (1998), De Larrard (1999), Billberg (1999), Su *et al.* (2001), Gomes (2002), Okamura e Ouchi (2003), Tutikian (2007), Ashraf e Noor (2013), são alguns nomes que fazem aplicações dos conceitos de obtenção de composições ótimas de agregados, cada um com suas contribuições e limitações.

A curva de Fuller, por exemplo, é menos adequada para concretos modernos, como o concreto autodensável, pois não representaria a maior parte dos finos (BROUWERS; RADIX, 2005). Na prática, a dosagem dos concretos necessitaria ser corrigida para que essa parcela significativa dos finos fosse inserida, o que ocasionaria cálculos imprecisos de volume de pasta.

O método de Bolomey é um método que se limita a uma relação água/cimento maior que 0,40 para dosagem de concreto, não sendo válido para concreto que requer apenas uma dosagem menor de pasta de cimento, o que acarretaria em um maior volume de pasta e, conseqüentemente, afetaria a resistência e a trabalhabilidade do mesmo (DÍAZ, 1998).

O método de Ashraf e Noor (2013) é voltado para composições de agregados para concreto convencional, aplicado à duas faixas de graduações de agregados. Os requisitos propostos por estes autores referem-se às porcentagens retidas individuais em diferentes peneiras. Na busca por melhores resultados de resistência à compressão e trabalhabilidade, sendo requisitos fundamentais para a definição de uma composição ótima, Ashraf e Noor (2013) estudaram oito tipos de metodologias diferentes, com curvas granulométricas de agregados distintas, conforme ilustradas na Figura 2.18, chegando-se a concluir que as duas faixas propostas (5-10-14-18 e 5-10-18-22) melhor atenderam a estas propriedades.

Figura 2.18 - Método de Ashraf e Noor: PRI das composições das faixas 5-10-14-18 e 5-10-18-22



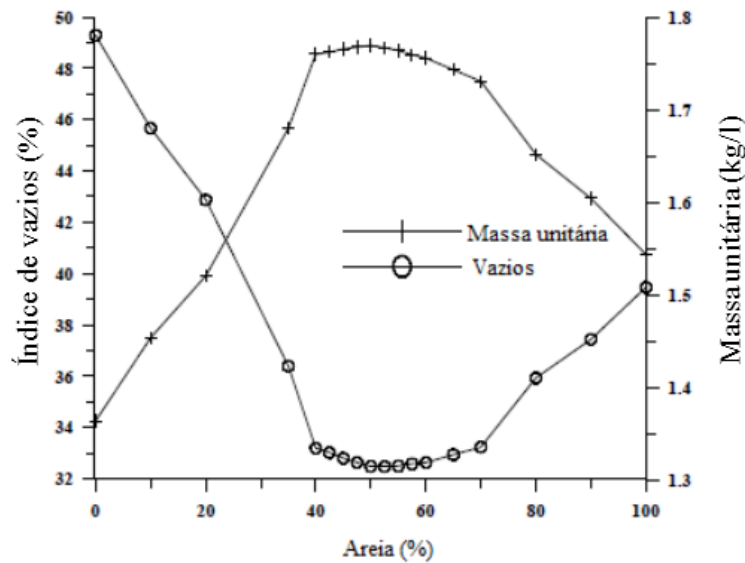
Fonte: Ashraf e Noor (2013)

A formulação dos concretos a partir do estudo das diferentes faixas de composições de agregados é um problema de encontrar uma curva granulométrica experimental devidamente projetada para atingir as propriedades que se pretendem alcançar no concreto. Por isso, que essa formulação depende do tipo de concreto que pretende ser produzido.

Já o método de Diaz (1998), utilizado no presente trabalho, conhecido por cubano Vitervo O'Reilly, propõe um método experimental de determinação de composição ótima de agregados, baseado em empacotamento de partículas, ao obter misturas binárias de areia e agregado graúdo, em diferentes proporções, a fim de alcançar a composição de maior compacidade e menor índice de vazios e, assim, proporcionar maior resistência à compressão de estruturas de concreto.

Estudos realizados por Gomes (2002), Figura 2.19, e Toralles-Carbonari (1996) empregaram este método, também conhecido como método das misturas sucessivas, destacando-se a determinação do teor de vazios, a partir da variação do teor dos agregados em diferentes composições binárias. Pode-se observar como as curvas de massa unitária e índice de vazios são influenciadas tanto pelos materiais, como pelo executor do procedimento. Este método de ensaio também foi utilizado por Skarendahl e Petersson (2000), Castro *et al.* (2009), Santos *et al.* (2018), e Tutikian (2007) e em trabalhos realizados no LEMA/UFAL por Amorim (2016) e Monteiro (2015).

**Figura 2.19 - Compacidade da composição de agregados, estado solto, de uma composição binária**



Fonte: Gomes (2002)

Na Figura 2.19 é observado que o teor de vazios obtido no ensaio de massa unitária no estado solto, foi de 32,5 % para a composição binária de areia (50 %) e pedra britada (50 %), conforme Gomes (2002). De acordo com Toralles-Carbonari (1996), um menor teor de vazios foi obtido quando se combinaram areia e pedra britada, da ordem de 18,5 %, para a proporção de 58 % de areia e 42% de pedra britada, no ensaio com compactação. Ambos resultados diferenciados se devem a fatores como: as características do próprio ensaio compactado/estado solto e a distribuição granulométrica de cada agregado. Segundo Toralles-Carbonari (1996), por falta da continuidade da pedra britada usada (apenas entre 5 – 12 mm), o índice de vazios tornou-se menor.

Experimentos para a obtenção da maior densidade de empacotamento, realizados por Destefani *et al.* (2018), chegaram a obter uma composição ternária formada por duas areias naturais siliciosas (fina e média) e pedra britada calcária (1-12,5 mm), com a proporção de 47,1 % de agregado miúdo e 52,9 % de agregado graúdo, tendo obtido, inicialmente, uma composição binária ótima de areia fina e areia média com 20% e 80%, respectivamente.

Este método de obtenção de maior massa unitária e menor índice de vazios entre dois agregados (miúdo e graúdo), por meio de relações areia/pedra britada distintas, consiste em um ensaio que segue as recomendações da norma americana ASTM C29/C29M (1992). As duas possibilidades de determinação – com compactação e sem compactação - são prescritas pela norma brasileira NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Computacionalmente, pode-se atingir um empacotamento máximo de partículas, algo difícil de ser determinado experimentalmente, e é com este propósito que modelos analíticos têm sido desenvolvidos (LONDERO *et al.*, 2017). Em geral, o objetivo dos modelos de empacotamento é minimizar os vazios de misturas secas, a fim de obter uma maior eficiência do empacotamento.

Dentre os modelos matemáticos de distribuição de tamanho de partículas, tem-se os modelos de Furnas (abordagem discreta), de Andreasen (abordagem contínua) (DINGER; FUNK, 1997), e de Alfred (que trata de um aprimoramento dos modelos citados (ORTEGA *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 2004; FENNIS, 2011; CORDON; TEIXEIRA, 2013), cujo intuito é determinar um máximo empacotamento de partículas a partir de uma distribuição granulométrica “ideal” na qual os vazios são reduzidos dentro de uma composição formada por grãos de tamanhos diferentes.

A apresentação dos modelos principais encontrados na literatura é feita nos próximos subitens, para que possa elucidar a diferença entre os modelos matemáticos, o que, de certo modo, possibilita mostrar a escolha do modelo utilizado no presente trabalho.

### 2.2.1 Modelo de Furnas

Em 1920, já eram realizadas comparações entre os modelos teórico e experimental por Furnas (1929 *apud* FU; DEKELBAB, 2003) para estudar o empacotamento de partículas. O modelo de Furnas trata da distribuição de partículas como distribuições discretas. Neste modelo é formada uma progressão geométrica das proporções dos vários tamanhos de partículas envolvidas em uma distribuição de máximo empacotamento. Desta forma, a teoria de Furnas é aplicada para qualquer mistura polimodal com vários diâmetros discretos, a qual corresponde a distribuições contínuas, cuja (2.4) satisfaz essa distribuição.

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D_p^{logr} - D_s^{logr}}{D_L^{logr} - D_s^{logr}} \right) \quad (2.4)$$

na qual CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ,  $D_p$  é o diâmetro da partícula,  $D_s$  é o diâmetro da menor partícula,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula e  $r$  é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.



### 2.2.2 Modelo de Andreasen

Na década de 1920, deu-se início à abordagem “contínua” desenvolvida por Andreasen (ou Andreasen e Andresen, conforme literatura), a mesma abordagem desenvolvida por Fuller e Thompson, em 1907, que propôs uma equação baseada na teoria de empacotamento aplicada às distribuições granulométricas contínuas, após ter observado que a maior parte das distribuições experimentais eram contínuas.

O modelo de Fuller-Thompson e Andreasen-Andersen foi desenvolvido considerando as partículas infinitamente pequenas, pois este modelo não considera a existência de um diâmetro mínimo (VOGT, 2010; TEIXEIRA; CORDON, 2013; LONDERO *et al.*, 2017). De fato, havia uma condição de similaridade que foi traduzida por uma lei de potência que, segundo os autores, não representa a realidade, pois nem todos os tamanhos (diâmetros) podem estar presentes.

Assumindo condições de similaridade de imagem granulométrica, Andreasen destacou que os arranjos de partículas no entorno de quaisquer partículas de diferentes tamanhos devem ser similares. Fuller e Thompson, em 1907, propuseram a curva granulométrica de distribuição contínua, dada pela (2.5, na qual foi assumido o valor de  $q = 0,5$ . Andreasen e Andersen propuseram a mesma equação em 1930, entretanto, o valor de “q” não foi especificado, variando conforme a aplicação (LONDERO *et al.*, 2017), estando entre 0,33 e 0,5 (CARNEIRO *et al.*, 2016).

A (2.5) foi definida, usando a condição de similaridade e distribuição contínua de tamanhos de partículas para o empacotamento perfeito (ótimo).

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad (2.5)$$

Da mesma forma, CPFT é a percentagem acumulada de partículas inferiores ao diâmetro  $D_p$  (do inglês “*Cumulative Percent Finer Than  $D_p$* ”);  $D_L$  é diâmetro da maior partícula;  $D_p$  é o tamanho da partícula;  $q$  é o módulo ou coeficiente de distribuição granulométrica.

A relação entre CPFT e  $D$  produz uma reta, diferente do modelo de Furnas, representando-se em uma escala log-log.

Como é sabido que, nesse modelo, as partículas são consideradas esféricas, exigir uma maior eficiência de empacotamento de um sistema de partículas não esféricas, com valores de  $q$  entre  $0,30 \leq q \leq 0,50$ , torna-se praticamente impossível, visto que a densidade de empacotamento de distribuições formadas com partículas de formato irregular é afetada.

### 2.2.3 Modelo de Alfred

Em simulações computacionais, os autores Funk e Dinger (1997) modificaram o modelo de Andreasen-Andersen, com a introdução de tamanhos de partículas menores, ou seja, considerando um limite inferior ao conjunto de partículas, o que levou ao modelo denominado de Alfred. O modelo de Alfred surgiu para um aperfeiçoamento dos modelos anteriores, considerando, neste caso, o diâmetro da menor partícula da mistura, conforme apresentado na Equação (2.6) (ORTEGA *et al.*, 1997; OLIVEIRA *et al.*, 2000; LONDERO *et al.*, 2017).

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (2.6)$$

na qual  $D_s$  é o diâmetro da menor partícula da distribuição (do inglês, *small*);  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula (do inglês, *large*); e  $q$  o coeficiente de distribuição (inclinação da curva granulométrica).

Assim, de acordo com os autores Ortega *et al.* (1997) e Londero *et al.* (2017), quando o tamanho da menor partícula tende a zero ( $D_s \rightarrow 0$ ), o modelo de Alfred aproxima-se do modelo de Andreasen.

O modelo de Alfred é considerado, atualmente, o modelo de empacotamento de partículas mais adequado a sistemas reais, devido ao fato de ele tornar-se potencialmente capaz de produzir comportamentos com maior densidade para um escoamento otimizado, comparado ao modelo de Andreasen (ORTEGA, 1997; OLIVEIRA *et al.*, 2000). Como se pode observar, o valor do coeficiente de distribuição ( $q$ ) deve ser adotado conforme a mistura de concreto desejada. Do mesmo modo, o modelo de Alfred é baseado na condição de similaridade usada por Andreasen. Estes autores constataram que o coeficiente de distribuição de 0,37 caracteriza a distribuição granulométrica ótima para o máximo empacotamento; entretanto, as partículas se encontram muito próximas e pouca matriz é disponível para promover o afastamento (OLIVEIRA *et al.*, Op. cit; CARNEIRO *et al.*, 2016).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) e Oliveira *et al.* (2018) valores de “ $q$ ” menores que 0,37 aumentam a fluidez dos concretos por permitir maior distanciamento entre as partículas de agregado, aumentando a quantidade de matriz. Portanto, quanto menor o valor de “ $q$ ”, menor é a relação agregado graúdo/miúdo, e maior a quantidade de pasta para preenchimento dos vazios.

Quando Andreasen afirma  $D_s$  igual a zero, de fato, a teoria de empacotamento não se aplica à realidade dos materiais, por não contemplar um tamanho mínimo de partículas. É uma particularidade a se preocupar quando se pretende obter a área superficial específica ou a média do número de partículas, pois, em todos os casos, a superfície específica é inversamente proporcional à dimensão nominal da partícula, o que influencia, consideravelmente, no consumo de água de molhagem nos concretos, devendo-se utilizar o menor  $D_s$  possível para representar a devida aplicação (SILVA *et al.*, 2004b; FARIAS; PALMEIRA, 2010).

O modelo modificado de Andreasen (modelo de Alfred) para a otimização do concreto autoadensável foi usado pelos autores Brouwers e Radix (2005). Estes autores declaram que, no CAA, uma mistura de concreto passa a ter um menor coeficiente de distribuição, de 0,22 a 0,25, assim incorporando partículas mais finas, chegando-se a afirmar que uma distribuição contínua de todos os sólidos (agregados e finos) resulta em uma melhor trabalhabilidade e estabilidade da mistura. Campos (2017) adotou o valor médio  $q = 0,225$  como o coeficiente mais adequado ao CAA. Vanderlei (2004) e Vogt (2010) também constataram que o aumento da quantidade de finos ocorre devido à redução do valor do coeficiente de distribuição, influenciando a interação entre as partículas. Segundo estes autores, para CAA, os valores de  $q$  situam-se entre 0,20 e 0,25.

Além desses autores, Grazia *et al.* (2019) reforçam que muitas pesquisas têm demonstrado que o coeficiente  $q$ , no modelo de Alfred, tem variado de 0,21 a 0,37, com valores próximos a 0,21 para misturas mais fluidas (*flowable*) como concretos autoadensáveis, por exemplo, e próximos a 0,37 para misturas secas, tal como o concreto compactado a rolo (*roller compacted concrete*). Valores de  $q$  iguais a 0,21 e 0,26 também foram verificados nas misturas de CAA, como também valores menores que 0,28 (CASTRO *et al.*, 2009). Quando o valor- $q$  é menor que 0,20, o teor de partículas se torna excessivo, podendo dificultar a fluidez, de acordo com Oliveira *et al.* (2000).

Um resumo de alguns trabalhos que usaram o modelo A&A modificado e os respectivos módulos de distribuição adotados para otimizar o esqueleto granular de misturas de concreto, estão listados no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2 - Resumo de coeficientes de distribuição do modelo Alfred aplicado em diferentes concretos**

Autores	Concretos	Composição de agregados (% de miúdo/ % de graúdo)	Quantidade de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Relação água/cimento (a/c)	Coeficiente de distribuição (q)
Castro <i>et al.</i> (2009)	CAA	50 %/ 50 %	-	0,30	0,21 0,26
Brouwers e Radix (2005)	CAA	50 %/ 50 %	315	0,55	0,250
Campos (2017)	CAA	45 %/ 55 %	329,5	0,67	0,225
Oliveira <i>et. al</i> (2018)	CAD	31,3 %/ 68,7 %	362,3	0,45	0,29

CAA: Concreto autoadensável; CAD: Concreto de alto desempenho.

Fonte: Próprio Autor (2019)

Neste contexto, o uso do modelo de Alfred no presente trabalho, apresenta-se como uma melhor ferramenta, pois permite ser aplicada ao tipo de concreto estudado, ou seja, ao concreto autoadensável, analisando-se diferentes composições de agregados. O exposto enfatiza a necessidade de se adotar parâmetros de composições de agregados para CAA que melhor representem as distintas distribuições granulométricas polimodais, contínua e descontínua. Por meio dessa abordagem teórica, possibilitou-se obter informações norteadoras desses parâmetros que puderam corroborar para a avaliação das características das composições de concreto propícias para CAA.

Apropriando-se de saberes discutidos neste segundo capítulo, partiu-se para o aprofundamento de conhecimentos sobre o concreto autoadensável, os métodos de dosagem, as propriedades reológicas e composições de agregados obtidas da literatura, as quais estão diretamente relacionadas a interação entre as partículas sólidas da mistura de CAA e ao desempenho dos estados fresco e endurecido.

### 3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)

De modo sucinto, este capítulo apresenta alguns aspectos relevantes das importantes características do CAA, principalmente com relação aos métodos de dosagem e às composições de CAA. Estes, já consolidados na literatura, têm mostrado eficiência na otimização das composições de agregados e da pasta e/ou argamassa, de modo a atender as propriedades de autoadensabilidade e garantir desempenhos satisfatórios no estado endurecido. São métodos empíricos que diferem dos utilizados na obtenção de concretos convencionais (CC).

#### 3.1 Definição e caracterização do CAA

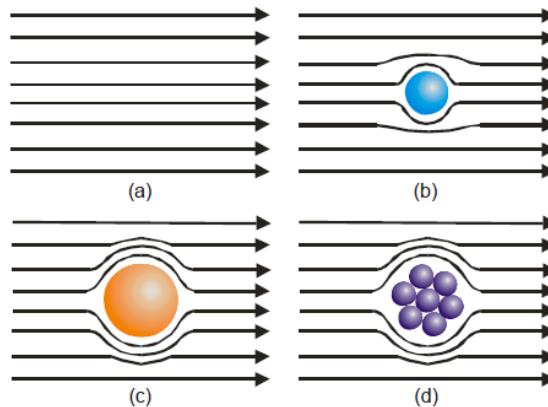
O concreto autoadensável (CAA) é um material cimentício que apresenta propriedades no estado fresco de destaque em comparação ao concreto convencional vibrado (CC). Alcançar uma elevada trabalhabilidade, ao ponto de tornar-se autoadensável, sem a necessidade de equipamento de vibração, é a característica mais crítica do CAA (MA *et al.*, 2017). Diante de sua tecnologia avançada, as propriedades do CAA foram descobertas, segundo a literatura, a partir de 1983, no Japão, visando atender a necessidade de se obter um concreto que preenchesse todos os espaços das formas somente com seu peso próprio, não necessitando de vibração, desta forma evitando problemas de durabilidade em estruturas com elevadas taxas de armadura e de difícil acesso de equipamentos de vibração (OKAMURA; OUCHI, 2003; BILLBERG, 1999).

O CAA, assim como o CC, é descrito como suspensões compostas por materiais finos com diâmetros menores que 125  $\mu\text{m}$ , com maior área superficial e com predominância de forças superficiais, como também por partículas sólidas, que são agregados com diâmetro maior que 125  $\mu\text{m}$ , caracterizados com baixa área superficial e por possuírem efeito da predominância de forças de massa (HUNGER; BROUERS, 2009).

A formação da estrutura granular dos concretos tem o efeito do atrito entre os grãos de agregados, enrijecendo o conjunto e dificultando a fluidez, sendo apontado como o causador de alterações no desempenho no estado fresco de concretos e argamassas (OLIVEIRA *et al.*, 2000; MENDES, 2008). A dificuldade de movimentação se dá entre partículas mais grossas, comprometendo o desempenho no estado fresco, pois, conforme supracitado, os efeitos de massa e a baixa área superficial dessas partículas afetam tal desempenho (MENDES, 2008). De fato, a trabalhabilidade do concreto é afetada negativamente quando aumenta a concentração de agregado e, por consequência, quando aumenta o atrito entre os grãos (CHANG, 2004).

Com as considerações feitas sobre a significância da concentração das partículas sólidas em uma suspensão, o escoamento de um meio líquido pode ser visualizado por meio de um perfil, no qual lâminas paralelas do líquido (Figura 3.1a) chegam a formar linhas de fluxo curvadas (Figura 3.1b, c) quando contornam partículas individuais (ou um aglomerado delas, Figura 3.1d), vistas como unidades móveis sólidas (PILEGGI, 2001).

**Figura 3.1 - Representação esquemática de unidades móveis sólidas imersas entre as linhas de fluxo: (a) no líquido; e as perturbações causadas por (b) uma partícula com pequeno diâmetro; (c) uma partícula com maior diâmetro; (d) e um aglomerado de pequenas partículas**

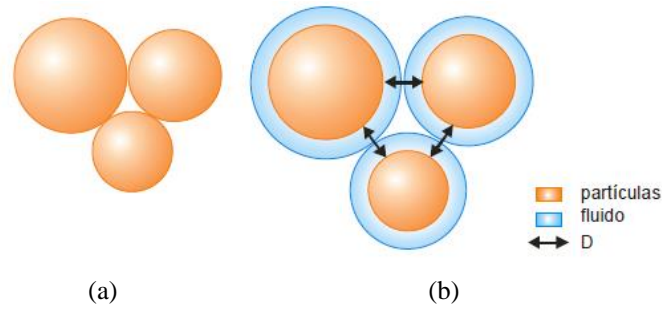


Fonte: Pileggi (2001)

Observa-se na Figura 3.1 que o meio líquido mostra maior perturbação quando a presença de partículas se torna maior, criando uma maior viscosidade no sistema, ou seja, quanto maior a perturbação causada pela partícula sólida, maior será a viscosidade do sistema (PILEGGI, 2001). Sob este aspecto, a concentração de agregados no CAA sendo maior, tem-se uma interferência significativa na fluidez, afetando a viscosidade dessa suspensão.

A relevância do tema concernente à verificação da diferença de separação entre partículas tem sido uma das preocupações dos pesquisadores na área da ciência dos materiais e da engenharia (BONADIA *et al.*, 1999; PILEGGI, 2001, DAMINELI, 2013; CARNEIRO *et al.*, 2016). Neste caso, a concentração das partículas sólidas é vista sob o aspecto da distância entre partículas, sendo definida como a distância média entre duas partículas adjacentes quaisquer na mistura, admitindo-se que não existem aglomerados entre todas as partículas (FUNK; DINGER, 1994 *apud* PILEGGI, 2001). Para um melhor entendimento sobre o assunto, a Figura 3.2 ilustra, esquematicamente, esta distância (D).

**Figura 3.2 - Representação esquemática da distância média de separação entre partículas ( $D$ ) vista entre partículas: (a) em contato sem nenhum fluido entre elas e (b) distanciadas pelo fluido**

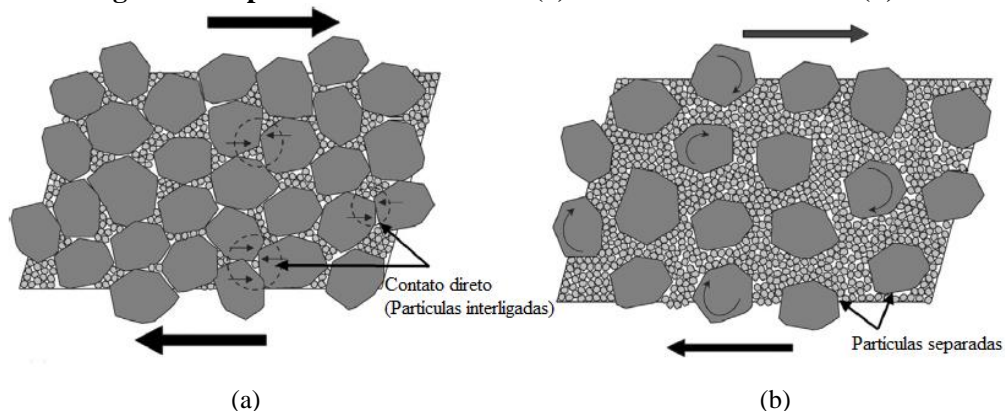


Fonte: Pileggi (2001)

Quando se tem um sistema de partículas sem o meio fluido (Figura 3.2a), inicialmente existe contato entre elas, visto que a distância de separação de partículas é nula, não podendo ocorrer mobilidade entre os grãos. Sendo o fluido inserido no sistema, gradativamente, antes com maiores vazios intergranulares, os grãos passam a ter a sua área superficial envolvida, inicialmente, para depois serem preenchidos os vazios entre eles (Figura 3.2b). Havendo-se o preenchimento de todos os vazios, o sistema granular se torna uma fase contínua sem a ocorrência de espaços não preenchidos pelo fluido, deixando-os afastados por apresentar um volume maior do que o volume de vazios (VOGT, 2010). A distância de separação de partículas aumenta após o recobrimento necessário das partículas pelo fluido, o qual atinge um maior preenchimento dos vazios, resultando em uma distância média ( $D$ ).

Como é mostrada na Figura 3.3, a quantidade de partículas com diâmetros menores, representativas dos finos contidos no CAA, originados dos finos do inerte ou pozolana e do agregado miúdo, por ser maior que a encontrada em misturas com empacotamento máximo de partículas, comum (Figura 3.3a), promove maior separação de partículas de diâmetros maiores (graúdas), Figura 3.3b.

**Figura 3.3 - Imagem de empacotamento máximo: (a) em misturas comuns e (b) em CAA**



Fonte: Mehdipour e Khayat (2018)

O efeito de separação de partículas ocorrido no CAA é o oposto do ocorrido em concreto de estrutura granular mais compacta, na qual as partículas graúdas mantêm-se firmemente interligadas e, conseqüentemente, com maior fricção umas com as outras. Pode-se observar, portanto, que a velocidade de sedimentação de uma partícula é inversamente proporcional à viscosidade do meio fluido no qual as partículas estão situadas, sendo este o princípio do CAA, conforme (UMA *et al.*, 2017). Como a viscosidade é sinônimo de fricção interna, esta é moderada no CAA, comparado a um concreto de estrutura compacta.

A estabilidade do CAA no estado fresco deve garantir a autoadensabilidade, a homogeneidade e a resistência à segregação da mistura (CALADO *et al.*, 2015; ESMAEILKHANIAN, *et al.*, 2014; KHAYAT *et al.*, 2000). Para isto, em geral, as misturas de CAA incluem aditivos químicos, adições minerais e menores volumes de agregado graúdo e dosagens maiores de agregado miúdo do que o CC. Além do volume de pasta que é relativamente maior, estas diferenças melhoram o desempenho do CAA, de forma que possa reduzir o atrito entre os agregados, durante o escoamento promovido pela matriz e alcançar os níveis adequados de autoadensabilidade (GOMES *et al.*, 2002; GOMES, 2002).

Devido a estas exigências, os métodos de dosagem do CAA são mais rigorosos, sendo constatado o interesse pelo estudo das fases pasta e agregado, isoladamente (LEITE, 2018; NIARAKI; FAROKHZAD, 2017; FAROKHZAD *et al.*, 2016; FERNEDA, 2014; NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2012; GOMES *et al.*, 2002; SKARENDAHL; PETERSSON, 2000). A pasta serve como base para as propriedades de autoadensabilidade do CAA, a qual tem de ser suficientemente fluida para garantir a fluidez do próprio concreto autoadensável, bem como suficientemente viscosa para suportar os agregados graúdos (VAHDANI *et al.*, 2010). E por sua vez, a fase agregado, que deve proporcionar um esqueleto granular com proporções e distribuições de agregados miúdos e graúdos com configuração do arranjo granular compatível para a autoadensabilidade do CAA, haja vista que a sua reologia é diferente da de outros concretos (SANTOS *et al.*, 2015).

Os parâmetros de referência (PR) das composições de CAA, ou seja, as faixas dos teores dos materiais empregados em CAA, propostos na literatura científica, identificados como relevantes, são apresentados na Quadro 3.1.



**Quadro 3.1 - Parâmetros de referência para dosagem de CAA**

Parâmetros	Intervalo
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	200 – 475
Massa de finos (kg/m <sup>3</sup> )	200 – 687
Teor de pasta por metro cúbico de concreto (%)	35 – 42
Massa de agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	750 – 920
Massa de agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	710 – 900
Volume de agregado graúdo/Volume de concreto (%/ m <sup>3</sup> )	28 – 35
Volume de agregado graúdo/ Volume total de agregados (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,44 – 0,65
Volume de agregado miúdo/ Volume total de agregados (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,36 – 0,60
Volume de agregado miúdo/ Volume de argamassa (%/m <sup>3</sup> )	40 – 50
Teor de finos (%/ m <sup>3</sup> ) (< 250 mm)	19,5 – 24,5
Relação água/ finos (kg/kg)	0,28 – 0,40

Fonte: Díaz (1998); Billberg (1999); Su *et al.* (2001); Saak *et al.* (2001); Gomes (2002); Khayat *et al.* (2002); Lisboa (2004); Melo (2005); Brouwers; Radix (2005); Cavalcanti (2006); ACI 237R-07 (2007); Gomes; Barros (2009); Moraes (2010); Tutikian; Pacheco (2012); Nanthagopalan; Santhanam (2012); Mendes *et al.* (2017).

Com as quantidades de todos os agregados definidas na composição do esqueleto granular do CAA, tem-se constatado, na literatura, que a relação volumétrica do agregado miúdo e o total de agregados varia entre 36 % e 60 %: Su *et al.* (2001) e Melo (2005) adotaram 53 %; Tutikian (2007) adotou 52 %; Lisboa (2004), Cavalcanti (2006), Monteiro (2015) adotaram 50 %. Tais resultados levaram a concluir que a percentagem de agregado graúdo (PAG) mais favorável tem sido em torno de 50 %, também considerada por Gomes (2002), confirmando o método de Okamura.

As faixas de proporções de agregados graúdos e miúdos são, respectivamente, 28 – 35 % (750 – 920 kg/m<sup>3</sup>) do volume de concreto e 40 – 50 % (710 – 900 kg/m<sup>3</sup>) do volume de argamassa.

Outra particularidade, não menos importante, consiste na dimensão máxima característica do agregado graúdo. Em muitos estudos da literatura é recomendado diâmetros  $\leq 12,5$  mm (MELO, 2005; GOMES, 2002). Porém, outros autores, como Esmailkhanian *et al.* (2014) utilizaram a dimensão máxima do agregado graúdo igual a 14,0 mm, podendo chegar a 20 mm (SANTOS *et al.*, 2015; NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2012; TUTIKIAN, 2007) e a 25mm (SU *et al.*, 2001; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2007).

### 3.2 Métodos de Dosagem de CAA

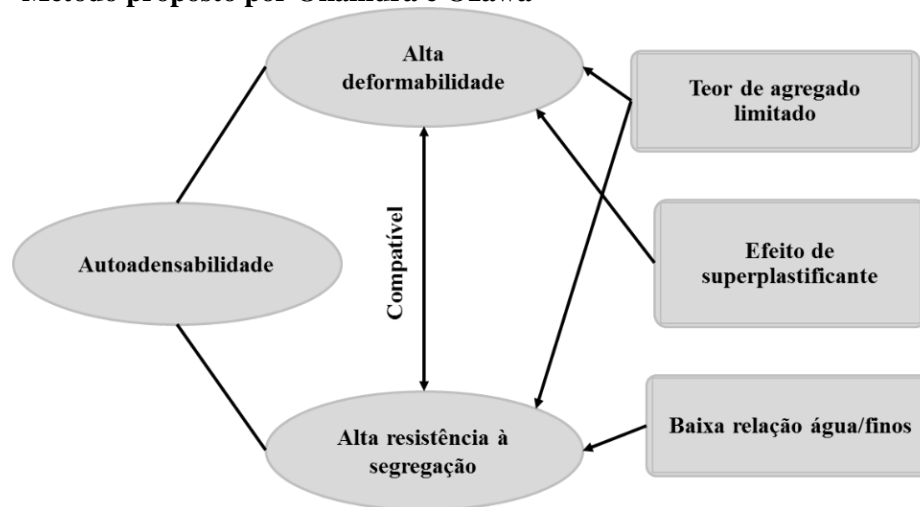
No estudo de métodos de dosagem do concreto autoadensável (CAA) enquadram-se métodos que evidenciam a necessidade do controle das quantidades dos materiais componentes para garantir as características de autoadensabilidade e o desempenho quanto às propriedades

mecânicas que devem ser atendidas. Estudiosos têm proposto métodos baseados em diferentes parâmetros, entretanto, não existe um método padronizado para a determinação de dosagens de CAA. Ashish e Verma (2018) descrevem, em seis classes, a metodologia adotada em cada método de dosagem para CAA avaliado. Dessa maneira, neste item, são apresentadas algumas discussões norteadoras para o presente estudo a respeito dos métodos de dosagem e suas particularidades sobre a obtenção da fase do esqueleto granular do CAA.

O primeiro método de CAA desenvolvido em 1988 na Universidade de Tóquio, Japão, foi o método de Okamura; também conhecido como método Japonês, o mesmo é fundamentado em duas fases: agregado graúdo e argamassa (OKAMURA; OUCHI, 2003; BROUWERS; RADIX, 2005). No que concerne à estrutura granular do CAA, este método fixa o volume de agregado graúdo em 50 % do volume total de sólidos, sendo referente à estrutura granular de todos os agregados. Não se faz referência à curva de distribuições de partículas. Já o volume de agregado miúdo (partículas maiores que 90  $\mu\text{m}$ ) é fixado em 40 % do volume de argamassa. Significa dizer que o primeiro princípio deste método consiste em manter constantes os teores de agregado miúdo e graúdo, para que o CAA seja facilmente obtido com o ajuste da relação água/finos e da dosagem de superplastificante.

O que se observa, segundo a literatura, é que, normalmente, o método de Okamura leva à obtenção de CAA com alto volume de pasta e, conseqüentemente, maior dosagem de superplastificante que o necessário, distante de uma mistura de concreto considerada como ótima, justamente pela necessidade de serem ajustados, na argamassa, os teores de aditivos, teores de finos e quantidade de água (sendo estes os demais princípios deste método) até obter uma viscosidade suficiente (moderada), de maior deformabilidade e de maior fluidez (SEDRAN; DE LARRARD, 1999; GOMES; BARROS, 2009; ASHISH; VERMA, 2018), conforme Figura 3.4. Conforme mostra este método, a questão do menor índice de vazios obtido em composições de agregados não é considerada, mas a limitação da quantidade de agregado graúdo a uma quantidade menor do que o normal para evitar o risco de bloqueio (OKAMURA; OUCHI, 2003).

**Figura 3.4 - Método proposto por Okamura e Ozawa**



Fonte: Adaptado de Ashish e Verma (2018)

Sob o aspecto da colisão entre as partículas graúdas, este método enfatiza a maior ocorrência de fricção entre as partículas, podendo esta ser reduzida pelo princípio do ajuste da dosagem de superplastificante que, conseqüentemente, contribui para o aumento da distância entre elas. Isto ocorre devido a percentagem mais alta de argamassa no CAA do que no CC. Nesse ponto, por contar com uma maior viscosidade da pasta no CAA, a tensão interna entre os grãos graúdos é evitada.

Ao contrário do método de Okamura, o modelo de empacotamento compressível (MEC) de De Larrard (1999), considera importante a obtenção de menores índices de vazios, partindo-se para o uso de cálculos de concentração de partículas sólidas e de densidade de empacotamento de um número  $n$  qualquer de frações ou classes de tamanhos de grãos, individual e devidamente combinadas (HERMANN, 2016; LONDERO *et al.*, 2017). Entretanto, devido à complexidade do MEC por fazer o uso de programas computacionais e a realização de um banco de ensaios com equipamentos difíceis de serem obtidos, estudos têm utilizado de seus conceitos para o entendimento matemático do empacotamento de partículas e para aperfeiçoar dosagens de concretos de diferentes tipos, inclusive o CAA (TUTIKIAN, 2007). Com relação à consideração da continuidade das frações granulométricas, este método considera a maior distância do diâmetro das frações para permitir uma maior aproximação dos grãos no arranjo granular e, assim, a diminuição dos vazios.

Para o concreto autoadensável, tornar mínimo o índice de vazios, dessa forma, traz à tona as considerações das recomendações do menor volume de agregado graúdo, da maior quantidade de agregado miúdo e de partículas finas, como também da limitação do tamanho do

agregado graúdo. Segundo Tutikian (2007), também tem a questão da ausência de grãos de uma determinada faixa granulométrica que pode não favorecer as propriedades do concreto fresco.

A metodologia de Skarendahl e Petersson (2000) propõe a ideia da otimização da composição de agregados, com referência ao uso de curvas granulométricas, utilizando-se a ASTM C29/C29M (1992) para alcançar um mínimo volume de pasta. Porém, este método, em termos gerais, mostra-se dificultoso de estabelecer as propriedades de autoadensabilidade (como os critérios de bloqueio no ensaio de caixa-L e o ensaio de espalhamento) e relacioná-las com a densidade de empacotamento de um esqueleto granular, exigindo-se, desta forma, a execução de mais ensaios. Nesse método, o critério de bloqueio na caixa-L é enfatizado, tratando-se de realizar ensaios com agregados de diâmetros máximos distintos com um volume de pasta fixo, usando-se partículas finas (fíler) e de aditivo modificador de viscosidade para contribuir em uma melhor viscosidade (GOMES; BARROS, 2009). Vale ressaltar que, independente das considerações de agregado miúdo e agregado graúdo, o CAA possui um alto volume de pasta (GOMES *et al.*, 2002; OKAMURA; OUCHI, 2003) e alcançar os critérios de autoadensabilidade é um desafio pela própria diversificação dos materiais.

O método de Su *et al.* (2001), método Chinês, assume a teoria do empacotamento ótimo de composições de agregados e da otimização da pasta de uma mistura de concreto. Para isso, este método emprega-se o modelo A&A modificado, obtendo-se uma curva granulométrica de todas as partículas da mistura do CAA. Em destaque, o método admite as partículas finas, como as de cimento, cinza volante e escória de alto-forno, e ainda acrescentam ao afirmar que as areias finas são componentes úteis na otimização da distribuição granulométrica das partículas, devido a possibilidade de aumentar a estabilidade e a trabalhabilidade da mistura de concreto.

Como se pode observar, a consideração principal do método Chinês é o empacotamento, ou seja, que os vazios dos agregados (não compactados) sejam preenchidos com a pasta, de forma que proporcione uma trabalhabilidade adequada ao concreto fresco. Esse método experimental inicia a discussão a respeito do teor de agregado, que grandemente influencia a trabalhabilidade. Também foi utilizada a norma ASTM C29/C29 (1992) para a obtenção da massa unitária dos agregados. Um teor maior de agregado tende a reduzir a pasta de cimento e, conseqüentemente, a fluidez. E é com base nesse conhecimento que o método Chinês aplica o empacotamento com vista a alcançar melhores resistências de concretos e melhores desempenhos para o concreto fresco, com menor teor de pasta. Ajustes das proporções das misturas podem ser realizados caso os resultados dos ensaios de controle de qualidade (*slump flow*, caixa-U, caixa-L e funil-V) não atenderem às especificações da *Japanese Architecture Society* - JAS (1986, *apud* SU *et al.*, 2001). O que se pode perceber nesse método, é que,

escolhida a resistência à compressão do CAA aos 28 dias, de 55 MPa, buscou-se determinar a quantidade dos agregados miúdos e graúdos para obter apenas um traço de CAA, o que mostra não apresentar a possibilidade de obter a mesma resistência com outras composições de agregados.

A racionalização da dosagem do CAA também é tratada no método de Repette e Melo (REPETTE, 2005). Sendo um método de caráter experimental, em que todos componentes do concreto são ajustados, desde ensaios de pasta, estuda-se a dosagem do CAA e verifica-se os critérios de durabilidade e resistência à compressão requeridos. Ajustes são realizados desde a etapa de definição do teor de argamassa, na qual inicialmente é definido o teor de agregado miúdo, variando-se o teor de aditivo superplastificante e, posteriormente, a adição mineral (dimensão inferior a 0,075 mm) é incorporada até alcançar a dosagem ideal.

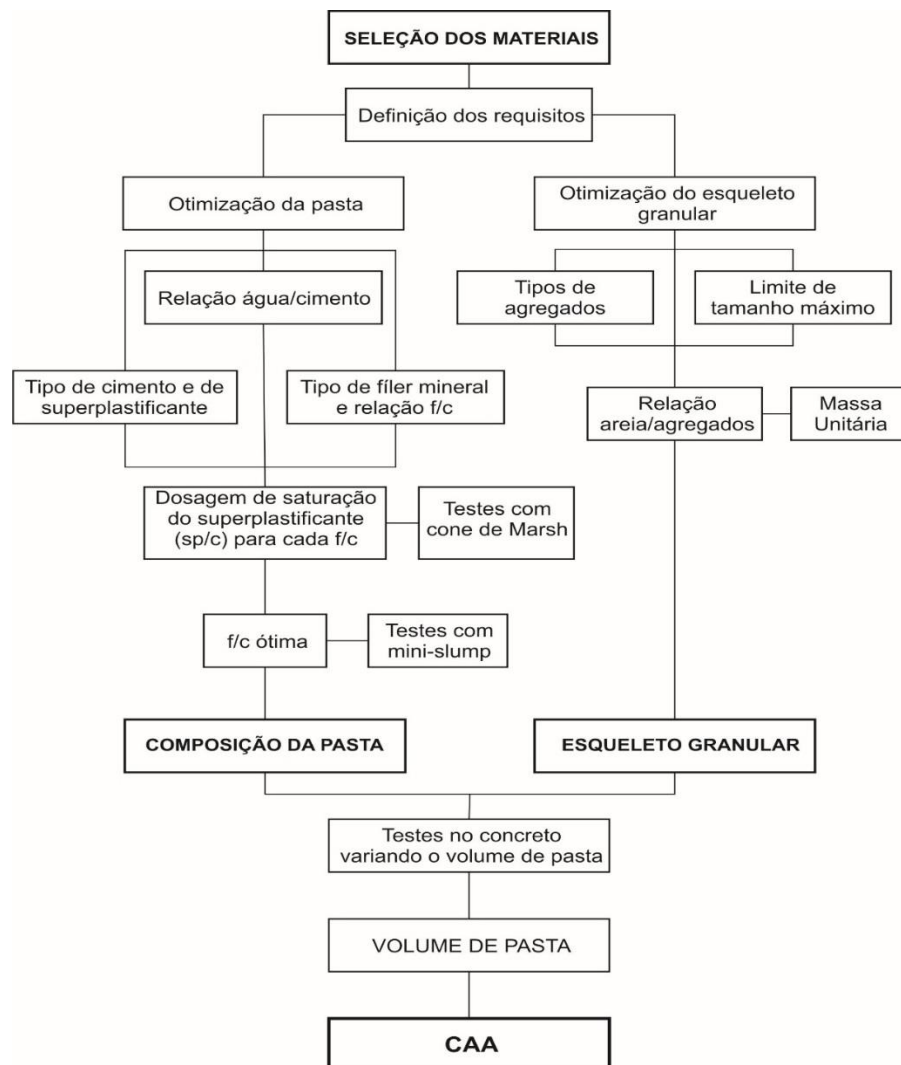
Como no método Repette-Melo as quantidades dos componentes são definidas por etapas, na etapa de determinação do volume de agregado graúdo, realiza-se, também, o ajuste final do teor de aditivo químico a partir de ensaios de autoadensabilidade. Os autores alegam que esta seja a melhor forma de se obter a otimização do uso do aditivo. Tal volume de agregado é obtido em relação ao volume total de concreto. A consideração do atendimento de faixa granulométrica é a proposta desse método, sendo relevante que a distribuição granulométrica dos agregados seja feita de forma criteriosa para a produção de CAA. Logo, composições de agregados são resultantes dessa adequação granulométrica. Destaca-se que a dimensão máxima do agregado graúdo seja menor que 10 mm, preferencialmente.

O método de Tutikian (2007), que também utiliza o método de O'Reilly Díaz (1998), em ensaios de massa unitária com compactação, além da junção de conceitos de De Larrard (1999), contidos no MEC, para a formulação de concretos, realiza um amplo estudo de comparação das propriedades estudadas com as diversas famílias de concreto (CC e CAA), envolvendo conceitos de outros métodos como IPT/EPUSP (1992), Tutikian (2004) e o proposto pelo autor. Sua proposta consiste em determinar composições de agregados com menor índice de vazios, de forma que possa reduzir o consumo de pasta na mistura. Ressalta-se, ainda, os cuidados que se deve ter na escolha do agregado graúdo, determinando a dimensão máxima característica entre 20 mm e  $1/3$  do espaçamento das armaduras.

Outro método de dosagem para CAA, que tem sido indicado na literatura, é proposto por Gomes (2001; 2002). Este consiste, basicamente, na obtenção do CAA por meio do estudo separado das fases pasta de cimento e esqueleto granular. O método propõe a otimização de cada fase. A primeira fase, chamada de otimização da pasta do CAA, consiste em avaliar a viscosidade e a fluidez da pasta a partir de uma relação ótima de superplastificante e finos

(cimento, filler e pozolana), como também de uma relação ótima de finos (fíler e pozolana) e cimento. Na segunda fase, a otimização do esqueleto granular consiste em determinar a composição ótima de agregados miúdo e graúdo, buscando-se obter composições com menores índice de vazios. Isto obteve-se por meio do método de O'Reilly Díaz (1998), baseado no empacotamento de partículas. Determinada a otimização das duas fases, tem-se uma terceira etapa que consiste na obtenção do menor teor de pasta, que é ajustada em função da composição de agregados determinada para atingir os requisitos de auto-compactabilidade. Na Figura 3.5 estão esquematizadas as duas fases tratadas por este método.

**Figura 3.5 - Método proposto por Gomes**



Fonte: Gomes e Barros (2009)

O método de Gomes foi empregado nos estudos de Vicentini *et al.* (2016), os quais mostraram que a composição de 47 % de areia e 53 % de pedra britada, em massa, conferiu o menor índice de vazios. Com esta composição de agregados e a composição da pasta,

substituindo 10 % do cimento por finos, o teor mínimo de pasta foi de 40 %, considerado um teor de pasta relativamente alto.

Entre outras pesquisas, o método de Gomes foi utilizado por Ferneda (2014), que obteve uma composição de 30 % de areia natural, 30 % de areia artificial e 40 % de pedra britada, resultando em um menor índice de vazios, porém, com alto teor de pasta, tendo em vista o elevado consumo de cimento ( $450,05 \text{ kg/m}^3$ ) e a descontinuidade granulométrica da areia grossa, o que demandou um acréscimo no teor de finos.

Mais recentemente, tem-se o método de Leite (2018), baseado no método de Gomes (2002), que faz uso do planejamento de experimentos de misturas para avaliar, separadamente, as composições de pasta (componentes = cimento + superplastificante + fíler) e de esqueleto granular aplicado a CAA. Trata-se de um método de dosagem aprimorado com a inclusão de um método estatístico, adotando a separação das duas fases supracitadas por promover maior praticidade na execução dos experimentos. Usando o método simplex, o autor mencionado declara ser possível utilizar, como variáveis, as proporções dos materiais constituintes e mapear as características que conferem um concreto autoadensável. Mantida a proposta do método de Gomes, Leite (Op.cit) atribui o desempenho do concreto no estado fresco às propriedades de fluidez e viscosidade da pasta.

Para produzir os concretos autoadensáveis no presente estudo, utilizou-se o método de dosagem de Gomes (2002), por permitir formular misturas de CAA otimizadas, havendo a independência de ambas as fases e, assim, focar na determinação da composição de agregados para CAA. Como esse tipo de concreto requer um controle minucioso de sua dosagem, avanços na formulação do esqueleto granular se fazem necessários para tornar possível a otimização da mistura de maneira mais sustentável, adotando-se uma composição de pasta de cimento adequada para garantia da autoadensabilidade.

Sobre os métodos de dosagem de CAA supracitados, o objetivo em comum sempre recai na maximização do conteúdo de agregados no concreto, na tentativa de otimizar o consumo de ligantes e a contribuir para o aumento da trabalhabilidade, visando-se, também, propriedades mecânicas melhoradas. Entretanto, no geral, os métodos de dosagem de CAA apresentam propostas distintas de determinação de volume de agregado graúdo e miúdo ao adotar metodologias que requerem um maior trabalho experimental para definição do arranjo granulométrico ideal para o concreto.

Deste modo, as misturas de CAA devem ser submetidas a ensaios no estado fresco, a fim de ser verificado o atendimento aos critérios mínimos de autoadensabilidade, além dos PR correspondentes à dosagem do CAA, já apresentados neste item. A seguir, são esclarecidas as

propriedades de autoadensabilidade abordadas no presente estudo, cujas mesmas devem ser satisfeitas pelas composições de concreto formuladas.

### 3.3 Propriedades Reológicas do CAA

As propriedades reológicas estão relacionadas à deformabilidade e estabilidade do CAA. Para ser, de fato, autoadensável, a mistura de concreto precisa atender a três propriedades: a facilidade de fluir, a capacidade de ultrapassar barreiras, ou seja, de passar entre os obstáculos, de modo que não apresente bloqueio, e a resistência à segregação (GOMES, 2002). Essas exigências características do CAA para obtenção da autoadensabilidade no estado fresco envolve, portanto, não apenas uma alta deformabilidade da pasta ou argamassa e moderada viscosidade, mas também envolve a resistência à segregação entre o agregado graúdo e argamassa quando fluir através da zona de barras reforçadas (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O que tem sido constatado pelos pesquisadores é que, quando a fluidez do concreto se torna dificultosa, significa que a energia necessária para promover a fluidez do concreto é consumida pelo aumento da tensão interna, resultando em bloqueio das partículas de agregado. Segundo Okamura e Ouchi (2003) e Billberg (1999), busca-se limitar o conteúdo de agregado graúdo na mistura, de modo que o bloqueio seja evitado e a energia não seja intensa.

De acordo com a NBR 15823, o concreto autoadensável (CAA) pode ser definido como:

“concreto capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ABNT, 2017)”.

Quatro parâmetros de ensaios estão inclusos em uma especificação adequada do concreto autoadensável, a saber: fluidez e escoamento (ensaios de escoamento (SF) e índice de estabilidade visual (IEV)); viscosidade plástica aparente (pelo funil-V (VF) ou pelo  $t_{500}$  (VS)); habilidade passante (pela caixa L (HP) ou anel J (PJ)); resistência à segregação (SR), conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Vale ressaltar que os ensaios SF, IEV, VS (ou VF) e PL (ou PJ), são requisitos de aceitação do CAA no estado fresco para todas as aplicações, embora VF e PJ sejam ensaios dificultosos no recebimento do concreto na obra.

No estado fresco, o CAA requer equipamentos específicos para a avaliação das propriedades de autoadensabilidade e, portanto, para a verificação de sua trabalhabilidade, sendo os mais usados: cone de Abrams, caixa-L e funil – V (GOMES; BARROS, 2009). O



método de ensaio de *slump flow* (SF) é o modo mais rápido para verificar e validar a trabalhabilidade de misturas de CAA (FAROKHZAD *et al.*, 2016; MA *et al.*, 2017).

Assim, as propriedades amplamente discutidas na literatura, e contidas nesta norma brasileira, são assim definidas:

- habilidade de preenchimento (*filling ability*): refere-se à capacidade do CAA fluir e preencher todos os espaços dentro da forma. Essa propriedade é obtida com a utilização de aditivos superplastificantes, principalmente de terceira geração, empregado para promover a alta deformabilidade (MELO, 2005);

- viscosidade plástica aparente: está relacionada à consistência da mistura, ou seja, com a coesão, e também influencia no comportamento do concreto resistir ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do CAA, maior a sua resistência ao escoamento; e quanto maior a viscosidade, maior tempo levará o concreto para escoar. Por meio de ensaios, como o do funil V, é possível avaliar qualitativamente essa propriedade, medindo-se o tempo de escoamento. Também é possível avaliar a viscosidade plástica aparente sob fluxo livre de uma mistura de concreto a partir da determinação do parâmetro  $t_{500}$ ;

- habilidade passante (*passing ability*): significa a capacidade do CAA fluir dentro da forma, passando entre os embutidos (obstáculos), sem obstrução do fluxo ou segregação. Recomendações a respeito da dimensão e do volume de agregado graúdo têm sido encontradas na literatura, justamente por afetar negativamente essa propriedade caso não seja compatível com a abertura entre as armaduras (OKAMURA; OUCHI, 2003; BILLBERG, 1999). O volume de agregado graúdo é um dos requisitos já consolidados para dosagens de CAA. No ensaio da caixa L, como a altura da câmara vertical é de 600 mm, segundo Sedran e De Larrard (1999), o valor máximo de 510 mm possibilita obter boa habilidade de preenchimento. Os autores Petersson *et al.* (1996) especificam como ideal uma profundidade de esvaziamento maior que 490 mm (GOMES; BARROS, 2009);

Ainda sobre a habilidade passante (HP), Bauer e Silva (2017) afirmam ser o ensaio de caixa L determinante para a classificação do concreto em autoadensável. Nos testes realizados com distintas composições binárias de agregados, Farokhzad *et al.* (2016) eliminaram as misturas que falharam no ensaio L-Box (caixa L), embora tenham atingido valores satisfatórios no ensaio *slump flow*. Isto implica que apenas os resultados de *slump flow* não são suficientes para detectar misturas de CAA.

- resistência à segregação (*segregation resistance*): diz respeito à capacidade do concreto manter a homogeneidade da sua composição durante as etapas de transporte, lançamento e

acabamento. Essa propriedade está relacionada à viscosidade, pois, quanto mais viscosa a mistura, mais coesa e melhor a capacidade de manter as partículas sólidas dos agregados em suspensão.

Conforme Okamura e Ouchi (2003), o ensaio de caixa-L é mais adequado para detectar a maior possibilidade de segregação do concreto ocorrida entre agregados graúdos e a argamassa. É um ensaio que mede, ao mesmo tempo, a fluidez e a habilidade de passar por obstáculos, mantendo-se coeso (GOMES, 2002). No estudo de Gomes para a determinação da melhor relação entre os agregados graúdos e miúdos, e o melhor teor de pasta, o ensaio da caixa L foi o mais determinante, pois quase sempre em ensaios de fluidez livre, sem impedimento, todas as relações de agregados para CAA foram atendidas. A relação de agregados que atenderam a todos os requisitos, inclusive o da caixa L, foi de 50% de volume de agregado graúdo e miúdo.

A composição do CAA deve ser formulada para que a habilidade passante, a habilidade de preenchimento, a viscosidade plástica aparente e a segregação estática sejam alcançadas. Toda atenção voltada a essas propriedades do CAA referem-se à composição de agregados. A verificação do diâmetro máximo dos agregados graúdos contidos nos concretos autoadensáveis com baixo e alto teor de cinza volante foi realizada pelos autores Pandurangan *et al.* (2012), podendo-se perceber que o *slump flow* aumentou com uma redução no tamanho do agregado graúdo (Quadro 3.2), os quais constataram que o tempo para alcançar 500 mm de diâmetro foi menor quando agregados de 10 mm foram usados.

**Quadro 3.2 - Propriedades no estado fresco de algumas misturas de concreto autoadensável**

Tamanho dos agregados (mm)	Espalhamento ( <i>Slump flow, SF</i> ) (mm)	t <sub>500</sub> (segundos)
20,0	646 – 665	5,60 – 5,92
16,0	660 – 670	4,80 – 5,23
12,5	690 - 695	4,30 – 4,93
10,0	705 - 707	4,0 – 4,28

Fonte: Adaptado de Pandurangan *et al.* (2012)

Conforme Quadro 3.2, o maior diâmetro dos agregados graúdos aumentou a dificuldade de mobilidade do CAA, tanto no espalhamento quanto no tempo de fluidez do funil V, requerendo um melhor desempenho da pasta.

Outro aspecto que tem sido relevante quanto à característica de agregados graúdos para CAA é a redução do diâmetro máximo característico que tem sido muito recomendado de 12,5 mm ou menor que este (GOMES, 2001; 2002; MELO, 2005; NIARAKI; FAROKHZAD, 2017; FAROKHZAD *et al.*, 2016).

Conforme o desempenho no estado fresco do CAA, suas características são muito influenciadas pela granulometria das partículas (finas e grossas) na mistura que, conseqüentemente, refletem nas suas propriedades reológicas, como tensão de escoamento e viscosidade. O item a seguir expõe os aspectos relativos à estas propriedades de forma sucinta, apontando alguns conceitos e implicações no uso de ensaios complementares de reologia para o estudo de misturas de CAA.

Exposta a revisão precedente sobre os aspectos relevantes que incidem sobre os ensaios de trabalhabilidade pelos métodos empíricos, fica mais adequado, neste momento, entender a correspondência que têm com os conceitos reológicos.

A reologia vem ganhando espaço no estudo de empacotamento de agregados aplicados a concretos, justamente por ser uma ciência que aborda as propriedades reológicas do concreto fresco, conhecidas como tensão de escoamento e viscosidade plástica, as quais afetam diretamente a trabalhabilidade e a estabilidade que são função do empacotamento do concreto (KHAYAT *et al.*, 2002; GHODDOUSI *et al.*, 2014; MOUTASSEM, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O concreto é considerado um tipo de material compósito ou, igualmente, uma suspensão de partículas polidispersas (fase agregados) em um fluido não-newtoniano (a pasta de cimento) (JIAO *et al.*, 2017; CHATEAU, 2012). Portanto, é importante que as propriedades reológicas do concreto sejam avaliadas desde a composição da mistura (cimento, adição mineral água, agregados e aditivos químicos) até o comportamento frente à sua deformação e fluxo no estado fresco. Além disso, o comportamento reológico de um sistema de partículas é diretamente influenciado pela distribuição granulométrica que, por sua vez, é fundamental para caracterização dos agregados (OLIVEIRA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Oliveira *et al.* (2018) comentam que a reologia e o empacotamento possuem caminhos distintos, ressaltando que, enquanto o primeiro consiste em estudar o comportamento reológico das suspensões cimentícias, incluindo adições minerais e aditivos químicos em suas dosagens, o segundo consiste em otimizar a dosagem dos materiais sólidos em uma composição de concreto, de forma que, juntos, possibilitem obter propriedades adequadas nos estados fresco e endurecido, compatíveis ao concreto desejado. Entretanto, essa distinção de abordagens permite complementar o estudo do desempenho do concreto, tendo em vista que as propriedades reológicas variam conforme o tipo de concreto e, portanto, conforme os materiais e composições de agregados.

A avaliação dos métodos empíricos de trabalhabilidade dos concretos, por meio dos ensaios de espalhamento (*slump flow*) e funil V, refletem a tensão de escoamento e a viscosidade, respectivamente (ESMAEILKHANIAN *et al.*, 2014).

A reologia e seus métodos científicos, junto com a possibilidade de analisar as características de fluxo através do uso de reômetros para concreto, torna o ensaio experimental mais completo.

Tratando-se de reologia do concreto, existem vários estudos que fazem menção aos parâmetros reológicos como, tensão de escoamento e viscosidade plástica. A primeira é uma medida de força para o movimento do concreto, enquanto que a segunda é a medida da taxa de fluxo do material (SEDRAN; DE LARRARD, 1999; NGUYEN *et al.*, 2006; WALLEVIK, 2006).

Compreender esses parâmetros é fundamental para uma análise adequada de desempenho de diferentes misturas de concreto, principalmente quando está sendo questionada a relação entre reologia e empacotamento de partículas. Conforme o **Quadro 3.3**, percebe-se que a granulometria e, portanto, o empacotamento de partículas, influenciam na viscosidade, enquanto que a tensão de escoamento é influenciada pelas forças externas promovidas pelo estado de dispersão das partículas. De forma geral, valores menores de tensão de escoamento e viscosidade possibilitam atingir boas propriedades de habilidade de espalhamento e facilita o manuseio e bombeamento do concreto, respectivamente.

**Quadro 3.3 - Aspectos que influenciam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do CAA**

Aspectos	Viscosidade plástica ( $\eta$ )	Tensão de escoamento ( $\tau_0$ )
Distribuição granulométrica ampla	Reduzida	Reduzida
Alto teor de agregado	Aumentada	Aumentada
Partículas esféricas	Reduzida	Reduzida
Adições minerais	Aumentada	Reduzida
Alto teor de água	Reduzida	Reduzida

Fonte: Adaptado de Banfill (2003)

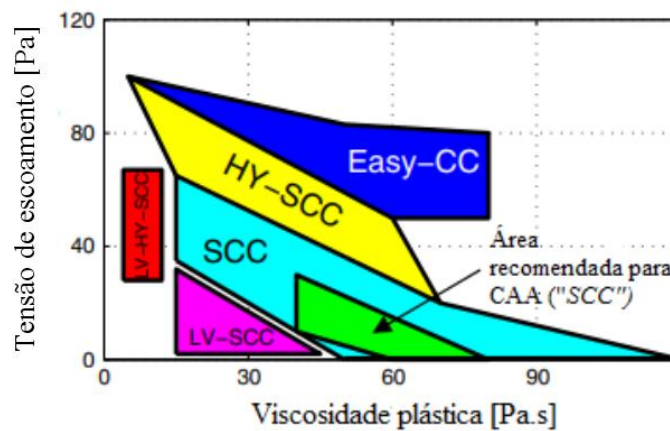
Como a água interfere na trabalhabilidade e na resistência à compressão do concreto, Sedran (1999) cita que, dentre os componentes do concreto, este constituinte é o principal parâmetro que controla a viscosidade e, por isso, deve ser encontrada a proporção adequada para que forneça a trabalhabilidade necessária e a resistência requerida em projeto. Do mesmo modo, Banfill (2003) confirma que a água reduz a viscosidade e a tensão de escoamento

A “reografia” é tida como primeira proposta de gráficos referente ao concreto autoadensável, contida em Wallevik e Wallevik (2011). Nestes gráficos, apresentaram-se regiões de valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica de um CAA ideal. Essa nova

proposta contém áreas coloridas que representam um tipo de concreto autoadensável em função dos valores de tensão de escoamento e de viscosidade plástica. Conforme é visto na Figura 3.6, as áreas pintadas mostram que a região LV-SCC refere-se ao CAA com baixa viscosidade plástica; LV-HY-SCC refere-se ao CAA com alta tensão de escoamento e baixa viscosidade plástica; e HY-SCC refere-se ao CAA com alta tensão de escoamento. Além dessas áreas, tem-se a área em azul, referindo-se ao *Easy-CC*, como os concretos de fácil adensamento (concreto bombeável).

Como pode ser visto, a reografia permite classificar os concretos de acordo com os parâmetros reológicos ilustrados, o que indica que diferentes CAA podem ser analisados, e ainda recomenda uma faixa de tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) entre 15 Pa e 35 Pa e viscosidade ( $\eta$ ) entre 40 Pa.s e 80 Pa.s, aproximadamente. Esses intervalos são propostos, também, por Esmailkhanian *et al.* (2014) ao afirmarem que, se  $\tau_0$  de misturas de CAA estiverem dentro da faixa de 0 a 20 Pa, a viscosidade ( $\eta$ ) correspondente deve ser maior que 55 Pa.s, a fim de assegurar a estabilidade do concreto.

**Figura 3.6 - Reografia para CAA**



Fonte: Wallevik e Wallevik (2011)

Banfill (2003) recomenda as seguintes faixas para o CAA:  $\tau_0$  de 50 a 200 Pa, e  $\eta$  de 20 a 100 Pa.s. Já De Larrard (1999) propõe as seguintes especificações:  $\tau_0$  de 200 a 500 Pa, e  $\eta$  de 200 a 300 Pa.s. Tendo em vista a gama de equipamentos utilizados mundialmente, é difícil estabelecer uma padronização dos parâmetros reológicos em termos de faixas adequadas para concreto autoadensável, o que pode gerar resultados distintos, embora haja tendência de aproximação de comportamento de diferentes CAA produzidos, conforme visto na literatura.

Com estas considerações, é imprescindível o conhecimento dos componentes do CAA, a dosagem e o comportamento no estado fresco, principalmente da composição de agregados, tendo em vista a importância do atendimento aos parâmetros de referência de dosagem de CAA.

Na teoria do empacotamento de um determinado conjunto de partículas está subentendido o papel importante dos agregados, justamente por estar relacionada à condição de dispersão das distribuições granulométricas dos agregados.

Diante do exposto acima, parte-se para a avaliação de composições de agregados para CAA obtidos da literatura, que contribuirão para o desenvolvimento deste trabalho, no sentido de avaliar a influência granulométrica das composições nas propriedades de autoadensabilidade das misturas.

### **3.4 Avaliação de composições de agregados**

Nos itens anteriores, distintos parâmetros e métodos de empacotamento de composições de agregados, adotados por diferentes autores, para determinação de composições de concretos, foram apresentados. Neste item, algumas composições de agregados obtidas para CAA, de diferentes estudos encontrados na literatura, apresentadas na Tabela 3.1, foram avaliadas visando analisar como a distribuição e a proporção de agregados miúdos/graúdos influenciaram no empacotamento dos agregados e, assim, repercutiram nas propriedades de autoadensabilidade do CAA.

Um importante aspecto a ser definido em relação ao estudo da autoadensabilidade do CAA é de como o arranjo granular de partículas de frações granulométricas distintas é obtido, possuindo, em muitos casos, combinações de agregados com maiores modalidades para alcançar uma melhor adequação granulométrica dos grãos e, assim, não resultar em perda de estabilidade e fluidez.

Com esta análise e revisão da literatura, foi possível identificar alguns parâmetros de graduação em diferentes arranjos granulares, que influenciaram e governaram os parâmetros de autoadensabilidade (diâmetro de espalhamento (SF), tempo de fluidez ao alcançar o diâmetro de 500 mm (t500), o tempo no funil V (VF) e habilidade de passagem (HP)) dentre eles: as proporções de agregado miúdo e graúdo, em massa, no esqueleto granular, a distribuição granulométrica contínua (DG - C) e descontínua (DG - D) – sendo estas definidas segundo a concavidade da curva que remete ao afastamento ou aproximação dos trechos das curvas que estão antes e após um “vale”, com tendência à descontinuidade, sendo curvas de concavidade aberta e fechada, respectivamente -, a distância de separação das predominâncias de partículas

graúdas e miúdas (DPGM) relacionada ao tipo de concavidade e que influencia no teor de vazios (Iv) da composição, a porcentagem de agregado graúdo (PAG) e o coeficiente de distribuição (q) do Modelo de Alfred.

Estas composições de agregados, bem como os parâmetros de autoadensabilidade dos CAA, foram analisados focando nos parâmetros de graduação (DG, PAG, DPGM, q) presentes nas composições e direcionados para o presente estudo. As nomenclaturas das composições de agregados utilizadas nos concretos foram padronizadas neste trabalho, conforme as granulometrias dos agregados fornecidas pelos pesquisadores. Estas estão representadas da seguinte forma: C – composição de agregados para CAA; F – areia fina; M – areia média; G – areia grossa; B12 e B19 - pedras britadas com  $D_{máx}$  de 12,5 mm e 19,0 mm, respectivamente; além da sigla de identificação do nome do autor.

Tabela 3.1 - Composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade para composições de CAA obtidas por diferentes autores

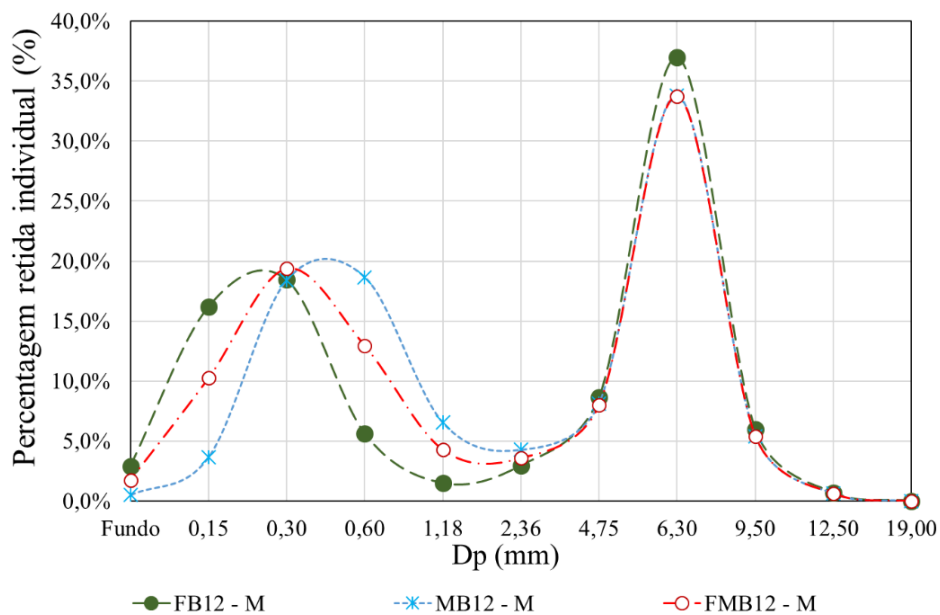
Autores	Composições de agregados	I <sub>v</sub> (%)	Agregado miúdo (%)			Agregado graúdo (%)			SF (cm)	t <sub>500</sub> (s)	IEV	VF (s)	HP
			F	M	G	B9	B12	B19					
Monteiro <i>et al.</i> (2015)	FB12 – M	30,1	45	-	-	-	55	-	68,5	-	1	22	0,50
	FB19 – M	27,6	45	-	-	-	-	55	77,5	-	2	16	0,78
	MB12 – M	34,7	-	50	-	-	50	-	74,0	-	0	12	1,0
	MB19 – M	31,3	-	45	-	-	-	55	79,0	-	3	6	0,50
	FMB12 – M	33,6	23	27	-	-	50	-	75,0	-	0	4	1,0
	FMB19 – M	30,9	23	27	-	-	-	50	81,5	-	0	6	1,0
	FB12B19 – M	31,9	45	-	-	-	25	30	79,0	-	2	4	0,70
	MB12B19 – M	32,6	-	40	-	-	27	33	78,5	-	3	6	0,50
FMB12B19 - M	32,1	22	28	-	-	22	28	76,5	-	0	6	1,0	
Nanthagopalan e Santhanam (2012)	GB12B19 – 1NP	32	-	-	40	-	10	50	72,0	1,5	-	-	-
	GB12B19 – 2NP	32	-	-	45	-	10	45	69,0	2,2	-	-	-
	GB12B19 – 3NP	32	-	-	45	-	15	40	70,0	2,06	-	-	-
	GB12B19 – 4NP	32	-	-	50	-	10	40	66,0	3,12	-	-	-
	GB12B19 – 5NP	32	-	-	50	-	20	30	63,5	3,04	-	-	-
	GB12B19 – 6NP	32	-	-	55	-	5	40	57,0	4,0	-	-	-
	GB12B19 – 7NP	32	-	-	55	-	15	30	55,5	5,0	-	-	-
GB12B19 – 8NP	32	-	-	60	-	10	30	53,0	5,2	-	-	-	
Farokhzad <i>et al.</i> (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)	FB12 – 1FN	-	62	-	-	-	38	-	79,0	-	-	4,35	0,99
	FB12 – 2FN	-	62	-	-	-	38	-	71,0	-	-	3,0	0,85
	FB12 – 3FN	-	62	-	-	-	38	-	78,5	-	-	2,9	0,96
	GB12 – 4FN	-	-	-	62	-	38	-	72,5	-	-	3,5	0,88
	GB12 – 5FN	-	-	-	62	-	38	-	74,0	-	-	3,3	0,94
	GB12 – 6FN	-	-	-	62	-	38	-	73,0	-	-	3,3	0,94
	GB12 – 7FN	-	-	-	62	-	38	-	71,0	-	-	4	0,88
	GB12 – 8FN	-	-	-	62	-	38	-	69,7	-	-	7,6	0,65
GB12 – 9FN	-	-	-	62	-	38	-	53,0	-	-	4,5	0,61	
Cavalcanti (2006)	MB12 – C	32,4	50	-	-	-	50	-	67,0	-	0	10	0,8
Gomes (2002)	GB12 – G1	32,5	-	-	50	50	-	-	70,0	3,8	-	10,9	0,88
	GB12 – G2	32,8	-	-	58	42	-	-	68,0	3,7	-	9,9	1,0
	GB12 – G3	32,9	-	-	45	55	-	-	60,0	4,5	-	16,5	0,33
Melo (2005)	FMB12 - ME	-	10,6	42,4	-	47	-	-	53,5	-	-	3,06	0,80

Fonte: Próprio Autor (2019)

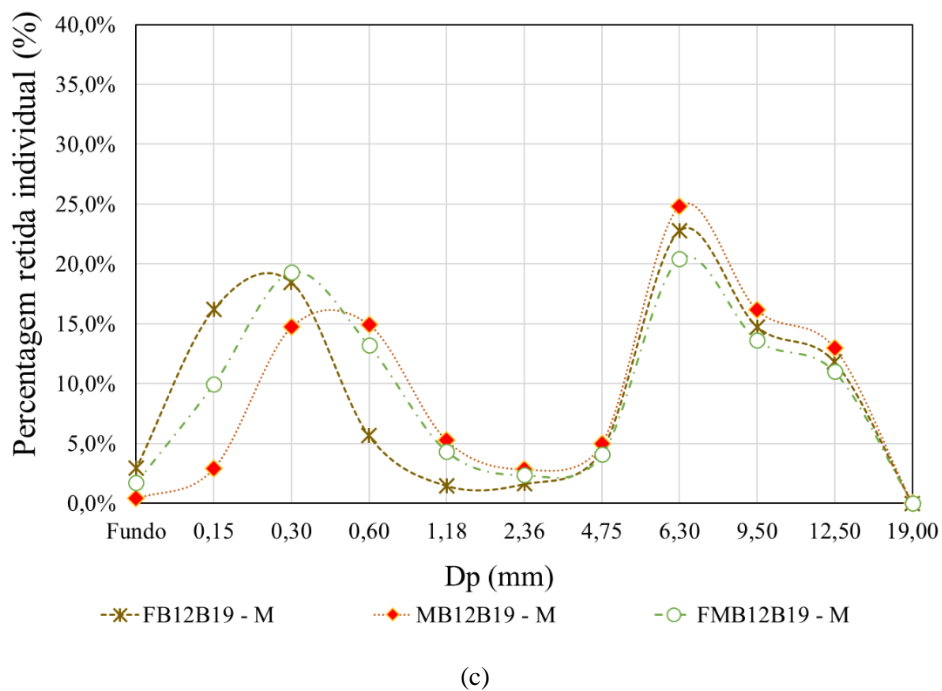
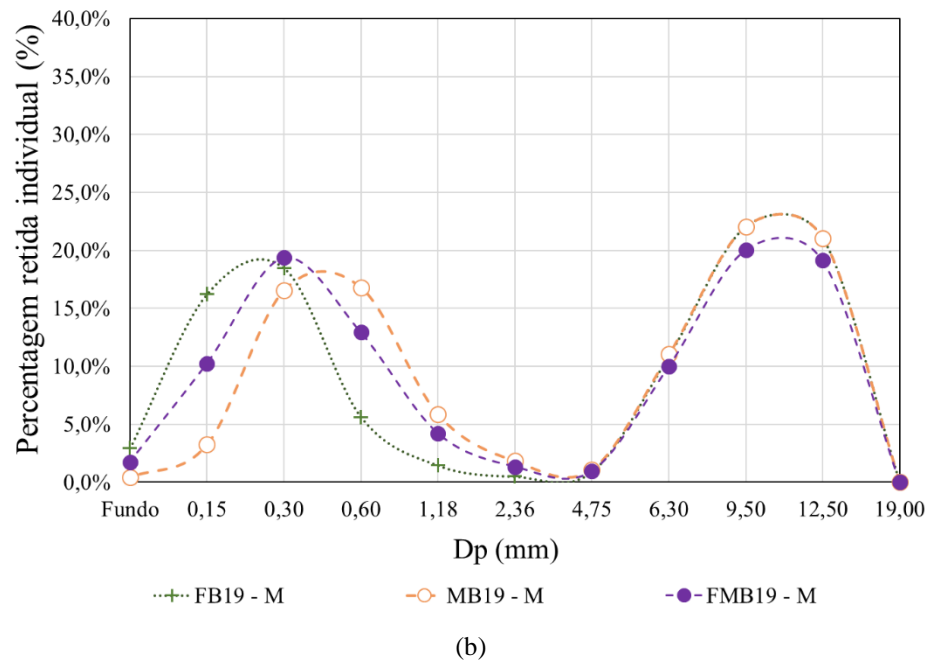


No estudo de Monteiro *et al.* (2015), nove composições de agregados, entre elas, binárias, ternárias e quaternárias, foram desenvolvidas, sendo possível analisar a granulometria de cada esqueleto granular. As curvas destas composições estão ilustradas na Figura 3.7 (a, b, c), agrupadas de acordo com a presença das pedras britadas com diâmetro máximo de 12,5 mm (B12) e 19,0 mm (B19). No Apêndice A, encontram-se os resultados da determinação das proporções dos esqueletos granulares determinados no estudo da massa unitária e do índice de vazios pelo método “C” da NBR NM 45 (ABNT, 2006), equivalente à norma ASTM C29/C29M (1992), sem compactação, também seguindo o procedimento experimental proposto pelo método de Díaz (1998). As análises destas composições em relação às características de empacotamento (DG, PAG, DPGM, q) resultaram na publicação de um artigo em periódico, sendo apresentado no Apêndice D, e abordado aqui sucintamente.

**Figura 3.7 - Composições dos agregados das misturas de CAA do estudo de Monteiro *et al.* (2015), (a) com B12, (b) B19, (c) B12 e B19**



(a)



Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao analisar as curvas granulométricas da Figura 3.7 e Tabela 3.1, percebe-se que a composição binária FB12-M apresentou: DG-D, maior porcentagem de agregado graúdo (PAG = 55 %) e concentração de partículas grossas na fração # 6,3 mm e nas mais finas # 0,15 e # 0,30mm, o que resultou numa descontinuidade da distribuição de partículas nas frações intermediárias #1,18, #2,36 e #4,75 mm, gerando, entre as concentrações, uma curva com abertura côncava mais aberta. Isto resultou no aumento da distância de separação das predominâncias das partículas dos agregados miúdos e graúdos, isto é, maior DPGM

(MDPGM), além do menor  $I_v$  (30,1%), proporcionando um maior empacotamento. Comparadas às contínuas MB12-M ( $I_v = 34,7\%$ ) e FMB12-M (PAG = 50%), ambas com PAG = 50%, percebe-se que estas obtiveram menor empacotamento, com uma curva de concavidade mais fechada e, portanto, com menores distâncias de separação das predominâncias dos agregados graúdos e miúdos (mDPGM).

Comportamento similar foi observado nas composições contendo B19, Figura 3.7b. A composição FB19 - M apresentou: DG-D, PAG = 55%, menor  $I_v$  (27,6%) e MDPGM, comparada-a com as composições MB19 - M e FMB19 - M. Entretanto, as graduações das composições com B19 apresentaram maior descontinuidade nas frações intermediárias comparado-as com aquelas contendo B12, ou seja, com a concavidade mais aberta, com porcentagens retidas individuais (PRI) menores nas frações intermediárias (#1,18 ;, #2,36 e #4,75 mm) e maior concentração de partículas abaixo de #0,60 mm e acima de #6,3 mm, levando as composições a uma DG-D e a MDPGM.

No caso das composições ternárias FB12B19 - M e MB12B19 - M (Figura 3.7 c), o comportamento também se repetiu como nas composições com B12. Na composição quaternária FMB12B19 - M (Figura 3.7 d) foi observado que quando as PRI das frações miúdas se situaram próximas das frações intermediárias, isto fez com que contribuíssem para a melhor distribuição, tendendo a apresentar-se mais contínuas, ou seja, com concavidade mais fechada e a mDPGM, em relação às descontínuas, e com maior  $I_v$  ( $> 32\%$ ).

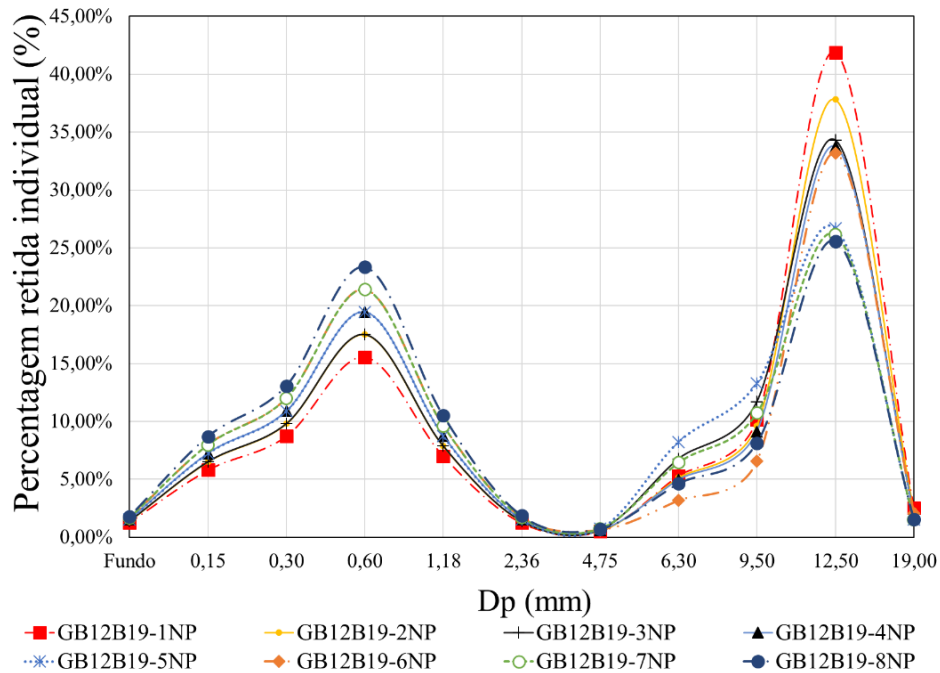
As discussões mais amplas a respeito da análise da continuidade e descontinuidade dessas composições, bem como das propriedades físicas e ensaios de autoadensabilidade dos CAA, encontram-se no no artigo apresentado no Apêndice D.

Do exposto, manifestam-se algumas frações predominantes nas graduações de agregados, possibilitando-se observá-las e distingui-las do ponto de vista de aproximação e afastamento de grãos de diâmetros das partículas miúdas e graúdas. Considera-se que graduações com frações granulométricas predominantes, de diâmetros mais próximos, diminuem a distância de separação das predominâncias de partículas (mDPGM), havendo interação entre o conjunto de partículas; e de diâmetros mais distantes, aumenta-se a distância (MDPGM), não havendo interação, conforme relaciona De Larrad (1999).

Nas composições ternárias de agregados obtidas por Nanthagopalan e Santhanam (2012), para CAA, foram utilizados três tipos de agregados: areia grossa (G) (MF = 3,66) e duas pedras britadas ( $D_{máx}$  iguais a 12,5 e 19,0 mm). As porcentagens dos agregados miúdos e graúdos foram obtidas pelo ensaio modificado do procedimento descrito pela ASTM C29/C29M (ASTM, 1992), semelhante ao adotado por Gomes (2002), Lisboa (2004), Cavalcanti (2006),

Tutikian (2007) e Monteiro *et al.* (2015), sem compactação. Nas oito composições, o  $I_v$  manteve-se constante e as porcentagens de agregados graúdos e miúdos foram alteradas, com o PAG variando de 45% a 60%. As curvas granulométricas das oito composições estão apresentadas na Figura 3.8.

**Figura 3.8 - Curvas de composições de agregados para CAA do estudo de Nanthagopalan e Santhanam (2012)**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Pode ser notado que as curvas de distribuição das partículas das oito composições ternárias se mantiveram, praticamente, oscilando em torno dos mesmos “picos”, isto é, das frações com dimensões de partículas ( $D_p$ ) de #0,60 mm e #12,5 mm, para manter constante o índice de vazios no arranjo granular ( $I_v = 32\%$ ). É notório que os proporcionamentos das frações discretas tornaram as distribuições multimodais concentradas em duas regiões, miúda (0 – #2,36 mm) e graúda (#4,75 – #19,0 mm). O uso dos mesmos materiais colaborou para que se pudesse obter, exatamente, a influência não apenas da presença de G e B12, mas também da constatação de PRI menores nas frações intermediárias, caracterizando DG-D com curvas côncavas mais abertas. Comparando-as com as curvas de Monteiro *et al.* (2015), percebeu-se que a dominância das partículas abaixo de #2,36 mm e acima de #4,75 mm não causou uma maior descontinuidade nas frações intermediárias, visto que a ausência ocorreu na fração mais grossa (#4,75 mm). A dominância das frações miúdas e graúdas e o  $PAG < 60\%$  favoreceu às propriedades no estado fresco de apenas sete composições.

A maior porcentagem de agregado graúdo (PAG) foi a referente a GB12B19-1NP, com 60%, levando ao acúmulo de agregados no centro e à segregação. O PAG não contribuiu para a maior fluidez da mistura.

Constatou-se que as porcentagens de agregados graúdos (PAG < 60 %), as maiores porcentagens retidas individuais (PRI) na peneira de abertura #0,60 mm, combinado com o balanceamento das PRI nas demais peneiras, principalmente na peneira #12,5 mm, contribuíram para o desempenho da mistura no estado fresco. É notório que a elevação de PRI na fração #12,5mm, não afetou a autoadensabilidade pela contribuição deste PAG. O oposto ocorreu na composição com o PAG = 40 % que, mesmo elevando-se as PRI nas frações de diâmetros #0,30, #0,60 e #1,18 mm, a composição GB12B19 – 8NP apresentou-se menos fluida, não atingindo o diâmetro mínimo do ensaio de espalhamento. Neste caso, o PAG = 40% e a dominância das partículas miúdas entre #0,30 e #1,18 mm pode ter contribuído para o aumento da fricção interna entre as partículas, tornando a mistura menos fluida, o que pode ter alterado sua viscosidade, conforme visto na literatura (UMA *et al.*, 2017). Observa-se que o afastamento originado pela concentração de partículas predominantes, que levaram ao entendimento de uma maior distância de separação das predominâncias de partículas graúdas e miúdas (MDPGM) nas composições com  $D_{m\acute{a}x} = 19,0$  mm, não afetou o desempenho das composições ternárias.

As composições de agregados de Monteiro *et al.* (2015) e as obtidas por Nanthagopalan e Santhanam (2012), contendo B12 e B19, mostraram que a dominância dos grãos das frações miúdas e graúdas, e a proporção de agregado graúdo no esqueleto granular promoveram características específicas no estado fresco quando comparadas com as composições contendo apenas B12. Tais desempenhos são caracterizados pela influência das frações de partículas grosseiras (maiores que 150  $\mu\text{m}$ ), submetida à ação do efeito das forças de natureza mássica (atrito) e das partículas finas (menores que 150  $\mu\text{m}$ ), submetida às forças superficiais (atração/repulsão), conforme literatura. Os autores Esmailkhanian *et al.* (2014) destacam que o principal fator que causa a instabilidade do CAA, quando a dimensão máxima do agregado aumenta, é a menor força de arrasto exercida pela argamassa sobre os agregados graúdos. Neste caso, quando imersa na pasta de cimento, as frações do agregado graúdo que se estendem até a dimensão de 19,0 mm distanciam-se das frações mais finas do agregado miúdo, por consequência das maiores PRI nas frações #9,5 e #12,5 mm, necessitando de uma argamassa de maior fluidez para que a mistura não apresente segregação.

Contudo, constatou-se que a presença de frações intermediárias contribui para a estabilidade de misturas de CAA devido à tendência à continuidade da distribuição, fato

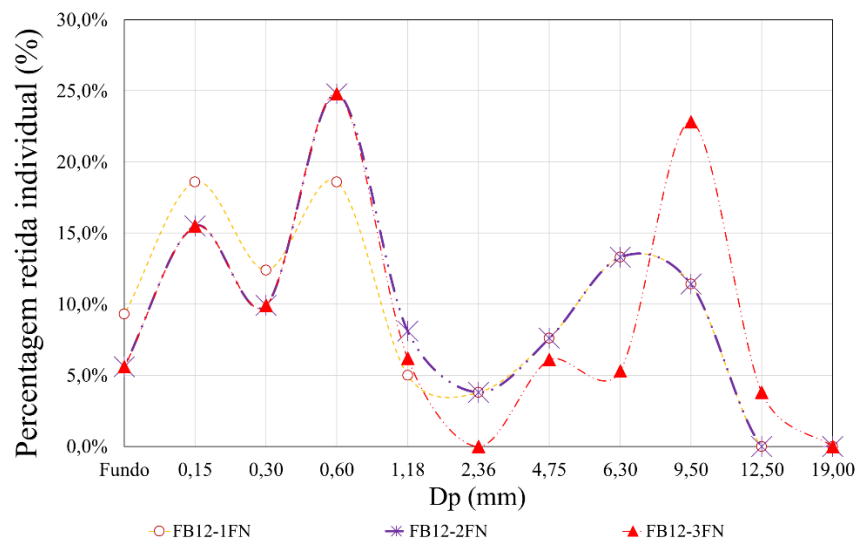
constatado nas composições de Nanthagopalan e Santhanam (2012) em que a pequena descontinuidade em #4,75 mm não prejudicou as propriedades de autoadensabilidade, mas o PAG acima de 55 %.

De acordo com os aspectos acima, foi preferível analisar separadamente as composições do grupo B12 ( $D_{m\acute{a}x}$  de 12,5 mm) e B19 ( $D_{m\acute{a}x}$  de 19,0 mm). Comparações similares às apresentadas anteriormente foram realizadas com os esqueletos granulares do estudo de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017), Tabela 3.1. Esses autores formularam nove curvas de composições de agregados com ( $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm) para CAA. Os materiais utilizados compreenderam a pedra britada passante na peneira de abertura #19,0 mm e retida na peneira #4,75 mm, como também as areias finas (F), com módulos de finuras (MF) iguais a 1,8 e 2,18, e grossas (G), com MF = 3,06; 4,0; e 4,58, passantes em #4,75 mm.

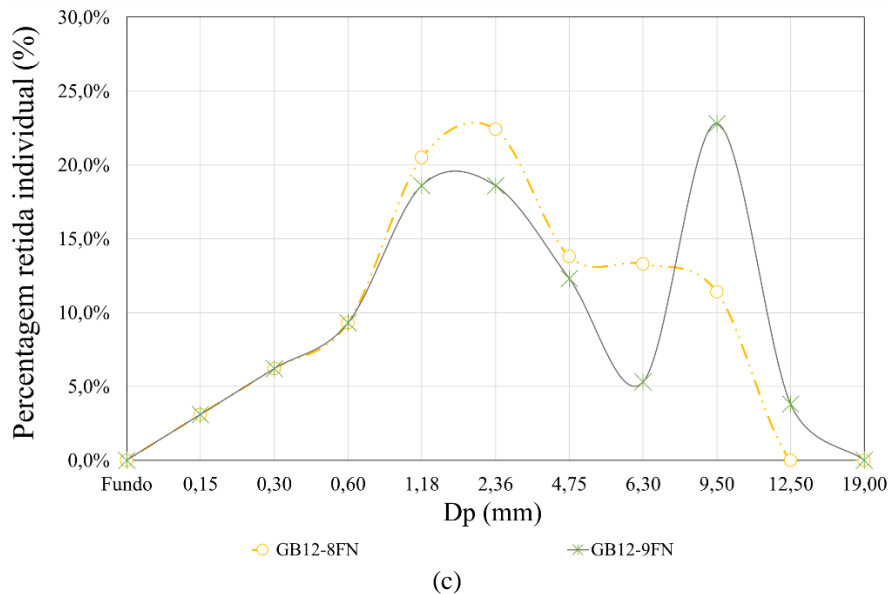
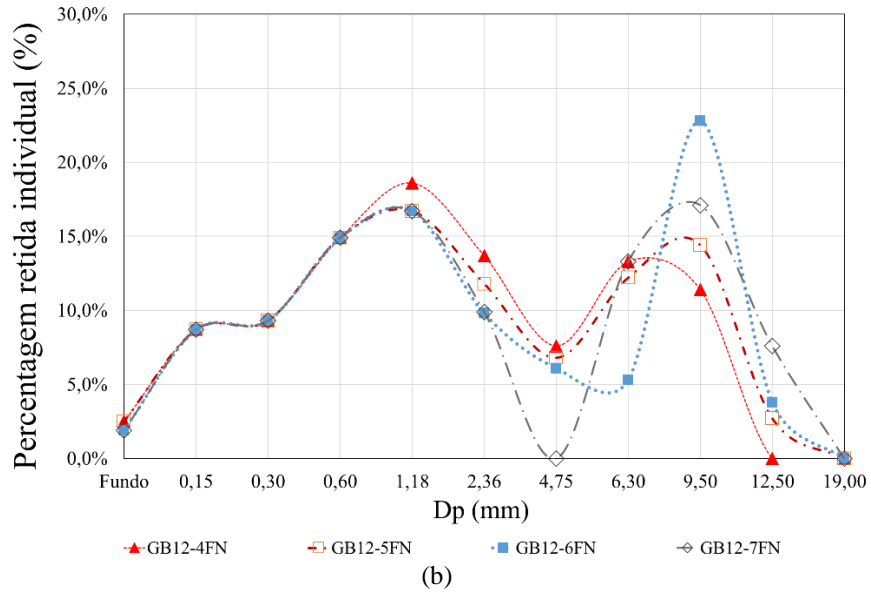
Por meio do procedimento experimental utilizado, as proporções de agregados - 38% e 62% para agregados graúdos e miúdos, respectivamente -, foram determinadas com base em valores de coeficientes de uniformidade, parâmetro esse que auxiliou na escolha das nove composições binárias com melhores distribuições granulométricas. Os índices de vazios das composições não foram determinados.

As curvas das nove composições binárias mostraram evidências de continuidade e descontinuidade das distribuições, como seguem apresentadas na Figura 3.9, classificadas com maiores percentagens de partículas retidas individuais em #0,15 mm e #0,60 mm (Figura 3.9a), em #0,60 e #1,18 mm (Figura 3.9b) e em #1,18 e #2,36 mm (Figura 3.9c).

**Figura 3.9 - Curvas de composições de agregados do estudo de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)**



(a)



Fonte: Próprio Autor (2019)

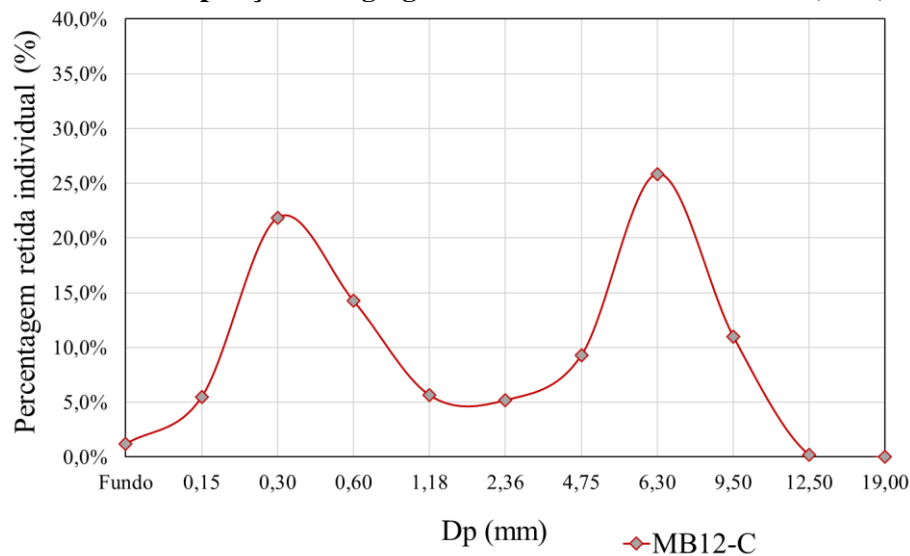
Dentre as curvas desenhadas na

Figura 3.9 (a e b), as descontinuidades de FB12-3FN e GB12-7FN resultaram em “vales” mais expressivos, deixando as curvas mais fechadas, na ausência das frações #2,36 mm e #4,75 mm, e “picos” em intervalos de tamanhos de partículas miúdas e grossas (acima de #4,75 mm). Desse modo, a distância das curvas de predominância dos agregados graúdos e miúdos tornou-se maior (MDPGM). Por outro lado, embora as composições GB12-8FN e GB12-9FN sendo distribuições contínuas, as menores PRI abaixo de #0,60 mm e o aumento de PRI entre #1,18 e #4,75 mm, aproximaram os diâmetros dos grãos retidos nas frações miúdas e graúdas, tornando menor o DPGM (mDPGM) e resultando em uma maior interação entre os grãos (DE LARRARD, 1999).

Dentre as propriedades de autoadensabilidade (SF, VF e HP), observou-se que as classes de espalhamento, fluidez e habilidade de passagem, respectivamente, foram abrangidas, devido a seleção adequada de conjuntos de grãos constituídos por intervalos de tamanhos de partículas miúdas e graúdas de percentagens retidas individuais (PRI) favoráveis para os CAA. Algumas misturas não atenderam em virtude da necessidade de correção granulométrica, como foram os casos das composições GB12-8FN e GB12-9FN.

Analisando a composição aplicada nos concretos de Cavalcanti (2006), observou-se que a distribuição se assemelha com as binárias desenvolvidas por Monteiro *et al.* (2015), contendo areia natural admitida como média (MF = 2,4) e pedra britada de  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm (B12). Sendo uma distribuição do tipo contínua, a curva granulométrica ilustrada na Figura 3.10, apresenta “picos” que caracterizam a dominância das partículas nas frações miúda (fração #0,30 mm) e graúda (fração #6,30 mm).

**Figura 3.10 - Curva de composições de agregados dos estudos de Cavalcanti (2006)**



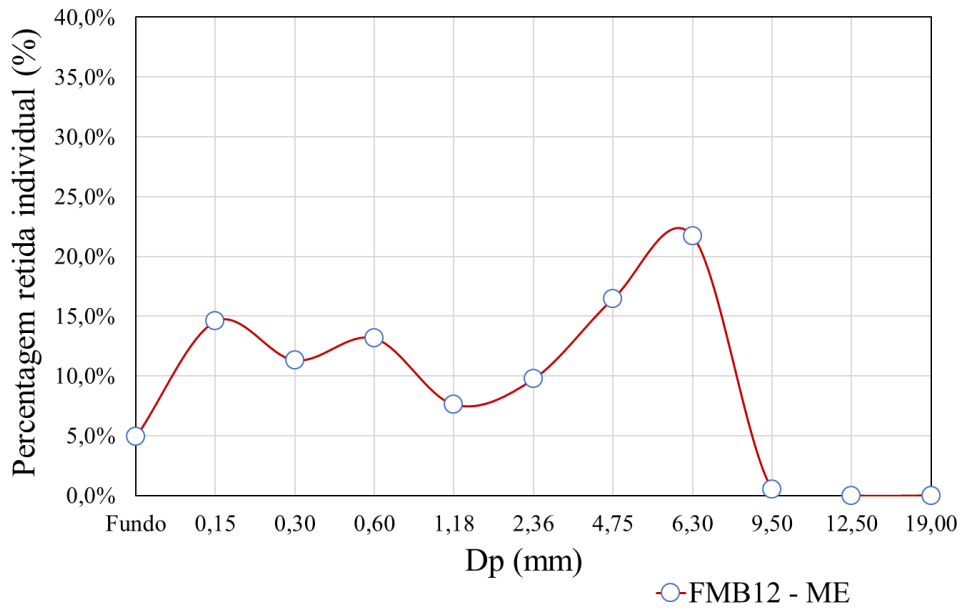
Fonte: Próprio Autor (2019)

Em virtude do próprio processo de produção, a ocorrência do “pico” no intervalo de tamanho #6,3 mm, confirma que a adequada distribuição granulométrica da pedra britada B12 e a presença da areia média (M) elevaram a PRI nas frações intermediárias (#1,18, #2,36 e #4,75 mm), para a proporção 50 % de miúdo e 50 % de graúdo. O índice de vazios de 32,4 % mostrou que a mistura de grãos com tamanhos mais próximos, contribuiu para a redução da distância das predominâncias de separação dos agregados graúdos e miúdos (mDPGM), devido a interação parcial entre as partículas (DE LARRARD, 2009).



No estudo desenvolvido por Melo (2005), fez-se a adequação de curvas granulométricas de agregados a uma faixa obtida por meio de proporções de agregados miúdos e graúdos empregados na literatura. A granulometria do esqueleto granular foi definida sem se deter ao empacotamento de partículas, não entrando no mérito do estudo de massa unitária e índice de vazios das composições. Uma composição ternária (FMB12) foi obtida, cuja proporção adotada representou 53 % de agregado miúdo e 47 % de agregado graúdo (Figura 3.11).

**Figura 3.11 - Curva de composições de agregados dos estudos de Melo (2005)**

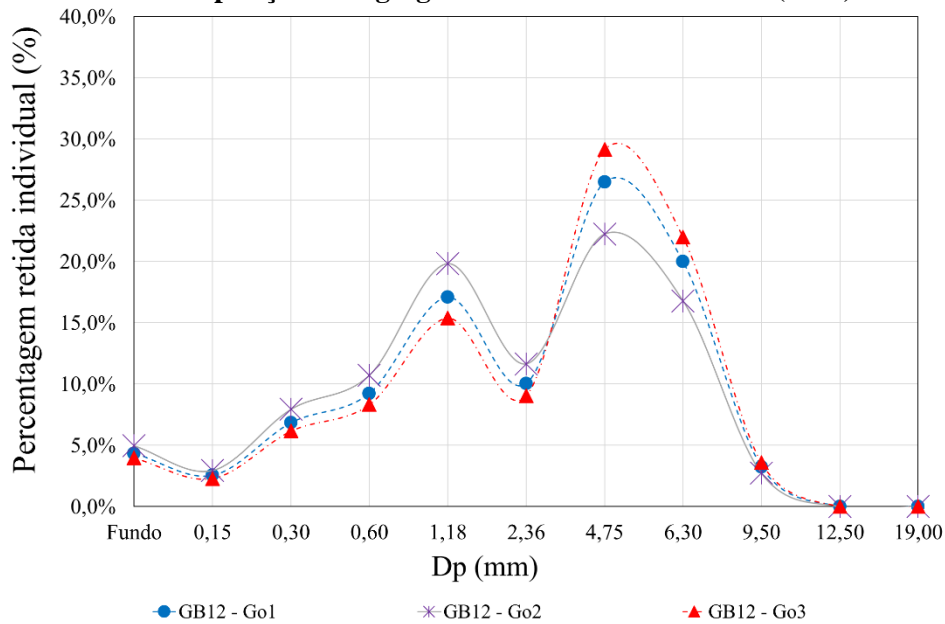


Fonte: Próprio Autor (2019)

Nota-se que a continuidade da distribuição dos agregados tornou a curva mais aberta e com elevações mais suaves, devido a proximidade do tamanho dos grãos de areia fina (F), média (M) e pedra britada limitada no tamanho de 10,0 mm. O PAG de 47 %, menor que o indicado por Okamura e Ouchi (2003) - PAG = 50 % -, favoreceu a ocorrência de um menor DPGM da composição. A limitação do tamanho do agregado graúdo contribuiu para que não houvesse “picos” mais altos de frações mais grossas, aumentando, assim, a dominância de partículas intermediárias (entre #1,18 e #4,75 mm).

As proporções dos agregados obtidas por Gomes (2002) também foram determinadas pelo método da massa unitária e menores teores de vazios. As curvas das composições dos agregados tiveram um padrão de distribuição granulométrica apresentado na Figura 3.12.

**Figura 3.12 - Curva de composições de agregados dos estudos de Gomes (2002)**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Conforme ilustrado, as composições GB12-Go1, GB12-Go2 e GB12-Go3 mantiveram seus picos nas frações de tamanhos #1,18 mm e #4,75 mm. A variação dos índices de vazios obtidos apresentou-se muito pequena, sendo, respectivamente: 32,5 %, 32,8 % e 32,9%, constatando-se a influência da interação parcial das partículas miúdas e graúdas para os PAG de 50 %, 42 % e 55%, respectivamente.

Como se tratam de curvas contínuas, apresentando um “vale” menos pronunciado em #2,36 mm, demonstram que a distância do tamanho das partículas graúdas e miúdas, com maiores predominâncias, é menor (mDPGM).

As referências apresentadas fornecem indicativos do comportamento dos concretos autoadensáveis, tornando-se perceptível a influência da fração fina e grosseira dos esqueletos granulares. De uma forma geral, percebeu-se que nas curvas de composições de agregados apresentadas pelos diferentes autores há uma predominância de partículas mais finas que varia de #0,15 até #1,18 mm.

A fração grosseira, quando de predominância muito maior, pode originar segregação. Quando a fração fina é bem menor, também ocorre da mistura de CAA não apresentar mobilidade devido a maior interferência. Para CAA, as composições que conferem características satisfatórias, mostram-se a questão da proximidade dos diâmetros das partículas e que as diferentes frações granulométricas contribuem para a fluidez quando as partículas se encontram preenchendo os vazios, para cada diâmetro, sem descontinuidades, com curvas de concavidade mais aberta. Sendo muito alta a predominância de partículas finas e muito altas a

predominância de partículas grossas pode impedir a fluidez por ação da gravidade. O que se pretende é identificar e avaliar os possíveis parâmetros de graduação para que, experimentalmente possam, quando combinados, indicar melhores desempenhos no estado fresco

Os parâmetros de graduação (DG, DPGM, PAG), avaliadas das curvas de composições de agregados, Tabela 3.1, são apresentadas na Tabela 3.2. Assim como os valores do módulo de distribuição do modelo de empacotamento de Alfred ( $q$ ), para os autores que forneceram dados para sua determinação. Estas propriedades serão avaliadas em relação aos parâmetros de autoadensabilidade.

Tabela 3.2 - Análise de composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade para composições de CAA obtidas por diferentes autores

Autores	Códigos das composições de agregados	DG	I <sub>v</sub> (%)	Agregado miúdo (%)			Agregado graúdo (%)			PAG (%)	DPGM	q	SF (cm)	t <sub>500</sub> (s)	IEV	VF (s)	HP
				F	M	G	B9	B12	B19								
Monteiro <i>et al.</i> (2015)	FB12 – M	D	30,1	45	-	-	-	55	-	55	M	0,194	68,5	-	1	22	0,50
	FB19 - M	D	27,6	45	-	-	-	-	55	55	M	0,152	77,5	-	2	16	0,78
	MB12 – M	C	34,7	-	50	-	-	50	-	50	m.	0,253	74,0	-	0	12	1,0
	MB19 - M	D	31,3	-	45	-	-	-	55	55	M	0,126	79,0	-	3	6	0,50
	FMB12 – M	C	33,6	23	27	-	-	50	-	50	m.	0,219	75,0	-	0	4	1,0
	FMB19 - M	D	30,9	23	27	-	-	-	50	50	M	0,184	81,5	-	0	6	1,0
	FB12B19 - M	D	31,9	45	-	-	-	25	30	55	M	0,174	79,0	-	2	4	0,70
	MB12B19 - M	C	32,6	-	40	-	-	27	33	60	m.	0,238	78,5	-	3	6	0,50
	FMB12B19 - M	C	32,1	22	28	-	-	22	28	50	m.	0,201	76,5	-	0	6	1,0
Nanthagopalan e Santhanam (2012)	GB12B19 – 1NP	D	32	-	-	40	-	10	50	60	M	-	72,0	1,5	-	-	-
	GB12B19 – 2NP	D	32	-	-	45	-	10	45	55		-	69,0	2,2	-	-	-
	GB12B19 – 3NP	D	32	-	-	45	-	15	40	45		-	70,0	2,06	-	-	-
	GB12B19 – 4NP	D	32	-	-	50	-	10	40	50		-	66,0	3,12	-	-	-
	GB12B19 – 5NP	D	32	-	-	50	-	20	30	50		-	63,5	3,04	-	-	-
	GB12B19 – 6NP	D	32	-	-	55	-	5	40	45		-	57,0	4,0	-	-	-
	GB12B19 – 7NP	D	32	-	-	55	-	15	30	45		-	55,5	5,0	-	-	-
	GB12B19 – 8NP	D	32	-	-	60	-	10	30	40		-	53,0	5,2	-	-	-
Farokhzad <i>et al.</i> (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)	FB12 – 1FN	C	-	62	-	-	-	38	-	38	m.	-	79,0	-	-	4,35	0,99
	FB12 – 2FN	C	-	62	-	-	-	38	-	38	m.	-	71,0	-	-	3,0	0,85
	FB12 – 3FN	C	-	62	-	-	-	38	-	38	M	-	78,5	-	-	2,9	0,96
	GB12 – 4FN	C	-	-	-	62	-	38	-	38	m.	-	72,5	-	-	3,5	0,88
	GB12 – 5FN	C	-	-	-	62	-	38	-	38	m.	-	74,0	-	-	3,3	0,94
	GB12 – 6FN	C	-	-	-	62	-	38	-	38	M	-	73,0	-	-	3,3	0,94
	GB12 – 7FN	D	-	-	-	62	-	38	-	38	M	-	71,0	-	-	4	0,88
	GB12 – 8FN	C	-	-	-	62	-	38	-	38	m.	-	69,7	-	-	7,6	0,65
	GB12 – 9FN	C	-	-	-	62	-	38	-	38	M	-	53,0	-	-	4,5	0,61
Cavalcanti	MB12 – C	C	32,4	50	-	-	-	50	-	50	m.	0,236	67,0	-	0	10	0,8
Gomes (2002)	GB12 – Go1	C	32,5	-	-	50	50	-	-	50	m.	0,271	70,0	3,8	-	10,9	0,88
	GB12 – Go2	C	32,8	-	-	58	42	-	-	42		0,294	68,0	3,7	-	9,9	1,0
	GB12 – Go3	C	32,9	-	-	45	55	-	-	55		0,313	60,0	4,5	-	16,5	0,33
Melo (2005)	FMB12 - ME	C	-	10,6	42,4	-	47	-	-	47	m.	-	53,5	-	-	3,06	0,80

Fonte: Próprio Autor (2019)

Com os resultados contidos na Tabela 3.2 foi observado, em geral, que os concretos com parâmetros de graduação favoráveis para obter autoadensabilidade apresentaram:  $I_v$  maior 32%, DG-C, menor DPGM (mDPGM) e  $PAG \leq 50 \%$ .

Conforme os parâmetros de autoadensabilidade obtidos da literatura, constatou-se que os índices de espalhamentos visuais foram compreendidos entre  $0 \leq IEV \leq 1$  e habilidade passante  $HP > 0,8$ . Por outro lado, os concretos que apresentaram parâmetros de composições de agregados menos favoráveis apresentaram, em geral, as seguintes características:  $I_v < 32 \%$ , DG-D com curvas fechadas, maior DPGM (M) e  $PAG > 50 \%$ . Quanto aos valores-q, foram obtidos fora dos indicados para CAA, sendo constatado pelas instabilidades das misturas por se enquadrarem entre as classes  $2 \leq IEV \leq 3$  e obterem  $HP < 0,80$ .

Quanto a avaliação qualitativa da viscosidade plástica aparente nos ensaios sob fluxo livre ( $t_{500}$ ) e sob fluxo confinado (VF), constatou-se que os CAA avaliados atenderam aos critérios recomendados na NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e NBR 15823-5 (ABNT, 2017): no primeiro ensaio, a classe VS2 ( $t_{500} > 2$ ) correspondeu diretamente ao ensaio SF, ou seja, diminuiu o diâmetro de espalhamento com o aumento do tempo medido no diâmetro de 500 mm, e vice-versa; no segundo, a classe VF2 (9 a 25s) abrangeu as misturas de CAA mais fluidas e algumas delas segregaram pela maior concentração de partículas graúdas, sendo comprovado que um alto tempo significa tendência a bloqueio. Já as misturas de CAA que foram classificadas em VS1 (9s), obtiveram fluidez favorável para o esvaziamento do funil (GOMES, 2002). As misturas que não atenderam a autoadensabilidade, mesmo enquadrando-se na classe VS1, apresentaram-se entre as classes  $2 \leq IEV \leq 3$  e obtiveram  $HP < 0,80$ .

Para estas misturas, analisadas quanto ao modelo de Alfred, os valores-q enquadraram-se nos indicados para CAA.

Os resultados referentes aos cálculos para os valores do módulo de distribuição do modelo de empacotamento de Alfred (q), analisados para as composições de Monteiro *et al.* (2015), mostraram-se coerentes com as propriedades de autoadensabilidade. Misturas de concreto que se mostraram instáveis foram aquelas que obtiveram valor-q fora dos indicados para CAA (entre 0,21 e 0,28) e maior PAG ( $> 50 \%$ ): q entre 0,126 e 0,194 – instáveis; q entre 0,201 e 0,253 - estáveis. CMB12B19 teve perda de estabilidade, menor DPGM, entretanto, o PAG foi igual a 60 %.

Analisando-se os resultados de Cavalcanti (2006), constatou-se que o valor-q foi de 0,236, enquadrando-se dentro dos indicados para CAA (OLIVEIRA *et al.*, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2018; GRAZIA *et al.*, 2019), pois valores menores do que 0,37 possuem menores relações

de agregado graúdo/miúdo, maior quantidade de pasta, maior quantidade de partículas finas e misturas mais fluidas.

Com as granulometrias de cada material fornecido por Gomes (2002), também foi possível o cálculo dos valores dos módulos de distribuição de GB12-Go1, GB12-Go2 e GB12-Go3, sendo iguais a 0,294; 0,271, 0,313, resultantes da maior concentração de partículas mais grossas e da viscosidade da mistura, principalmente na primeira e na segunda composição.

A contribuição das distribuições granulométricas do conjunto de partículas de cada composição correspondeu, na maioria dos casos, a resultados satisfatórios de autoadensabilidade (Tabela 3.1 e Tabela 3.2).

Quando se trata de concretos autoadensáveis um maior volume de pasta é utilizado, que pode ser justificado pelo alto teor de finos, além de uma maior camada de pasta que deve envolver os agregados, comparado com o envolvimento da pasta em agregado de concreto convencional. Neste sentido, o maior  $I_v$  em composições de agregados com mDPGM mostra-se mais favorável para CAA, além de DG-C. As distribuições contínuas e as descontínuas com concavidade mais fechada foram as mais indicadas, visto que para uma menor distância entre as partículas graúdas e miúdas, qualitativamente, as dosagens de concreto tenderam a ser mais uniformes, ao contrário das descontínuas, de concavidade mais abertas, em que teve uma maior distância entre os tamanhos dos grãos graúdos e miúdos predominantes, nas quais percebeu-se um excesso de pasta. Neste ponto, destacou-se uma contradição entre o melhor empacotamento e maiores índices de vazios.

Diante do apresentado neste capítulo, pode-se ressaltar a relevância dos parâmetros de composições de agregados observados neste estudo para a obtenção de CAA, a fim de torná-lo mais eficiente no atendimento aos parâmetros de autoadensabilidade, indicando que o melhor empacotamento de agregados para CAA não está relacionado ao menor índice de vazios da composição e, sim, há uma distribuição de partículas que favoreça tanto a pasta quanto ao teor de pasta necessário para garantir a autoadensabilidade. Assim, possibilita-se que os esqueletos granulares para CAA possam ser mais otimizados que, em geral, neste estudo, apresentaram maiores índices de vazios.

Nos próximos capítulos, estes parâmetros de graduação foram novamente avaliados, qualitativamente, em composições de agregados constituídas por diferentes agregados locais, a fim de obter CAA e propor melhoras nas composições visando a obtenção quantitativa destes parâmetros. Em seguida, prosseguiu-se com a discussão da avaliação dos parâmetros de graduação de composições de agregados para CAA (DG, DPGM, PAG), necessária para a determinação, e posterior aplicação destes parâmetros com diferentes agregados.

#### 4 TÉCNICA MULTIVARIADA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

O emprego de uma técnica estatística multivariada de modelagem da estrutura de covariância é apresentado neste capítulo, a qual é denominada análise de componentes principais. Tal técnica foi descrita, inicialmente, pelo matemático Karl Pearson em 1901 (HONGYU *et al.*, 2015).

Nesta técnica, as variáveis e eixos originais são transformados linearmente, de modo que não mais estejam correlacionadas entre si (VARELLA, 2008; HONGYU *et al.*, 2015). Essa possibilidade de combinação as torna independentes entre si, responsáveis por reter o máximo de informação da variabilidade do conjunto de dados originais. Vale salientar que o princípio tradicional existente na análise estatística, que requer um número maior de amostras que o número de variáveis, não se aplica na ACP, visto que se trata de um método para dados de análise fixa com variáveis fortemente correlacionadas (WOLD *et al.*, 1987 *apud* BERNARDI *et al.*, 2009).

É importante frisar que a modelagem estatística multivariada é uma das técnicas estatísticas mais aplicadas em diferentes áreas do conhecimento, como construção civil, agronomia, zootecnia, ecologia, florestal, medicina, etc., para a análise de dados sob investigação. Nessa técnica, em cada indivíduo (objeto) analisado, múltiplas medidas são analisadas simultaneamente (HONGYU *et al.*, 2015; VARELLA, 2008).

Pesquisas recentes, como de Cruz e Nagahama (2017), mostraram que os dados experimentais foram coletados de diferentes estudos. Estes autores, buscaram avaliar as propriedades de resistência à compressão e módulo de deformação de concreto reciclado de resíduos de construção e demolição. Os 1180 dados foram preparados utilizando-se a modelagem ACP, admitindo-se um conjunto de 24 variáveis de entrada, entre elas: módulos de finuras dos agregados miúdos naturais e reciclados, módulos de finuras dos agregados graúdos naturais e reciclados, percentuais de agregados miúdos e graúdos reciclados, teores de agregados, entre outros. Estas variáveis foram reduzidas para 10 novas variáveis, ou seja, as componentes principais que explicaram mais de 98,1% da variância total dos dados.

Conforme Vargas-Nordbeck *et al.* (2017), 12 misturas de concreto asfáltico produzidas no laboratório foram avaliadas, com o interesse em analisar o desempenho quanto à resistência à compressão. Nessas misturas, foram usados os agregados de dimensões nominais máximas de 9,5 e 12,5 mm. Foram consideradas 6 variáveis: resistência à tração condicionada e seca, módulo dinâmico condicionado e seco, número de fluxo condicionado e seco. A partir da análise, embora três componentes principais tenham sido identificados, a primeira componente

explicou 61 % dos dados, sendo fortemente correlacionada com três das seis variáveis analisadas: o módulo dinâmico seco e os números de fluxo condicionado e seco. Isso mostra que o uso da técnica multivariada tem respondido em termos de indicar o agrupamento de variáveis mais relevantes reduzidas nas componentes principais obtidas estatisticamente.

Lang *et al.* (2015) aplicaram a ACP em busca da otimização da trabalhabilidade de pastas, tomando-se como base 24 dados experimentais e 4 variáveis originais (concentração de sólidos, relação resíduo/cimento, massa específica e *slump*), para avaliação da influência desses fatores nas propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade plástica). Duas componentes principais explicaram 98,63% da variabilidade dos dados: a primeira componente com 73,62 % e a segunda com 25,01 %.

Na busca pela otimização, vários trabalhos aplicaram a análise de componentes principais, como o de Raharjo *et al.* (2013), que buscaram estudar a otimização de misturas de concreto autoadensável, nos quais diferentes dosagens de adições minerais e aditivos químicos foram testados, chegando-se a avaliar 33 composições de misturas de CAA, de modo que atingisse uma máxima resistência à compressão (variável resposta). Sendo uma variável resposta a ser estimada, os autores avaliaram a influência de 8 variáveis no estudo de ACP, tais como cimento, água, areia, sílica de fumo, cinza volante, pedra britada, “viscocrete” e “ironslag”, as quais os autores chamaram de variáveis predictoras. Assumiu-se que a quantidade de superplastificante não afetou a variável resposta. Assim, reduziu-se de sete variáveis para duas componentes principais, correspondendo a 78,48 % da variabilidade dos dados. A primeira componente representou 44,26% da variância total, com a combinação das variáveis predictoras: água, areia, sílica de fumo, cinza volante e “viscocrete”; enquanto que a segunda componente representou 34,25 % da variabilidade dos dados e combinou as variáveis: cimento, pedra britada e “ironslag”.

Garcia-Taengua e Marti-Vargas (2016) buscaram estudar correlações entre cinco parâmetros de ensaios no estado fresco de concretos autoadensáveis e características de dosagens de misturas, tomando-se resultados experimentais de 193 concretos, de diferentes estudos, para a construção de um banco de dados, entre eles: ensaios de espalhamento,  $t_{500}$  (não medido em alguns casos), índice de segregação visual (ISV), caixa-L, funil-V (VF) e anel-J (por ser menos comum, decidiram descartar estas informações). Constataram-se uma forte correlação entre  $t_{500}$  e VF (0,787), como também H2/H1 com os parâmetros SF (0,842), VF (0,519) e ISV (-0,640). Ao todo foram cinco parâmetros fortemente correlacionados, não constituindo um sistema de coordenadas ortogonais. Tal análise mostrou que três componentes principais explicaram 94,66 % da variância total nas variáveis originais. Também pode-se obter



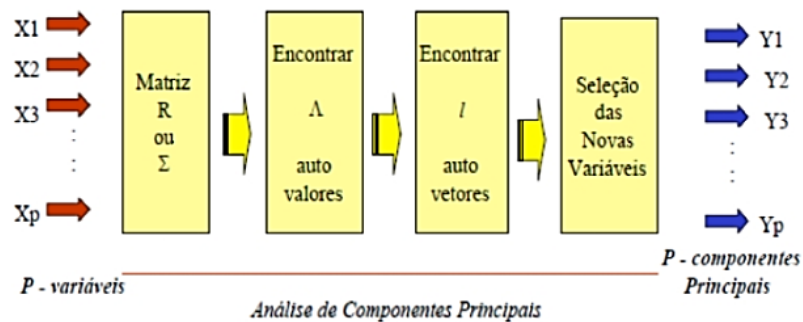
associações entre três componentes principais correspondentes aos aspectos: fluidez ( $t_{500}$  e VF), habilidade passante (H2/H1 e SF) e estabilidade (ISV).

Como se trata de um método que abrange “n” dados experimentais e uma quantidade maior de variáveis “p”, muitos autores têm recorrido a outros estudos para obtenção de mais dados e, assim, permitir a aplicação da técnica supramencionada.

#### 4.1 Interpretação de Componentes Principais

Uma matriz de dados de dimensão  $n \times p$  ( $n$ : indivíduos e  $p$ : características, isto é, variáveis originais  $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) é determinada. Em outras palavras, todas as características “p” de “n” indivíduos são agrupadas segundo suas variâncias, sendo selecionadas as novas variáveis (Figura 4.1). Nesse caso, a variabilidade total do sistema pode ser explicada pelos autovalores, também conhecidos como componentes principais (VARELLA, 2008; HONGYU *et al.*, 2015).

**Figura 4.1 – Esquema da aplicação da análise de componentes principais**

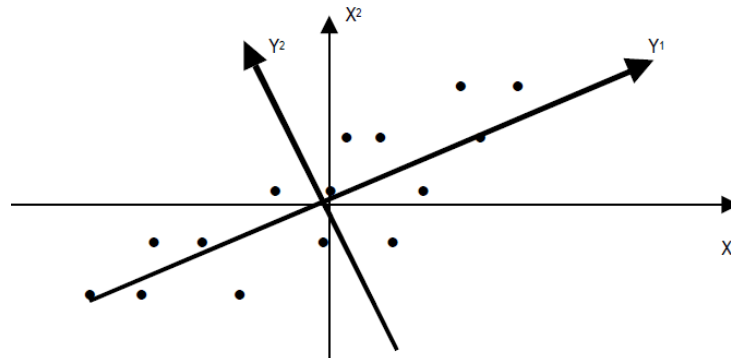


Fonte: Souza (2000) *apud* Martins *et al.* (2012)

É importante ressaltar que a interpretação de cada componente principal é feita pela influência de cada variável sobre um determinado componente, sendo vista pela correlação entre cada variável original e o componente principal Y.

Um esquema geométrico de um novo sistema de coordenadas é representado na Figura 4.2, podendo-se constatar a determinação de duas componentes principais nas quais as variáveis observadas nos eixos originais ( $X_1$  e  $X_2$ ) passam a ser redistribuídas em eixos ortogonais não correlacionados ( $Y_1$  e  $Y_2$ ).

**Figura 4.2 - Representação geométrica de duas componentes principais**



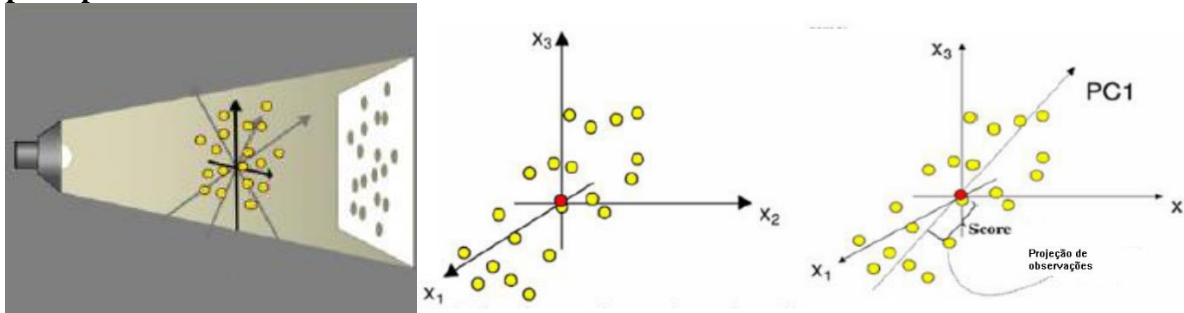
Fonte: Marques; Marques (2005)

Em geral, o componente principal de maior importância é escolhido primeiro como sendo o que possui maior variância explicada, ou seja, aquele que explique o máximo de variabilidade dos dados. No caso da Figura 4.2, o maior eixo define a primeira CP (Y1). Passa-se para a escolha do segunda CP (Y2) de maior importância, sendo o que apresenta a maior variância e perpendicular ao primeiro eixo. É definido, assim, sucessivamente, até o componente principal de menor importância, destacando-se na ACP os CP na direção da maior variabilidade (MARTINS *et al.*; 2012). No geral, os últimos componentes principais não obterão variabilidade representativa. A importância de cada componente principal  $Y_i$  é avaliada pela contribuição “ $C_i$ ”, que é dado em porcentagem, representando a proporção de variância total explicada pelo componente principal  $Y_i$ . (MANLY, 1986 *apud* HONGYU *et al.*, 2015). Assim, a proporção da contribuição de cada  $i$ -ésimo componente principal é dada pela Equação 4.1:

$$C_i = \frac{Var(Y_i)}{\sum_{i=1}^p Var(Y_i)} \cdot 100 = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A modelagem numérica dos dados na ACP permite uma maior facilidade na visualização dos componentes principais (CP) em mais de duas dimensões, conforme Figura 4.3. Além das informações supracitadas, a ACP pode ser usada para revelar diferentes grupos existentes em amostras, baseados nas propriedades destas amostras.

**Figura 4.3 – Projeção espacial dos dados aleatórios (a) no plano e (b) em uma componente principal**



Fonte: Nazaroo's Forum Thread (2019)

O importante é interpretar os eixos com base nas correlações das variáveis e no número de autovalores determinados como representativos de maior variabilidade dos dados, isto é, pela proporção de variância total explicada por cada componente. Os autovetores também correspondem às componentes principais, sendo estes resultantes dos carregamentos das variáveis originais em cada uma delas, considerando-se os sinais positivo ou negativo para indicação das relações direta e inversamente proporcionais.

As componentes principais são, então, escolhidas, sendo aquelas que representam juntas uma variação total acima de 70 % das informações originais. Tem-se o critério *Scree Plot* (método gráfico), que determina as componentes anteriores ao ponto de inflexão da curva. A partir deste ponto, a porcentagem diminui e a curva do gráfico torna-se, praticamente, paralela ao eixo das abscissas (MATIATOS *et al.*, 2016; REGAZZI, 2000 *apud* VARELLA, 2008).

Utilizando-se validação cruzada das variáveis, considera-se significativa na análise de componentes principais àquelas correlações com valores de coeficientes R acima de 0,50 ( $R > 0,50$ ), sendo indicativo de forte correlação (BORGES *et al.*, 2008). Já a interpretação dos *factor loadings*, com rotação dos eixos, maximiza a associação das variáveis com cada uma das componentes. A rotação mais utilizada é denominada *Varimax normalized*, sendo esta a que mantém os eixos perpendiculares entre si e apresenta a decomposição dos valores das correlações em uma matriz de correlação (GARCIA-TAENGUA; MARTI-VARGAS, 2016).

Assim, no teste estatístico de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que mede a adequação dos dados, podem ser utilizados os termos "forte", "moderado" e "fraco" aplicado às cargas das variáveis nas componentes principais, referindo-se a valores de carga absoluta  $> 0,75$ ,  $0,75-0,5$  e  $0,5-0,3$ , respectivamente (MATIATOS *et al.*, 2016).

Os resultados dos modelos da ACP podem ser apresentados em forma de gráficos e tabelas. Na interpretação dos gráficos de dispersão (*biplots*), são considerados os seguintes princípios (VICINI, 2005): (1) uma maior, ou menor proximidade, entre dois pontos (variáveis),

no plano, traduz uma maior ou menor correlação entre essas variáveis; a correlação é ainda mais representativa quando elas são afastadas do centro do plano. Deve-se atentar que cada uma das variáveis é representada por um vetor, e que a direção e comprimento deste indicam como cada variável contribui para as componentes principais; (2) a proximidade entre dois pontos-amostra é entendida como uma certa similaridade das variáveis identificadas entre essas duas amostras. Esse passo consiste em encontrar os vetores dos indivíduos de todas as amostras, conhecidos como escores das componentes principais.

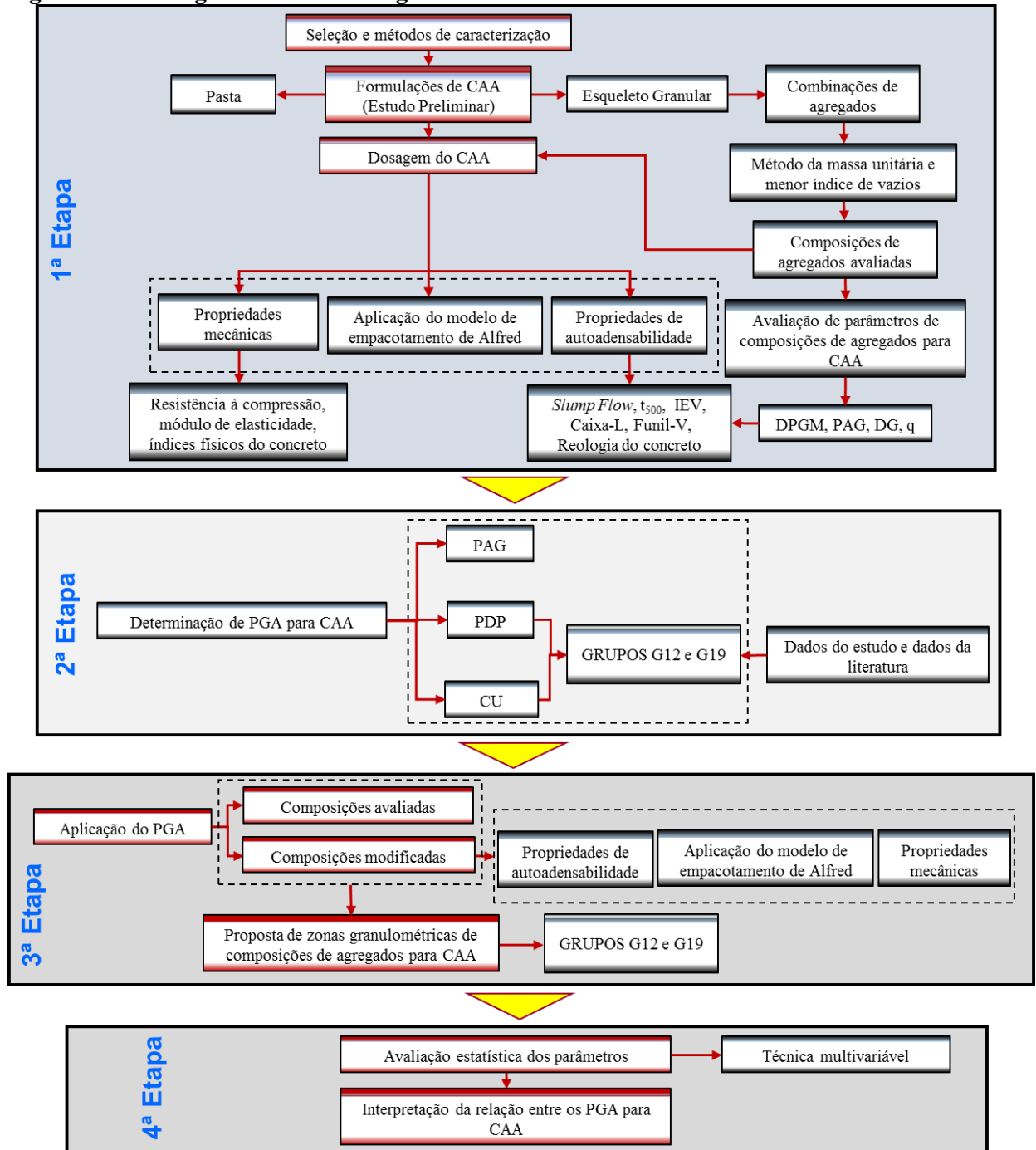
Diante do exposto, neste presente trabalho buscou-se estudar a variabilidade dos parâmetros de graduação de agregados (PGA) e das variáveis de resposta dos concretos (amostras) nas componentes principais, interpretar a concordância entre as variáveis de altas cargas (ou teores) e resumir, em poucas e relevantes dimensões, a maior parte da variabilidade da matriz de dados. Assim, pode-se obter os agrupamentos das características mais importantes nos dados dos concretos, permitindo-se extrair a informação da relação dos parâmetros mais relevantes.

Cabe salientar que o atendimento aos critérios de autoadensabilidade é fundamental para a aplicação do concreto autoadensável, o que requer o controle das distribuições granulométricas e das proporções de agregados. O programa experimental, os resultados, os comentários e as conclusões do trabalho foram tecidos e apresentados nos capítulos a seguir.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Considerando o objetivo geral do trabalho, que consiste em avaliar composições de agregados para CAA por meio do efeito de suas distribuições granulométricas, a fim de propor parâmetros de graduação de agregados (PGA) que possibilitassem otimizá-las no atendimento às propriedades de autoadensabilidade, um programa experimental-numérico foi constituído, basicamente, em quatro etapas, conforme está esquematizado na Figura 5.1.

**Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho**



Conforme exposto no fluxograma ilustrado na Figura 5.1, o programa experimental iniciou a partir da primeira etapa, que consistiu em obter CAA com materiais locais e avaliar, qualitativamente, suas composições de agregados por meio dos parâmetros de composições de agregados – DG (distribuição granulométrica), DPGM (distância de separação das predominâncias de partículas miúdas e graúdas), PAG (percentagem de agregado graúdo) e  $q$  (coeficiente de distribuição) -, aplicados nas composições de diferentes autores, visando o atendimento do CAA às propriedades de autoadensabilidade. As variáveis de resposta (dependentes) consideradas foram: diâmetro de espalhamento (SF), tempo de fluidez no funil V (VF) e habilidade passante pela caixa L (L-box) (HP). Buscou-se, então, desenvolver uma avaliação das composições com diferentes agregados e suas correspondências com os parâmetros de autoadensabilidade, ou seja, quanto ao atendimento das propriedades de autoadensabilidade, considerando os métodos empíricos de ensaios de espalhamento (*slump flow*), tempo de espalhamento no diâmetro de 500 mm ( $t_{500}$ ), índice de estabilidade visual (IEV), Caixa L e Funil V. Propriedades reológicas também foram avaliadas conjuntamente com as propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade estático) e físicas (massa específica seca, saturada e real, absorção e índice de vazios dos corpos-de-prova).

Com relação às propriedades mecânicas, os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático foram realizados em todas as misturas desenvolvidas neste trabalho, sendo verificados quanto ao atendimento às recomendações da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), que considera concretos com resistência normal entre 20 e 50 MPa. As propriedades físicas abrangeram: massa específica (seca, saturada e real), absorção e índice de vazios dos corpos-de-prova dos CAA.

Uma vez avaliados os parâmetros de composições de agregados e a influência de suas propriedades físicas nos parâmetros de autoadensabilidade e nas propriedades mecânicas, partiu-se para a análise quantitativa de DPGM, o qual passou a ser nomeado de predominância de diâmetros de partículas (PDP), juntamente com o coeficiente de uniformidade (CU). Na segunda etapa a formulação matemática abrangeu os PGA - PDP e CU -, sendo quantificados como variáveis preditoras propostas no estudo. Baseando-se na teoria de empacotamento de partículas, no tocante a proporção entre os diâmetros de partículas maiores e menores para promoção de maiores empacotamentos, buscou-se obter uma razão de predominância dos diâmetros de frações granulométricas graúdas e miúdas, considerando-se, para o concreto autoadensável, a influência da presença de partículas miúdas, a limitação da dimensão do agregado graúdo, a consideração do PAG em torno de 50 % e o maior índice de vazios, de modo

a não impedir o fluxo entre as partículas. Determinado o PDP e CU quantitativos, e avaliada a influência do PAG nas composições, os mesmos foram aplicados no estudo da terceira etapa.

Na terceira etapa, as variáveis preditoras (PGA) foram aplicadas nas composições avaliadas na primeira etapa, como também foram aplicadas na modificação de composições de agregados do CAA. Estas foram desenvolvidas com base nos resultados das composições avaliadas, sendo as que apresentaram deficiências no atendimento a algum parâmetro de autadensabilidade. Ainda, na terceira etapa foram desenvolvidas simulações numéricas de empacotamento de partícula pelo modelo de Alfred ou A&A modificado, de forma a corroborar na avaliação do empacotamento de partículas das misturas de CAA e, por conseguinte, na análise do coeficiente de distribuição ( $q$ ). Uma abordagem sobre a relação deste coeficiente com as características das curvas granulométricas de agregados foi desenvolvida. Por fim, nesta etapa foram propostas zonas granulométricas de composições de agregados com base nos resultados dos CAA que atenderam e não atenderam a autoadensabilidade. Apresentado um certo domínio das composições de agregados que atenderam aos critérios no estado fresco e obtiveram melhores desempenhos no estado endurecido, passou-se para o estudo estatístico.

Na quarta etapa, a avaliação estatística dos parâmetros foi desenvolvida utilizando-se uma técnica multivariada: Análise de Componentes Principais. Nesta etapa, foram abrangidas seis variáveis correspondentes às amostras de concretos desenvolvidas no estudo e obtidas da literatura: as variáveis preditoras PDP, CU e PAG, e as variáveis de resposta SF, VF e HP. Tal estudo estatístico consistiu em interpretar a relação entre as variáveis e identificar quais delas mostraram-se mais representativas nos resultados dos concretos autoadensáveis. Por fim, permitiu-se apresentar uma interpretação da relação entre os PGA que corroboraram para o atendimento à autoadensabilidade de concretos.

As quatro etapas desenvolvidas neste estudo foram apresentadas com mais detalhes nos itens a seguir, sendo a primeira etapa abordada neste capítulo, a segunda e terceira etapa no capítulo seis e a quarta etapa no capítulo sete.

## 5.1 Seleção e Métodos de Caracterização

### 5.1.1 Características dos materiais

Os materiais finos foram o cimento Portland CP II Z – 32, que atende às exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018), e o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como adição mineral.

As caracterizações químicas e físicas do cimento CP II Z-32 podem ser visualizadas no Quadro 5.1.

**Quadro 5.1 - Caracterização química do CP II Z-32**

Ensaio	Unidade	Cimento
<i>Químicos</i>		
CaO (Óxido de cálcio)	%	54,56
SiO <sub>2</sub> (Dióxido de silício)	%	21,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de alumínio)	%	6,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de ferro)	%	3,18
MgO (Óxido de magnésio)	%	5,22
SO <sub>3</sub> (Trióxido de enxofre)	%	3,03
<i>Físicos</i>		
Finura na peneira 0,075 mm (#200)	%	2,6
Finura na peneira 0,044 mm (#325)	%	10,3
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,01

Fonte: Grupo Elizabeth Cimentos (2018)

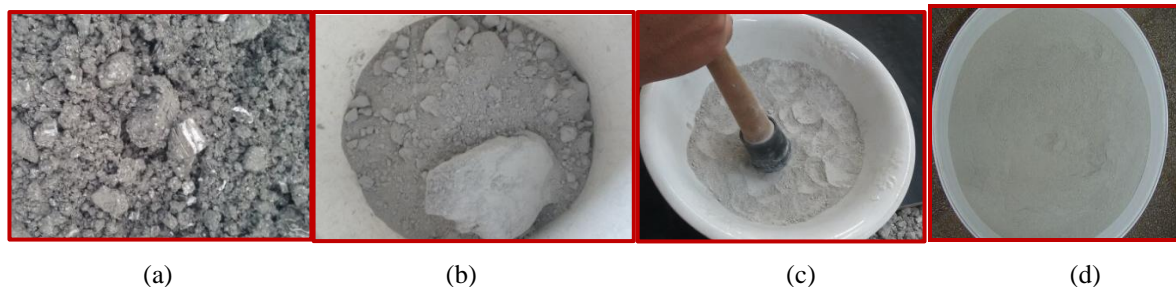
Observa-se no Quadro 5.1, que a composição química do cimento tem como constituinte principal o óxido de cálcio (CaO) e o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), com pequena concentração de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>).

Como adição mineral, foi empregado o fíler inerte conhecido como resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), sendo oriundo de tanques de decantação de uma das maiores indústrias de beneficiamento de mármore e granito do Estado de Alagoas. O RBMG foi obtido do polimento e corte de chapas de mármore e granito.

O RBMB foi um resíduo utilizado em várias pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Estruturas e Materiais/ UFAL (CAVALCANTI, 2006; LISBOA, 2004; NUNES *et al.*; 2012; MONTEIRO, 2015), sendo também utilizado no presente trabalho. O resíduo não sofreu qualquer tipo de tratamento, mas apenas submetido a secagem ao ar livre e desagregação das partículas (torrões) (Figura 5.2 a e b), para que, posteriormente, fosse colocado na estufa e, assim, pudesse ser passado na peneira de 300 µm (Figura 5.2 c, d).



**Figura 5.2 - RBMG: a) com torrões úmidos antes de posto na estufa; b) com torrões secos após a estufa; c) submetido ao apiloamento e e) após ser peneirado na peneira de abertura 300 micrômetros**

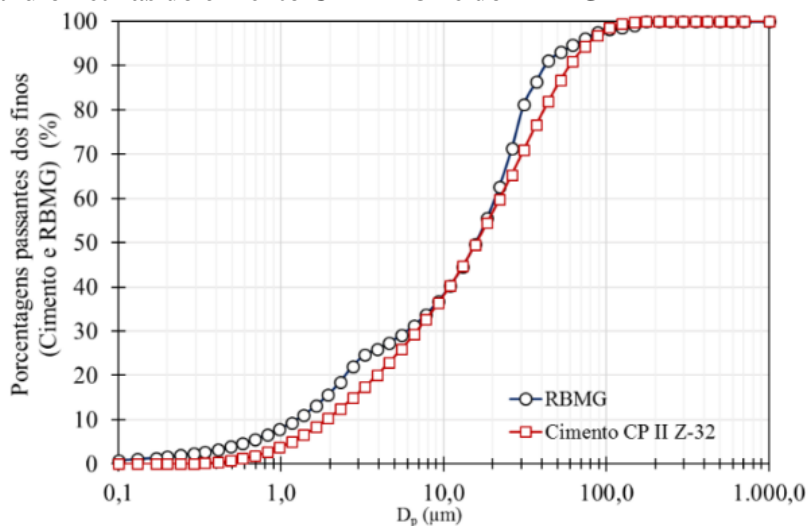


Fonte: Próprio Autor (2019)

Devidamente peneirado, o resíduo foi mantido estocado, estando pronto para ser utilizado nos concretos. Visando o uso de um material de granulometria mais fina que contribuísse para a redução do consumo de cimento, o preenchimento dos vazios da pasta de cimento e promovesse estabilidade e mobilidade ao concreto, o uso dessa adição permitiu obter uma pasta de cimento com grãos mais finos e, assim, ser enquadrado ao teor de finos ( $19,5 - 24,5 \text{ \%} / \text{ m}^3$ ) ( $< 250 \text{ mm}$ ), geralmente aplicado em CAA.

A granulometria a laser do cimento Portland CP II Z-32, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), é ilustrada na Figura 5.3, juntamente com o resíduo RBMG.

**Figura 5.3 - Granulometrias do cimento CP II Z-32 e do RBMG**



Fonte: Próprio Autor (2019)

No Quadro 5.2 está descrita a granulometria do resíduo RBMG passante na peneira de  $300\mu\text{m}$ , de massa específica igual a  $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ , pelo método do picnômetro (CAVALCANTI, 2006).

**Quadro 5.2 - Granulometria do RBMG #300  $\mu\text{m}$** 

Granulometria (Método à Laser)	(%)
( $\mu\text{m}$ )	% passante
150	99,15
100	98,06
88	97,56
63	94,78
45	91,77
32	82,97
3	24,08

Fonte: Cavalcanti (2006)

De acordo com o Quadro 5.3, verifica-se que cerca de 91,77 % do volume total da amostra apresentou dimensão máxima característica dos grãos inferior a 45  $\mu\text{m}$ . A superfície específica deste resíduo, passante pela peneira de abertura #300  $\mu\text{m}$ , obtida pelo método de Blaine, é de 208,5  $\text{m}^2/\text{kg}$ , segundo Cavalcanti (2006).

O resíduo utilizado neste estudo pode ser comparado com a análise química apresentada no Quadro 5.3, a qual contém a análise de 5 resíduos semelhantes estudados por Neves (2002) *apud* Cavalcanti (2006), oriundos de diferentes localidades da região Nordeste: R-01 (municípios de Sumé, Picuí, Serra Branca e Pocinho no estado da Paraíba), R-02 (município de Cabaceiras – PB), R-03 (municípios de Taperoá e Baraúnas no Estado da Paraíba), R-04 (município de Belo Jardim no Estado de Pernambuco), R-05 (municípios de Alcântara, Forquilha e Irauçuba no Estado do Ceará). Conforme visto, o RBMG utilizado no presente estudo, proveniente do Estado de Alagoas, foi enquadrado neste comparativo, o qual foi oriundo de jazidas dos Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Espírito Santo (CAVALCANTI, 2006).

**Quadro 5.3 - Comparativos de análise química do RBMG**

Amostra	PF (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)
RBMG	2,14	56,89	9,58	15,08	5,88	traços	1,45	1,68
R-01	4,44	59,61	5,98	11,77	4,48	traços	2,70	3,63
R-02	2,93	88,91	traços	6,40	traços	traços	0,14	0,06
R-03	2,57	60,20	6,30	13,80	6,02	traços	3,38	3,63
R-04	0,78	65,01	7,62	13,86	3,64	traços	2,38	3,63
R-05	6,10	54,75	8,38	12,90	8,40	traços	4,05	3,03

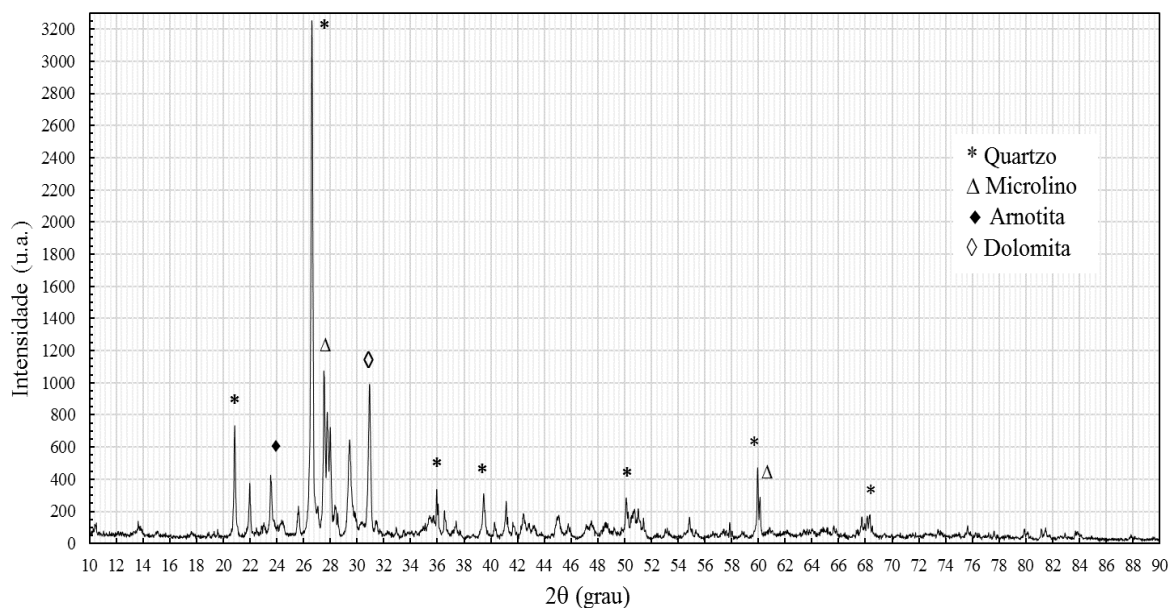
Legenda: PF - Perda ao Fogo

Fonte: Cavalcanti (2006) *apud* Neves (2002)

Conforme os resultados contidos no Quadro 5.3, a composição química do resíduo tem como constituinte predominante o dióxido de silício ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ) óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), ocupando mais de 50% da composição dos resíduos.

A caracterização mineralógica do RBMG, realizada por meio do ensaio de difração de raios X (DRX), mostra a ocorrência dos compostos químicos como quartzo, microlito, anotita e dolomita, mediante o difratograma ilustrado na Figura 5.4.

**Figura 5.4 - Difratograma de uma amostra de RBMG**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Pode-se observar que a composição mineralógica do RBMG se apresenta na forma cristalina. Tipicamente, esta característica existe em compostos com baixa atividade pozolânica.

As características do aditivo superplastificante (SP) de terceira geração, à base de policarboxilato, estão apresentadas na Quadro 5.4.

**Quadro 5.4 - Característica do aditivo químico**

Propriedades	Aditivo superplastificante (SP)
Base química	Éter policarboxílico
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5
Aparência	Líquido branco turvo
Viscosidade (cps)	< 150
pH	5 a 7
Dosagem recomendada (%)	0,2 a 1,00 s.p.c. (sobre o peso de cimento)

Fonte: Ficha técnica da BASF S/A (2016)

Como se trata de composições de agregados, a proposta desta pesquisa é empregar diferentes agregados. Portanto, é importante apresentar os agregados miúdos e graúdos britados utilizados. Estes últimos foram provenientes de rochas graníticas.

Os agregados utilizados consistiram de duas areias naturais, obtidas do Rio Paraíba e Usina Terra Nova (Cidade de Pilar), no Estado de Alagoas, e de uma areia artificial (pó de pedra), obtida de uma mineradora, também situada no Estado, de duas pedras britadas comercialmente chamadas de 0 e  $\frac{3}{4}$ ", provenientes de duas pedreiras locais. O uso desses materiais deve-se à necessidade de obter diferentes distribuições granulométricas de modo a trabalhar com diferentes combinações de agregados. Para se ter conhecimento das propriedades físicas na seleção dos agregados, os ensaios de caracterização seguiram as recomendações das normas brasileiras contidas na Quadro 5.5.

**Quadro 5.5 - Ensaios e normas utilizadas para a caracterização dos agregados**

Ensaio	Normas	
	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
D <sub>máx</sub> e MF	NBR 7211 (ABNT, 2009)	
Teor de material passante na peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	
Massa unitária	Estado solto (Método C)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Estado compactado (Método A)	
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	NBR 30 (ABNT, 2001)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2019) NBR 5564 (ABNT, 2011)	-
Substância orgânica	-	NM 49 (ABNT, 2001)
Material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	

Fonte: Próprio Autor (2019)

Além dos ensaios contidos no Quadro 5.5, algumas caracterizações, como a forma dos grãos de diferentes frações granulométricas, complementaram este estudo.

No estudo da análise granulométrica dos agregados, além das recomendações obtidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), na qual estão estabelecidas algumas peneiras da série normal e intermediária, foram utilizadas um número maior de peneiras para uma melhor distribuição granulométrica. Após o peneiramento, todo o material é dividido em frações granulométricas, demonstrando a quantidade em gramas (g) e as percentagens retidas e acumuladas, por peneira. As frações se enquadram em intervalos bem estreitos, compreendidos entre duas peneiras

consecutivas, com razão de classes de tamanhos igual  $\sqrt[4]{2}$  ( $\approx 1,189$ ). No Quadro 5.6 estão apresentadas as numerações e as aberturas de malhas das peneiras utilizadas neste estudo.

**Quadro 5.6 - Série de peneiras normais e intermediárias utilizadas na distribuição granulométrica**

Abertura das peneiras (mm)			
Agregado miúdo		Agregado graúdo	
Série normal	Série intermediária	Série normal	Série intermediária
Nº 4 - 4,75	Nº 3,5 - 5,6	Nº 3/4" - 19	Nº 5/8" - 16
Nº 8 - 2,36	Nº 5 - 4,0	Nº 3/8" - 9,5	Nº 1/2" - 12,5
Nº 16 - 1,18	Nº 6 - 3,35		Nº 7/16" - 11,2
Nº 30 - 0,6	Nº 7 - 2,8		Nº 5/16" - 8,0
Nº 50 - 0,3	Nº 10 - 2,0		Nº 1/4" - 6,3
Nº 100 - 0,15	Nº 12 - 1,7		
	Nº 14 - 1,4		
	Nº 20 - 0,85		
	Nº 25 - 0,710		
	Nº 35 - 0,50		
	Nº 40 - 0,425		
	Nº 45 - 0,355		
	Nº 70 - 0,21		
	Nº 100 - 0,15		
	Nº 140 - 0,105		
	Nº 200 - 0,075		

Fonte: Próprio Autor (2019)

Foi empregado um maior número de peneiras para que todos os grãos dos agregados fossem peneirados em intervalos mais próximos para a formação das distribuições polimodais. Assim, todas as frações granulométricas (compreendidas entre duas peneiras) puderam ser discretizadas.

Para assegurar ainda mais representatividade das amostras dos agregados graúdos, utilizou-se um separador (quarteador) tipo Jones (Figura 5.5 a e b), para fracionamento e homogeneização, o qual é composto por 10 calhas que alternadamente direcionam material para dois recipientes distintos, separando os agregados em duas partes. Os procedimentos enquadraram-se nas recomendações das NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2000).

**Figura 5.5 - Tipos de quarteador de agregados (a) graúdos e (b) miúdos**



Fonte: Próprio Autor (2019)

No separador, ou amostrador, duas amostras reduzidas podem ser obtidas, das quais uma é sucessivamente reduzida pelo mesmo método, pela amostragem por fracionamento, até chegar-se à amostra final. A amostra final obtida deve ter uma massa igual ou maior que a massa mínima representativa (CHAVES, 2012). Esse método de quarteamento é o método que foi usado, também, para determinação do tamanho da amostra necessária para os demais ensaios de caracterização dos agregados utilizados neste estudo, cujo número de quarteamentos depende do tamanho da amostra final.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos e graúdos foram elaboradas, seguindo recomendações da NBR 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009).

Para tomar conhecimento sobre a forma dos grãos dos agregados graúdos produzidos no Estado de Alagoas, foram obtidas amostras de pedras britadas de quatro pedreiras principais do Estado. Este estudo possibilitou analisar tanto o atendimento das pedreiras às prescrições normativas, quanto a realização de um estudo estatístico das amostras de pedras britadas comercializadas como  $\frac{1}{2}$ " ,  $\frac{3}{4}$ " e 1". As pedreiras foram nomeadas de A, B, C e D. Apenas esta última não comercializava a de 1".

Foi utilizado um procedimento mais preciso na execução do ensaio de determinação do índice de forma (IF) (comprimento/ espessura), que consistiu, também, na consideração das frações passantes na peneira com abertura de malha de 9,5 mm e das porcentagens retidas individuais em massa, iguais ou menores que 5%.

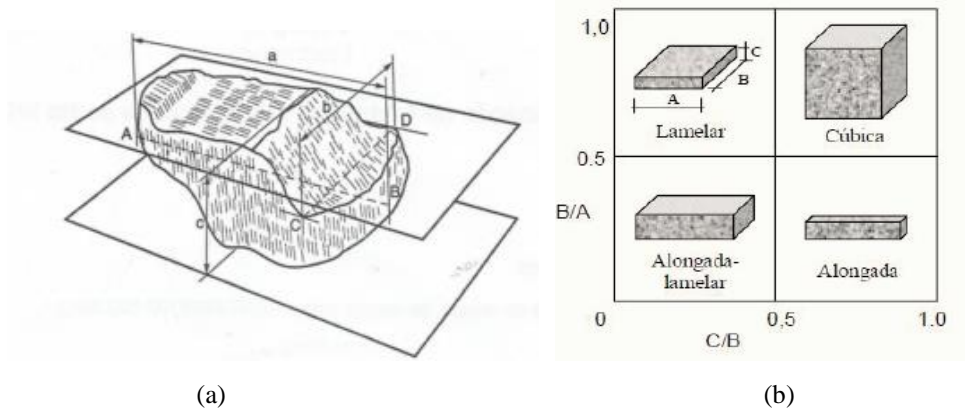
O ensaio de granulometria foi executado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após este ensaio, tornou-se possível determinar o número de grãos de cada fração retida, calculado de acordo com as porcentagens de massa dos grãos retidos em cada peneira. O número total de grãos necessários para realização do ensaio foi de 200 grãos, admitindo o cálculo prescrito na NBR 7809 (ABNT, 2019),

As medidas dos grãos foram realizadas com o método do paquímetro, sendo cada fração quarteada de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2000). Como, neste estudo, foram consideradas todas as frações para o cálculo do IF, ao invés de obter o índice de forma médio do agregado (dado pelo somatório do índice de forma de cada fração ponderado pela respectiva porcentagem de massa retida), obteve-se o índice de forma médio equivalente a cada fração retida nas peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.

Obtido o número de grãos correspondente a cada fração, foram determinadas as formas dos grãos segundo a NBR 5564 (ABNT, 2011), em seu Apêndice A, a partir das relações de comprimento ( $a$ ), largura ( $b$ ) e espessura ( $c$ ), conforme a classificação de formas de agregado, as quais foram cúbica, alongada, lamelar ou alongado-lamelar (Figura 5.6 e Quadro 5.7). Como

a forma dos grãos refere-se à sua geometria tridimensional, a Figura 5.6 (b) ilustra as quatro formas de um agregado referidas por Farias e Palmeira (2010).

**Figura 5.6 - Representação das (a) dimensões de um grão e (b) representação das formas dos grãos**



Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2011)

Fonte: Farias; Palmeira (2010)

A norma NBR 5564 (ABNT, 2011) prescreve que apenas 100 grãos sejam utilizados, mas, para tornar o ensaio de classificação de formas mais preciso, considerou-se os 200 grãos, conforme NBR 7809 (ABNT, 2019).

**Quadro 5.7 - Classificação da forma dos grãos**

RELAÇÕES (b/a) e (c/b)	CLASSIFICAÇÃO DA FORMA
$b/a \geq 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Alongada
$b/a \geq 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2011)

### 5.1.2 Formulação e produção do CAA

Na formulação do CAA foram abordadas duas fases – pasta e esqueleto granular, conforme o método proposto por Gomes (2002; 2003). Para a fase pasta, manteve-se a composição constante, com relação resíduo/cimento ( $r/c$ ) e água/cimento ( $a/c$ ) de 0,5 e teor de pasta de 40%; composição já utilizada em estudos prévios de Lisboa (2004), Cavalcanti (2006) e Monteiro *et al.* (2015). Para a definição do esqueleto granular, foram determinadas combinações de agregados e obtidas as composições por meio do método da maior massa unitária e menor índice de vazios, conforme descritos a seguir.

#### 4.1.2.1. Composição de agregados

A metodologia de composições básicas de agregados foi formulada, previamente, com base no método de Vitervo O'Reilly (1998), de maior massa unitária e menor índice de vazios, sendo este já consolidado em vários estudos como de Toralles-Carbonari (1999), Sharendahl e Petersson (2000), Su *et al.* (2001), Gomes (2002), Lisboa (2004), Cavalcanti (2006), Tutikian (2007) e Monteiro *et al.* (2015).

A metodologia de combinação de agregados inicialmente compreendeu as combinações binárias, ternárias e quaternária, conforme Monteiro *et al.* (2015) e Melo *et al.* (2018; 2019).

No estudo de maior massa unitária e menor índice de vazios foram estabelecidas diferentes composições com variações de proporções de agregados graúdo e miúdo. Preliminarmente, foram utilizadas as proporções sugeridas por Vitervo O'Reilly (DÍAZ, 1998), nesta ordem: 35:65; 40:60; 45:55; 50:50; 55:45; 60:40; 65:35.

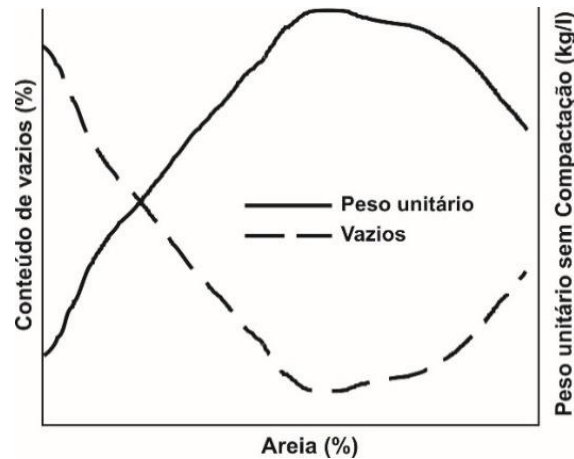
O ensaio realizado consistiu em preencher um recipiente cilíndrico de volume conhecido, com diferentes composições de agregados, a fim de alcançar a relação agregado de maior dimensão/agregado de menor dimensão, correspondente a maior densidade e o menor volume de vazios. Teve-se o cuidado de usar um cilindro com um diâmetro não inferior a dez vezes o tamanho máximo dos agregados, de modo que evitasse o efeito parede e, assim, seguindo às recomendações da literatura (GOLTERMANN *et al.*, 1997; NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2012). Neste ensaio, a massa unitária se aplica a agregados secos em estufa, até constância de massa.

Primeiramente, as proporções de agregados foram definidas para uma composição binária, considerados como % A (de maior dimensão) e % B (de menor dimensão), respectivamente. No primeiro procedimento de ensaio das composições, obteve-se o primeiro ensaio com 100 % de agregado "A", sendo realizados incrementos posteriores do agregado "B". O agregado com grãos de menor dimensão (B) foi inserido para obtenção de uma nova composição, sendo a mistura homogeneizada posteriormente. Obtida a melhor homogeneização dos agregados, procedeu-se à colocação do material seco no recipiente conhecido, sem nenhuma compactação, seguindo o método "C" da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Tratando-se de composições ternárias e/ou quaternárias, um "novo agregado", obtido de uma composição binária, é combinado com outro agregado de dimensão menor, até que, por fim, fosse obtida uma nova composição binária. Com os dados de massa unitária (peso unitário) e



índice de vazios de cada uma das composições de agregados, foram confeccionados gráficos de massa unitária (ou peso unitário) e índice de vazios, conforme apresentado na Figura 5.7.

**Figura 5.7 - Representação gráfica para determinação dos vazios da composição de agregados**



Fonte: Gomes (2002)

Três determinações para obtenção da massa unitária média, em  $\text{kg/m}^3$  foram obtidas, conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para cada composição granular, corresponderam os resultados de peso (kg), massa unitária ( $\text{kg/m}^3$ ) e massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ) dos agregados componentes, tendo-se condições de determinar os valores resultantes de massa unitária média e teor de vazios médios. O coeficiente de variação, em percentagem, foi a medida estatística utilizada para medir a variabilidade dos dados dos índices de vazios de cada composição.

As nomenclaturas das composições utilizadas para as misturas de concreto foram definidas da seguinte forma: AI (areia industrial) e d1..dn (descontinuidades nos agregados miúdos de 1 a n), D1..Dn (descontinuidades nos agregados graúdos de 1 a n): d1 (#2,36 - 1,18 mm) e d2 (#4,75 - 2,36 mm), na areia industrial; e D1 (#6,3 - 4,75 mm) e D2 (#9,5 - 6,3 mm). Como exemplo: AI d1 B12, trata-se de um concreto autoadensável com areia industrial (AI) e pedra britada de dimensão máxima ( $D_{\text{máx}}$ ) de 12,5 mm (B12), com descontinuidade (d1) na fração granulométrica 1,18 mm.

Na composição com agregados reciclados de concreto nomeou-se o agregado miúdo de ARM, o agregado graúdo de ARG, seguido do PAG de 45 %.

Uma vez definidas a pasta de cimentos e os esqueletos granulares, as produções dos CAA foram realizadas para cada formulação de composições de concretos. Um misturador de eixo inclinado (betoneira), foi utilizado com capacidade de 150 litros e rotação de tambor de 34 rpm. O procedimento desenvolvido nesta pesquisa foi o seguinte:

1. coloca-se o agregado miúdo e a pedra britada, no misturador parado, e inicia a mistura por 30 segundos;
2. adiciona-se a água de absorção e mistura por 1 minuto;
3. coloca-se a adição mineral, no misturador parado, e inicia a mistura por 30 segundos;
4. adiciona-se o cimento, com o misturador parado, e mistura por 30 segundos;
5. adiciona-se 80 % da água da mistura, e liga o misturador por 2 minutos;
6. procede-se com a parada do misturador para a limpeza por 1 minuto, com uma colher de pedreiro, removendo o material aderido nas paredes do misturador, caso seja necessário;
7. acrescenta-se o superplastificante, junto com a 20 % da água restante, por 2 minutos.

### 5.1.3 Propriedades de autoadensabilidade

Os ensaios no estado fresco realizados atenderam aos requisitos mínimos para a aceitação do CAA, estando baseados na NBR 15823: 2017 nas seguintes propriedades: fluidez (determinação do espalhamento – *slump flow test*), viscosidade plástica aparente (determinação do  $t_{500}$ ) e estabilidade visual (determinação do índice de estabilidade visual – IEV), conforme NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). Assim os métodos aplicados foram: método da caixa L, de acordo com a NBR 15823-4 (ABNT, 2017c) e o método do funil V, norma NBR 15823-5 (ABNT, 2017d).

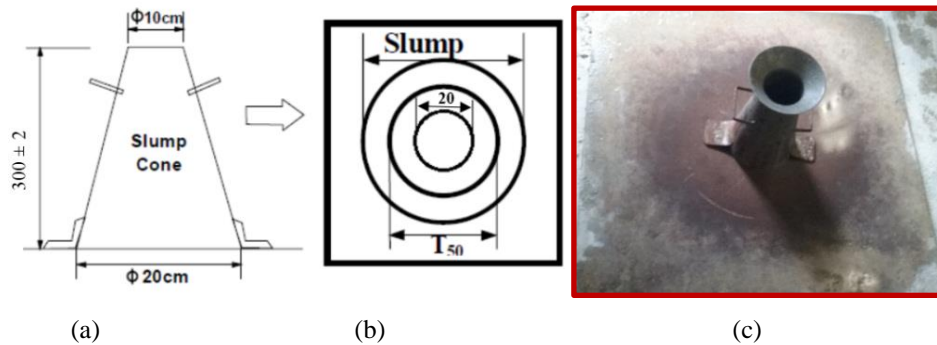
As influências das graduações de agregados foram avaliadas por meio do ensaio de espalhamento, índice de espalhamento visual, caixa-L e funil-V. Nesta avaliação dos testes de autoadensabilidade, inicialmente, utilizou-se o ensaio de espalhamento como sendo fundamental para análise dos concretos formulados, com distintas composições de agregados, visando determinar os que não apresentaram segregação, exsudação, perda de estabilidade visual, além das medidas de espalhamento final e tempo de espalhamento de 50 cm. A partir dessa constatação, aquelas composições de concreto que atenderam tais testes, foram submetidas aos demais testes de autoadensabilidade.

Para uma especificação adequada dos concretos, neste trabalho, os CAA foram caracterizados pelos quatro parâmetros de ensaios: fluidez e escoamento (teste de escoamento (SF) e índice de estabilidade visual (IEV)), viscosidade plástica aparente (pelo teste de funil-V (VF)) e habilidade passante (pela caixa L (HP)). Ensaios de reologia foram desenvolvidos na primeira fase do trabalho.

*Determinação do espalhamento – Método do Cone de Abrams*

O ensaio de espalhamento consistiu em determinar tanto a fluidez do concreto como a velocidade de escoamento definida pelo tempo  $t_{500}$ , ou seja, *slump-flow* de 500 mm, utilizando-se o cone de Abrams (Figura 5.8).

**Figura 5.8 - (a) Cone de Abrams, (b) a placa-base para a determinação de espalhamento do CAA e as marcas de referência  $t_{200}$  e  $t_{500}$  e (c) placa-base**



Fonte: Lisboa *et al.* (2005)

Fonte: Próprio Autor (2019)

As propriedades de classificação de CAA, determinadas no ensaio de espalhamento, quanto ao critério de espalhamento e quanto ao critério de viscosidade plástica aparente, estão apresentadas na Quadro 5.8 e Quadro 5.9, respectivamente.

**Quadro 5.8 - Classes de espalhamento obtidas no ensaio de *Slump flow***

Classe	Espalhamento (SF) (mm)	Aplicação/Exemplo
SF 1	550 – 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre, e estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do CAA. Ex.: lajes, estacas e certas fundações profundas.
SF 2	660 – 750	Adequadas para a maioria das aplicações correntes. Ex.: paredes, vigas, pilares e outras.
SF 3	760 – 850	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). Ex.: pilares-parede; paredes-diafragma; pilares.

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

**Quadro 5.9 - Classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$**

Classe	$t_{500}$
VS 1	$\leq 2$
VS 2	$> 2$

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

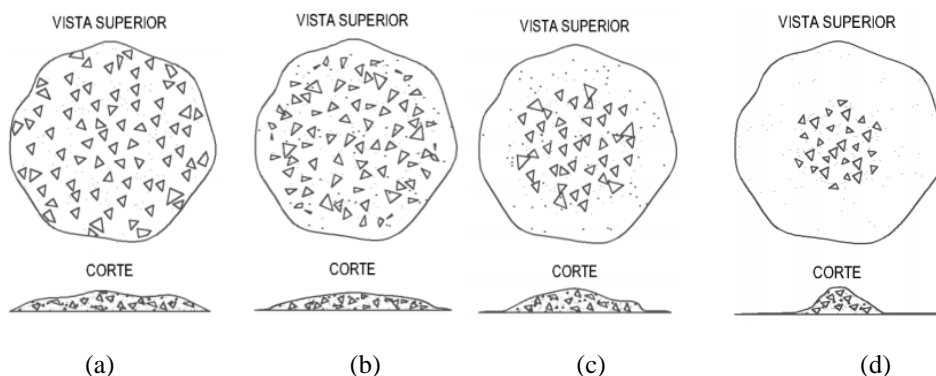
A partir da análise visual do concreto no ensaio de espalhamento, imediatamente após o término do escoamento, obteve-se o índice de estabilidade visual (IEV). Esta avaliação, apesar de subjetiva, foi executada registrando-se a distribuição dos agregados graúdos e da fração de argamassa ao longo de todo o espalhamento. Para isso, utilizou-se uma câmera fotográfica para que, a partir da visualização, estabelecesse, qualitativamente, os resultados quanto à presença ou não de exsudação e segregação, conforme os critérios contidos no Quadro 5.10 e na Figura 5.9.

**Quadro 5.10 - Classes de índice de estabilidade visual (IEV)**

Classe	Espalhamento (SF) (mm)
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa $> 10$ mm)

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017a); NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)

**Figura 5.9 - Classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$  (a) IEV 0; b) IEV 1; c) IEV 2 e d) IEV 3**



Fonte: NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)

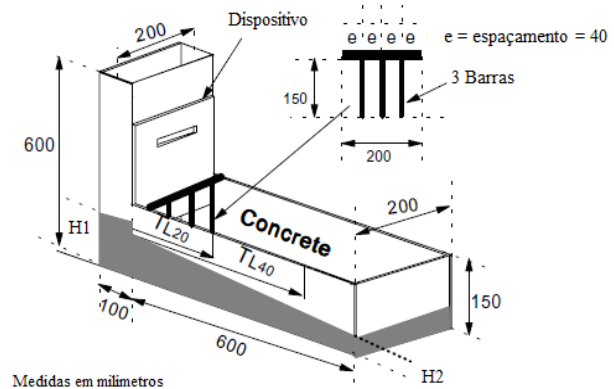
#### *Determinação da habilidade passante – Método da Caixa L (L-Box)*

O ensaio de caixa L (Figura 5.10) foi realizado com duas e três barras verticais e paralelas, as quais representam armaduras mais densas através do qual o concreto autoadensável flui do sentido vertical para o horizontal pela ação de seu próprio peso. Cada uma das barras metálicas lisas, que formavam a grade, possui diâmetro de  $12,5 \pm 0,2$  mm, espaçadas de 31 mm.

**Figura 5.10 - Caixa L**



(a)



(b)

Fonte: Gomes (2002)

Neste ensaio, optou-se por colocar o funil-V por cima da caixa-L de modo que o concreto pudesse ser vertido diretamente na câmara vertical e, assim, o restante de concreto que faltasse fosse completado.

Foram medidos os valores de  $H_1$  e  $H_2$  nas extremidades da câmara horizontal, cuja expressão que define o bloqueio da caixa L é dada pela razão  $H_2/H_1$  para o cálculo da habilidade passante (HP) (Figura 5.10b e Quadro 5.11). Os valores considerados aceitáveis para concreto autoadensável situam-se entre 0,8 e 1,0. O concreto foi, também, inspecionado visualmente para avaliar a segregação e bloqueio.

**Quadro 5.11 - Classes de habilidade passante pela caixa-L**

Classe	$H_2/H_1$
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço

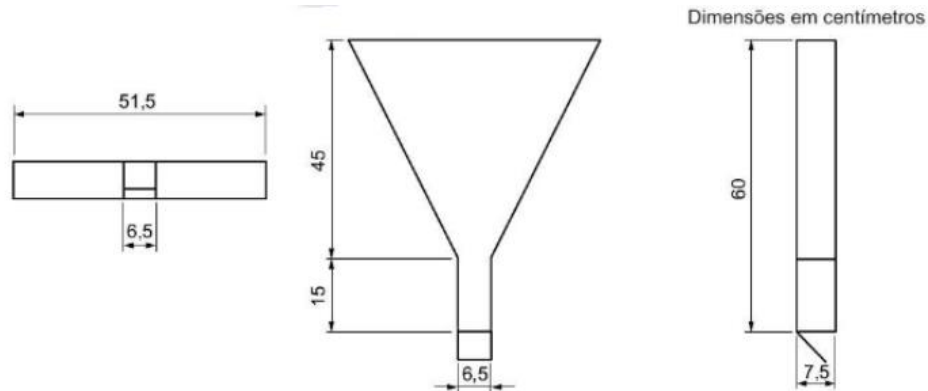
Fonte: NBR 15823-4 (ABNT, 2017c)

#### *Determinação da viscosidade – Método do Funil V (V-Funnel)*

O ensaio de funil V foi realizado conforme a norma NBR 15823 (ABNT, 2017d), que possibilitou avaliar não apenas a fluidez do CAA, a classe VF, em segundos, e a capacidade de passar através do espaço estreito, mas também a viscosidade da mistura a partir da abertura (

Figura 5.11). Foi acionado o cronômetro com a filmagem do ensaio de forma a permitir a visualização do fluxo durante o registro do tempo com o cronômetro, que foi interrompido quando apareceu uma claridade na comporta, vista do topo do funil V.

**Figura 5.11 - Funil V (a) vista em planta; (b) vista frontal e (c) vista lateral**



(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: ABNT (2017d)

Fonte: Próprio Autor (2019)

Na Quadro 5.12 constam os limites recomendados pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017) para avaliação da viscosidade plástica aparente, agora sob fluxo confinado pelo funil V.

**Quadro 5.12 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V**

Classe	VF (s)
VF 1	< 9
VF 2	9 a 25

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

Neste ensaio, é importante que a temperatura do concreto esteja enquadrada em torno das prescrições normativas, não ultrapassando 32 °C no início do lançamento, e que o concreto autoadensável seja lançado no funil em um processo contínuo, simulando o lançamento em formas (ABNT, 2017a).

#### 5.1.4 Propriedades no estado endurecido

O desempenho dos concretos no estado endurecido pode ser dividido em dois grupos: propriedades mecânicas e índices físicos. Além das propriedades mecânicas aqui descritas, a avaliação do índice de vazios, da absorção e das massas específicas do concreto são importantes para avaliação do aspecto da durabilidade do concreto, haja vista a relevância da garantia da integridade de uma estrutura.

##### *Determinação da resistência à compressão simples*

Ensaio de resistência à compressão axial ( $f_{ck}$ ) foram realizados para cada formulação de concretos, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), aos 28 dias, após a moldagem dos corpos de prova. Para isso, os corpos de prova foram untados com óleo vegetal e moldados sem qualquer meio de adensamento, além do seu próprio peso, e desmoldados após 1 dia de concretagem. Posteriormente, foram mantidos em processo de cura dentro de um tanque contendo água saturada de cal hidratada (hidróxido de cálcio). Ao todo foram selecionados dez corpos de prova cilíndricos 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo cinco para o ensaio de módulo de elasticidade tangencial e cinco para o ensaio de resistência à compressão, seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015). Estes foram retificados, preparando-se as bases de modo a promover a regularização da superfície, planicidade e perpendicularidade ao eixo longitudinal dos corpos de prova.

Neste estudo, o rompimento dos CP foi realizado na prensa AMSLER de 200 tf (Figura 5.12), na qual cada um deles foi submetido a um carregamento a uma velocidade constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, até o momento de ruptura, quando atingida uma queda de força. Após a ruptura dos corpos-de-prova, a distribuição dos agregados ao longo da altura foi avaliada, como forma de verificar a ocorrência de segregação do concreto.

**Figura 5.12 - Prensa AMSLER do LEMA/UFAL de 200 tf (a) Equipamento de registro de carga e (b) máquina de ensaio de resistência**



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor (2019)

#### *Determinação do módulo de elasticidade estático*

O módulo de elasticidade estático tangente inicial do concreto ( $E_{ci}$ ) é uma propriedade que foi estimada, ou medida, tomando-se como base os resultados dos ensaios realizados conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2017). Sendo  $E_{ci}$  determinado experimentalmente, os valores obtidos foram comparados com os valores estimados estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), em função de  $f_{ck}$ , sendo utilizados agregados graúdos de origem granítica,  $\alpha_E = 1,0$ .

Os corpos-de-prova cilíndricos, no total de cinco, com dimensões nominais de 100 x 200 mm, foram submetidos à cura úmida até a idade do ensaio (28 dias a partir da concretagem), de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). A carga de ruptura estimada foi a média das cargas de ruptura de cinco corpos-de-prova. Estes foram retificados na face superior e ensaiados úmidos. É ilustrado na Figura 5.13 o ensaio de módulo de elasticidade com o uso de extensômetros fixados em um dos corpos de prova.



**Figura 5.13 - Ensaio de módulo de elasticidade estático**

Fonte: Próprio Autor (2019)

Na análise dos resultados de  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$  foi aplicado o critério de Grubbs (teste do valor extremo), para decisão do descarte de valores espúrios, admitindo-se um nível de confiança de 95 %. Esse critério estabelece que, dentre as quantidades obtidas de medições ( $x_i$  com  $i=1..n$ ), caso o valor do teste estatístico  $Z$  for maior que o valor crítico ( $Z_c$ ) (para cada medição  $x_i$ ) obtido da relação  $|x_i - \bar{X}|/S$  (sendo  $\bar{X}$  o  $f_{ck}$  médio e  $S$  o desvio padrão), a referida medição deve ser excluída. Esta estatística testa as seguintes hipóteses:  $H_0$ :  $x_i$  é uma observação considerada valor extremo;  $H_1$ :  $x_i$  não é uma observação considerada valor extremo. Rejeita-se a hipótese  $H_0$ , se  $Z > Z_c$ .

*Determinação da absorção de água, índice de vazios por imersão e fervura e massa específica*

As determinações da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, como também da massa específica dos corpos-de-prova foram realizadas como ensaios complementares, na idade de 28 dias, conforme a norma ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005). Cinco corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Todos os resultados foram analisados conforme sugestão de Helene (1993), Quadro 5.13, para a classificação dos concretos em função da porosidade e da absorção de água:

**Quadro 5.13 - Proposta de classificação dos concretos em função da porosidade e da absorção de água**

Classificação do concreto	Porosidade ( $I_{vc}$ )	Absorção de água (A)
Concretos duráveis	< 10 %	< 4,2 %
Concretos normais	Entre 10 % e 15 %	Entre 4,2 e 6,3 %
Concretos deficientes	> 15 %	> 6,3 %

Fonte: Helene (1993 *apud* 1983)

Valores de absorção abaixo de 6,0 %, segundo Neville (2016) são considerados como bons concretos, enquadrando-se em porcentagens menores que 10 % em massa. O índice de vazios do concreto endurecido não reflete a facilidade com que a água pode ter ao penetrar no concreto, mas ao volume de poros, sendo dependente da estrutura de poros acessíveis (CORDEIRO, 2006).

No Quadro 5.14 estão apresentados os procedimentos utilizados na caracterização dos concretos produzidos nos estados fresco e endurecido.

**Quadro 5.14 - Ensaios realizados na caracterização dos concretos produzidos**

Estado	Ensaio	Norma	Idade	Amostras
Concreto fresco	Espalhamento ( <i>Slump flow</i> )	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)	-	1
	Caixa L	NBR 15823-4 (ABNT, 2017c)	-	1
	Funil V	NBR 15823-5 (ABNT, 2017d)	-	1
	Reologia do Concreto	Reômetro ICAR Plus	-	1
	Moldagem e cura dos corpos-de-prova	NBR 5738 (ABNT, 2015)	-	15
Concreto endurecido	Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	28 dias	5
	Módulo de elasticidade estático	NBR 8522 (ABNT, 2017e)	28 dias	5
	Absorção de água, índice de vazios por imersão e fervura e massa específica dos corpos-de-prova	NBR 9778 (ABNT, 2009)	28 dias	5

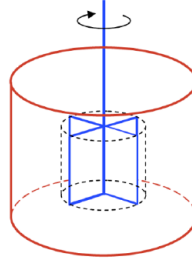
#### *Determinação das propriedades reológicas*

A determinação das propriedades reológicas – tensão cisalhante de escoamento e viscosidade plástica – de diferentes dosagens de CAA, compreendeu distintas composições de agregados, a fim de obter uma avaliação mais aprimorada das misturas produzidas na primeira etapa do estudo. Para isso, utilizou-se de o reômetro ICAR Plus para concreto, no qual comportamentos de fluxo do material puderam ser identificados e mensuradas as grandezas reológicas. Assim, tornou o ensaio experimental mais completo pela possibilidade de contar com equipamentos automatizados.

O reômetro ICAR Plus possui um *software* que é iniciado após a configuração de um vane de raio igual a 63,5 mm e altura de 127,0 mm, colocado sobre um recipiente de ensaio, cujo raio é de 143 mm. O vane é inserido verticalmente no recipiente, o qual tem sua altura ajustada, dentro da amostra do concreto, de acordo com o volume do recipiente, de forma correta para que não fique geometricamente torcido ou desnivelado. As dimensões do vane permanecerão constantes para todas as dimensões dos agregados (do tamanho máximo de 12,5 mm a 19,0 mm

de diâmetro). Estão apresentados na Figura 5.14 os componentes do Reômetro ICAR de tecnologia alemã

**Figura 5.14 - Esquema da geometria do cilindro concêntrico e o vane do reômetro ICAR**



Fonte: Germann Instruments (2017)

Para este ensaio, aplicou-se uma baixa e constante velocidade rotacional, enquanto for gerado um gráfico de torque (N.m) *versus* tempo (s), imediatamente após o vane iniciar a rotação. Depois de um período de parada inicial, uma curva de fluxo, torque (N.m) *versus* velocidade de rotação do vane (rps), foi gerada baseada em um número de pontos.

O ensaio foi concluído, manualmente, após atingir o torque máximo, o que leva menos de um minuto para ser concluído. Baseado no torque máximo e nas dimensões do vane é que o *software* calculou a tensão de escoamento, assumindo que a tensão de cisalhamento seja uniformemente distribuída. Uma vez que o torque máximo for medido, a velocidade rotacional (0,005 rps) foi interrompida. Baseado nos resultados do ensaio, foram plotadas curvas de fluxo para medir a tensão de cisalhamento e a viscosidade plástica, cujas unidades são dadas em Pascals (Pa) e Pascal-segundos (Pa.s), respectivamente.

Os parâmetros de configuração do ensaio foram: tempo de desagregação (*breakdown*): 20 segundos; velocidade de desagregação: 0,5 rps; velocidade de início do ensaio: 0,5 rps; velocidade final: 0,05 rps; número de pontos no gráfico: 7; tempo por ponto: 5 segundos.

Por meio do modelo reológico de Bingham, Equação (5.1, os parâmetros reológicos de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica serão obtidos. Este modelo, considerado no *software* ICAR Plus, estabelece, de forma mais simples, uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Com isso, o *software* converte os valores de Y e V nas propriedades fundamentais de tensão cisalhante de escoamento,  $\tau_0$  (Pa) e viscosidade plástica,  $\eta$  (Pa.s), inclinação da reta.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (5.1)$$

na qual  $\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa);  $\tau_0$  = tensão de escoamento (Pa);  $\eta$  = viscosidade plástica (Pa.s);  $\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento (1/s).

Para cada mistura de concreto, após a realização do ensaio, remove-se o vane do recipiente, sendo efetuado apenas uma leitura por ensaio.

A determinação dos resultados experimentais de reologia foi realizada apenas na fase inicial do estudo (na avaliação dos parâmetros de graduação das composições de agregados), no qual pode-se contar com a disponibilidade do equipamento.

#### 5.1.5 Avaliação dos CAA pelo método de empacotamento (MEP)

Os concretos formulados neste estudo foram avaliados segundo suas curvas granulométricas experimentais, utilizando-se o conceito de previsão do empacotamento de partículas. Para isso, aplicou-se o modelo de empacotamento (MEP) de A&A (Andreasen-Andersen) modificado, conhecido como modelo de Alfred. Neste modelo, considerou-se, também, os materiais componentes da pasta. Vale ressaltar que a escolha desse modelo de empacotamento deveu-se aos melhores resultados encontrados na literatura.

Esse estudo numérico foi feito com base nos materiais sólidos previamente selecionados, entre eles: os agregados (definidas suas proporções), o cimento e o RBMG. Inicialmente, foram formuladas dosagens de concretos com esqueletos granulares na aplicação de parâmetros de graduação de composições de agregados, sem alteração das percentagens retidas nas frações granulométricas.

Os resultados da granulometria das composições dos concretos foram representados, graficamente, em curvas cumulativas experimentais de porcentagens passantes, com ordenada em escala aritmética (CPFT, %), em função do tamanho de partícula ( $D_p$ ,  $\mu\text{m}$ ), na escala logarítmica. Estas curvas experimentais referiram-se às curvas de probabilidades acumuladas das misturas de concretos.

Para a aplicação do modelo, utilizou-se o programa *Elkem Material Mix Analyser (EMMA)* (ELKEM, 2018) e planilhas desenvolvidas no *software Microsoft Excel*, considerando-se como diâmetro mínimo o valor da menor partícula ( $D_s=0,00029$  mm), e como diâmetro máximo o valor da maior partícula ( $D_L$  igual a 12,5 mm – quando  $D_{\text{máx}}=12,5$  mm (grupo G12) – e igual a 19,0mm – quando  $D_{\text{máx}} = 19,0$  mm) da dosagem do concreto a que se

refere. Cabe ressaltar que esse programa de cálculo foi desenvolvido pela *Elkem ASA Materials*, baseado nos modelos de Andreasen e de Alfred, podendo-se o usuário selecionar um dos dois.

Foram obtidas, inicialmente, curvas do modelo predito (teóricas) do MEP para cada dosagem de concreto. De início, verificou-se a aproximação da curva experimental de cada mistura à curva teórica correspondente no EMMA, partindo-se de qualquer valor “q”, e comparados aos valores-q indicados para CAA. Estes situam-se no intervalo de  $0,21 \leq q \leq 0,28$  (ORTEGA *et al.*, 1997; CARNEIRO, 2001; VANDERLEI, 2004; CASTRO *et al.*, 2009, VOGT, 2010; CAMPOS, 2017, RHODNEY, 2017).

As formulações das composições dos concretos foram, então, determinadas com o auxílio de uma planilha eletrônica gerada pelo EMMA.

Ajustes não lineares foram determinandos para todos os concretos produzidos no presente estudo e em algumas misturas de CAA da literatura, com os quais foram obtidos valores-q de forma mais objetiva por meio de programação linear, aplicando-se a função *Solver* do Excel. Neste caso, a função objetivo “soma dos erros quadráticos” foi minimizada, tornando o erro mínimo entre o modelo estimado do MEP e a curva experimental (valores medidos). Desta forma, os parâmetros do modelo de Alfred ( $D_L$ ,  $D_S$  e  $q$ ) fixos foram obtidos. O único parâmetro variável foi o diâmetro  $D_p$ , que depende dos diâmetros das aberturas das peneiras.

Assim, fez-se a comparação de diferentes curvas granulométricas experimentais de cada composição de concreto e as curvas do modelo predito.

Vale destacar que valores de  $q < 0,21$  foram relacionados às misturas com elevada quantidade de partículas muito finas com baixas dosagens de agregados miúdos e graúdos, que distanciam da realidade de composições de concretos; já os valores de  $q > 0,28$  foram indicados para concretos com percentual de partículas grossas, que necessitam de vibração.

Obtida a soma dos erros quadráticos minimizados, um coeficiente estatístico de determinação  $R^2$  foi determinado, resultado do ajuste entre as curvas experimentais de empacotamento e a do modelo predito. Esta última, portanto, corresponde a um dado coeficiente de distribuição ( $q$ ) gerado pelo ajuste, sendo encontrado e avaliado para cada concreto autoadensável ou não. A partir do estudo do ajuste não-linear, parâmetros do modelo teórico do MEP como  $D_L$ ,  $D_S$  e  $q$ , foram ajustados a um erro mínimo.

A partir de toda a avaliação realizada nesta etapa do estudo, pode-se obter a relação entre os parâmetros PDP e  $q$ , tendo-se como fundamento as distribuições granulométricas dos agregados (contínuas e descontínuas) e os resultados dos ensaios de autoadensabilidade.

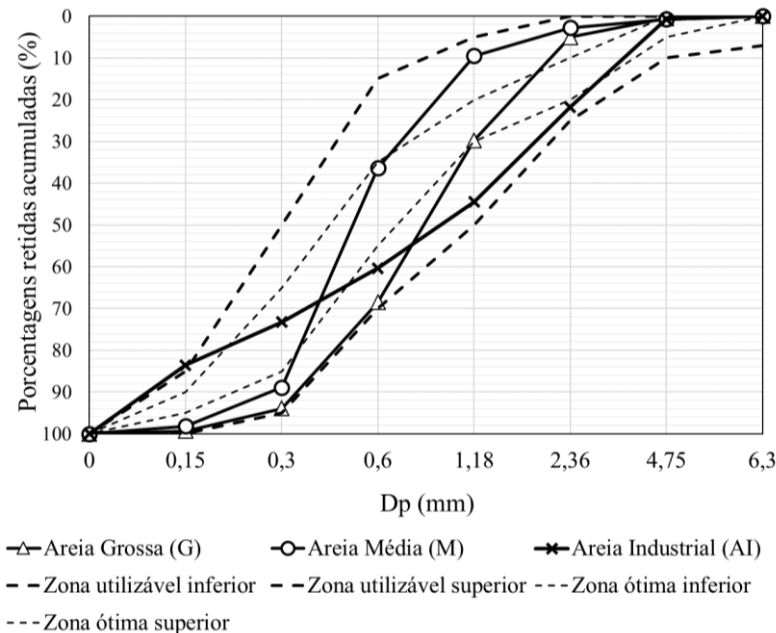
## 5.2 Análise dos Resultados Obtidos

### 5.2.1 Caracterização dos agregados

Quanto aos agregados miúdos, permite-se verificar que o agregado de granulometria média (módulo de finura entre 2,2 e 2,9), está com as frações abaixo de #0,30 mm e acima de #0,60 mm fora das zonas ótimas superior e inferior, respectivamente. A areia de granulometria um pouco mais grossa (módulo de finura entre 2,9 e 3,5), está situada mais próxima da zona utilizável limite superior, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Na areia média ocorre maior predominância de grãos de diâmetro #0,30 mm, com 56,37%. Esta areia contém 1,94 % de grãos menores que o diâmetro #0,150 mm. A areia industrial (AI) também foi utilizada, conhecida como pó de pedra britada, proveniente da britagem de rochas e com maior parte do trecho da curva granulométrica situada próxima da zona utilizável limite superior. A AI, considerada como areia grossa, possui partículas que vão de 4,75 mm a menores que 0,075 mm. As curvas granulométricas das areias consideradas como média e grossa, bem como da areia industrial (AI,) encontram-se na Figura 5.15.

**Figura 5.15 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos: areias média, grossa e industrial**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Comparando as curvas granulométricas das areias com as zonas granulométricas especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2009), nota-se que parte da curva da areia média (M)

possui intervalos fora das zonas ótimas, entretanto apresenta-se dentro da zona utilizável e está por cima da zona ótima inferior, englobando os diâmetros acima de 0,30 mm. Já a curva da areia grossa (G) apresenta-se mais enquadrada acima da zona utilizável superior, um maior intervalo fora da zona utilizável superior. Com relação à areia artificial, a mesma ficou enquadrada na zona utilizável. Observa-se que a granulometria desta areia é bastante diferente das areias naturais, contendo mais partículas finas. As características físicas desses agregados miúdos estão contidas na Tabela 5.1.

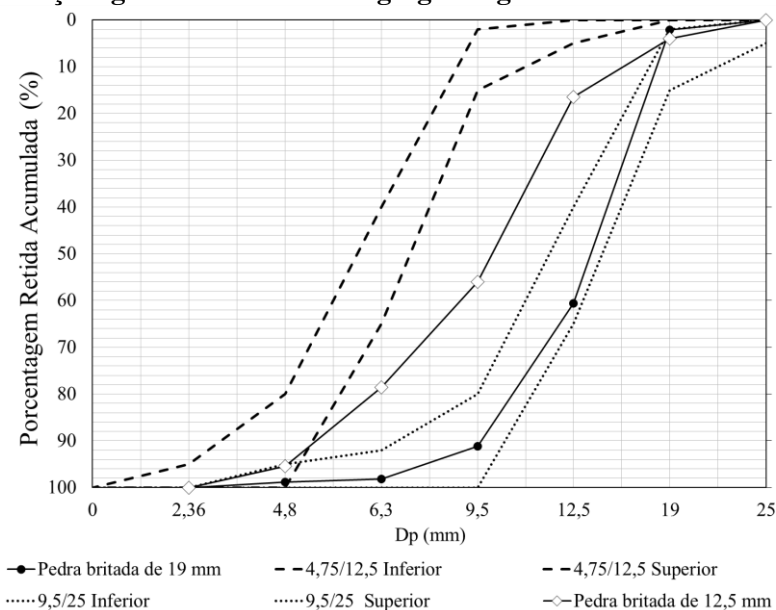
**Tabela 5.1 - Características físicas dos agregados miúdos**

Características físicas dos agregados miúdos	Resultados		
	Areia média (M)	Areia Grossa (G)	Areia artificial (AI)
Módulo de finura (mm)	2,20	2,96	2,85
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	4,8	4,75
Massa unitária no estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	1443,67	1451,0	1673
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,64	2,59
Massa específica saturada superfície seca	2,60	2,60	2,55
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,57	2,58	2,53
Absorção de água (%)	1,0	1,1	1,1
Teor de material pulverulento (%)	0,4	2,0	10,4
Impureza orgânica (ppm)	200	250	-

Fonte: Próprio Autor (2019)

As características físicas dos agregados graúdos britados estão apresentadas na Tabela 5.2, e suas distribuições granulométricas são mostradas na Figura 5.16.

**Figura 5.16 - Distribuições granulométrica dos agregados graúdos britados B12 e B19**



Fonte: Próprio Autor (2019)

É visto na Figura 5.16 que a pedra britada 12,5 mm é mais contínua que a pedra britada 19,0 mm (B19), sendo esta última praticamente situada entre as zonas granulométricas 9,5/25 inferior e superior. A distribuição da pedra britada 12,5 mm (B12), por outro lado, não se situa em nenhuma das zonas.

**Tabela 5.2 - Características físicas dos agregados graúdos britados**

Características físicas dos agregados graúdos britados	Resultados	
	Pedra britada 12,5 mm	Pedra britada 19,0 mm
Módulo de finura (mm)	6,21	5,92
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	19,0
Massa unitária no estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	1427,22	1479,11
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,61
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	2,63
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,73	2,67
Absorção de água (%)	0,86 %	0,90 %
Teor de material pulverulento (%)	2,41 %	0,85 %
Índice de forma	2,4	2,6

Fonte: Próprio Autor (2019)

Conforme literatura, as massas específicas dos agregados graúdos situaram-se no intervalo de 2,60 – 3,00 g/cm<sup>3</sup>, do grupo de rochas graníticas.

Os índices de forma dos agregados graúdos britados com D<sub>máx</sub> de 12,5 mm e 19,0mm apresentaram valores inferiores ao limite máximo recomendado pela norma NBR 7809 (ABNT, 2019), que é igual a 3,0, sendo classificados como adequados para a produção de concretos. De acordo com a NBR 5564 (ABNT, 2011), todos os agregados estudados no presente trabalho foram classificados como cúbicos, pois em todas as frações granulométricas a predominância da forma dos grãos foi cúbica.

Um panorama geral de índices de forma referentes às pedras britadas obtidas de quatro pedreiras (1", ½" e ¾"), localizadas no Estado de Alagoas, é apresentado na Tabela 5.3, de acordo com a classificação da forma dos grãos (cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar). Esta análise foi realizada a partir do estudo das pedras britada ¾", ½" e 1" de cada pedreira, com exceção da Pedreira D em que não foi considerado a pedra britada de 1". Deste modo, pode-se ter uma melhor representatividade da frequência das formas das frações granulométricas acima de 4,75 mm até 25 mm (NBR NM 248, ABNT, 2003), conforme Tabela 5.3 e Figura 5.17.



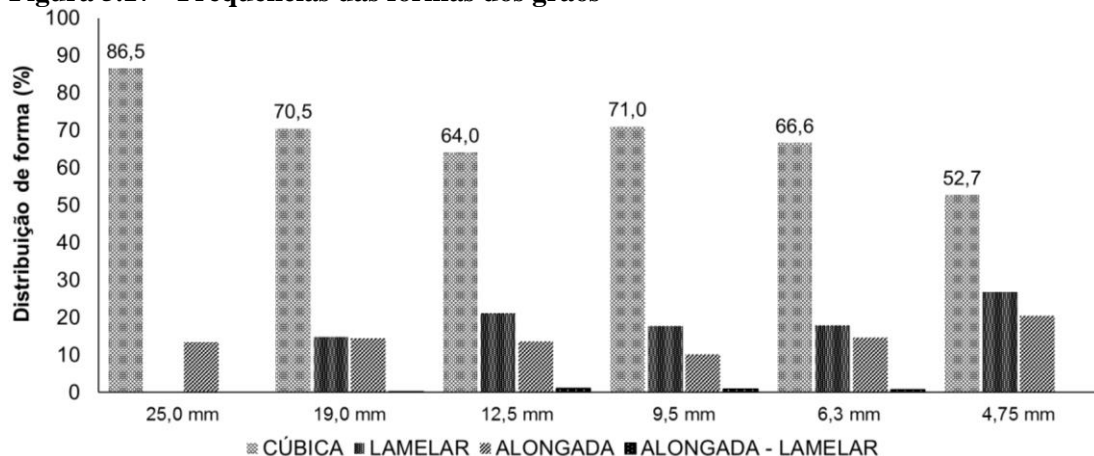
**Tabela 5.3 - Índice de forma pelo método do paquímetro**

Frações (mm)	Formas dos grãos								Total
	Cúbica		Lamelar		Alongada		Alongada – Lamelar		
	N	%	N	%	N	%	N	%	
25,0	77	86,5	0	0,0	12	13,5	0	0,0	89,0
19,0	320	70,5	67	14,8	66	14,5	1	0,2	454,0
12,5	552	64,0	182	21,1	118	13,7	10	1,2	862,0
9,5	279	71,0	70	17,8	40	10,2	4	1,0	393,0
6,3	253	66,6	68	17,9	56	14,7	3	0,8	380,0
4,75	49	52,7	25	26,9	19	20,4	0	0,0	93,0

N=n° de grãos

Fonte: Próprio Autor (2019)

Constata-se, na Figura 5.17, a predominância da forma cúbica dos grãos, sendo possível comparar as frequências relativas em cada classificação de forma.

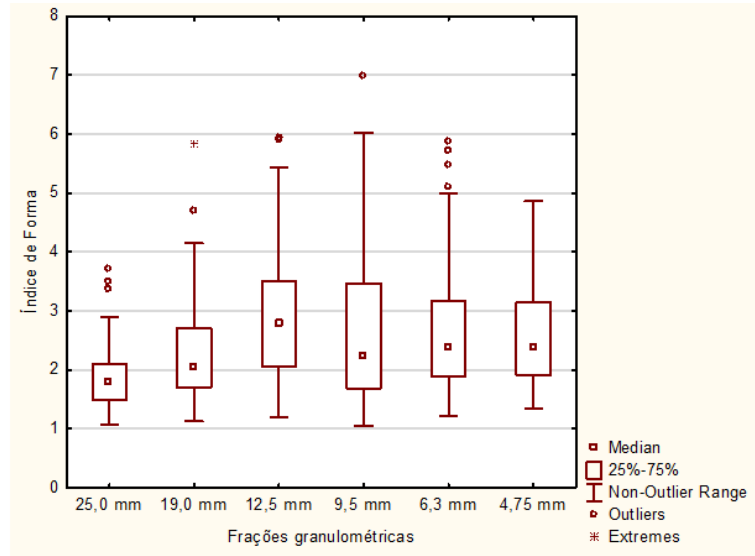
**Figura 5.17 - Frequências das formas dos grãos**

Fonte: Próprio Autor (2019)

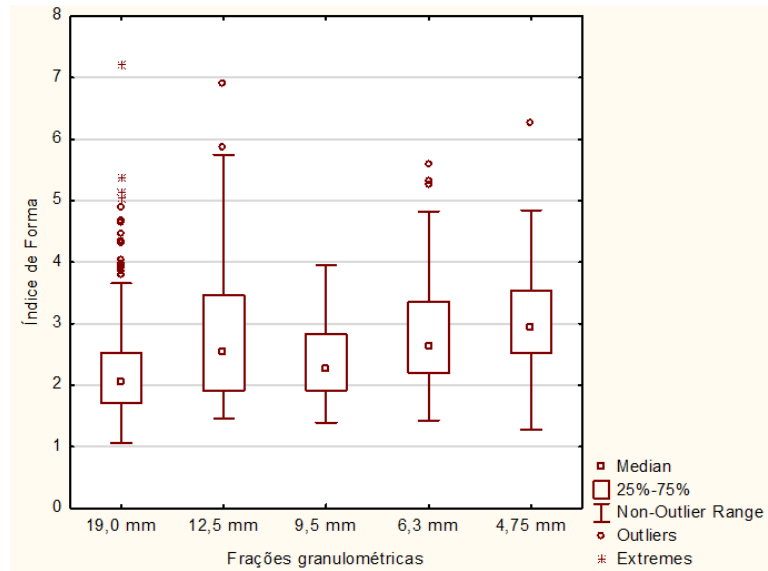
De acordo com os resultados da Figura 5.17, é notória a predominância de grãos cúbicos em todas as frações granulométricas, sendo a fração de # 25,0 mm a que obteve maior porcentagem (86,5%). Já a fração de # 4,75 mm apresentou-se com menor predominância de grãos cúbicos (52,7%). Tal resultado é satisfatório, tendo em vista que os números de grãos alongados e alongados-lamelares foram menores nas frações nestas classificações.

Analisando-se o índice de forma referente aos agregados graúdos de cada uma das pedreiras, percebeu-se na Figura 5.18 (a) A, (b) B, (c) C e (d) D, uma dispersão dos dados em cada uma das seis frações granulométricas.

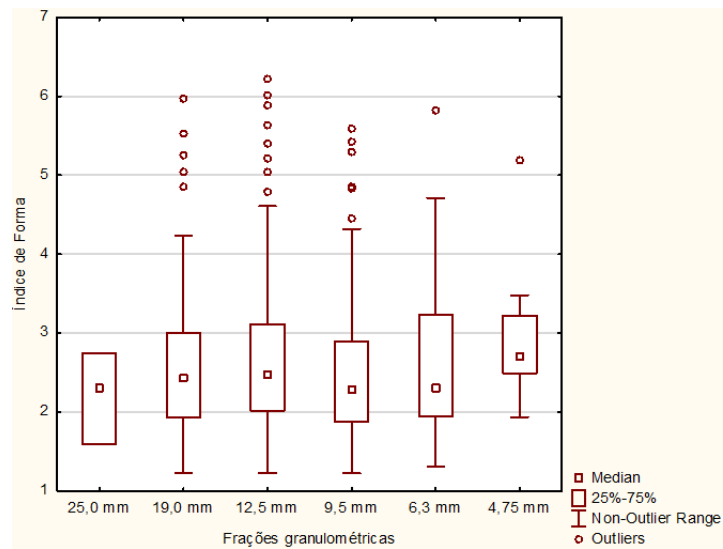
Figura 5.18 - Índices de forma dos grãos das pedras britadas obtidas das pedreiras (a) A, (b) B, (c) C e (d) D



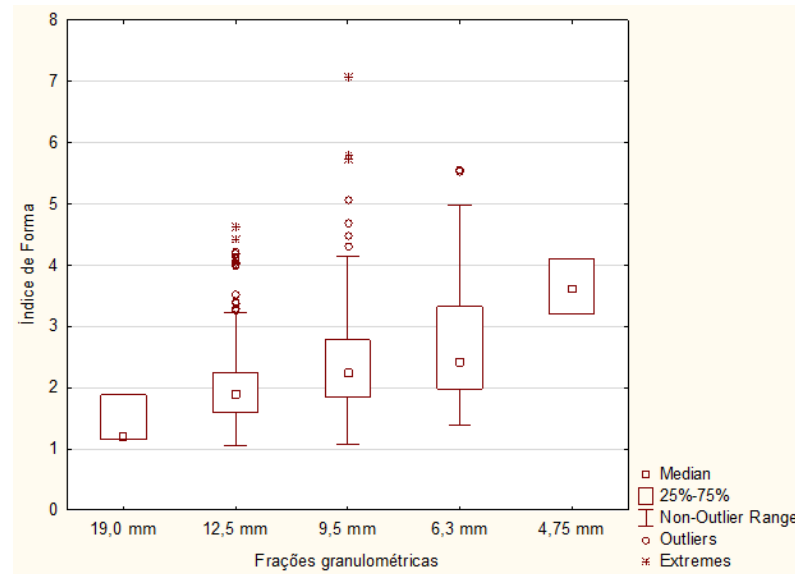
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Próprio Autor (2019)

Em geral, os diagramas de caixas indicam a variabilidade nos índices de forma de cada uma das frações granulométricas dos agregados  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " e 1". A faixa dos 50% dos valores mais típicos dos dados aproximaram-se de 3,0 apenas na pedra C.

A ocorrência de valores discrepantes foi perceptível nas quatro análises dos dados das pedreiras, entretanto, ocorreu menor variabilidade na pedra D. No geral, o índice de forma médio dos agregados obtidos situaram-se abaixo do recomendado pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009), conforme Tabela 5.4.

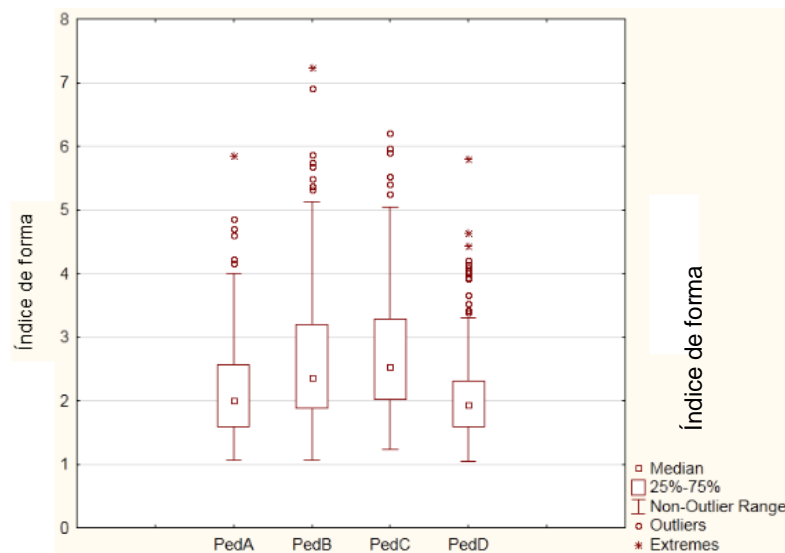
Constatou-se que os agregados disponíveis no mercado não apresentaram uma continuidade e até mesmo uma reprodutibilidade das dimensões dos grãos, devido a fatores do próprio processo de produção.

**Tabela 5.4 - Descrição estatística dos índices de forma das pedras britadas ¾", ½" e 1"**

Pedra britada	Frações (mm)	Índice de forma dos grãos							
		Pedreira A		Pedreira B		Pedreira C		Pedreira D	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1 "	25,0	1,9	0,5	-	-	2,2	0,6	-	-
	19,0	2,3	0,8	2,5	1,0	2,6	0,9	-	-
	12,5	3,5	1,1	2,9	1,2	2,9	1,0	-	-
	9,5	-	-	-	-	3,9	1,4	-	-
¾ "	19,0	2,0	0,4	2,1	0,2	-	-	1,4	0,4
	12,5	2,8	1,0	-	-	2,6	0,8	2,1	0,7
	9,5	3,9	1,5	2,5	0,7	2,7	1,0	3,5	1,1
	6,3	5,4	0,6	-	-	3,7	0,5	-	-
½"	12,5	-	-	-	-	2,1	0,6	2,0	0,7
	9,5	2,0	0,8	2,3	0,6	2,4	0,8	2,4	0,9
	6,3	2,5	0,9	2,8	0,9	2,6	0,9	2,7	1,0
	4,75	2,7	1,0	3,1	1,0	3,0	0,9	3,6	0,4

Fonte: Próprio Autor (2019)

A partir dos resultados da Tabela 5.4, observou-se que as indústrias de mineração buscam atender as exigências normativas, e que variações de granulometria e forma dos grãos são controladas nos processos de produção, conforme visto na Figura 5.19.

**Figura 5.19 - Comparativo do índice de forma dos agregados das quatro pedreiras (a) A, (b) B, (c) C e (d) D**

Fonte: Próprio Autor (2019)

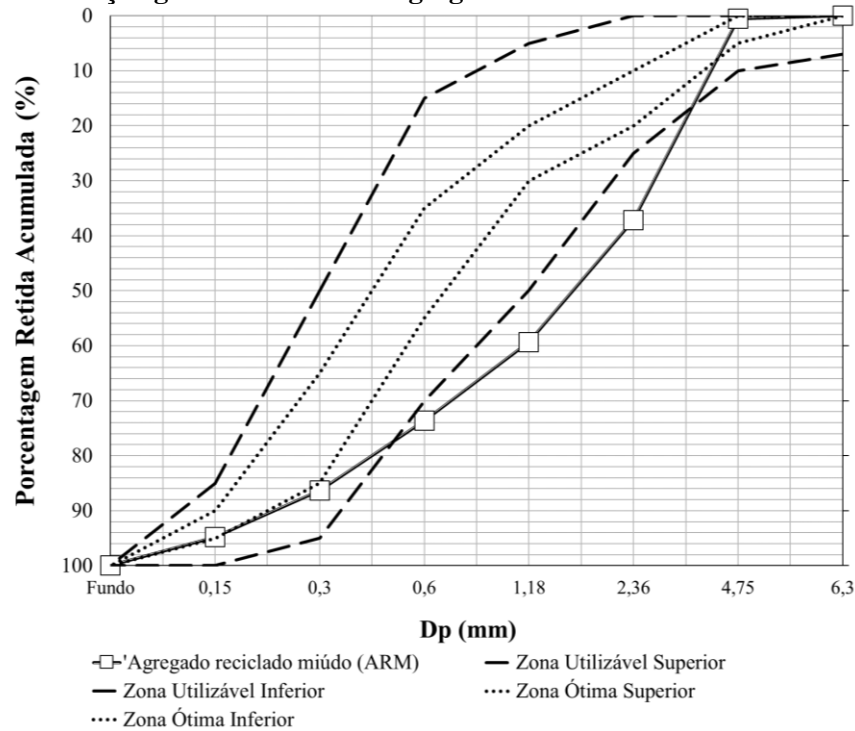
Ao analisar a predominância do índice de forma dos grãos de cada uma das frações granulométricas de cada pedreira, constata-se que a faixa dos 50% dos valores mais típicos das

distribuições que se aproximaram de 3,0 foram melhores apresentadas pela Pedreira C. Entretanto, observa-se que a maior variabilidade desta pedreira ocasionou um aumento representativo do índice de forma quando se examina a pedreira como um todo.

Ao analisar a Pedreira D, que possuiu uma menor variabilidade, sua faixa representativa dos valores de índice de forma apresentou melhores resultados, tal que a variabilidade geral também se apresentou menor. As pedras britadas de  $\frac{1}{2}$ " e  $\frac{3}{4}$ ", utilizadas neste trabalho, foram adquiridas da pedreira C.

Agregados miúdo e graúdo reciclados de corpos-de-prova de concreto também foram caracterizados. As características físicas estão apresentadas na Tabela 5.5, e suas distribuições granulométricas são mostradas nas Figura 5.20 e Figura 5.21, respectivamente.

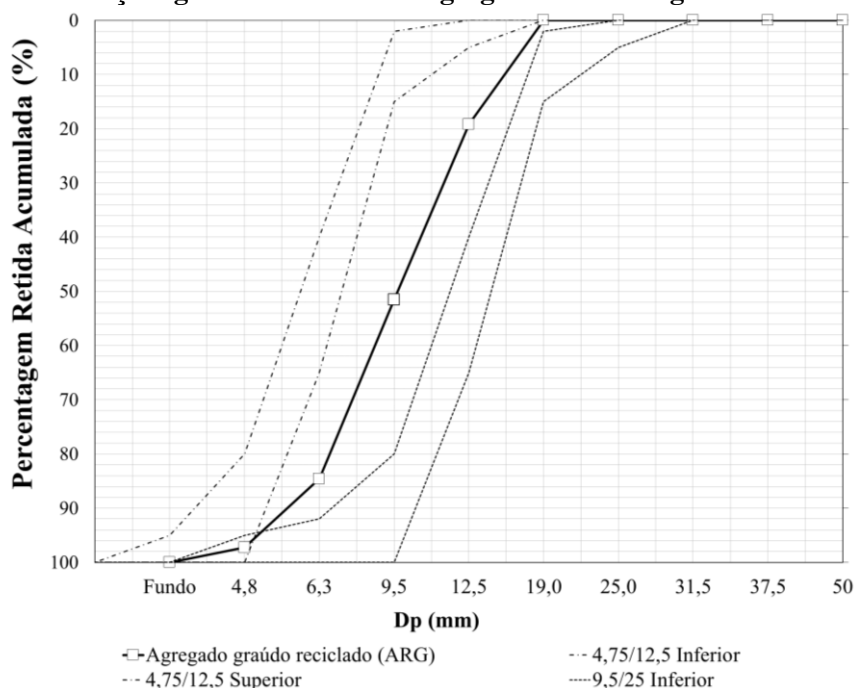
**Figura 5.20 - Distribuição granulométrica do agregado reciclado miúdo**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Percebe-se, na Figura 5.20, que o agregado miúdo reciclado possui intervalos fora das zonas ótimas acima de 0,60 mm, enquadrando-se melhor à zona utilizável superior até 0,30 mm.

**Figura 5.21 - Distribuições granulométricas do agregado reciclado graúdo**



Fonte: Próprio Autor (2019)

É mostrada na Figura 5.21 que o agregado reciclado graúdo situou-se entre as zonas granulométricas 4,75/12,5 superior e 9,5/25 inferior.

Na Tabela 5.5 estão descritas as propriedades físicas dos agregados reciclados.

**Tabela 5.5 - Propriedades físicas dos agregados miúdo e graúdo reciclados de concreto**

Características físicas dos agregados reciclados	Resultados	
	Agregado reciclado miúdo (ARM)	Agregado reciclado graúdo (ARG)
Módulo de finura (mm)	3,5	6,28
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	12,5
Massa unitária no estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	1312,5	1308,0
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,92	2,19
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,34
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,44	2,58
Absorção de água (%)	10,9	7,0
Teor de material pulverulento (%)	5,3	0,22
Impureza orgânica (ppm)	100	100

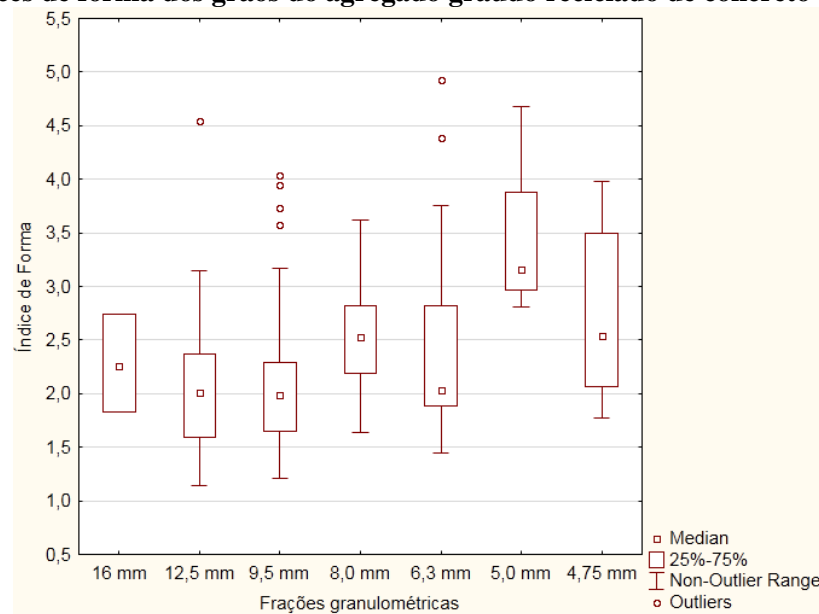
Fonte: Próprio Autor (2019)

Tanto ARM quanto ARG apresentaram massas específicas menores que a dos agregados naturais (Tabela 5.1 e Tabela 5.2). As maiores absorções desses agregados foram consideradas aceitáveis, conforme aos requisitos da NBR 15116 (ABNT, 2004), sendo 7% o limite máximo

para agregado graúdo e 12 % para o agregado miúdo. Valores dos teores de materiais pulverulentos também se mostraram aceitáveis, conforme os limites estabelecidos pela referida norma, sendo 15 % o limite máximo para agregado miúdo e 10 % para o agregado graúdo.

Para os agregados graúdos reciclados de concreto, o índice de forma, enquadrou-se na norma NBR NM 7809 (ABNT, 2019). Analisando-se por frações granulométricas, é visto na Figura 5.22, que os resultados situaram em torno de 3,0, ocorrendo uma maior dispersão dos dados nas frações #5,0 mm e # 4,75 mm, sendo os grãos menores os mais irregulares.

**Figura 5.22 - Índices de forma dos grãos do agregado graúdo reciclado de concreto**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Como citado na metodologia do trabalho, procedeu-se com a dosagem do CAA, abrangendo 16 composições de agregados que foram formuladas com os materiais caracterizados nesta primeira etapa.

### 5.2.2 Dosagem do CAA

As composições dos concretos estão apresentadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7, na qual estão ilustradas as quantidades dos materiais para 1 m<sup>3</sup> de concreto. Os concretos estão nomeados a partir das combinações dos agregados.

**Tabela 5.6 - Concretos com diferentes composições de agregados aplicadas e teor de pasta de 40 %/ m<sup>3</sup> de concreto**

Materiais (kg/m <sup>3</sup> )	Composição de agregados para CAA (kg/m <sup>3</sup> )								
	Binárias				Ternárias			Quaternária	
	CMB12	CMB19	CGB12	CGB19	CMGB12	CMGB19	CMB12B19	CGB12B19	CMGB12B19
Cimento (kg)	396,0	396,0	396,0	396,0	396,0	396,0	396,0	396,0	396,0
*f/c = 0,50	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0
a/c = 0,50	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0	198,0
SP (teor de sólido 30 %)	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94
M	794,7	707,8	-	-	437,4	390,3	634,5	-	434,5
G	-	-	718,5	709	357,9	318	-	713,2	355,5
B12	794,7	-	878,2	-	795,3	-	428,3	393,1	355,5
B19	-	865,0	-	866,4	-	865,6	523,5	478,6	434,5
Peso da mistura (kg/m <sup>3</sup> )	2403	2386	2410	2389	2404	2387	2400	2398	2393
Vag/ Vat (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,48	0,54	0,54	0,54	0,49	0,54	0,59	0,54	0,49
Vag/Vc (%/ m <sup>3</sup> )	29	32	32	33	29	32	36	32	29
Vam/ Vat (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,52	0,46	0,46	0,46	0,51	0,46	0,41	0,46	0,51
Vam/ Vc (%/ m <sup>3</sup> )	31	28	28	28	31	27	25	28	31

Legenda: \*f: fillers – Resíduo de blocos de mármore e granito (RBMG); \*f/c: relação filer/cimento; a/c: relação água/cimento; SP: Superplastificante; Vat – Volume total de agregado; Vc – Volume de concreto; Vag – Volume de agregado graúdo; Vam – Volume de agregado miúdo.

Fonte: Próprio Autor (2019)

A partir das formulações dos CAA vistos na Tabela 5.6, constata-se que as proporções dos materiais (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo) estão de acordo com parâmetros de referência (PR) para dosagem de CAA. Apenas ocorreu a exceção do CMB12B19 que apresentou Vag/Vc igual a 36 (28 – 35 %/m<sup>3</sup>), destacando-se um consumo elevado de agregado graúdo por metro cúbico de concreto. A massa de finos (cimento + RBMG), enquadrou-se nos valores indicados para CAA (entre 400 – 687 kg/m<sup>3</sup>), reduzindo o consumo de cimento em todas as misturas.

Para as composições dos concretos formuladas com agregado miúdo industrial, pedra britada D<sub>máx</sub> de 12,5 mm e agregados reciclados de concreto, utilizou-se a dosagem apresentada na Tabela 5.7, na qual estão ilustradas as quantidades dos componentes das misturas de concreto para 1 m<sup>3</sup> de concreto. Os concretos foram nomeados a partir das combinações dos agregados, identificados pelas discontinuidades.



**Tabela 5.7 - Dosagem das misturas de concreto com areia industrial (AI) e com agregados reciclados (ARC)**

Materiais (kg/m <sup>3</sup> )	Composição de agregados para CAA (kg/m <sup>3</sup> )	
	AI	ARC
Cimento (kg)	394	394
*f/c = 0,50	197	197
a/c = 0,50	197	197
Superplastificante	5,9	4,6
Areia industrial/ Agregado reciclado miúdo (kg)	798	826
Pedra britada/ agregado graúdo reciclado (kg)		
(Dmáx=12,5 mm)	798	675,8
Peso da mistura (kg/m <sup>3</sup> )	2405,4	2404,2
V <sub>ag</sub> / V <sub>at</sub> (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,49	0,44
V <sub>ag</sub> /V <sub>c</sub> (%/ m <sup>3</sup> )	29	26
V <sub>am</sub> / V <sub>at</sub> (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,51	0,56
V <sub>am</sub> / V <sub>c</sub> (%/ m <sup>3</sup> )	31	34

Fonte: Próprio Autor (2019)

As proporções dos materiais (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo) estão de acordo com parâmetros de referência (PR) para dosagem de CAA.

### 5.2.3 Propriedades de autoadensabilidade

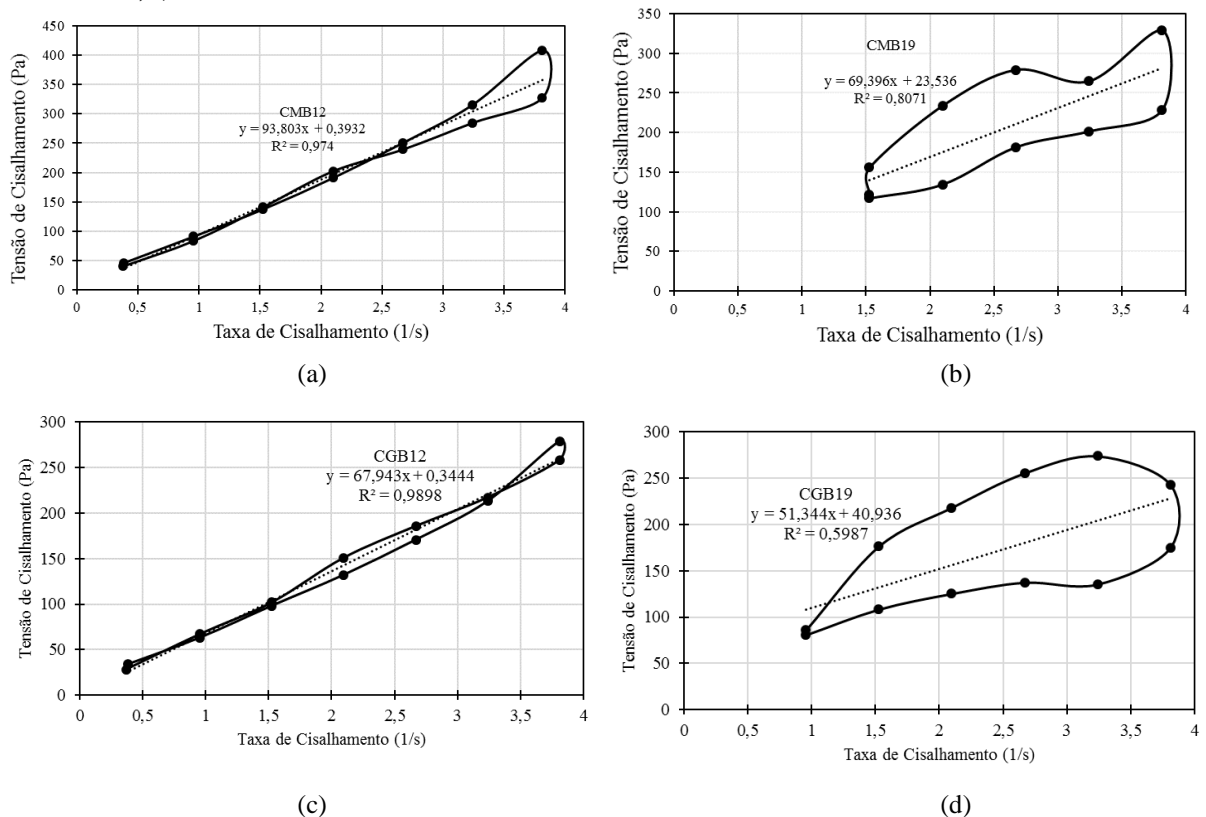
As propriedades no estado fresco, referentes aos concretos produzidos com as 16 composições formuladas (11 binárias, 4 ternárias e 1 quaternária), são apresentadas neste item, baseados nos resultados dos ensaios que avaliam a autoadensabilidade. Primeiramente, aplicou-se o estudo da reologia de nove concretos formulados no estudo base, nos quais foram utilizados diferentes agregados naturais, também com diferentes proporções de agregados e o mesmo volume de pasta (40 % / m<sup>3</sup> de concreto). Também foram produzidos cinco concretos com as composições formuladas com areia industrial e uma com agregado reciclado. Foi possível verificar o atendimento dos requisitos mínimos descritos nas classificações para os ensaios de *slump flow*, índice de estabilidade visual (IEV), t<sub>500</sub>, funil V e caixa-L dos concretos produzidos na etapa de avaliação de composições de agregados.

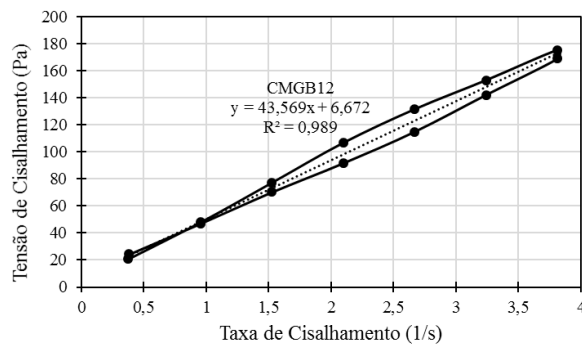
Para a caracterização do desempenho no estado fresco quanto ao aspecto reológico, foram obtidas as curvas de fluxo de nove concretos com agregados naturais produzidos no estudo base por meio do reômetro ICAR, o qual é configurado para o modelo Binghamiano. Não foi possível o estudo reológico dos concretos formulados com as cinco composições de areia industrial, devido ao desempenho nos testes de autoadensabilidade não terem se apresentado satisfatórios, além de não ter sido foco do trabalho.

O modelo Binghamiano fornece os dois parâmetros necessários para caracterizar os concretos: viscosidade plástica e tensão de escoamento. O ICAR *rheometer*, apesar de seus testes não serem padronizados, e de não serem identificadas faixas aceitáveis de tensão de escoamento e viscosidade plástica para trabalhabilidade, conforme afirma Anson-Cartwright (2011), mostrou a limitação de não encontrar parâmetros de referência para CAA, entretanto, foi possível obter informações gráficas que corresponderam às avaliações visuais de estabilidade das misturas com curvas de fluxo fechadas; as de curvas de fluxo abertas caracterizaram as misturas instáveis.

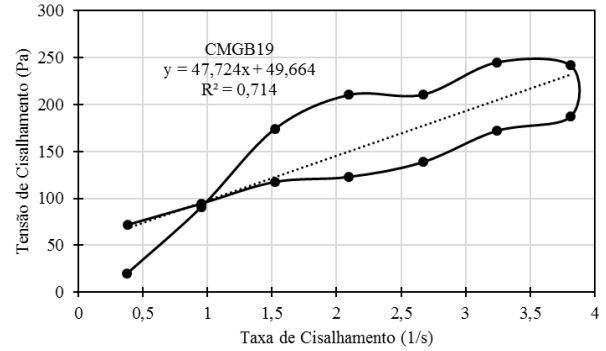
A viscosidade plástica e a tensão cisalhante de escoamento dos nove concretos produzidos com areia natural são apresentadas na Figura 5.23 e na Tabela 5.8, juntamente com os resultados dos ensaios de autoadensabilidade, considerando-se os limites apresentados na NBR 15823-1 (2017a). Os concretos produzidos com areia industrial e agregados reciclados de concreto não foram submetidos ao ensaio de reologia.

**Figura 5.23 - Tensão de cisalhamento dos concretos do estudo base com 40 % de pasta: a) CMB12, b) CMB19; c) CGB12; d) CGB19; e) CMGB12; f) CMGB19; g) CMB12B19; h) CGB12B19; i) CMGB12B19**

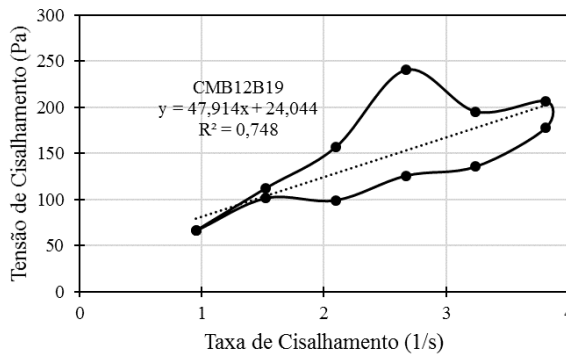




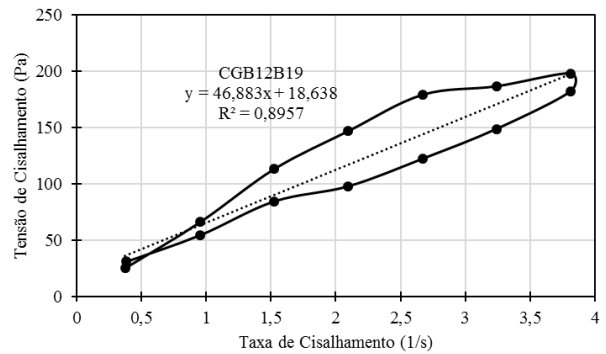
(e)



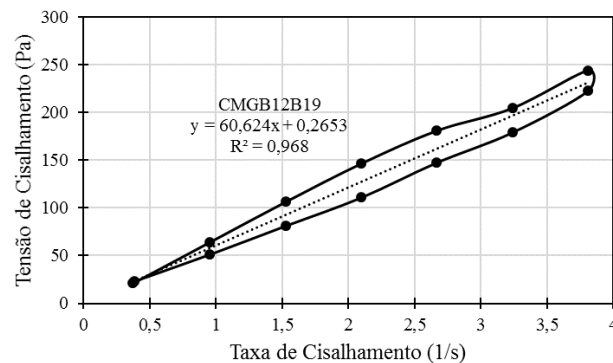
(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: Próprio Autor (2019)

No estudo de reologia dos concretos, constatou-se que o modelo de Bingham foi apropriado para descrever o comportamento reológico dos concretos. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram acima de 96,8 % para os CAA e entre 59,9 % e 89,6 % para os demais concretos (CMB19, CGB19, CMGB19, CMB12B19 e CGB12B19), para os ajustes lineares entre os valores de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.

Em geral, os concretos autoadensáveis apresentaram menores valores de tensão cisalhante de escoamento e maiores valores de viscosidade plástica quando comparados com os concretos que não apresentaram autoadensabilidade. É possível que a maior proporção de agregado

graúdo e o menor volume de agregado miúdo aumentem a tensão de escoamento e reduzam a viscosidade. Neste aspecto, Farokhzad *et al.* (2016) constataram que misturas não aceitáveis para CAA foram aquelas que resultaram em menores viscosidades, apresentando proporções de agregados com distribuição mais grossa. Conforme estes autores, as partículas muito finas (menores do que #0,6mm) contidas no CAA, promovem uma maior capacidade de preencher os vazios, contribuindo positivamente na trabalhabilidade. Estes autores ainda concluem que as propriedades de trabalhabilidade do CAA são mais influenciadas pela areia do que pela pedra britada.

Observa-se também, efeito positivo da adição mineral nas propriedades do concreto fresco, em razão da melhor coesão e fluidez promovida pelas partículas finas do fíler.

**Tabela 5.8 - Propriedades no estado fresco das misturas aplicadas**

COMPOSIÇÕES	ESPALHAMENTO			FUNIL V	CAIXA L (HP)	REOLOGIA	
	t <sub>500</sub> (s)	SF (mm)	IEV	VF (s)	H2/H1	Viscosidade plástica (Pa.s)	Tensão cisalhante de escoamento (Pa)
CMB12	3,0	745	1	9,5	A (0,92)	93,8	0,4
CGB12	2,3	763	0	10,2	A (0,94)	67,9	0,34
CMGB12	1,7	783	0	6,3	A (1,0)	43,6	6,7
CMB19	0,5	884	3	15	N (0,75)	69,4	23,5
CGB19	0,3	878	3	12,3	N (0,63)	51,3	40,9
CMGB19	0,39	925	3	23	N (0,56)	47,7	49,7
CMB12B19	1,39	883	3	3,5	N (1,0)	47,9	24,0
CGB12B19	1,65	758	1	13,4	N (0,73)	46,8	18,6
CMGB12B19	2,9	778	0	6,9	A (1,0)	60,6	0,27
CMc0.6B12	-	825	3	-	N (0)	-	-
CAIB12	5,3	749	2	-	N (0,58)	-	-
CAId1B12	3,0	723	2	-	N (0,33)	-	-
CAId2B12	5,0	662	0	-	N (0,63)	-	-
CAIB12D1	3,0	754	3	-	N (0,28)	-	-
CAIB12D2	2,0	814	3	-	N (0,47)	-	-
CARMARG12	1,1	69,0	3	25,0	N (0)	-	-

Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 5.8, observa-se que, dos nove concretos produzidos com agregados naturais, apenas quatro enquadraram-se nos quesitos normativos preconizados pelas normas NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), sem ocorrência de exsudação e segregação.

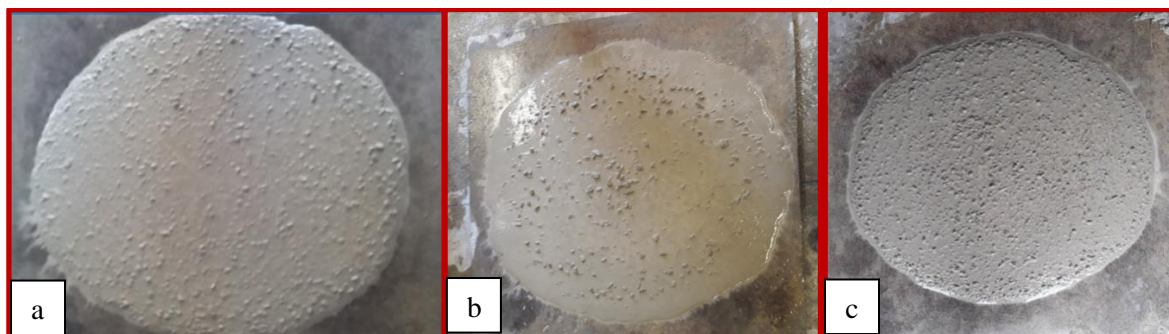
Cabe destacar algumas observações tiradas desses resultados:

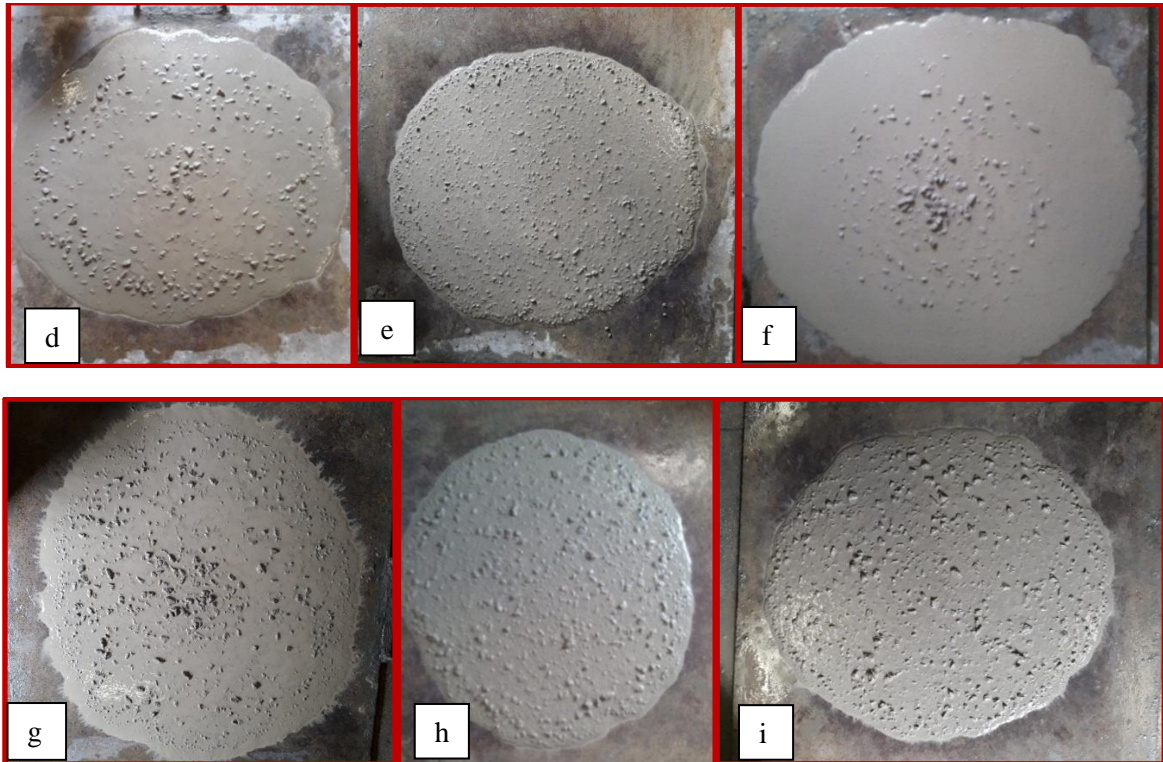
- Composições: no geral, os concretos constituídos por esqueletos granulares com proporção, em massa, de 50 % de agregado miúdo e 50 % de agregado graúdo – CMB12, CMGB12 e CMGB12B19 -, como também a composição com 45 % de agregado miúdo e 55 % de agregado graúdo – CGB12 -, apresentaram melhores resultados nos ensaios.

- Avaliação da habilidade de preenchimento: no ensaio de espalhamento dos concretos foram obtidos valores de espalhamentos com diâmetros finais entre 662 e 925 mm, os quais mostraram aspectos visuais distintos e característicos de cada esqueleto granular. Aqueles concretos que apresentaram mais estabilidade da mistura foram: CMB12, CGB12, CMGB12 e CMGB12B19 (Figura 5.24 a, c, e, h, i, respectivamente), ao contrário dos concretos CMB219, CGB19, CMGB19 e CMB12B19 (Figura 5.24 b, d, f, g, respectivamente), que se apresentaram altamente instáveis, com exsudação de água e segregação da pasta. Os experimentos mostraram que nem sempre os concretos que conseguem alcançar os limites preconizados pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) são adequados para CAA. Com estes resultados pode-se observar que, quando a porcentagem retida individual nas frações de agregado graúdo tornou-se excessiva, principalmente nas composições com maior proporção de agregado graúdo (PAG), a viscosidade e a estabilidade foram reduzidas.

Percebeu-se, também, que o fíler RBMG contribuiu positivamente nas propriedades obtidas. É válido salientar que o diâmetro das partículas influencia no consumo de pasta de cimento, conforme constatado nos experimentos. Partículas de tamanhos maiores têm a tendência de consumir menos pasta, enquanto partículas com menores dimensões tendem a consumir uma maior quantidade, conforme constatado por Mehta e Monteiro (2014) e Farokhzad *et al.* (2016). Os ensaios de espalhamento (*slump flow tests*) de distintas misturas de concreto, com 40 % de pasta, são apresentados na Figura 5.24.

**Figura 5.24 - Espalhamento dos concretos: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12, (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19 e (i) CMGB12B19**





Fonte: Próprio Autor (2019)

- Quanto às classes de espalhamentos (*slump flow test*), os CAA avaliados se enquadraram na classe SF 2 de 660 a 750 mm (CMB12); e na classe SF 3 de 760 a 850 mm (GB12, CMGB12, CGB12B19 e CMGB12B19). As misturas de distribuições descontínuas, CMB19, CGB19, CMB12B19 e CMGB19, não se enquadraram a nenhuma das classes.

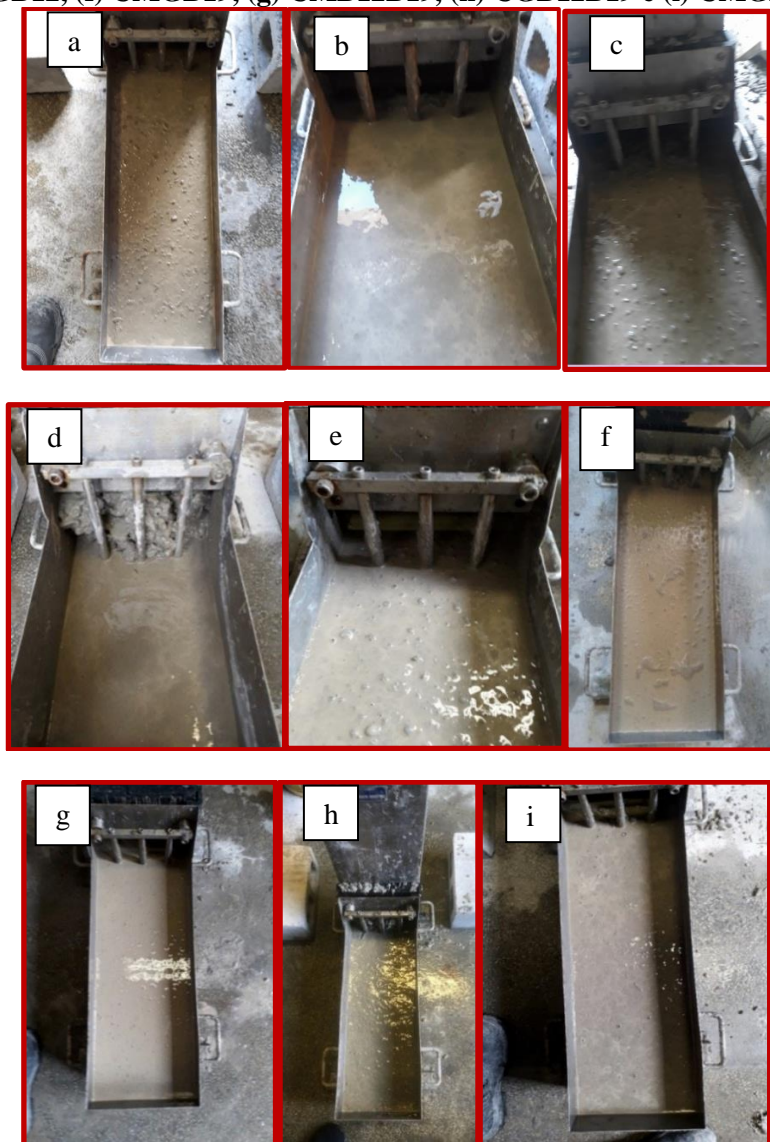
- Avaliação da viscosidade plástica aparente sob fluxo livre por meio do espalhamento também caracterizado pelo parâmetro  $t_{500}$ : dos concretos estudados, as misturas CMB12, CGB12 e CMGB12B19, apresentaram maiores  $t_{500}$  e, portanto, maiores viscosidades e maiores fluidez, pertencentes a mesma classificação, VS 2 ( $> 2$ ). Já os demais concretos (CMB19, CGB19, CMGB19, CMGB12, CGB12B19 e CMB12B19) enquadraram-se na classe VS 1 ( $\leq 2$ ), o que caracteriza baixa viscosidade. Esses resultados comprovam estarem de acordo com Billberg (1999) ao afirmar que valores muito baixos de  $t_{500}$  indicam baixa viscosidade plástica aparente e, assim, exsudação e segregação da mistura.

- Avaliação da habilidade passante pela caixa-L sob fluxo confinado: no ensaio da caixa-L foi possível constatar as três propriedades de autoadensabilidade: habilidade passante (fluidez através de obstáculos), resistência ao bloqueio e habilidade de preenchimento (sem segregação das misturas de concreto). Dos ensaios realizados, na Figura 5.25 é possível notar que nem



todas as composições atenderam aos requisitos normativos, ou seja,  $H2/H1$  maior ou igual a 0,80, passante por três barras de aço.

**Figura 5.25 - Habilidade passante dos concretos: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12, (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19 e (i) CMGB12B19**



Fonte: Próprio Autor (2019)

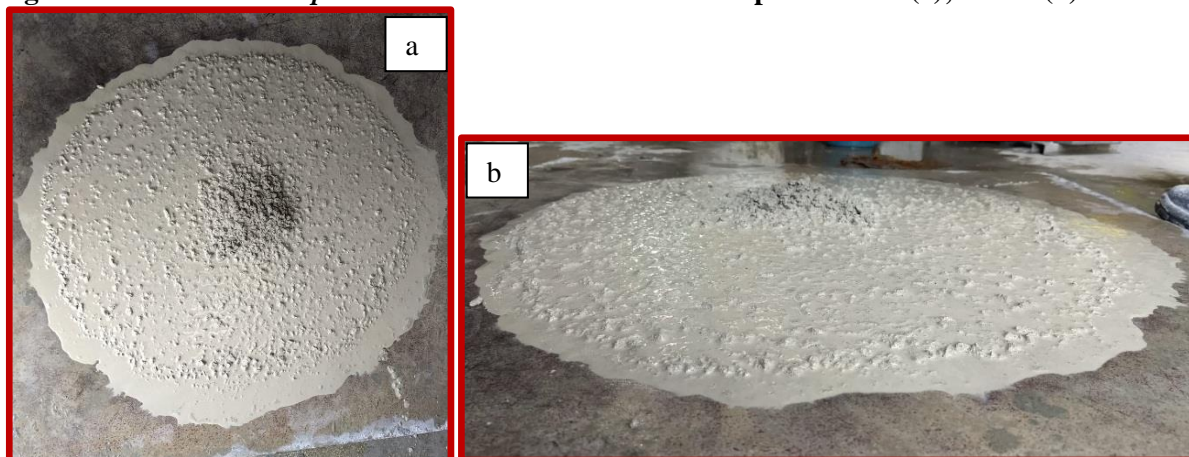
• Dos concretos estudados, com 40 % de pasta, apenas as misturas CMB12 (Figura 5.25a), CGB12 (Figura 5.25c), CMGB12 (Figura 5.25e) e CMGB12B19 (Figura 5.25 i), não apresentaram problemas de segregação, bloqueio e fluidez na caixa-L, pertencendo a classe PL 2 (0,80). Os agregados graúdos apresentaram-se distribuídos na superfície do concreto até o alcance da altura  $H2$ , considerando-os como misturas de considerável estabilidade. Neste ensaio, tanto o bloqueio quanto a estabilidade puderam ser detectados visualmente. Nos concretos CMB19 (Figura 5.25b), CGB19 (Figura 5.25d), CMGB19 (Figura 5.25f),

CGB12B19 (Figura 5.25h) houve bloqueio com excesso de pasta. Esses concretos não obtiveram habilidade de preenchimento. Normalmente, o bloqueio é constatado pelos agregados graúdos que ficam presos nas barras verticais da caixa-L, conforme afirma Billberg (1999). Apenas o concreto CMB12B19 (Figura 5.25g) apresentou razão de bloqueio maior que 0,8, sem atender ao requisito de habilidade de preenchimento devido ao excesso de pasta;

- No ensaio do funil V, sob fluxo confinado, mediante os dados constantes na Tabela 5.8, nota-se que os concretos com agregados naturais, que atenderam a autoadensabilidade, CMB12, e CGB12 enquadraram-se na classe VF 2 ( $9 < VF \leq 25$ ), com viscosidade moderada, e os concretos CMGB12 e CMGB12B19, pertenceram a classe VF 1 ( $< 9$ ).

Seguiu-se com a avaliação, retirando-se as frações granulométricas passantes na peneira #0,60 mm da composição CMB12, permitindo caracterizar a composição contínua CMc0.6B12, no estado fresco, com distribuição contínua a partir de #0,60 mm (c0.6, continuidade a partir da fração #0,60 mm) e com a mesma dosagem de CAA (Figura 5.26, Tabela 5.6). No ensaio de espalhamento, foi observada maior segregação, havendo maior separação dos agregados e da pasta e, conseqüentemente, má distribuição dos agregados, devido à baixa coesão da mistura com 40 % de pasta.

**Figura 5.26 - Ensaio *Sump Flow* do concreto CMc0.6B12: Espalhamento (a); borda (b)**



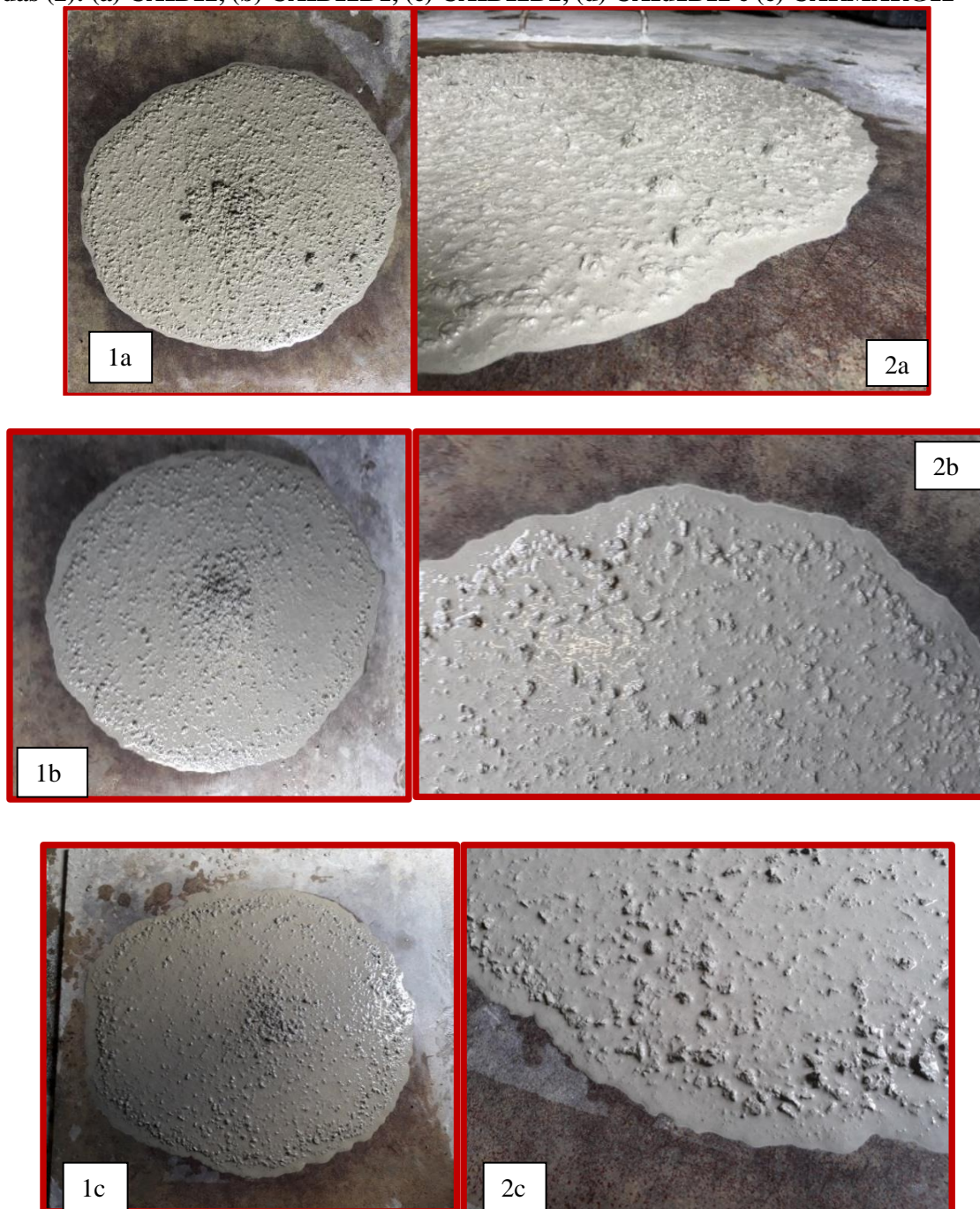
Fonte: Próprio Autor (2019)

A retirada dos finos da referida composição contribuiu para a segregação do concreto, prejudicando as propriedades no estado fresco. Comprovou-se que a proporção de agregados deve ser formulada de forma que a porcentagem de partículas finas, que compõem os agregados, esteja presente, a fim de promover a estabilidade do CAA.



Com relação as cinco misturas produzidas com areia industrial e uma mistura formulada com agregados reciclados de concreto, os aspectos visuais dos espalhamentos estão ilustrados na Figura 5.27. As composições de agregados foram formuladas a partir da originalidade dos agregados, ou seja, sem alteração de percentagens granulométricas individuais das frações.

**Figura 5.27 - Ensaio *Slump flow* das misturas de concretos com segregação no centro (1) e nas bordas (2): (a) CAIB12, (b) CAIB12D1, (c) CAIB12D2, (d) CAId1B12 e (e) CARMARG12**





Fonte: Próprio Autor (2019)

Os concretos CAIB12 (Figura 5.27a), CAIB12D1 (Figura 5.27b), CAIB12D2 (Figura 5.27c), CAId1B12 (Figura 5.27d) e CARMARG12 (Figura 5.27e) apresentaram exsudação com o excesso de pasta, mostrando a falta de uma consistência adequada da argamassa para conduzir os agregados. A formação de uma auréola no centro da placa-base e com contorno irregular, mostra que a mistura segregou e os agregados não se distribuíram de forma homogênea.

No ensaio de espalhamento, os concretos CAIB12, CAIB12D1, CAId1B12 e CARMARG12 ficaram enquadrados na classificação SF 2 (de 660 a 750 mm), por apresentarem o diâmetro médio de espalhamento de 749 mm, 754 mm e 723 mm, respectivamente. Já o concreto CAIB12D2, com 814 mm de espalhamento, foi classificado como SF 3 (de 760 a 850 mm). Ao contrário desses concretos, AI2B12 (#4,75 - 2,36 mm), foi classificado como SF1 (de 550 a 650), com diâmetro de espalhamento de 662 mm (Figura 5.28).



**Figura 5.28 - Ensaio *Slump flow* das misturas de concretos com segregação no centro (1) e nas bordas (2): mistura de concreto AId2B12**



Fonte: Próprio Autor (2019)

O concreto AId2B12 (Figura 5.27) apresentou-se com melhor distribuição dos agregados envolvidos pela pasta, não havendo segregação no espalhamento e, portanto, sem excesso de pasta, mostrando-se maior coesão da mistura em relação aos concretos apresentados na Figura 5.27.

No ensaio de caixa L, os concretos CAIB12 (Figura 5.29 a), CAIB12D1 (Figura 5.29 b), CAIB12D2 (Figura 5.29 c), CAId1B12 (Figura 5.29 d) e CARMARG12 (Figura 5.29 e) apresentaram bloqueio com 40 % de pasta, devido à maior concentração de partículas de dimensões mais grossas presente nas graduações desses agregados. É notório, nas imagens, que os concretos passaram por entre as barras e houve o encobrimento dos agregados pela pasta, entretanto, ocorreu segregação entre as três barras e o fundo da câmara vertical. Então, estas misturas não foram aprovadas neste ensaio e, portanto, não foram consideradas como CAA, pela falta de viscosidade adequada. Os resultados deste ensaio estão contidos na Figura 5.29.

**Figura 5.29 - Ensaio *L-box* das misturas de concretos: (a) CAIB12, (b) CAIB12D1, (c) AIB12D2, (d) CAId1B12 e (e) CARMARG12**





Na Figura 5.29 está destacado que os concretos não alcançaram a habilidade de preenchimento pelo fato de possuírem uma maior quantidade de frações granulométricas graúdas em relação ao agregado miúdo, fazendo com que partículas da pedra britada B12 fiquem separadas da argamassa pela restrição das três barras de aço. Portanto, mostrou-se a necessidade de formular novas composições de agregados que alcançassem uma melhor distribuição dos grãos graúdos na argamassa. Dentro dos critérios estabelecidos, apenas uma das misturas apresentou características de autoadensabilidade (Figura 5.30). Pode-se observar que todos os concretos obtiveram a relação  $H_2/H_1$  menor que 0,80, inclusive a composição descontínua AId1B12 (#2,36 - #1,18 mm), entretanto este concreto não apresentou bloqueio, isto é, obteve estabilidade satisfatória e maior viscosidade da mistura, devido a maior percentagem de partículas abaixo de #150 $\mu$ m. Tais resultados mostraram que estas misturas necessitavam de modificação das PRI de suas frações para apresentarem deformabilidade satisfatória.

**Figura 5.30 - Ensaio *L-box* da mistura de concreto CAId2B12**



Fonte: Próprio Autor (2019)

O teor de agregado graúdo e a deficiência de agregado miúdo nas misturas é comprovada nesta avaliação, mostrando-se que devem ser seguidas as recomendações dos métodos de dosagem para CAA, que discutem a respeito desta questão (GOMES, 2002; OKAMURA; OUCHI, 2003; REPETTE, 2005). A questão da influência do tipo de distribuição (contínua e descontínua), explanada na revisão bibliográfica, foi verificada nos aspectos visuais das misturas. As composições de distribuições descontínuas com agregados naturais, que mostraram ausência de frações intermediárias, apresentaram elevada segregação com a dosagem de aditivo utilizada nas misturas. Ao contrário, observou-se que a dosagem de aditivo

foi suficiente nas composições contínuas com agregado natural, de forma que promoveu o cobrimento dos grãos e o afastamento, mantendo a mobilidade dos CAA.

De maneira geral, os concretos apresentaram desempenhos favorecidos pela composição e volume de pasta utilizado, inicialmente empregado na avaliação das composições de agregados. As distintas graduações de agregados contribuíram na avaliação de como as frações dos grãos de agregados (miúdos e graúdos) afetam o desempenho no estado fresco. No tocante ao atendimento das propriedades no estado fresco, tal favorecimento deveu-se, principalmente, à predominância das frações miúdas, necessárias para a manutenção da trabalhabilidade do CAA. Nesse sentido, é relevante que se dê maior ênfase ao estudo da predominância dessas frações e de como elas se distanciam das frações graúdas.

Outro ponto a ser enfatizado com os resultados, é a questão da influência de partículas miúdas (entre #0,15mm e #4,75 mm) na fluidez dos concretos. Por exemplo, o *slump flow* (SF) do concreto produzido na composição AId2B12 foi menor (cerca de 8,44 % do SF de AId1B12). Isto fez com que ocorresse o excesso de pasta nesta última composição, com a redução da área superficial específica provocada por tal descontinuidade, resultando em IEV 2. Fato que a argamassa perdeu a instabilidade para cobrir e separar os grãos graúdos, praticamente, com mesma tendência de crescimento nas frações graúdas desde #4,75 mm até #9,5 mm. Caso de maior espalhamento (SF) e IEV 3, ocorrido na composição CAIB12D2, comprova a segregação da mistura devido ao excesso de pasta.

Diante dos resultados de granulometria dos esqueletos granulares e dos concretos produzidos e apresentados na Tabela 5.8, pela análise qualitativa do parâmetro DPGM de cada uma das 16 composições descritas anteriormente, percebeu-se que o tipo de distribuição granulométrica (C - contínua e D - descontínua), o diâmetro máximo do agregado graúdo e as proporções de agregado graúdo (PAG), não apenas afetaram o índice de vazios ( $I_v$ ), como também o parâmetro “distância de separação das predominâncias de partículas graúdas e miúdas”, DPGM. Nota-se, em geral, que as composições com PAG maiores que 50 % não atenderam as propriedades de autoadensabilidade. Praticamente, aquelas com valores maiores de DPGM e maiores PAG apresentaram instabilidade da mistura, comparado àquelas com PAG igual a 50 %, cujos DPGM foram menores. Ocorreram exceções como as composições com areia industrial, em virtude de a granulometria não ter contribuído para o melhor desempenho no estado fresco do CAA, mesmo com as descontinuidades ocorridas em: d1 (#2,36 - 1,18 mm) e d2 (#4,75 - 2,36 mm), na areia industrial; e D1 (#6,3 - 4,75 mm) e D2 (#9,5 - 6,3 mm) na pedra britada de 12,5 mm. Do mesmo modo, os agregados reciclados de concreto não se

apresentaram bem graduados, por não serem predominantes as frações granulométricas contidas nas areias naturais, que é comum encontrar uma distribuição em forma de “sino”.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o valor do  $I_v$  variou entre as composições, situando-se entre 26,4 % e 34,7 %, particularmente nas distribuições descontínuas de 26,4 % a 32,8 % e, nas distribuições contínuas de 27,9 % a 34,7 %. No geral, percebe-se que os menores  $I_v$  ocorreram em composições com maiores DPGM e, portanto, descontínuas, como foi o caso de FB19, GB19, MGB19, com maiores empacotamentos, de acordo com a literatura (DAMINELI, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2000; CHATEAU, 2012; MOOSBERG-BUSTNES (2004). As duas exceções foram as contínuas MB12B19 ( $I_v = 27,9$  %) e MGB212B219 ( $I_v = 28,9$  %), nos quais os grãos da pedra britada B12 e das duas areias (M e G) promoveram melhor preenchimento dos vazios entre os grãos da pedra britada B19. Além disso, essas composições apresentaram reduções de porcentagens retidas individuais (PRI) nas frações intermediárias #1,18 mm, #2,36 mm e #4,75 mm, o que mostrou uma curva granulométrica mais fechada nesta região. Já as contínuas, com maiores índices de vazios, apresentaram menores valores de DPGM, destacando-se uma melhor predominância das frações intermediárias, favorecidas pelas areias grossa e industrial, como também pela pedra britada B12, o que contribuiu para a formação de curvas granulométricas mais fechadas, como foram os casos de GB212 ( $I_v = 33,3\%$ ) e AIB212 ( $I_v = 34,2$  %).

As não conformidades dos concretos, vistas nos resultados dos testes tecnológicos, puderam esclarecer a necessidade de “ajuste” granulométrico dos esqueletos granulares. Percebeu-se, então, que composições de concreto com porcentagem de agregado graúdo maior que 50 % mostraram dificuldades em alcançar a fluidez desejada, além de, somado a essa questão, apresentar coeficiente de uniformidade elevado, o que é caracterizado por uma distribuição granulométrica “mal graduada”. Nestas misturas, observou-se o acúmulo de partículas mais grossas no centro do espalhamento, detectado no teste de índice de espalhamento visual (IEV) e o bloqueio no teste de caixa-L, dificultando a habilidade de passagem pelas aberturas de 31 mm.

#### 5.2.4 Propriedades no estado endurecido

A avaliação do desempenho dos concretos no estado endurecido incluiu os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias e a propriedades físicas dos concretos produzidos com agregados naturais (produzidos no estudo com CP II Z - 32), entre elas: ensaios de absorção de água por imersão (A), índice de vazios do concreto ( $I_{vc}$ ) e massa específica real ( $\rho_r$ ). Para

os concretos produzidos com areia industrial, prosseguiu-se até a determinação da resistência à compressão, por serem concretos que não atingiram a autoadensabilidade. Estas propriedades estão apresentadas na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos com as composições da 1ª etapa**

Concretos	$f_{ck}$ (MPa)		A (%)		I <sub>vc</sub> (%)		$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	
	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)
CMB12	22,82	4,87	6,2	5,35	13,7	4,93	2,55	0,44
CGB12	22,84	7,41	6,0	4,35	13,2	4,12	2,55	0,42
CMGB12	30,26	8,11	5,5	4,84	12,3	4,01	2,54	0,38
CGB19	24,04	1,67	6,1	5,09	13,8	4,03	2,60	0,42
CMB19	27,34	9,64	5,1	2,13	11,7	2,33	2,59	0,77
CMGB19	23,96	13,41	6,0	13,86	13,4	11,62	2,61	0,38
CMB12B19	20,18	11,52	5,7	4,97	13,0	4,14	2,60	0,50
CGB12B19	20,47	13,37	5,6	1,75	12,5	1,34	2,56	0,44
CMGB12B19	22,65	3,36	6,1	8,92	13,4	9,6	2,52	3,25
CMc0.6B12	25,55	12,16	6,3	1,97	14,0	2,47	2,6	1,06
CAIB12	27,38	14,22	6,0	3,85	13,1	2,64	2,50	1,11
CAId1B12	36,07	4,16	-	-	-	-	-	-
CAId2B12	37,63	4,39	-	-	-	-	-	-
CAIB12D1	25,67	7,0	-	-	-	-	-	-
CAIB12D2	36,8	7,77	-	-	-	-	-	-
CARMARG12	13,68	2,84	-	-	-	-	-	-

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Próprio Autor (2019)

Mediante análise dos dados contidos na Tabela 5.9, verifica-se que todos os concretos apresentaram resistência à compressão maior que 20 MPa aos 28 dias, enquadrando-se em concretos estruturais, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). É notório que a granulometria dos agregados, o vazio entre os grãos e o tipo de agregado influenciaram no desempenho dos concretos no estado endurecido. Ocorreu de as composições descontínuas apresentarem valores ligeiramente maiores de resistência, especialmente àquelas produzidas com areia industrial. Isso é atribuído à maior quantidade de partículas grossas utilizadas nas composições contendo areia industrial. No geral, houve alguns casos isolados com  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$  com CV de 14,0%, mesmo assim, os resultados apresentaram uma boa homogeneidade das misturas de acordo com o critério de Grubbs.



No tocante às propriedades físicas dos concretos produzidos com areia natural, o parâmetro índice de vazios do concreto ( $I_{vc}$ ) ficou na faixa de 10 a 15 %, enquadrando-se como concretos normais. Este parâmetro está relacionado com a quantidade de água absorvida pelo concreto endurecido, havendo uma tendência de aumento ou diminuição de  $I_{vc}$  com a maior ou menor absorção por imersão, respectivamente. Comparando-os aos valores de absorção (A), estes ficaram na faixa de 4,2 a 6,0 %, refletindo-se em concretos com estruturas de poros mais compactas (HELENE, 1983).

Por meio da análise da Tabela 5.9, constata-se que as massas específicas reais dos concretos apresentaram valores da ordem de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ , conforme previsto, devido a não inclusão dos poros permeáveis.

No geral, houve pequena variação dos resultados de A,  $I_{vc}$  e  $p_r$ . Os resultados experimentais mostraram uma boa homogeneidade das misturas.

Com um teor de pasta constante, observa-se que as misturas CMB12, CGB12, CMGB12 e CMGB12B19 obtiveram um maior envolvimento dos grãos, não havendo exsudação ou segregação. Por outro lado, nas misturas com menor área específica (CMB19, CMGB19, CGB19, CMB12B19 e CGB12B19), percebe-se que o volume de pasta utilizado foi excessivo, o que causou fluidez indesejável e, conseqüentemente, resultaram em resistências à compressão pouco elevadas. Tal fato mostra uma tendência de aumento da resistência à compressão em concretos contendo partículas mais finas, envolvidas por partículas mais grossas, contribuindo para o empacotamento, principalmente nas composições contendo areia industrial, em relação aos concretos dosados com agregados naturais.

Com respeito a CMc0.6B12D1, esta apresentou menor valor de resistência ( $f_{ck}=25,55 \text{ MPA}$ ), possivelmente por ter aumentando a concentração de partículas finas na fração de diâmetro 0,60 mm, devido a retirada de partículas abaixo de  $c_5$  (0,60 mm) nessa distribuição contínua, o que não foi apropriado para a trabalhabilidade do CAA. Deve-se estar atento ao fato de que a diminuição da quantidade de agregados graúdos dominantes em um volume faz surgir o fenômeno de efeito de afastamento exercido pelos grãos pequenos nos grãos grandes (DE LARRARD, 1999). Isso refletiu nos resultados de  $I_{vc}$  (14,0 %), A (6,3 %) e  $p_r$  ( $2,60 \text{ g/cm}^3$ ).

Considerando os aspectos levantados neste capítulo, pode-se constatar que o conceito de empacotamento de esqueletos granulares para CAA conduziu, exclusivamente, à questão da predominância de partículas. Tanto granulometrias contínuas quanto descontínuas resultaram em CAA, com o destaque de que as misturas dependem da garantia da melhor proporção de partículas miúdas e graúdas para conferir fluidez sem segregação. Visto que a porcentagem de agregado graúdo (PAG) menor ou igual a 50 % facilita na promoção de melhores propriedades

no estado fresco, o impacto causado pela distribuição mais contínua ou descontínuas em intervalos menores de tamanhos de partículas dependem de como as partículas mais finas e mais grossas estejam arrançadas.

Assim, para se conseguir resultados satisfatórios de CAA, foi necessário formular numericamente os PGA que auxiliassem na obtenção e otimização de composições de agregados, sendo este o objetivo principal deste estudo. Para as misturas produzidas na etapa 1, foi desenvolvido um estudo numérico de empacotamento de partículas apresentado a seguir.

#### 5.2.5 Empacotamento de partículas pelo modelo de Alfred

Os resultados do emprego do modelo numérico de empacotamento de Alfred (MEP) são apresentados neste item.

Com a obtenção da distribuição granulométrica discreta dos materiais constituintes das misturas desenvolvidas, verificou-se os desvios das curvas granulométricas correspondentes, em relação à curva teórica do MEP. Tais desvios foram admitidos resultantes da ausência de determinados tamanhos de partículas.

As curvas resultantes do MEP, referentes aos valores- $q$ , foram obtidos pela aplicação da ferramenta *solver* (contida no programa Excel®), e estão contidas no Apêndice B. O estudo consistiu em comparar os coeficientes obtidos com os indicados na literatura para CAA (ELKEM, 2017; VOGT, 2010; BROUWERS; RADIX, 2005; ORTEGA *et al*, 1997), avaliando-se a qualidade do ajuste pelo resultado do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), conforme Tabela 5.10. Nesta tabela, também estão apresentadas as variáveis obtidas no experimento, entre elas: percentagem de agregado graúdo (PAG), diâmetro de partículas graúdas e miúdas (DPGM), além do nível de atendimento dos concretos às propriedades de autoadensabilidade: alto – todos os ensaios atendidos, médio – alguns ensaios atendidos e baixo – nenhum ensaio atendido.

**Tabela 5.10 - Correlação entre  $q$  e  $R^2$  com as composições desenvolvidas na 1ª etapa**

Composições de concreto	Parâmetros			Nível de atendimento do concreto às propriedades de autoadensabilidade
	Variáveis predictoras		Variável de resposta	
	PAG (%)	DPGM	$q$ ( $R^2$ )	
Grupo 12,5 mm				
CMB12	50	m.	<b>0,265</b> (0,992)	<b>Alto</b>
CGB12	55	m.	<b>0,268</b> (0,991)	<b>Alto</b>
CMGB12	50	m.	0,236 (0,989)	<b>Alto</b>
CAIB12	50	m.	0,237 (0,991)	Médio
CAId1B12	50	m.	0,207 (0,989)	Médio
CAId2B12	50	m.	0,209 (0,991)	Médio
CAIB12D1	50	M	0,232 (0,99)	Baixo
CAIB12D2	50	M	0,233 (0,99)	Baixo
CARMARG12	45	m.	0,260 (0,984)	Baixo
CMc0.6B12	50	m.	0,231 (0,992)	Baixo
Grupo 19,0 mm				
CMB12B19	60	M	0,21 (0,981)	Médio
CGB12B19	55	m.	0,235 (0,988)	Médio
CMGB12B19	50	m.	<b>0,211</b> (0,988)	<b>Alto</b>
CMB19	55	M	0,164 (0,967)	Médio
CGB19	55	M	0,182 (0,979)	Baixo
CMGB19	55	M	0,144 (0,979)	Baixo

Fonte: Próprio Autor (2019)

Comparando-se os resultados encontrados nas 16 composições (Tabela 5.10), percebeu-se a significativa influência da granulometria dos agregados, da contribuição das partículas finas e do  $PAG \leq 50\%$  no atendimento à autoadensabilidade. Tais características favoreceram o melhor desempenho na trabalhabilidade do concreto, também observado por Díaz (1998), Okamura (1996), Gomes *et al.* (2001), Gomes *et al.* (2002), Melo (2002), Monteiro *et al.* (2015), Gomes (2002).

Todos os ensaios foram considerados importantes para identificar diferenças no desempenho dos concretos produzidos, podendo-se associar as características das misturas dos concretos com o parâmetro de empacotamento do MEP. No Apêndice B, estão representados os resultados das simulações realizadas com as composições de agregados aplicadas na 1ª etapa. Variações do esqueleto granular repercutiram maiores desvios nas frações mais grossas, principalmente em pontos de curvas de distribuições descontínuas ou devido ao próprio processo de obtenção do material.

Os concretos que apresentaram o valor- $q$  entre os indicados na literatura para CAA, foram os que se encontraram entre o intervalo  $0,20 \leq q \leq 0,28$ : CMB12, CMGB12, CGB12, CMB12B19, CGB12B19, CMGB12B19, CAIB12, CAId1B12, CAId2B12, CAIB12D1, CAIB12D2 e CMc0.6B12. Entretanto, algumas destas não foram favoráveis aos requisitos de

autoadensabilidade, como os concretos CMB12B19, CGB12B19, CAIB12, CAId1B12, CAId2B12, CAIB12D1, CAIB12D2, CARMARG12 e CMc0.6B12, o que pode estar relacionado à maior predominância de partículas grossas nestas composições, até mesmo pelo maior PAG (55 % e 60 %) observado em algumas delas (conforme Tabela 5.10), como discorre na literatura.

Analisando as composições dos concretos com areia industrial (AI), observou-se que a granulometria deste agregado miúdo, principalmente nas frações abaixo de #1,18 mm, não favoreceu a trabalhabilidade das misturas, mesmo com PAG igual a 50 % e valores de índices de vazios entre 31 e 34 %, considerados altos. Com respeito à mistura com agregados reciclados de concreto (ARM e ARG), com PAG = 45 % também apresentou com menor potencial de escoamento e estabilidade.

De fato, uma maior interação entre as partículas das diferentes frações miúdas e graúdas foi notada nos concretos com menor distância de diâmetro entre partículas miúdas e graúdas (DPGM). Esta interação é satisfatória para os CAA, pois reduz a deformabilidade do concreto no estado fresco (OKAMURA, 1997). Para as composições com mDPGM, os valores-q situaram-se entre 0,236 e 0,265, ou seja, caracterizando concretos autoadensáveis.

Analisando as composições do grupo G19, observou-se MDPGM, ou seja, maior distância de separação entre as partículas graúdas e miúdas, com curvas de concavidades abertas e com menor índice de vazios. Tal intervalo evidenciou a maior diferença de tamanho das frações, com maiores porcentagens retidas individuais (PRI) destacadas em “picos” das curvas granulométricas das composições. Neste aspecto, o valor-q mostrou a influência da presença das partículas miúdas e graúdas. Composições com partículas mais finas (CMB19, CGB19 e CMGB19) obtiveram maiores DPGM e menores valores-q. Já o aumento de partículas grossas contribuiu para uma tendência de aumento do valor-q (CMB12B19 e CGB12B19). A exceção foi da composição CMGB12B19 que obteve mDPGM e menor valor-q, tendo em vista a presença de duas areias naturais média (M) e grossa (G), como também do PAG 50 % (favorável à autoadensabilidade). Neste caso, a redução de PRI nas frações graúdas (#9,5mm e #12,5 mm) eliminou o problema de segregação com o acúmulo de partículas grossas no centro da mistura, visto nas demais composições do grupo G19.

Com o estudo das composições aplicadas ficou comprovado que os diferentes agregados miúdos naturais utilizados apresentaram distribuições granulométricas aproximadas comparando-os ao agregado miúdo industrial (AI) e agregados reciclados de concreto miúdo (ARM) e graúdo (ARG), o que necessitou de uma redistribuição da granulometria destes últimos para um melhor aproveitamento deste material.

A granulometria das pedras britadas, por apresentarem distribuições granulométricas não reprodutíveis, influenciaram nos resultados dos coeficientes de distribuição. As pedras britadas com diâmetro máximo de 19,0 mm apresentaram granulometrias uniformes, nas quais foi percebido um *gap-graded* maior, comparado às pedras britadas com  $D_{\text{máx}}$  de 12,5 mm, o que tende a promover maior segregação, confirmando afirmações da literatura (UMA *et al.*, 2017; FAROKHZAD *et al.*, 2016; GOMES; BARROS, 2009; MELO, 2005). Variações granulométricas dos agregados industriais é inevitável, principalmente por se tratarem de materiais oriundos de processos de britagens, pois tem-se a questão do controle do processo de peneiramento que, periodicamente, é submetido a ajustes de aberturas de peneiras sob o ponto de vista econômico.

A continuidade e descontinuidade das composições de agregados não apresentaram grandes diferenças do ponto de vista do valor- $q$ . Pode-se verificar, também, que o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), quando em substituição parcial do cimento Portland, contribuiu para que os concretos obtivessem melhor viscosidade e chegou a colaborar na avaliação da estabilidade das misturas de concreto no estado fresco. Tal resultado mostrou que a granulometria da adição mineral foi imprescindível por promover o efeito *fíler* e contribuir para o melhor desempenho dos concretos.

### 5.3 Avaliação Qualitativa dos Parâmetros de Composições de Agregados para CAA

Tendo em vista os objetivos propostos neste trabalho, uma avaliação de parâmetros de composições de agregados também foi abordada nesta primeira etapa do programa experimental, tomando-se como base os resultados do método da maior massa unitária e menor índice de vazios, empacotamento de partículas pelo modelo de Alfred e propriedades de autoadensabilidade. Tal avaliação resultou na publicação de um artigo em periódico por Melo *et al.* (2019), o qual encontra-se no Apêndice D.

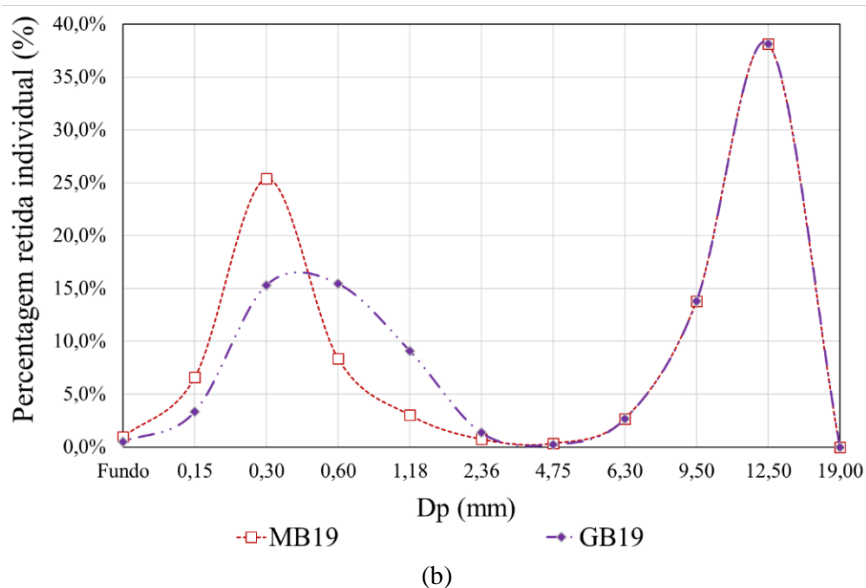
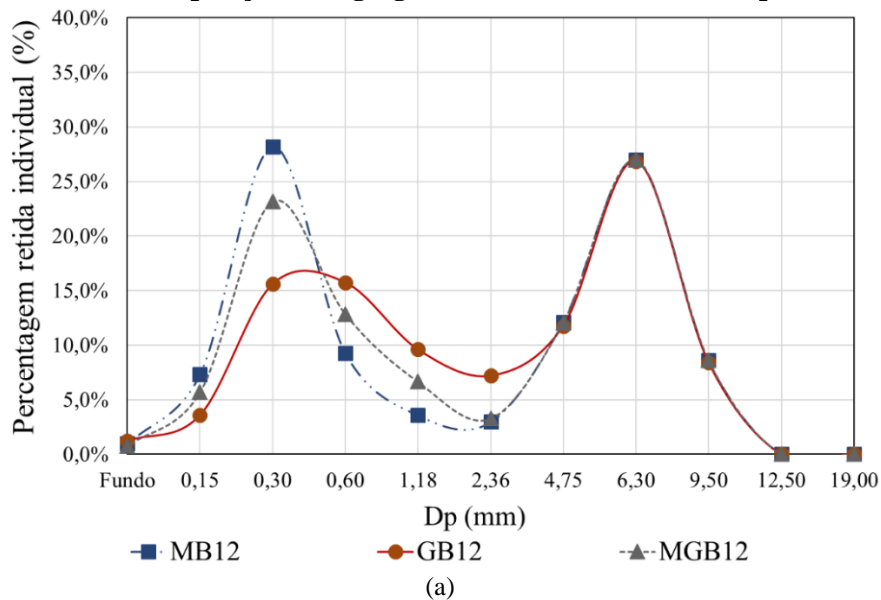
A metodologia empregada para a determinação, de forma qualitativa, de um parâmetro de graduação que representasse a distância de separação das predominâncias de partículas graúdas e miúdas, DPGM, com maiores porcentagens retidas individuais (PRI), teve início com a formulação de composições de agregados binárias, ternárias e quaternárias, sendo 16 esqueletos granulares distintos, apresentadas no item anterior. Admitiu-se MDPGM (maior distância entre partículas graúdas e miúdas) e mDPGM (menor distância). Para isso, utilizou-se de proporções de agregado miúdo e graúdo diferenciadas (com porcentagem de agregado graúdo (PAG) entre 40 % e 60 %), e os dados de granulometria dos agregados, a fim de simular,

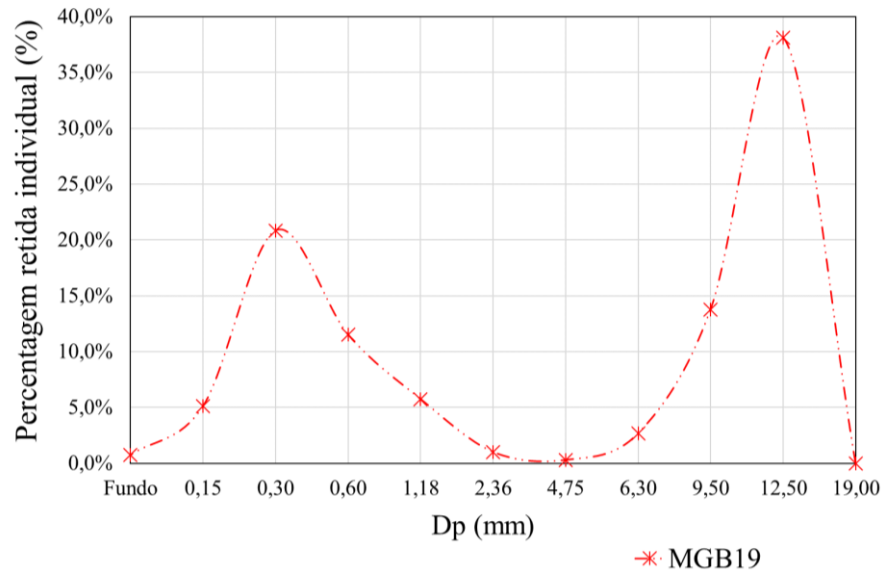
numericamente, as distintas graduações de agregados e a geração de curvas granulométricas de distribuições discretas.

Os tamanhos das aberturas das peneiras da série normal e intermediária foram mantidos constantes #0,15; #0,30; #0,60; #1,18; #2,36; #4,75; #6,3; #9,5; #12,5 milímetros, conforme normas NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009). Partículas menores que 0,15 mm (150  $\mu$ m) foram consideradas como finos.

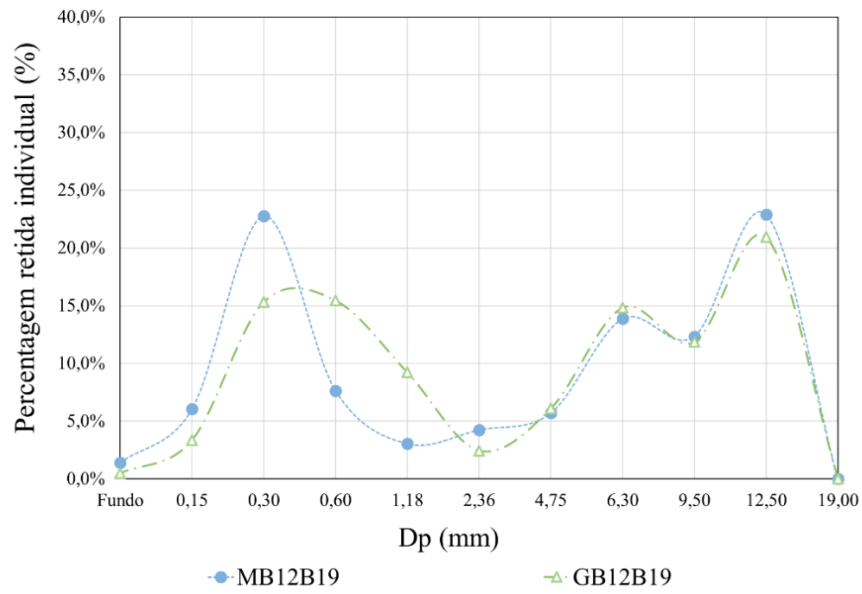
Partindo-se para a análise das composições de agregados aplicadas no presente estudo, foram desenvolvidas 16 curvas granulométricas de diferentes distribuições, tanto contínuas quanto descontínuas (Figura 5.31). Estas distribuições encontram-se descritas no Apêndice A.

**Figura 5.31 - Curvas de composições de agregados desenvolvidas na 1ª etapa**

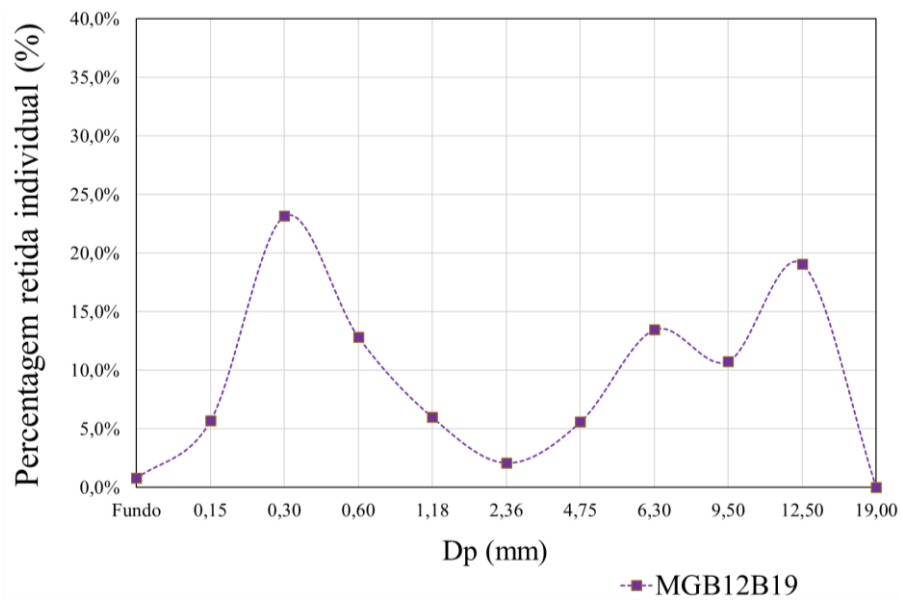


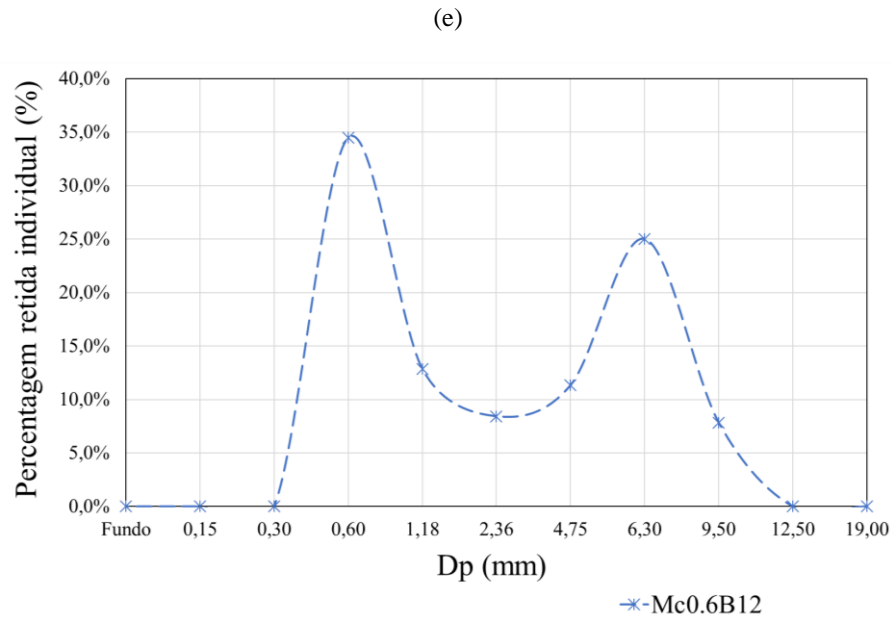


(c)



(d)





As composições de agregados foram caracterizadas com distintos índices de vazios, sendo estes calculados, inicialmente, para cada combinação. A variação encontrada nos  $I_v$  - porosidade intergranular (ORDOÑEZ, 2015; DAMINELI, 2013) -, é justificada pelas diferentes proporções, frações granulométricas e forma dos grãos presentes nos distintos esqueletos granulares. O índice de vazios diminuiu com o aumento da distância entre os tamanhos dos grãos graúdos e miúdos, estando presente o agregado graúdo de dimensão máxima de 19,0 mm, e os agregados miúdos M e G. Dentre as composições analisadas, as composições GB19, MB19, MGB19 e MB12B19 (curvas com concavidades mais abertas), foram as únicas que apresentaram menores percentuais de índice de vazios e, conseqüentemente, maiores massas unitárias. Por outro lado, a composição binária GB12 foi uma das que apresentou maior  $I_v$  dentre as composições com concavidades fechadas.

Verificou-se, experimentalmente, que a composição binária das duas areias, que conduziram à composição ótima com maior massa unitária e menor índice de vazios, consistiu em 45% de areia grossa (G) e 55 % de areia média (M), tendo sido a relação adotada nas composições ternárias (MGB12 e MGB19, com curvas de concavidades mais fechada e mais aberta, respectivamente) e quaternária (MGB12B19, com curva de concavidade mais fechada).

Das nove composições com agregados naturais, quatro foram constituídas por 50 % de agregado graúdo e 50 % de agregado miúdo, sendo uma composição binária (MB12), uma ternária (MGB12) e uma quaternária (MGB12B19), com curvas de concavidades mais fechadas; cinco foram constituídas por 55 % de agregado graúdo e 45 % de agregado miúdo,



sendo três binárias (MB19, GB19 – com curvas de concavidades mais abertas, e GB12 – com concavidade mais fechada) e duas ternárias (MGB19 – curva de concavidade mais aberta, GB12B19 – curva de concavidade mais fechada); apenas a ternária MB12B19 foi constituída por 60 % de agregado graúdo e 40 % de agregado miúdo, resultando numa curva de concavidade mais aberta.

Na formulação da distribuição contínua Mc0.6B12, a ausência de partículas abaixo da fração #0,60 mm (composição alterada da MB12), fez com que as porcentagens retidas individuais (PRI) se redistribuíssem nas demais frações do agregado miúdo, sobressaindo a fração de dimensão nominal #0,60 mm com PRI = 34,49 %, resultando numa curva de composição mais fechada.

Dando continuidade ao estudo de composições de agregados, distintas graduações de agregados foram formuladas com agregados industriais miúdo (areia industrial - AI) e graúdo (pedra britada de 12,5 mm – B12) do tipo binárias. Além destas composições, foi também desenvolvida uma composição de agregados reciclados (ARMARG12), para servir como base na determinação dos PGA.

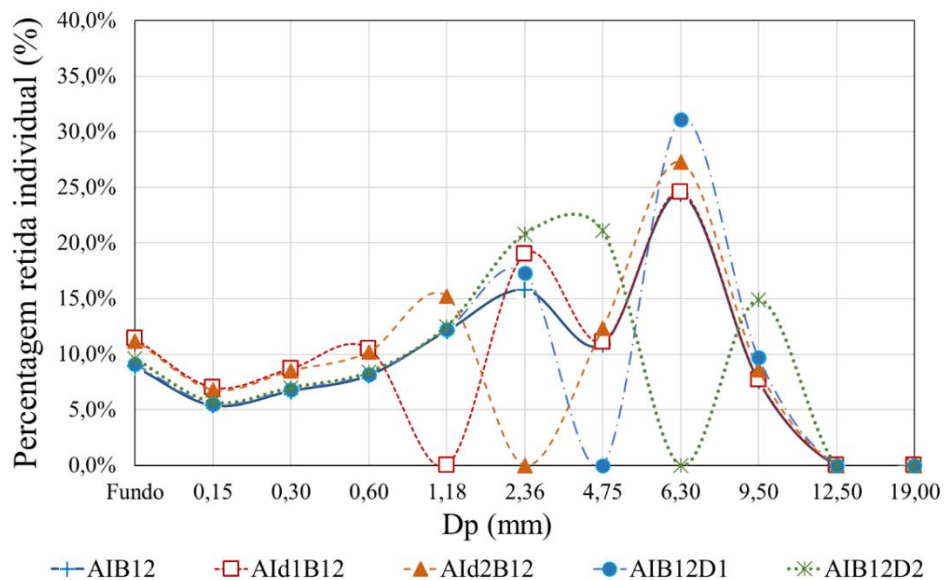
Com os resultados apresentados na Figura 5.31, observa-se que o estudo da proporção ótima entre os agregados graúdos e miúdos apresentados resultaram em proporções que variaram de 40 % a 60 % de agregado graúdo, alcançando um valor mínimo de vazios, mas que, tais proporções e a própria granulometria dos materiais, interferiram na predominância de algumas frações granulométricas e, com isso, dificultaram a obtenção da continuidade de algumas composições de agregados. Assim, a proporção ideal alcançada para as combinações binárias, ternárias e quaternárias demonstraram que é inevitável a ocorrência da predominância de partículas graúdas quando se eleva o PAG. Nesse sentido, a configuração do parâmetro PDP, de forma qualitativa, mostrou que este se torna menor quando a predominância se dá em frações mais próximas, ou seja, com menores razões entre tamanhos de grãos graúdos e miúdos, o que possibilita o aumento do índice de vazios. Com este mesmo raciocínio, o PDP se torna maior quando a predominância se dá em frações mais distantes, apresentando maiores razões entre tamanhos de grãos graúdos e miúdos, o que favorece na redução do índice de vazios.

Por exemplo, a areia média (M) possuiu a maior parte dos grãos concentrados nas peneiras com aberturas de malhas # 0,30 mm e #0,60 mm. No agregado graúdo, com diâmetro máximo de 19,0 mm, a maior PRI dos grãos se concentraram em duas peneiras com aberturas de malhas #9,5mm e #12,5 mm apenas, reduzindo-se em um pouco mais de grãos na peneira de abertura #6,3mm, devido ao processo de produção que é projetado para separar os grãos por peneiramento para obter as frações de agregados.

Ao contrário das areias naturais, a areia industrial possuiu a maior parte dos grãos concentrados nas peneiras de aberturas # 1,18 mm e # 2,36 mm e, ainda, abaixo da peneira #0,60mm se distribui com partículas mais finas até o fundo, no qual a PRI variou de 8,9 a 11,4 % nas cinco composições binárias aplicadas. Características similares foram observadas na distribuição contínua do esqueleto granular ARMARG12 (Figura 5.33).

No que se diz respeito às composições binárias com a areia industrial do tipo pó de pedra britada, na Figura 5.32 são ilustradas as curvas granulométricas de distribuições descontínuas, incluindo uma contínua. Com isso, permitiu-se reforçar a análise das curvas de distribuições descontínuas mais fechadas, como também a presença de picos nas curvas granulométricas.

**Figura 5.32 - Curvas de composições de agregados com areia industrial (AI) desenvolvidas na 1ª etapa**



Fonte: Próprio Autor (2019)

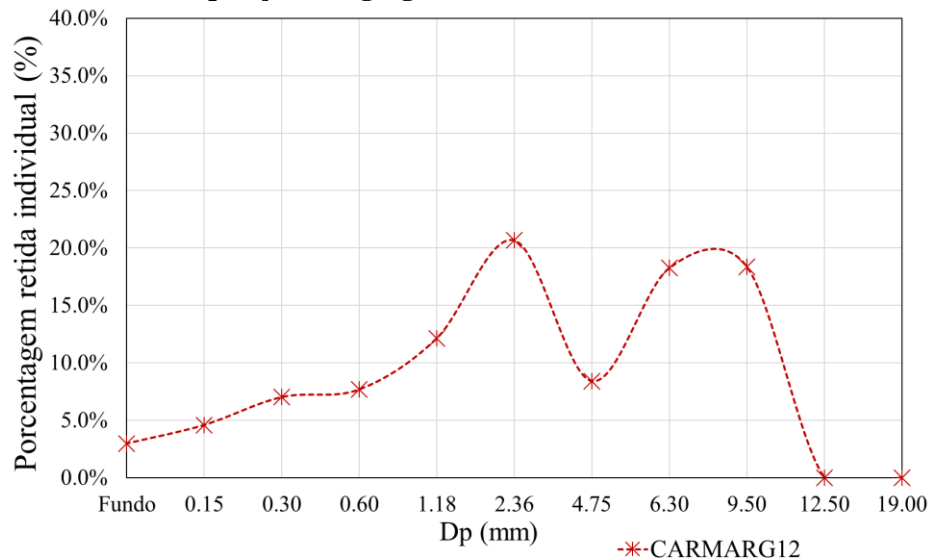
Na distribuição contínua (com curva de concavidade mais fechada) e nas descontínuas (com curvas de concavidades abertas) têm-se detectado porcentagens retidas individuais (PRI) maiores em algumas frações granulométricas, as quais podem ser nomeadas de “picos”, enquanto outras PRI têm se apresentado menores (caso contínua) e nulas (caso descontínuas), nomeadas de “vales”.

Pode-se notar que as graduações das composições apresentaram um crescimento semelhante de PRI a partir do fundo até a fração #0,60 mm. O material retido no fundo ficou em torno de 8,9% e 11,4% nas graduações aplicadas, destacando-se a composição AId1B12 com 11,4%, com descontinuidade na fração #1,18 mm. Em geral, as maiores concentrações de

grãos retidos encontraram-se na fração granulométrica #6,3 mm, destacando-se a composição AIB12D1, em virtude da descontinuidade na fração #4,75 mm.

Com agregados reciclados de concreto foi elaborado o esqueleto granular mostrado na Figura 5.33, de granulometria original e distribuição contínua com concavidade mais fechada.

**Figura 5.33 - Curva de composição de agregados reciclados de concreto desenvolvida na 1ª etapa**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Como se pode observar, a análise qualitativa do DPGM das composições ilustradas nas Figura 5.32 e Figura 5.33 repercute de forma distinta das apresentadas na Figura 5.31. Este fato demonstra que os materiais escolhidos para compor os esqueletos granulares podem se apresentar bem distribuídos, abrangendo diâmetros variados de grãos ou podem apresentar predominâncias de poucos diâmetros, de maneira que não se consiga obter uma adequada distribuição para o concreto autoadensável. Assim, um menor DPGM das composições binárias com areia industrial e agregados reciclados de concreto é um caso típico da ausência de frações granulométricas predominantes nas areias. Vale ressaltar que os índices de vazios destas composições foram maiores, em virtude da menor distância de separação das predominâncias de grãos graúdos e miúdos predominantes.

No tocante ao parâmetro DPGM, observou-se que este é influenciado não apenas pelos tamanhos dos agregados graúdos com maiores PRI, mas também pelos tamanhos dos agregados miúdos com maiores PRI.

Como o que se pretende é propor parâmetros de graduação de agregados (PGA) que caracterizem os concretos como autoadensáveis, é nítido que haja uma tendência do parâmetro DPGM ser maior para proporções com menores índices de vazios e de ser menor para

proporções com maiores índices de vazios. Como consequência das diferenças observadas nas 16 graduações apresentadas, optou-se por analisar separadamente as composições contendo pedra britada de diâmetro máximo de 12,5 mm e pedra britada de diâmetro máximo de 19 mm, como segue no Apêndice A. As formulações das composições de agregados, bem como as proporções de agregados e os ensaios de CAA, estão apresentados na Tabela 5.11, seguindo as etapas do fluxograma (Figura 5.1).

**Tabela 5.11 - Composições de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições para CAA da 1ª etapa**

Códigos das composições de agregados	DG	Iv (%)	Agregado miúdo		Agregado graúdo		PAG (%)	DPGM	SF (cm)	t <sub>500</sub> (s)	IEV	VF (s)	HP
			M	G	B12	B19							
MB12	C	30,8	50	-	50	-	50	m.	74,5	3,0	0	9,5	0,92
GB12	C	33,3	-	45	55	-	55	m.	76,3	2,3	0	10,2	0,94
MGB12	C	31,7	27,5	22,5	50	-	50	m.	78,3	1,7	0	6,3	1,0
Mc0.6B12	C	34,2	50	-	50	-	50	m.	82,5	-	3	-	0
AIB12	C	34,2	-	50	50	-	50	m.	74,9	3,0	2	-	0,58
AId1B12	D	31,6	-	50	50	-	50	m.	72,3	3,0	2	-	0,33
AId2B12	D	31,7	-	50	50	-	50	m.	66,2	5,0	0	-	0,63
ARMARG12	C	29,3	-	-	55	-	45	m.	69,0	1,1	3	25,0	0
AIB12D1	D	32,8	-	50	50	-	50	M	75,4	3,0	3	-	0,28
AIB12D2	D	31,8	-	50	50	-	50	M	81,4	2,0	3	-	0,47
MB12B19	C	27,9	40	-	27	33	60	M	88,3	1,4	0	3,5	1,0
GB12B19	C	30,1	-	45	24,8	30,2	55	m.	75,8	1,7	1	13,4	0,73
MGB12B19	C	28,9	27,5	22,5	22,5	27,5	50	m.	77,8	2,9	0	6,9	1,0
MB19	D	26,8	45	-	-	55	55	M	88	0,4	3	15	0,75
GB19	D	28,4	-	45	-	55	55	M	87,8	0,3	3	12,3	0,63
MGB19	D	26,4	24,8	20,2	-	55	55	M	92,5	0,4	3	23	0,56

Legenda: DG: Distribuição granulométrica: C - contínua; D – descontínua; M: Média; G: grossa; Pedra britada (Dmáx.): B12: 12,5 mm; B19: 19,0 mm

Fonte: Próprio Autor (2019)

## 5.4 Conclusão

Os estudos realizados nesta etapa mostraram que diferentes combinações de agregados para concreto autoadensável (CAA) tiveram a influência dos tamanhos dos grãos, principalmente, na região de frações intermediárias. O uso de diferentes agregados miúdos mostrou a dificuldade de serem encontradas areias para tornar a distribuição mais fechada nesta fração, fato apenas obtido com o uso da areia industrial e de agregado reciclado miúdo de concreto. Desenvolvidas as combinações de agregados pelo método experimental da massa unitária, permitiu-se obter composições “ótimas”, mas a distância de partículas graúdas e miúdas não foi um quesito discutido por este método quando aplicado ao CAA.

Ressalva-se, no entanto, que este método experimental é aplicado de forma satisfatória em distribuições contínuas e descontínuas, sendo eficiente na obtenção do empacotamento de partículas, permitindo-se calcular os índices de vazios resultantes de distintos arranjos granulares. Entretanto, os resultados experimentais permitiram constatar que algumas composições de agregados não foram atendidas para CAA, o que depende do conhecimento da curva granulométrica dos agregados combinados, da identificação do tipo de distribuição (se contínua ou descontínua) e da predominância de diâmetros de partículas, aqui denominados de PDP, e avaliado no estudo pelo parâmetro DPGM. Tais influências são importantes, visto que se deve ter o cuidado de não tornar excessiva a presença de frações mais grossas na mistura, o que afeta a viscosidade e a estabilidade do CAA.

Para comprovação dos resultados obtidos no CAA, foram simuladas composições com agregados naturais, industriais e reciclados a fim de avaliar as possibilidades de enquadramento dos parâmetros de composições de agregados, ora denominados de parâmetros de graduação de agregados (PGA), admitindo-se a mesma composição e teor de pasta. A curva granulométrica e os ensaios de autoadensabilidade das composições de agregados reciclados apresentaram conclusões aproximadas das obtidas com agregados industriais.

A motivação para desenvolver o estudo dos PGA iniciou-se com a análise dos parâmetros PAG, DG e PDP, realizados na revisão bibliográfica e nesta primeira etapa experimental, o que pode constatar como estas variáveis estão interligadas na configuração do sistema granular, para que este apresentasse satisfatório no atendimento à autoadensabilidade do CAA. Além destas variáveis, observou-se também que o coeficiente de distribuição “q” das misturas foi enquadrado entre os indicados na literatura. Aquelas que apresentaram níveis baixos de autoadensabilidade foram as composições que apresentaram elevados teores de frações grosseiras (casos em que apresentaram valores-q maiores que os indicados para CAA), como

também misturas que apresentaram desvios expressivos da distribuição granulométrica, o que aumentou a dificuldade de fluidez principalmente em misturas com valor- $q$  bem menores, conforme revisão bibliográfica.

Maiores DPGM em composições granulométricas com partículas de granulometria mais fina (areia fina – predominância dos grãos de # 0,15 mm) e partículas de granulometria mais grossa (pedras britadas B12 e B19 - com predominância de grãos acima de # 6,3 mm), tornaram arranjos granulares mais empacotados e com diâmetros dos grãos dominantes mais distantes, ou seja, sem interação ( $d_1 \gg d_2$ ), o que resultou em uma diminuição do índice de vazios, prejudicando a fluidez e a coesão da mistura. Entretanto, a incorporação de areias consideradas médias e grossas (dominância de grãos entre # 0,3 e 0,6 mm e a dominância dos grãos da pedra britada 12,5 mm), contribuíram para a aproximação do diâmetro, justamente pela melhora das PRI nas frações intermediárias.

Já DPGM significativamente menores (com frações intermediárias dominantes - entre #1,18 e 4,75 mm - e menor PRI nas partículas abaixo de # 0,60 mm) resultaram em arranjos menos empacotados, com interação total  $d_1=d_2$ , aumentando-se o índice de vazios. Tal característica levou composições a não apresentarem fluidez e coesão satisfatórias, resultando em bloqueio na caixa L. Quando as partículas miúdas se tornaram dominantes nas frações intermediárias e o tamanho do agregado graúdo ficou limitado a uma dimensão abaixo de # 12,5 mm, observou-se que o sistema particulado ficou mais fechado, porém necessitando de melhora na fluidez devido à maior viscosidade.

Nos casos apresentados com menores DPGM, com interação parcial ( $d_1 \geq d_2$ ), e que apresentaram satisfatórias propriedades de autoadensabilidade, foi observada a influência da dominância de partículas finas e grossas em distribuições contínuas e descontínuas com *gaps* menos pronunciados e curvas de concavidade mais fechada.

Deste modo, nesta primeira etapa do trabalho foi possível identificar e avaliar distintas frações granulométricas, verificando não apenas o empacotamento, mas como as variáveis envolvidas indicaram a tendência dos parâmetros DG, DPGM, PAG e  $q$ , e a necessidade de modificações nas proporções e nas porcentagens retidas individuais nas frações granulométricas conforme for o caso da composição original, de forma que a dominância de dimensões dos grãos de agregados contribua para a melhor adequação do desempenho do CAA no estado fresco às demandas da aplicação do CAA e no atendimento às propriedades mecânicas.

## 6 DETERMINAÇÃO E APLICAÇÃO DE PARÂMETROS DE GRADUAÇÃO DE AGREGADOS PARA CAA

Neste capítulo estão abordados tanto a etapa 2 quanto a etapa 3 do programa experimental. Avaliados e determinados de forma qualitativa, preliminarmente, os parâmetros de graduação de agregados (PGA) passaram a ser formulados numericamente para uma determinação quantitativa nesta segunda etapa, tais como: coeficiente de uniformidade (CU) e predominância de diâmetros de partículas (PDP). Neste estudo, convencionou-se analisar as composições em grupos separados por diâmetro máximo característico, considerando-se composições do grupo G12 e do grupo G19. Foi de extrema importância que ocorresse a variabilidade das percentagens retidas individuais (PRI) em cada fração, para que, então, fosse implantada uma relação matemática para quantificação destes parâmetros. Na ausência de grãos em uma determinada fração granulométrica, admitiu-se distribuição granulométrica do tipo mal graduada ou descontínua (DG-D). Do contrário, foram obtidas distribuições granulométricas bem graduadas ou contínuas (DG-C), conforme discutido na revisão da literatura e no capítulo anterior.

A fim de aplicar os PGA fundamentados anteriormente, bem como avaliá-los nas composições de concreto autoadensável (CAA) já obtidas e nas modificadas, o estudo prosseguiu com formulações de misturas de concreto de composições de agregados modificadas, no intuito de obter CAA com melhores propriedades de autoadensabilidade. Além disso, estas modificações foram desenvolvidas com vista a solucionar problemas na granulometria do esqueleto granular de forma a encontrar composições favoráveis para CAA que levassem à melhor combinação de parâmetros de graduação: PDP, CU e porcentagem de agregado graúdo (PAG).

Com relação ao PAG, discutiu-se na literatura que valores em torno de 50 % foram mais aplicados (SU *et al.* (2001), GOMES (2002), OKAMURA; OUCHI (2003), MELO (2005), TUTIKIAN (2007), LISBOA (2004), CAVALCANTI (2006) e MONTEIRO (2015)).

Com o parâmetro CU, utilizado na mecânica dos solos, viu-se que o mesmo se adequava à avaliação do esqueleto granular do concreto, podendo, desta forma, ser empregado na avaliação de distribuições granulométricas contínuas e descontínuas. Passando-se de uma análise subjetiva para uma análise quantitativa, conforme visto na revisão bibliográfica, tornou-se possível detectar o aumento e a diminuição da interação entre partículas graúdas e miúdas por meio, não apenas, de suas curvas granulométricas, como também da magnitude deste



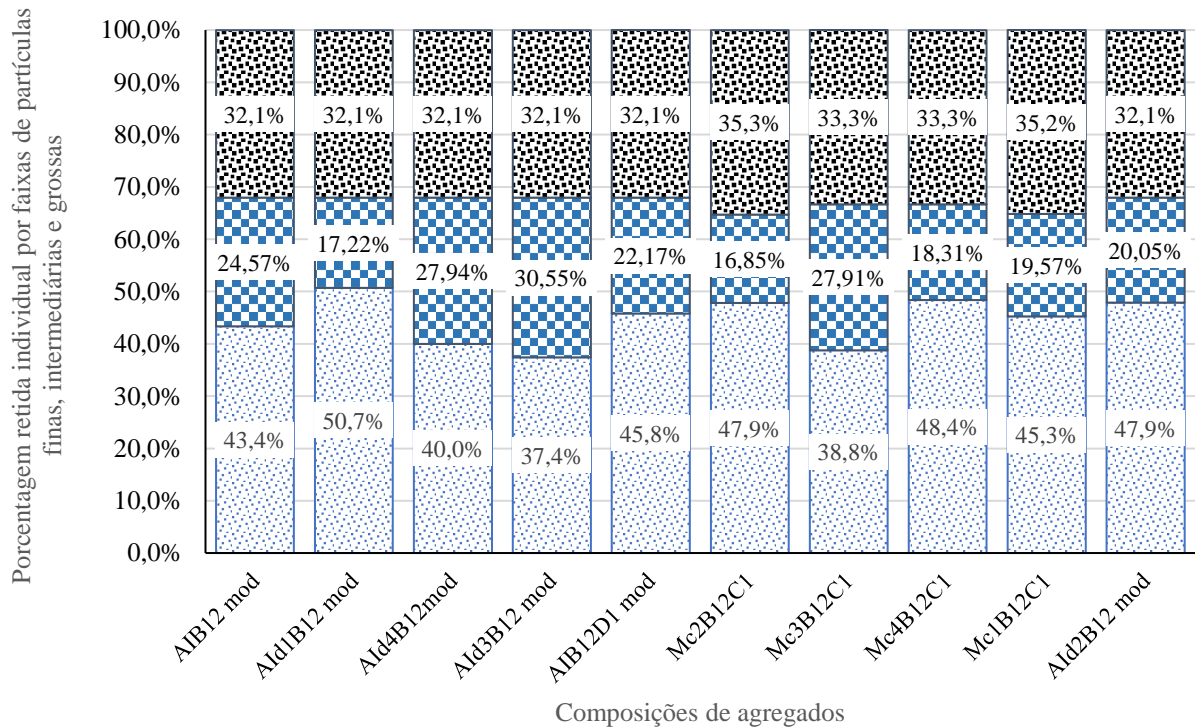
coeficiente quando elevadas concentrações de frações grosseiras se distanciaram das frações finas.

### 6.1 Formulação do PDP para Aplicação do Parâmetro de Predominância

Como forma de quantificar o parâmetro PDP, baseado na teoria de empacotamento de partículas, destaca-se que esta variável independente considerou a regra da interação parcial entre as partículas,  $d1 \geq d2$ , no qual  $d1$  representa a predominância de partículas graúdas e  $d2$  a de partículas miúdas.

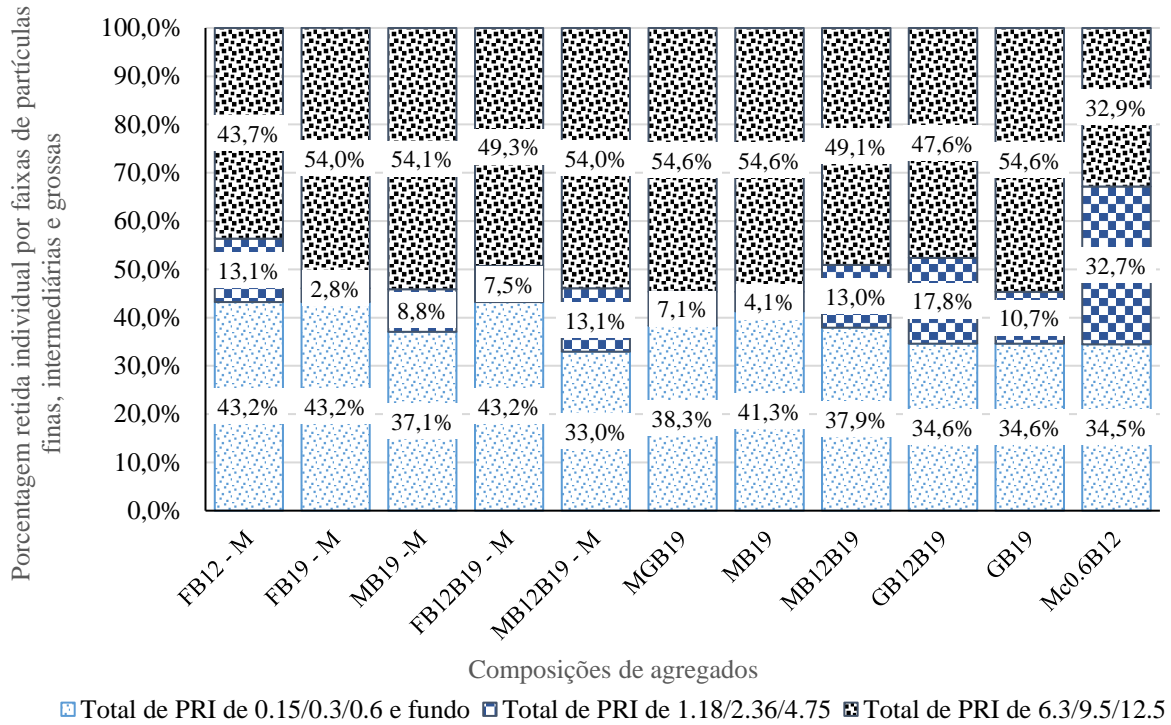
Para uma melhor compreensão do procedimento de cálculo referente ao parâmetro de predominância de partículas (PDP), a seguir apresentam-se as composições granulométricas dos agregados desenvolvidas no estudo, por meio da divisão de três regiões de frações granulométricas distintas, tais como finas, intermediárias e grossas, e suas correspondentes porcentagens retidas individuais (PRI), Figura 6.1.

**Figura 6.1 - Gráfico das contribuições de partículas finas, intermediárias e grossas nas composições de agregados: (a) naturais e industriais que atenderam e (b) não atenderam a autoadensabilidade, e (c) industriais que não atenderam**

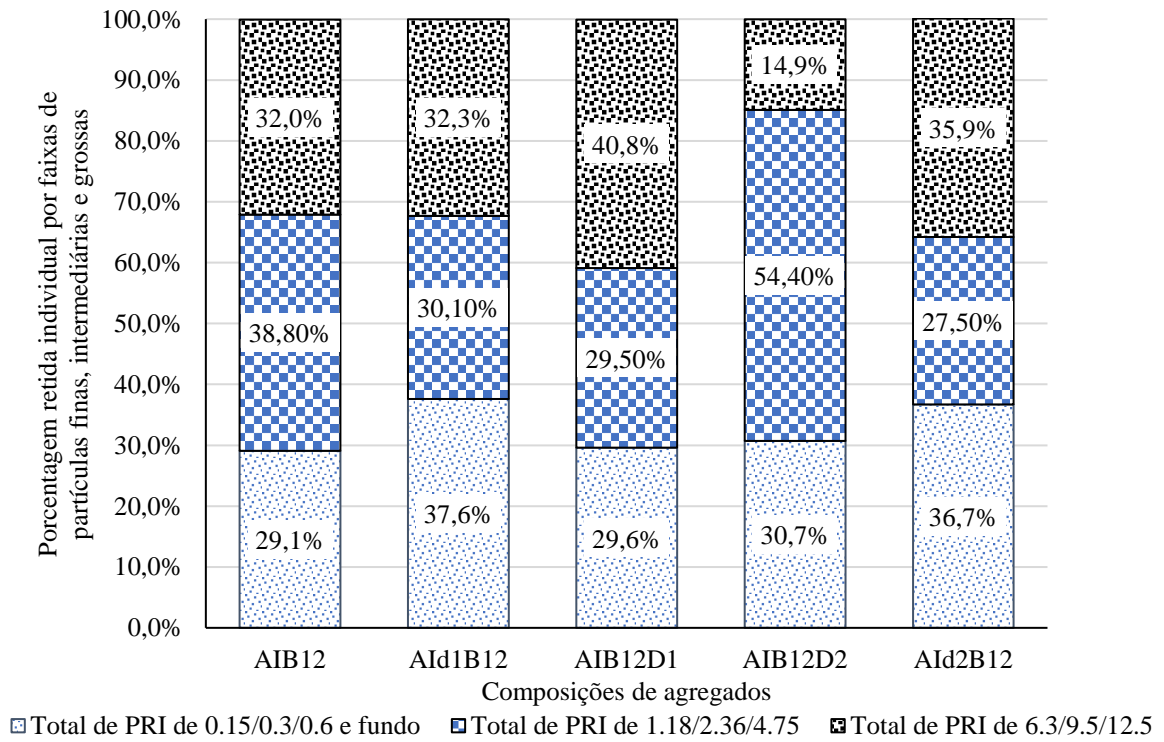


■ Total de PRI de 0.15/0.3/0.6 e fundo ■ Total de PRI de 1.18/2.36/4.75 ■ Total de PRI de 6.3/9.5/12.5

(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio Autor (2019)

Por meio da análise das composições apresentadas na Figura 6.1, observa-se que a concentração de uma maior porcentagem retida nas frações abaixo de #0,60 mm (incluindo o

fundo) indica um favorecimento das proporções estabelecidas nas frações intermediárias e de grãos mais grossos para o CAA. A Figura 6.1a mostra esse favorecimento, quando comparado às demais composições apresentadas em (b) e (c).

A análise apresentada na Figura 6.1 (b, c) mostrou que as percentagens retidas na região de grãos mais grossos (a partir da fração #6,3 mm), combinada com as retidas na região intermediária (entre as frações #1,18 e #4,75 mm) foram significativamente elevadas quando comparadas às percentagens retidas na região de grãos mais finos (abaixo de #0,60 mm, incluindo o fundo), o que indica uma tendência dessas composições apresentarem dificuldades no alcance das características de autoadensabilidade.

Com base nestas constatações, avaliou-se a razão de predominância de partículas (PDP) considerando-se os agregados miúdos e graúdos em conjunto, ou seja, as proporções e as PRI dos grãos pequenos e grossos predominantes. Para a quantificação deste parâmetro de graduação, obteve-se a Equação (6.1)

$$PDP = \frac{D_{g,médio}}{D_{p,médio}} \quad (6.1)$$

na qual  $D_g$  médio = diâmetro de partículas grossas que apresenta maior percentagem retida individual (PRI) e que diferencie mais que 10 % das demais percentagens das partículas grossas. Caso a diferença seja menor, obtém-se o diâmetro médio referente às PRI predominantes na fração grossa;  $D_p$  médio = diâmetro médio de partículas pequenas, apresentando-se PRI maiores que 10 %.

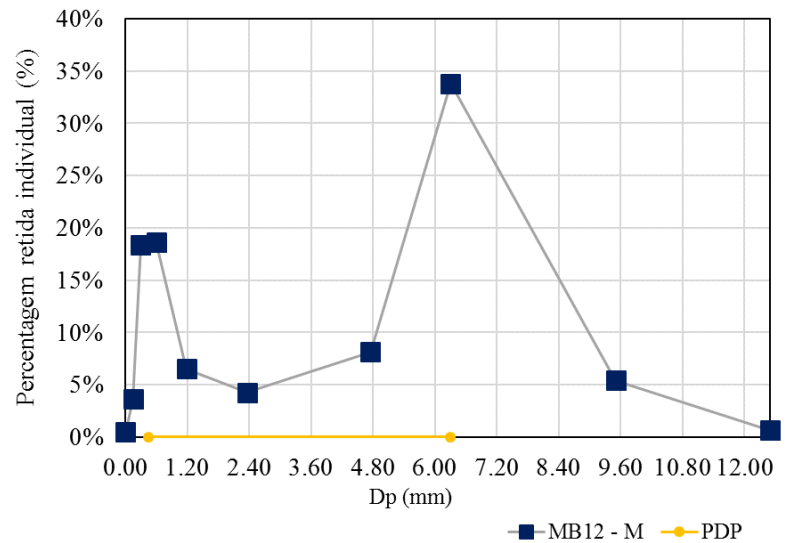
A equação considera as informações apresentadas pelas distribuições granulométricas dos grãos de agregados com PRI obtidas em massa. Foi baseado nessas informações que surgiram várias tentativas de procedimentos de cálculo que não corresponderam à representatividade dos “picos” destacados em alguma fração.

A seguir, dois exemplos de cálculo de PDP estão apresentados na Figura 6.2, a fim de ilustrar os detalhes do procedimento de cálculo sobre as dimensões das partículas compreendidas entre #0,15 e 12,5 mm.

Figura 6.2 - Exemplificações de cálculos de PDP: (a) MB12, (b) AIB12

(a) MB12

Composição	MB12	
	PRI	PRA
19,00	0,0%	0,0%
12,50	0,6%	0,6%
9,50	5,4%	6,1%
6,30	33,8%	39,9%
4,75	8,1%	48,0%
2,36	4,3%	52,3%
1,18	6,5%	58,8%
0,60	18,7%	77,5%
0,30	18,4%	95,9%
0,150	3,6%	99,5%
0,00	0,5%	100,0%



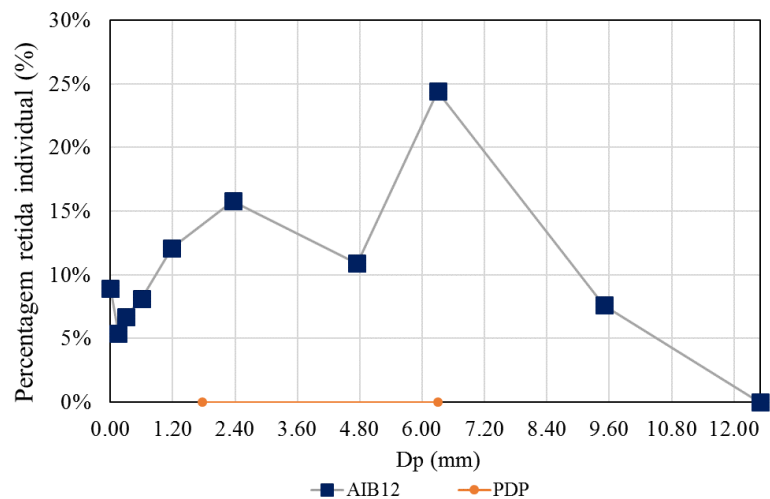
$$PDP = \frac{6,3}{\frac{(0,3+0,6)}{2}} = 14,03$$

Diâmetros médios predominantes:

$D_p = 0,45$  mm;  $D_g = 6,30$  mm

(b) AIB12

Composição	AIB12	
	PRI	PRA
19.00	0.0%	0.0%
12.50	0.0%	0.0%
9.50	7.6%	7.6%
6.30	24.4%	32.0%
4.75	10.9%	42.9%
2.36	15.8%	58.7%
1.18	12.1%	70.8%
0.60	8.1%	78.9%
0.30	6.7%	85.6%
0.150	5.4%	91.0%
0.00	8.9%	100%



$$PDP = \frac{6,3}{\frac{(1,18+2,36)}{2}} = 3,56$$

Diâmetros médios predominantes:

$D_p = 1,77$  mm;  $D_g = 6,30$  mm

Nas duas composições apresentadas acima, constatou-se que a distribuição bem graduada de AIB2 apresentou maior aproximação dos tamanhos das partículas abaixo e acima de #4,75 mm, entretanto, o excesso das partículas contidas na região em destaque e a deficiência de partículas abaixo de #1,18 mm, favoreceu o surgimento de segregação do concreto. Ao contrário da composição MB12 que, mesmo apresentando uma concavidade mais fechada na faixa intermediária (#1,18 a 4,75 mm), apresentou um PDP maior e favorável ao CAA, garantindo sua interação granular com tamanhos de grãos mais próximos.

## **6.2 Aplicação dos PGA nas Composições de Agregados Avaliadas**

Determinados numericamente os parâmetros PDP e CU, nas composições de agregados modificadas foram realizados ajustes de frações granulométricas, de modo que não fossem alteradas as proporções dos agregados miúdo e graúdo. Assim, manteve-se constante o PAG em 50 %, a dimensão máxima característica do agregado graúdo de 12,5 mm, a composição da pasta e seu teor de 40 % por metro cúbico de concreto. Partindo-se para as composições de agregados de 50 % / 50 %, formuladas numericamente, aplicou-se o método de O'Reilly Vitervo (1998), a fim de obter o índice de vazios de cada uma das composições.

A princípio foi aplicado o PGA nas composições de agregado avaliadas e obtidas da literatura. Com a aplicação do PGA, também, nas composições modificadas, posteriormente, foram definidas zonas granulométricas para os esqueletos granulares enquadrados como adequados para obtenção de CAA, considerando-se todas as combinações de agregados analisadas neste estudo. Assim, fez-se uma comparação destas composições com as zonas determinadas, admitindo-se, para seu traçado, as maiores porcentagens retidas acumuladas daquelas que atenderam a autoadensabilidade, de modo a definir as zonas superior e inferior.

Detalhes adicionais sobre a quantificação do parâmetro de predominância de diâmetros de partículas (PDP) encontram-se descritos no item anterior, incluindo alguns detalhes gráficos.

As nomenclaturas das composições utilizadas para as misturas de concreto foram mantidas: AI (areia industrial), d1..d4 (descontinuidades nos agregados miúdos de 1 a 4), D1 e D2 (descontinuidades nos agregados graúdos de 1 e 2) e a palavra “mod” nas formulações das composições ajustadas. Como exemplo: AI d1 B12 mod, trata-se de um CAA com areia industrial (AI) e pedra britada (B12) de dimensão máxima ( $D_{m\acute{a}x}$ ) de 12,5 mm, com descontinuidade (d1) na fração em # 1,18 mm. Da mesma forma, na composição com agregados reciclados de concreto manteve-se o código do agregado miúdo (ARM), do agregado graúdo

(ARG), seguido do PAG (45 % ou 50%), e acrescentou-se a palavra “mod” na composição ajustada.

Nas formulações das composições de agregados contendo agregados naturais (areia média – M; e pedra britada de  $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$  – B12), optou-se por variar as frações miúdas e graúdas. As nomenclaturas destas composições foram definidas da seguinte forma: M (areia média), c1 (#2,36 mm), c2(# 0,60 mm), c3(#0,15+#1,18 mm), c4(#0,15+#0,60 mm) - continuidades ajustadas nas frações de 1 a 4 do agregado miúdo -, e C1 (#9,5 mm) - continuidade ajustada em uma única fração). Como exemplo: Mc1B12C1, trata-se de um concreto autoadensável com areia média (M) e pedra britada B12, com modificação das frações miúdas e graúdas, ajustadas as porcentagens retidas individuais (PRI) em c1 e C1.

Nas Tabela 6.1 e Tabela 6.2 é apresentado o comparativo das misturas avaliadas segundo os PGA e as propriedades de autoadensabilidade. Nesta abordagem numérica, foram englobadas as composições da literatura e as composições aplicadas neste trabalho.

**Tabela 6.1 - Comparativos de parâmetros de graduações de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições da literatura**

Autores	Composições dos concretos	DG	I <sub>v</sub> (%)	PAG (%)	CU	PDP	SF (cm)	t <sub>500</sub> (s)	IEV	VF (s)	HP
Monteiro <i>et al.</i> (2015)	FB12 – M	D	30,	55	30,	28,13	68,5	-	1	22	0,5
	FB19 – M	D	27,	55	45,	49,11	77,5	-	2	16	0,7
	MB12 – M	C	34,	50	15,	14,03	74,0	-	0	12	1,0
	MB19 – M	D	31,	55	23,	24,49	79,0	-	3	6	0,5
	FMB12 – M	C	33,	50	23,	18,0	75,0	-	0	4	1,0
	FMB19 – M	D	30,	50	34,	27,0	81,5	-	0	6	1,0
	FB12B19 – M	D	31,	55	35,	35,27	79,0	-	2	4	0,7
	MB12B19 – M	C	32,	60	18,	21,0	78,5	-	3	6	0,5
FMB12B19 - M	C	32,	50	25,	27,0	76,5	-	0	6	1,0	
Nanthagopalan e Santhanam (2012)	GB12B19 – 1NP	D	32	60	33,	11,29	72,0	1,5	-	-	-
	GB12B19 – 2NP	D	32	55	29,	10,93	69,0	2,2	-	-	-
	GB12B19 – 3NP	D	32	45	33,	11,44	70,0	2,0	-	-	-
	GB12B19 – 4NP	D	32	50	32,	11,35	66,0	3,1	-	-	-
	GB12B19 – 5NP	D	32	50	34,	11,32	63,5	3,0	-	-	-
	GB12B19 – 6NP	D	32	45	31,	11,17	57,0	4,0	-	-	-
	GB12B19 – 7NP	D	32	45	28,	11,06	55,5	5,0	-	-	-
	GB12B19 – 8NP	D	32	40	20,	11,21	53,0	5,2	-	-	-
Farokhzad <i>et al.</i> (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)	FB12 – 1FN	C	-	38	9,0	22,57	79,0	-	-	4,3	0,9
	FB12 – 2FN	C	-	38	9,3	21,07	71,0	-	-	3,0	0,8
	FB12 – 3FN	C	-	38	9,9	25,33	78,5	-	-	2,9	0,9
	GB12 – 4FN	C	-	38	12,	5,72	72,5	-	-	3,5	0,8
	GB12 – 5FN	C	-	38	14,	5,72	74,0	-	-	3,3	0,9
	GB12 – 6FN	C	-	38	15,	10,67	73,0	-	-	3,3	0,9
	GB12 – 7FN	D	-	38	15,	8,88	71,0	-	-	4	0,8
	GB12 – 8FN	C	-	38	7,2	3,87	69,7	-	-	7,6	0,6
	GB12 – 9FN	C	-	38	8,4	3,87	53,0	-	-	4,5	0,6
Cavalcanti	MB12 – C	C	32,	50	16,	14,03	67,0	-	0	10	0,8
Gomes (2002)	GB12 – Go1	C	32,	50	12,	3,12	70,0	3,8	-	10,	0,8
	GB12 – Go2	C	32,	42	13,	2,67	68,0	3,7	-	9,9	1,0
	GB12 – Go3	C	32,	55	11,	9,36	60,0	4,5	-	16,	0,3
Melo (2005)	FMB12 - ME	C	-	47	21,	15,79	53,5	-	-	3,0	0,8

Fonte: Próprio Autor (2019)

**Tabela 6.2 - Comparativos de parâmetros de graduações de agregados e propriedades de autoadensabilidade das composições desenvolvidas no estudo**

Autores	Composições dos concretos	DG	I <sub>v</sub> (%)	PAG (%)	CU	PDP	SF (cm)	t <sub>500</sub> (s)	IEV	VF (s)	HP
Próprio Autor	MB12	C	30,8	50	17,88	21,14	74,5	3,0	0	9,5	0,92
	GB12	C	33,3	55	14,22	14,03	76,3	2,3	0	10,2	0,94
	MGB12	C	31,7	50	16,57	14,03	78,3	1,7	0	6,3	1,0
	Mc0.6B12	C	34,2	50	6,93	7,07	82,5	-	3	-	-
	AIB12	C	34,2	50	28,71	3,56	74,9	3,0	2	-	0,58
	AId1B12	D	31,6	50	36,34	4,26	72,3	3,0	2	-	0,33
	AId2B12	D	31,7	50	39,89	7,08	66,2	5,0	0	-	0,63
	AIB12D1	D	32,8	50	36,82	3,56	75,4	3,0	3	-	0,28
	AIB12D2	D	31,8	50	26,79	4,03	81,4	2,0	3	-	0,47
	ARMARG12	C	29,3	45	14,0	4,46	69,0	1,1	3	25,0	0
	MB12B19	C	27,9	60	25,2	31,66	88,3	1,4	0	3,5	1,0
	GB12B19	C	30,1	55	18,9	21,0	75,8	1,7	1	13,4	0,73
	MGB12B19	C	28,9	50	20,9	21,0	77,8	2,9	0	6,9	1,0
	MB19	D	26,8	55	36,8	41,95	88	0,4	3	15	0,95
	GB19	D	28,4	55	28,8	27,84	87,8	0,3	3	12,3	0,63
	MGB19	D	26,4	55	33,7	27,84	92,5	0,4	3	23	0,56

Fonte: Próprio Autor (2019)

Uma vez obtidas as informações apresentadas nas Tabela 6.1 e Tabela 6.2, possibilitou-se encontrar relações entre as características estudadas.

Algumas razões H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>, definidas pelo parâmetro de habilidade passante (HP), diferiram das medidas tidas como aceitáveis, sendo às contidas no intervalo de 0,8 a 1,0. Percebeu-se, então, que os PGA tratados no presente estudo (PDP, CU e PAG) foram decisivos nesta avaliação.

Dentre as informações extraídas dos dados, destacaram-se:

- Coeficiente de uniformidade (CU): valores compreendidos entre 9,0 e 23,0 referiram-se às misturas que atenderam à autoadensabilidade, em composições do grupo G12. Valores acima ou abaixo deste intervalo foram vistos nas misturas que apresentaram problemas de bloqueio e segregação, por exemplo, as misturas CFB12 - M, CGB12-8FN, CGB12-9F, CMc0.6B12, CAIB12, CAId1B12, CAId2B12, CAIB12D1, CAIB12D2 e CARMARG12. Tratando-se do grupo G19, este parâmetro foi maior, justamente pela contribuição da porcentagem retida individual (PRI) de frações com diâmetros mais distantes, reflexo da descontinuidade ocorrida na maioria das composições deste grupo contendo apenas B19, com distribuições com concavidade mais aberta. Valores de CU compreendidos entre 20,91 e 34,56 (aproximadamente entre 21 e 35), corresponderam a concretos autoadensáveis. Aquelas



misturas que não obtiveram propriedades satisfatórias, mesmo se enquadrando neste intervalo, tiveram reflexo de suas descontinuidades, apresentando deficiência e excesso de algumas dimensões de partículas miúdas e graúdas, respectivamente, bem como maiores porcentagens de agregado graúdo, por exemplo, CMB19 - M, CFB12B19 - M (Monteiro *et al.*, 2015), CMB19, CGB19 e CMGB19 (do estudo). Apenas a mistura CFB19 - M destacou-se com CU muito alto, igual a 45,98, justificado pela maior descontinuidade do esqueleto granular, comparado às demais composições, o que comprometeu as propriedades no estado fresco. A exceção ocorreu com o valor menor de CU (18,57) em CMB12B19 - M que, apesar de apresentar-se mais contínua, obteve o PAG = 60 %; e a composição GB12B19-1NP, que obteve CU = 33,52, também com PAG = 60%.

- Predominância de diâmetro de partículas (PDP): valores de PDP indicaram o intervalo de 5,72 a 25,33 (arredondados para 6 e 25) para as composições do Grupo G12, sendo estas as que apresentaram um alto nível de autoadensabilidade. As granulometrias destas composições (contidas no Apêndice A) mostraram, nitidamente, que as maiores porcentagens retidas individuais (PRI) ocorreram nas peneiras #0,30; 0,60; 6,3 e 9,5 mm. Variações de PRI nestas peneiras, tornaram o parâmetro PDP limitado à 5,72. Caso de exceções ocorreram nas composições que foram satisfatórias para CAA e obtiveram valores de CU dentro do intervalo supracitado, mas que apresentaram PDP menores que o limite inferior, tais como CGB12-G1 (PDP = 3,12) e CGB12-G12 (PDP = 2,67). Tal fato ocorreu devido à influência da maior PRI nas frações intermediárias (#1,18; 2,36 e 4,75 mm) destas composições, resultante da areia grossa (G) e da pedra britada B12 por possuir maior PRI na fração # 4,75 mm. Valores muito menores de PDP dos concretos CGB12-8FN, CGB12-9FN, CAIB12, CAId1B12, CAId2B12, CAIB12D1, CAIB12D2 e CARMARG12, e com CU fora do intervalo indicado, refletiram no problema destas misturas não apresentarem fluidez, pois tanto os parâmetros CU e PDP não foram enquadrados. Sendo limitado à 25,33, a composição CFB12 - M não atendeu a autoadensabilidade, possivelmente pelo valor de PDP estar acima do limite superior (28,13), assim como também de CU (30,7).

Em uma mesma análise feita com as composições do grupo G19 constatou-se que este mesmo parâmetro compreendeu de 10,93 a 27,0 (aproximadamente 11 e 27). Os resultados evidenciaram que as variáveis PAG e CU tenham contribuído para a ausência de segregação e bloqueio. Analisando-se a mistura CFB19 - M com PDP elevado (igual a 49,11), comprovou-se que o maior empacotamento foi ditado pela sua distribuição de maior descontinuidade, razão pela qual o valor de CU = 45,98 não foi enquadrado.

- Porcentagem de Agregado Graúdo (PAG): os dados comprovaram que menores proporções de agregado graúdo foram vistas como uma tendência tanto nas composições aplicadas no estudo quanto nas obtidas da literatura. Neste aspecto, como a maior parte dos autores analisados utilizou o método da maior massa unitária na determinação das proporções de agregado miúdo e graúdo, constatou-se que a predominância de diâmetros de partículas em frações mais finas e a limitação do PAG ( $PAG \leq 50\%$ ), possibilitou o atendimento aos critérios de autoadensabilidade. De igual forma também foram atendidos os demais parâmetros (PDP e CU) nos estudos de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017), com os quais “novos agregados” foram obtidos pelo enquadramento em zonas granulométricas de agregados miúdos e graúdos.

### 6.3 Aplicação dos PGA nas Composições de Agregados Modificadas

Considerando-se as composições avaliadas, buscou-se modificar aquelas que não apresentaram desempenhos satisfatórios no estado fresco. Assim, com as composições contendo areia industrial e pedra britada com  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm constatou-se, na primeira etapa, que o menor índice de vazios ocorreu na proporção de 45 % de agregado miúdo e 55 % de agregado graúdo. No entanto, considerando uma certa estabilização dos valores dos índices de vazios a partir desta proporção de agregados, adotou-se a proporção de 50% de graúdo e 50 % de miúdo. Esta decisão deveu-se à consideração desta percentagem de agregado graúdo (PAG) ser recomendada por muitos autores (CAVALCANTI, 2006; LISBOA, 2004; OKAMURA; OUCHI, 2003; GOMES, 2002) para a obtenção das propriedades de autoadensabilidade do CAA.

As composições com areia britada, portanto, foram formuladas do tipo contínua e descontínua, admitindo-se o PAG fixo de 50 %. Da mesma forma, obteve-se as proporções de agregados para formar o esqueleto granular de agregados reciclados de concreto, resultando na proporção de 55 % de miúdo e 45 % de graúdo.

Nas Tabela 6.3 e Tabela 6.4 encontram-se as distribuições granulométricas das graduações determinadas com areia industrial e natural, respectivamente. As nomenclaturas das composições apresentadas procederam-se da forma descrita no programa experimental.

A seguir mostram-se os resultados das composições de agregados modificadas, baseado na consideração dos limites obtidos neste trabalho, restringindo-se a análise à obtenção de composições do grupo G12.

**Tabela 6.3 - Composições de agregados industriais modificadas**

Abertura das peneiras (mm)	AIB12 mod	AId1B12 mod	AId2B12 mod	AId3B12 mod	AId4B12 mod	AIB12D1 mod
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
6,3	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4
4,75	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	0,0
2,36	5,8	6,3	0,0	6,4	6,2	13,7
1,18	7,8	0,0	9,1	13,2	10,8	8,5
0,60	14,5	17,0	15,4	25,1	0,0	15,0
0,30	21,3	25,0	22,3	0,0	29,9	21,8
0,15	6,0	7,0	6,8	10,3	8,3	6,4
Fundo	1,5	1,7	3,5	2,1	1,8	2,6

Fonte: Próprio Autor (2019)

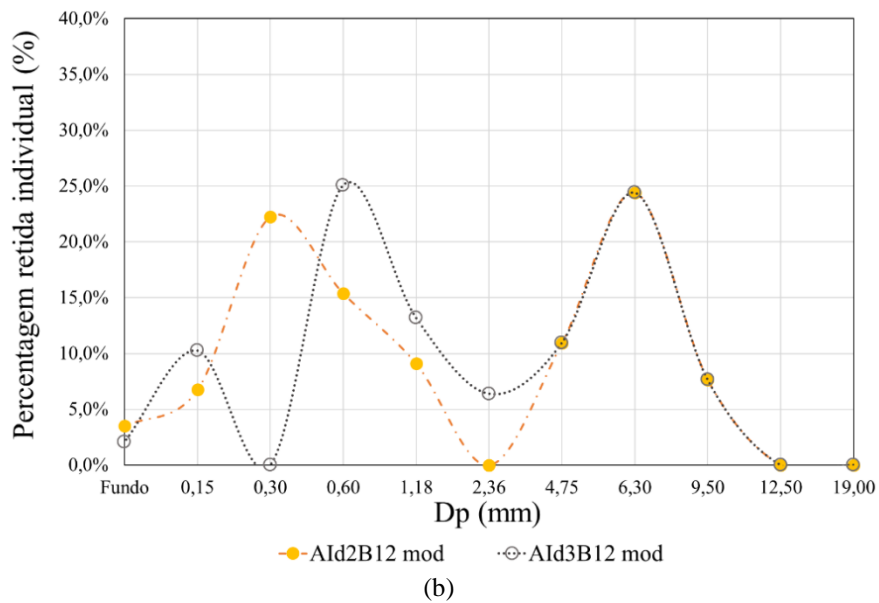
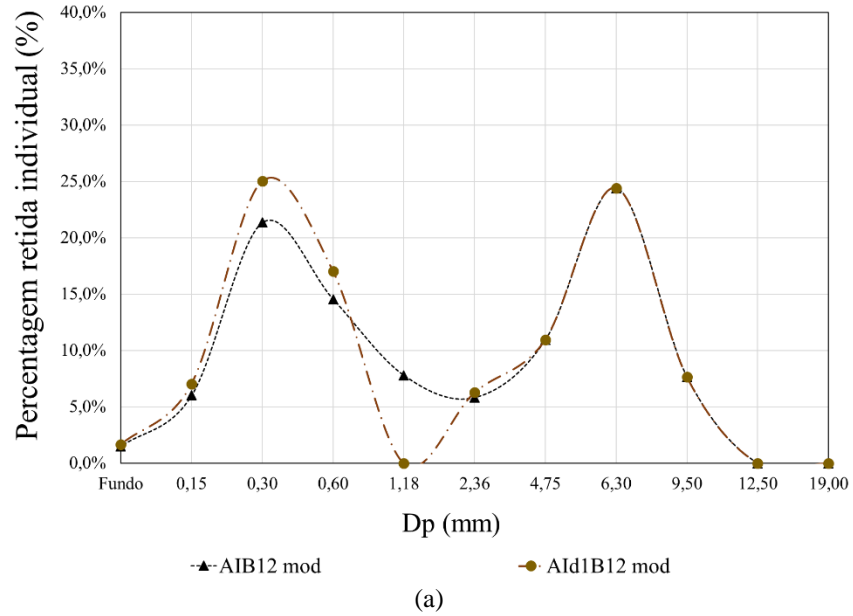
**Tabela 6.4 - Composições de agregados naturais e reciclados modificadas**

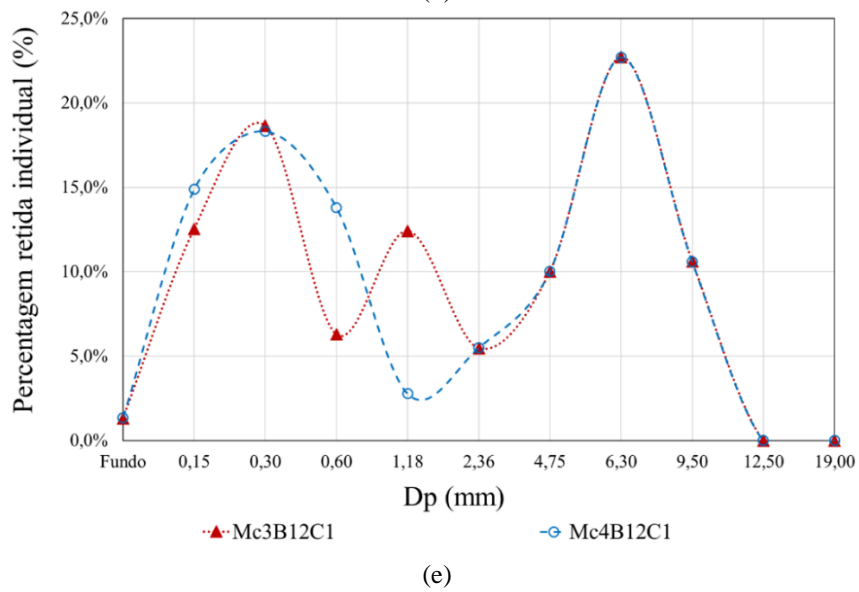
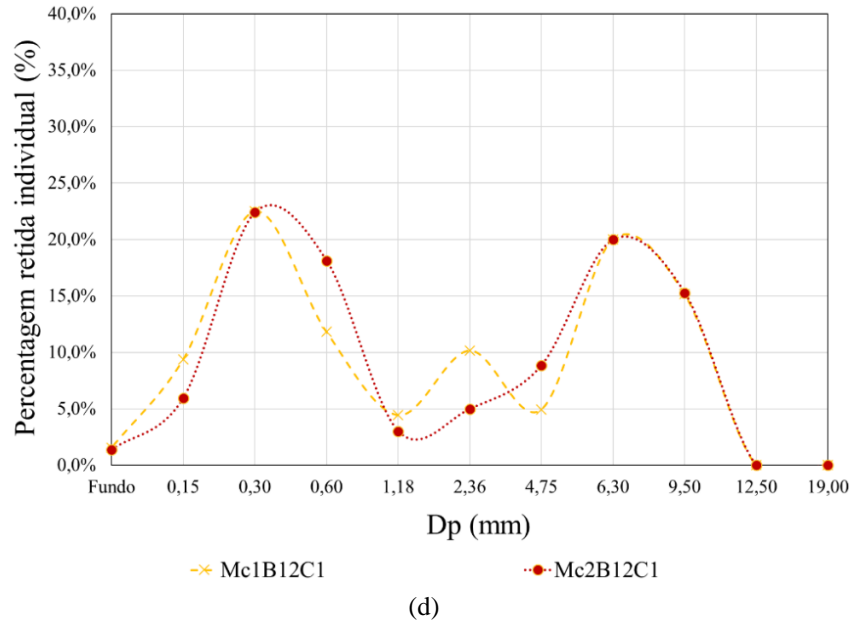
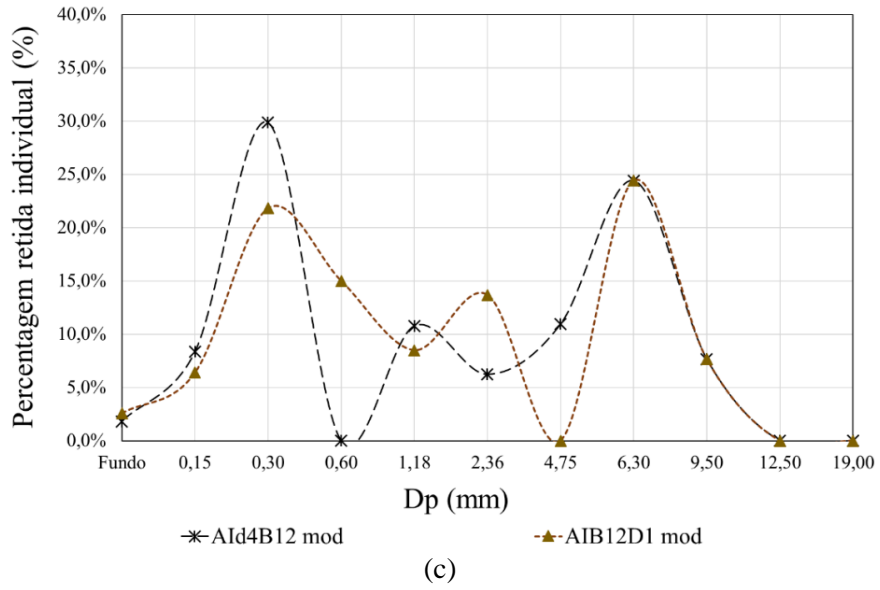
Abertura das peneiras	Mc1B12D1	Mc2B12D1	Mc3B12D1	Mc4B12D1	ARMARG12-45 mod	ARMARG12-50 mod
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	15,2	15,3	10,6	10,6	11,3	12,5
6,3	20,0	20,0	22,7	22,7	21,8	24,3
4,75	4,8	8,8	10,0	10,0	11,9	13,2
2,36	10,2	5,0	5,5	5,5	5,4	4,9
1,18	4,5	3,0	12,4	2,8	7,4	6,7
0,60	11,9	18,2	6,3	13,8	16,9	15,3
0,30	22,6	22,4	18,7	18,4	16,3	14,9
0,15	9,4	6,0	12,5	14,9	7,9	7,2
Fundo	1,6	1,4	1,3	1,4	1,0	1,0

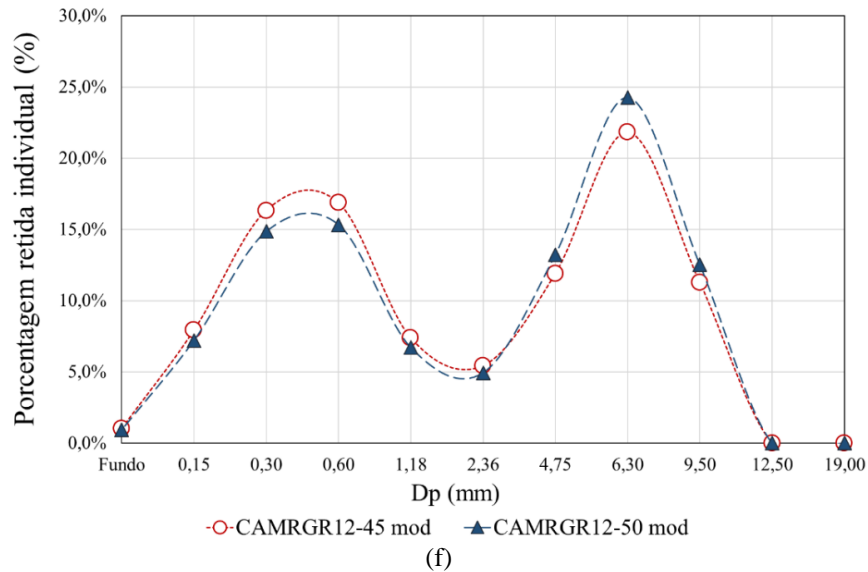
Fonte: Próprio Autor (2019)

Conforme visto na Tabela 6.3, as composições foram formuladas mantendo-se fixas as porcentagens retidas individuais (PRI) das frações graúdas, a fim de possibilitar uma análise minuciosa das frações miúdas. Para as graduações contidas na Tabela 6.4, foram consideradas as variações das PRI nas nove peneiras, englobando as frações tanto do agregado graúdo quanto do miúdo. Todas as graduações, nesta terceira etapa do estudo, foram modificadas, podendo constatar uma adequação das curvas granulométricas destes esqueletos granulares aos PGA que configuraram misturas com deformabilidades satisfatórias. As curvas granulométricas das composições binárias de agregados reformuladas com proporções e agregados distintos estão ilustradas na Figura 6.3.

**Figura 6.3 - Curvas de composições binárias de distribuição: a) contínua AIB12 mod e descontínuas AId1B12 mod, b) descontínuas: AId2B12 mod e AId3B12 mod, c) descontínua: AId4B12 mod e AIB12D1, d) contínuas: Mc1B12C1 e Mc2B12C1, e) contínuas: Mc3B12C1 e Mc4B12C1 e f) contínuas: ARMARG12, ARMARG12-45 mod e ARMARG12-50 mod**







Fonte: Próprio Autor (2019)

Observa-se, na Figura 6.3, que as novas formulações de composições de agregados para CAA tiveram suas PRI mais concentradas nas frações granulométricas dos agregados miúdos, ou seja, grãos menores, sendo favorável ao fluxo e a estabilidade da mistura.

A concentração de frações granulométricas dos agregados miúdos contrabalançado com as frações do agregado graúdo recai na teoria de separação de partículas graúdas pelas miúdas. Também reforça o estudo de que as distribuições contínuas, apesar de não serem exatamente contínuas, apresentam uma tendência à continuidade, sendo favorável ao fluxo das misturas de agregados. De certa forma, as partículas intermediárias contribuíram para esta tendência.

Analisando as distribuições das composições de agregados da terceira etapa do estudo, observa-se que tanto àquelas que apresentaram distribuições descontínuas quanto as que apresentaram distribuições contínuas, assemelharam-se no quesito redistribuição das partículas miúdas e graúdas. Por exemplo, em Mc1B12D1, as porcentagens retidas individuais (PRI) das frações #0,15 mm, #2,36 mm e #9,5 mm sobressaíram em relação às composições investigadas na primeira fase do estudo, entretanto, as demais frações acompanharam o crescimento das PRI, embora com menores concentrações.

Para mostrar a tendência dos PGA determinados em cada uma das graduações reformuladas, os resultados dos tipos de distribuições e os valores de  $I_v$ , PAG, CU e PDP estão apresentadas na Tabela 6.5.

**Tabela 6.5 - Composições de agregados com proporções e agregados distintos**

Composições de concretos	Tipo de distribuição (DG)	I <sub>v</sub> (%)	PAG (%)	CU	PDP
AIB12 mod	C	31,7	50	15,44	14,03
AId1B12 mod	D	31,9	50	16,39	14,03
AId2B12 mod	D	31,7	50	17,59	14,03
AId3B12 mod	D	33,1	50	19,45	9,79
AId4B12 mod	D	31,8	50	17,41	8,53
AIB12D1 mod	D	30,9	50	10,7	5,80
CARMARG12-45 mod	C	25,9	45	16,94	12,28
CARMARG12-50 mod	C	26,1	50	17,56	12,28
Mc1B12C1	C	30,9	50	16,66	7,27
Mc2B12C1	C	30,9	50	16,29	17,59
Mc3B12C1	C	29,6	50	20,71	17,59
Mc4B12C1	C	30,8	50	22,19	18,03

Fonte: Próprio Autor (2019)

Constatou-se que os estudos em concretos com composições de agregados modificadas foram capazes de alcançar a autoadensabilidade dentro dos intervalos de CU e PDP, cujos limites foram estabelecidos entre 9 e 23 para CU e entre 6 e 25 para PDP, aproximadamente, quantificados na seção anterior. Pode-se observar, também, que os índices de vazios das composições modificadas tenderam a aproximar-se de 31% para àquelas com areia natural, 32 % para às que continham areia industrial e 26 % para às que foram produzidas com agregados reciclados, resultantes da interferência da irregularidade e da dimensão dos grãos sobre o empacotamento.

### 6.3.1 Dosagem do CAA com as composições modificadas

Para o desenvolvimento da dosagem das misturas de concreto de composições binárias, contendo areia industrial (AI) ou natural (areia média – M) ou areia reciclada de concreto (ARM), como agregado miúdo, e pedra britada de dimensão máxima ou agregado graúdo reciclado de concreto (ARG) de 12,5 mm (B12), admitiu-se 40 % de volume de pasta por metro cúbico de concreto (Tabela 6.6). Os códigos dos concretos foram admitidos para nomeá-los de acordo com as composições, identificados pela modificação, continuidade ou descontinuidade.

**Tabela 6.6. - Dosagem de concretos com distintas composições de agregados contendo areia industrial**

<i>Materiais (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Composições de agregados para CAA (kg/m<sup>3</sup>)</i>		
	<i>Areia industrial</i>	<i>Agregados naturais</i>	<i>Agregados reciclados</i>
Cimento (kg)	394	394	394
*f/c = 0,50	197	197	197
a/c = 0,50	197	197	197
Superplastificante (30 % de teor de sólidos)	5,9	5,9	5,9
Areia média	-	807	-
Areia industrial	798	-	-
Agregado reciclado miúdo	-	-	753
Pedra britada com D <sub>máx</sub> = 12,5 mm	798	807	-
Agregado reciclado graúdo com D <sub>máx</sub> = 12,5 mm	-	-	753
Peso da mistura (kg/m <sup>3</sup> )	2405,0	2423,7	2408,4
V <sub>ag</sub> /V <sub>at</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,49	0,49	0,49
V <sub>ag</sub> /V <sub>c</sub> (%/m <sup>3</sup> )	29	30	29
V <sub>am</sub> /V <sub>at</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,51	0,51	0,51
V <sub>am</sub> /V <sub>c</sub> (%/m <sup>3</sup> )	31	30	31

Legenda: \*f/cimento – Filer de resíduo de blocos de mármore e granito/cimento; a/c: água/cimento; V<sub>at</sub> – Volume total de agregado; V<sub>c</sub> – Volume de concreto; V<sub>ag</sub> – Volume de agregado graúdo; V<sub>am</sub> – Volume de agregado miúdo.

Fonte: Próprio Autor (2019)

As proporções dos materiais (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo) estão de acordo com parâmetros de referência (PR) para dosagem de CAA (Quadro 3.1).

### 6.3.2 Propriedades de autoadensabilidade

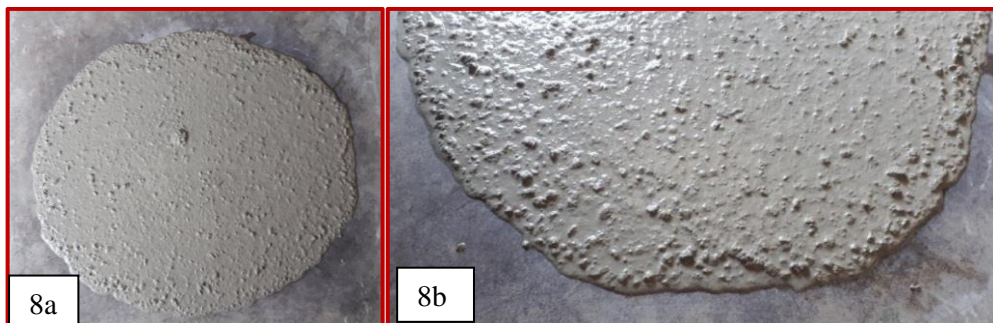
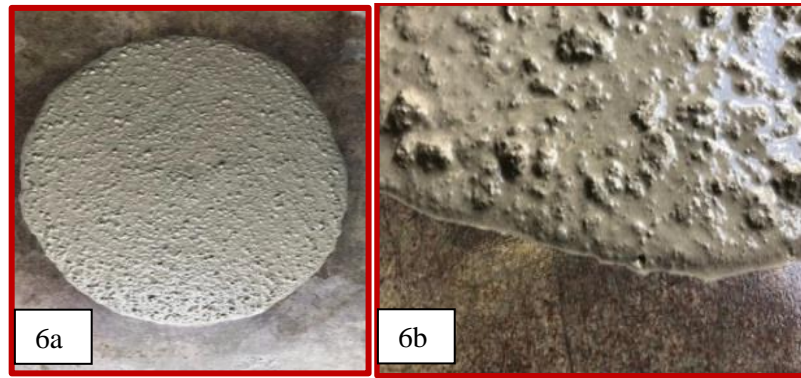
Os resultados dos ensaios de autoadensabilidade dos concretos com areia industrial, produzidos na terceira etapa, estão apresentados nas Figura 6.4 e Figura 6.5, considerando-se os limites apresentados na NBR 15823-1 (2017a).

**Figura 6.4 - Ensaio *Slump flow* dos CAA com detalhes do espalhamento (a) e da borda (b): CAId1B12 mod (1), CAId2B12 mod (2), CAId3B12 mod (3), CAId4B12 mod (4), CAIB12D1 mod (5), CAIB12 mod (6), CARMARG12-45 mod (7) e CARMARG12-50 mod (8)**









Fonte: Próprio Autor (2019)

As misturas de CAA formuladas com agregado miúdo do tipo areia industrial e agregados reciclados de concreto atenderam aos requisitos normativos da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). Pelo aspecto visual (Figura 6.4 e Tabela 6.7), percebe-se que todas apresentaram-se altamente estáveis, de acordo com a classe de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre), IEV 0. Apenas a mistura CAId2B12 mod enquadrou-se na classe SF 1 (550 a 650 mm), com os demais CAIB12 mod, CAId1B12 mod, CAId3B12 mod, CAId4B12 mod e CAIB12D1 mod, enquadrando-se na classe SF2 (660 a 750 mm). Na avaliação da habilidade passante pela caixa-L, sob fluxo confinando, foi possível constatar (Figura 6.5 e Tabela 6.7) que as misturas apresentaram resistência ao bloqueio e habilidade de preenchimento ao passar pelas três barras de aço, sem segregação.



Figura 6.5 - Ensaio *L-box* dos CAA: CAId1B12 mod (1), CAId2B12 mod (2), CAId3B12 mod (3) e CAId4B12 mod (4), CAIB12D1 mod (5), CAIB12 mod (6), CARMARG12-45 mod (7) e CARMARG12-50 mod (8)

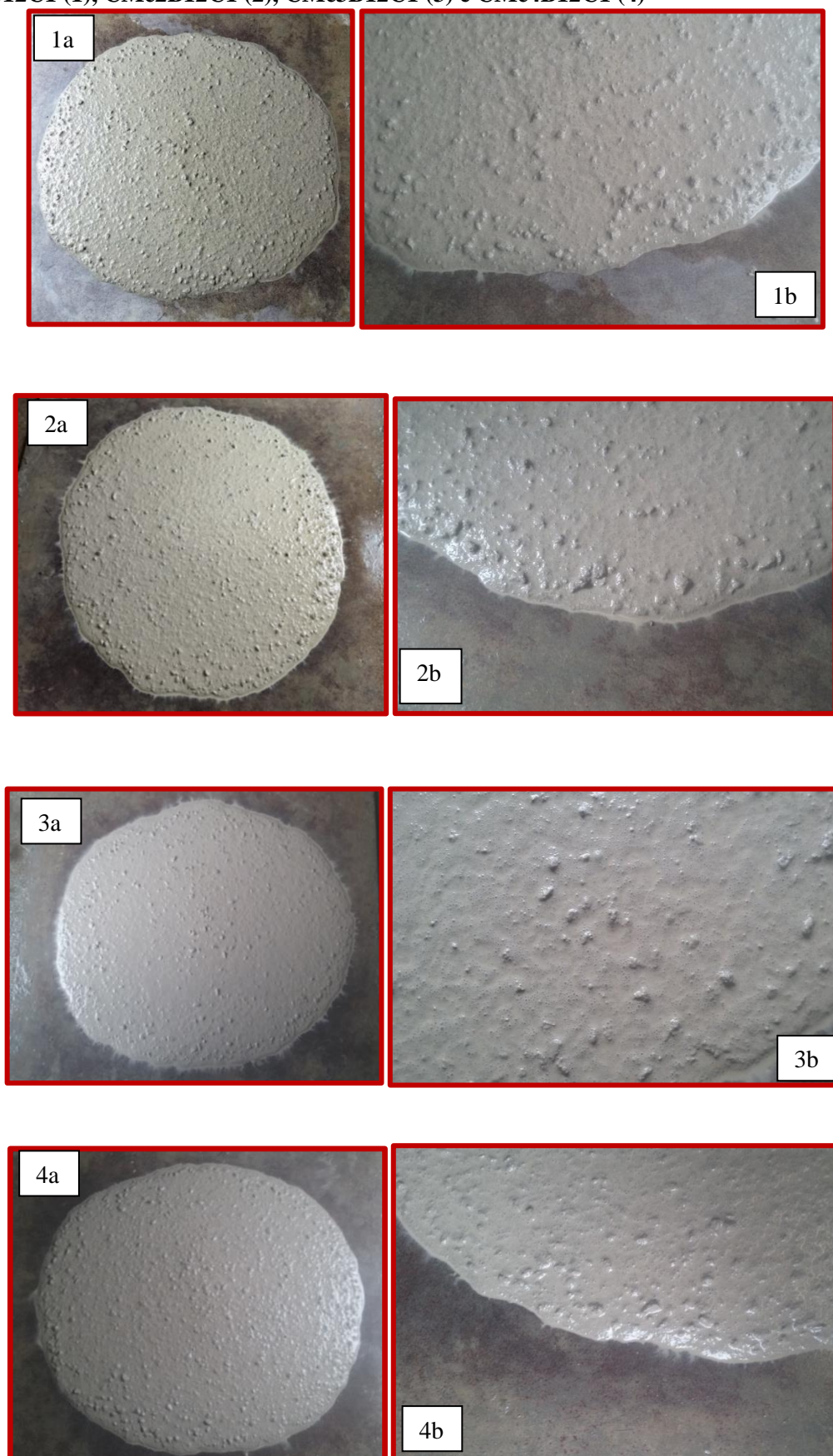


Fonte: Próprio Autor (2019)

No ensaio da caixa – L, as misturas enquadraram-se na classe PL 2 ( $> 0,80$ ), com satisfatória distribuição dos agregados graúdos na argamassa (Figura 6.5).

Misturas de concreto com areia natural também foram formuladas, a fim de verificar, se dentro das formulações desenvolvidas com areia natural, as composições também apresentariam características satisfatórias para obtenção das propriedades de autoadensabilidade (Figura 6.6 e Figura 6.7).

Figura 6.6 - Ensaio *Slump flow* dos CAA com detalhes do espalhamento (a) e da borda (b): CMc1B12C1 (1), CMc2B12C1 (2), CMc3B12C1 (3) e CMc4B12C1 (4)





Ao analisar os resultados apresentados na Figura 6.6, constatou-se que os CAA com areia natural apresentaram estabilidade da mistura, sem ocorrência de exsudação e segregação. Na avaliação da habilidade de preenchimento por meio do ensaio de espalhamento (*slump-flow test*), os diâmetros finais situaram-se entre 748 e 825 mm, enquadrando-os na classe de espalhamento SF 2 (660 a 750 mm) e SF3 (760 e 850 mm) e índice de espalhamento visual (IEV 0) altamente estável, alcançando os limites preconizados pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), conforme Tabela 6.7. Na avaliação da habilidade de passante pela caixa-L sob fluxo confinado (Figura 6.7), observou-se que os concretos atenderam aos requisitos normativos.

**Figura 6.7 - Ensaio *L-box* dos CAA: CMc1B12C1, CMc2B12C1, CMc3B12C1 e CMc4B12C1**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Como se pode observar na Figura 6.7, não houve a ocorrência de bloqueio que restringisse o movimento dos agregados. A pedra britada e a argamassa apresentaram-se bem distribuídas nas misturas. A relação das alturas ( $H_2/H_1$ ) dessas misturas de CAA foi maior que 0,80, devido à adequada viscosidade. No ensaio de funil V para avaliação da viscosidade, sob fluxo confinado, os concretos com agregados naturais enquadraram-se na classe VF 1 ( $VF < 9$ ). Para todas as formulações visualizadas neste estudo, constatou-se a importância de uma argamassa mais viscosa, que necessitava da presença de partículas mais finas para manter a suspensão de partículas mais grossas.

**Tabela 6.7 - Propriedades de autoadensabilidade dos concretos**

Composições dos concretos	ESPALHAMENTO		FUNIL V	CAIXA L (HP)
	SF (mm)	IEV	VF (s)	H2/H1
CAIB12 mod	741	0	9,1	0,93 (Sem bloqueio)
CAId1B12 mod	715	0	8,1	0,90 (Sem bloqueio)
CAId2B12 mod	609	0	12	0,71 (Sem bloqueio)
CAId3B12 mod	748	0	4,6	0,92 (Sem bloqueio)
CAId4B12 mod	706	0	8,5	0,90 (Sem bloqueio)
CAIB12D1 mod	666	0	18	1,0 (Sem bloqueio)
CARMARG-45 mod	770	0	5,7	1,0 (Sem bloqueio)
CARMARG-50 mod	763	0	20	1,0 (Sem bloqueio)
CMc1B12C1	748	0	7,3	1,0 (Sem bloqueio)
CMc2B12C1	755	0	6,0	1,0 (Sem bloqueio)
CMc3B12C1	825	0	5,7	0,90 (Sem bloqueio)
CMc4B12C1	781	0	7,0	1,0 (Sem bloqueio)

Fonte: Próprio Autor (2019)

No geral, todas as composições apresentaram distribuições homogêneas no parâmetro IEV e enquadraram-se na classe PL 2 ( $> 0,80$ ), com satisfatória distribuição dos agregados graúdos na argamassa. A exceção ocorreu na mistura CAId2B12 mod no parâmetro HP ( $< 0,80$ ). Possivelmente, isto ocorreu devido ao maior PRI abaixo de 150 micrômetros, resultando no aumento da viscosidade da pasta formada com maior quantidade de partículas finas. Tal resultado confirma a afirmação de Okamura e Ouchi (2003) da dificuldade da mistura se deformar quando se torna maior o teor de agregado miúdo e a angulosidade de suas partículas, em consequência da maior resistência ao cisalhamento da argamassa.

### 6.3.3 Propriedades do estado endurecido

A análise de desempenho no estado endurecido, realizada com os concretos produzidos na terceira etapa do estudo, foram, também, relacionadas aos resultados de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade aos 28 dias e às propriedades físicas, entre elas: ensaios de absorção de água por imersão (A), índice de vazios do concreto ( $I_{vc}$ ) e massa específica real ( $p_r$ ). Estas propriedades estão apresentadas na Tabela 6.8, com as medidas estatísticas de coeficiente de variação, referentes aos concretos produzidos com agregados naturais e industriais. Na análise dos resultados de  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$  foi utilizado o critério de Grubbs.

**Tabela 6.8 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos com composições modificadas**

Códigos dos concretos	$f_{ck}$ (MPa)		$E_{ci}$ (GPa)		A (%)		I <sub>vc</sub> (%)		$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	
	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)	Valores	CV (%)
CAIB12 mod	29,77	8,08	31,73	3,52	5,1	5,1	11,3	4,04	2,52	0,61
CAId1B12 mod	28,52	15,9	28,52	14,48	6,4	7,87	13,7	6,3	2,49	0,94
CAId2B12 mod	27,07	18,0	26,01	10,71	5,7	1,42	12,5	1,15	2,50	1,39
CAId3B12 mod	31,29	7,52	27,55	10,27	4,4	4,08	9,9	3,48	2,50	0,45
CAId4B212 mod	26,82	15,26	26,79	18,0	4,6	5,71	10,1	4,44	2,45	1,09
CAIB12D1 mod	23,88	8,74	24,15	2,78	6,3	9,8	13,24	2,22	2,51	2,03
CMc1B12C1	29,08	5,34	30,32	17,70	5,9	6,8	11,4	4,55	2,16	1,72
CMc2B12C1	26,76	10,60	29,55	14,70	5,1	2,14	9,7	2,60	2,16	2,16
CMc3B12C1	27,11	12,85	28,99	12,2	5,3	5,8	10,2	5,28	2,17	2,25
CMc4B12C1	23,35	9,98	32,52	18,35	5,9	8,38	11,3	7,15	2,16	2,87
CARMARG-45 mod	18,32	11,88	-	-	-	-	-	-	-	-
CARMARG-50 mod	27,50	3,54	-	-	-	-	-	-	-	-

CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao analisar a Tabela 6.8, nota-se que os concretos produzidos com agregados naturais e com industriais, obtiveram valores significativos tanto para a resistência à compressão axial, quanto para o módulo de elasticidade estático. Salienta-se que as diferenças entre os valores encontrados por ambos ensaios foram significativas. Os resultados mostraram que as modificações de acréscimo e/ou retirada de partículas de determinadas frações nas composições proporcionaram efeitos significativos nessas propriedades, atendendo-se as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014). CAId3B12 mod, que conteve uma descontinuidade d3 (passante na peneira # 0,60 mm e retido na peneira # 0,30 mm), feita com areia industrial (AI) e pedra britada de D<sub>máx</sub> de 12,5 mm (B12), obteve uma considerável diferença dos demais, com  $f_{ck} = 31,29$  MPa, possivelmente pelo aumento de partículas mais finas (abaixo de 0,15 mm) ter favorecido a redução do índice de vazios do concreto (I<sub>vc</sub>=9,9 %) e, conseqüentemente, a absorção (A=4,4%).

No geral, houve alguns casos isolados com  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$  com CV de 18,0%, mesmo assim, os resultados apresentaram uma boa homogeneidade das misturas de acordo com o critério de Grubbs. Tendo em vista que as frações maiores que #4,75 mm foram mantidas constantes nas composições com areia industrial, os valores de  $E_{ci}$  não apresentaram variações significativas, exceto em CAIB12D1 mod, devido a descontinuidade D1 (#6,3 - 4,75 mm), influenciando nos valores de  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$ . Observou-se uma pequena influência do agregado graúdo no aumento de  $E_{ci}$  das composições com agregado natural, possivelmente pelas modificações nas frações mais grossas.

Atenta-se ao fato de que o emprego de uma adição mineral com granulometria abaixo de 150 micrômetros, inserida na pasta de cimento, juntamente com as partículas finas da areia industrial (percentagem abaixo de 150 micrômetros igual a 14,5 %), contribuiu para uma melhor coesão e influenciou na obtenção de um melhor preenchimento dos vazios dos concretos.

Quanto aos valores de massa específica real dos CAA contendo AI e B12, verificou-se que se mantiveram significativamente próximos, sendo possível que isso tenha ocorrido por causa dos índices de vazios das composições descontínuas de agregados terem sido relativamente próximos, resultante da modificação do esqueleto granular. Os resultados de massa específica real desses concretos mostraram-se superiores, que podem ter sido influenciados pela modificação da estrutura granular, contribuindo, assim, para o melhor empacotamento dos grãos, quando comparados aos concretos produzidos com agregados naturais, também modificados.

No tocante ao índice de vazios dos concretos ( $I_{vc}$ ), observou-se que ficaram dentro da faixa de 10 a 15 %, enquanto a absorção (A) ficou dentro da faixa de 4,2 a 6,3, o que significa dizer que os CAA foram classificados como concretos normais, de acordo com Helene (1983). No geral, houve pequena variação dos resultados de A,  $I_{vc}$  e  $p_r$ . Os resultados experimentais mostraram uma boa homogeneidade das misturas.

#### **6.4 Aplicação do Modelo de Empacotamento de Partículas de Alfred**

Para as novas formulações de concretos contendo apenas areia industrial, outras com agregados naturais e duas outras contendo apenas agregados reciclados de concreto, foram também avaliados os valores-q, obtidos do ajuste não-linear, como também o coeficiente estatístico de determinação  $R^2$  resultante do ajuste de cada mistura de concreto com a curva teórica predita pelo modelo de Alfred (Tabela 6.9).



**Tabela 6.9 - Correlação entre  $q$  e  $R^2$  com as composições modificadas de CAA**

Composições de concreto	Parâmetros			Nível de atendimento do concreto às propriedades de autoadensabilidade
	Variáveis predictoras		Variável de resposta	
	PAG (%)	PDP	$q$ ( $R^2$ )	
Grupo 12,5 mm				
CAIB12 mod	50	14,03	0,224 (0,991)	<b>Alto</b>
CAId1B12 mod	50	14,03	0,215 (0,986)	<b>Alto</b>
CAId2B12 mod	50	14,03	0,210 (0,988)	<b>Alto</b>
CAId3B12 mod	50	9,79	0,236 (0,991)	<b>Alto</b>
CAId4B12 mod	50	8,53	0,209 (0,984)	<b>Alto</b>
CAIB21D1 mod	50	5,80	0,226 (0,991)	<b>Alto</b>
CMc1B12C1	50	7,27	0,216 (0,987)	<b>Alto</b>
CMc2B12C1	50	17,59	0,222 (0,988)	<b>Alto</b>
CMc3B12C1	50	17,59	0,232 (0,989)	<b>Alto</b>
CMc4B12C1	50	18,03	0,210 (0,988)	<b>Alto</b>
CARMARG12-45 mod	45	12,28	0,238 (0,994)	<b>Alto</b>
CARMARG12-50 mod	50	12,28	0,243 (0,992)	<b>Alto</b>

Fonte: Próprio Autor (2019)

Em geral, observa-se que os coeficientes de determinação apresentaram valores próximos a  $R^2 = 1$ , destacando-se as composições de distribuições descontínuas com valores mais distantes do valor máximo.

O efeito das modificações das composições causou uma redistribuição de partículas no esqueleto granular, evidenciando misturas com agregados industriais menos empacotadas e maior fluidez, conforme os resultados de IEV e caixa – L. Menores valores- $q$ , compreendidos entre 0,209 e 0,236, foram alcançados com a otimização das composições, tornando-as com maior estabilidade e fluidez satisfatória. Da mesma forma, continuidade e descontinuidade das composições de agregados não apresentaram grandes diferenças do ponto de vista do valor- $q$ .

Pode-se verificar que a tentativa de modificar as distribuições granulométricas das composições com areia industrial com configurações mais próximas das formuladas com areia natural, resultaram em valores de PDP em torno de 12,28 e 18,03. Isso se deu na simulação numérica de CAIB12 mod, CAId1B12 mod, CAId2B12 mod, CMc2B12C1, CMc3B12C1, CMc4B12C1, CARMARG12-45 mod e CARMARG12-50 mod, levaram em consideração à porcentagem de partículas mais finas e mais grossas localizadas em intervalos distantes. Como partículas mais finas foram inseridas, levou a redução do valor- $q$ . As configurações de graduações de agregados que apresentaram menores PDP (entre 5,80 e 9,79), evidenciaram a maior porcentagem de partículas retidas individuais (PRI) em frações adjacentes situadas na faixa intermediária, como o que ocorreu em CAId3B12 mod, CAId4B12 mod, CAIB12D1 mod e CMc1B12C1 (Figura 6.3). Tal resultado mostrou que a presença de partículas finas do agregado miúdo com maiores PRI e a limitação do PAG, bem como da dimensão máxima do

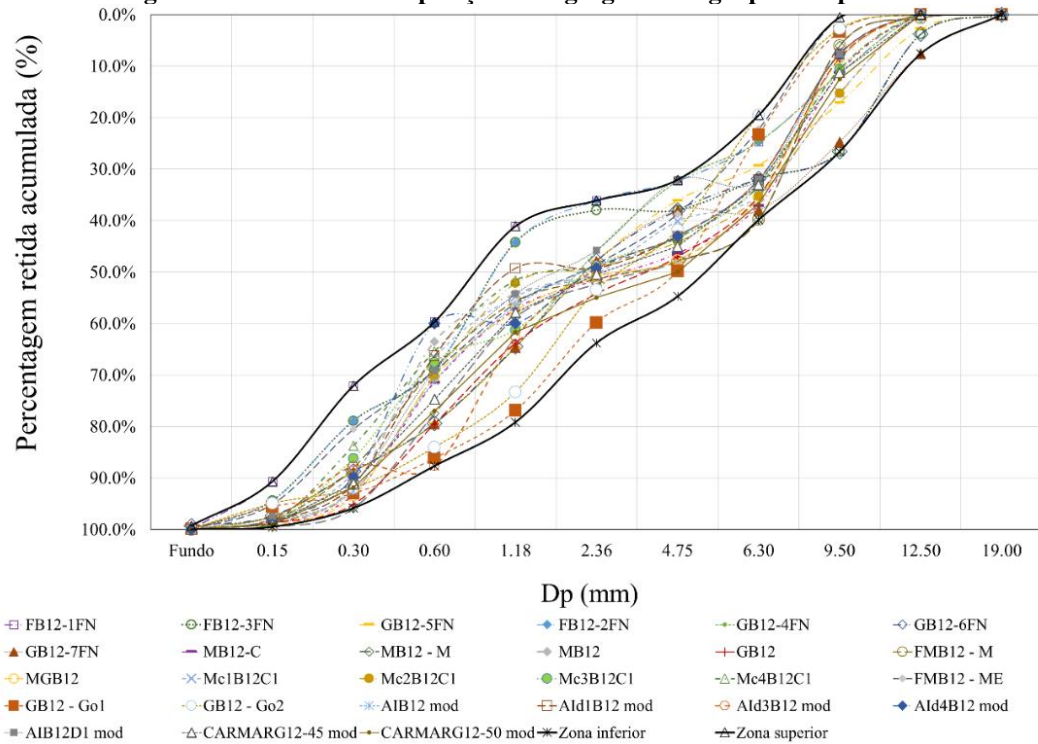
agregado graúdo, não causaram significativa variação do valor- $q$ , mantendo a fluidez e estabilidade desejada para CAA. A simulação realizada para avaliar o ajuste das curvas teórica e experimental dos CAA está contida no Apêndice B. Ocorreram maiores desvios em trechos que apresentaram descontinuidades das composições, mas também se verificou a diminuição dos desvios nos intervalos de partículas finas, comum em todas as misturas.

A seguir são apresentadas as zonas granulométricas desenvolvidas para os grupos B12 e B19, com o intuito de auxiliar na simulação de composições de agregados para CAA conforme a limitação do tamanho do agregado graúdo (12,5 mm e 19,0 mm).

### **6.5 Zonas Granulométricas para as Composições de Agregados**

A definição de duas zonas granulométricas específicas de composições de agregados para CAA é definida neste item, limitando-se o tamanho de agregado graúdo para os grupos G12 ( $D_{máx}$  de 12,5 mm) e G19 ( $D_{máx}$  de 19,0 mm). A motivação para desenvolver zonas específicas destes dois grupos deveu-se à possibilidade de analisar como os esqueletos granulares aplicados ao CAA se distribuem em relação aos diâmetros de partículas ( $D_p$ ), em milímetros, ou seja, referentes aos diâmetros de abertura de peneiras fixados neste estudo. Para isso, fez-se uma compilação de dados de diferentes esqueletos granulares na literatura, buscando-se melhor representatividade, como está sendo ilustrado nas Figura 6.8 e Figura 6.9.

**Figura 6.8 - Zonas granulométricas de composições de agregados do grupo G12 para CAA**

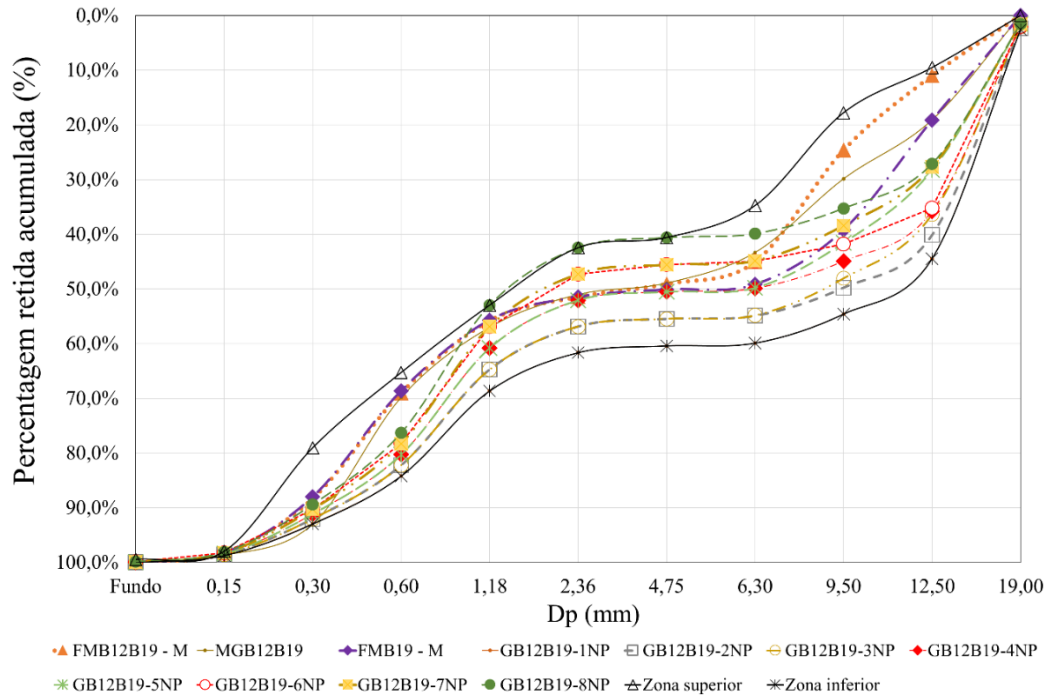


Fonte: Próprio Autor (2019)

Os critérios estabelecidos, para que as composições de agregados fossem enquadradas entre as zonas granulométricas, foram atendidos, isto é, as características de fluidez dos CAA produzidos com materiais e dosagens diferentes foram adequadas, atendendo-se, também, as propriedades mecânicas, conforme a literatura. As curvas granulométricas de cada esqueleto granular apresentaram-se situadas, praticamente, no centro das zonas, quando analisado entre as partículas miúdas de maior predominância de #0,15 a 0,6 mm, destacando-se a predominância nas frações #0,30 e #0,60 mm.

Visando as partículas grossas, as curvas tenderam a se aproximar da zona superior entre #6,3 e #9,5 mm (gráudo), sendo a primeira de maior predominância. Poucas foram as graduações de agregados que se aproximaram da zona superior, entre as peneiras #0,15 e #0,60 mm, em comparação com às que obtiveram menor predominância dessas partículas.

**Figura 6.9 - Zona granulométrica de composições de agregados do grupo G19 para CAA**

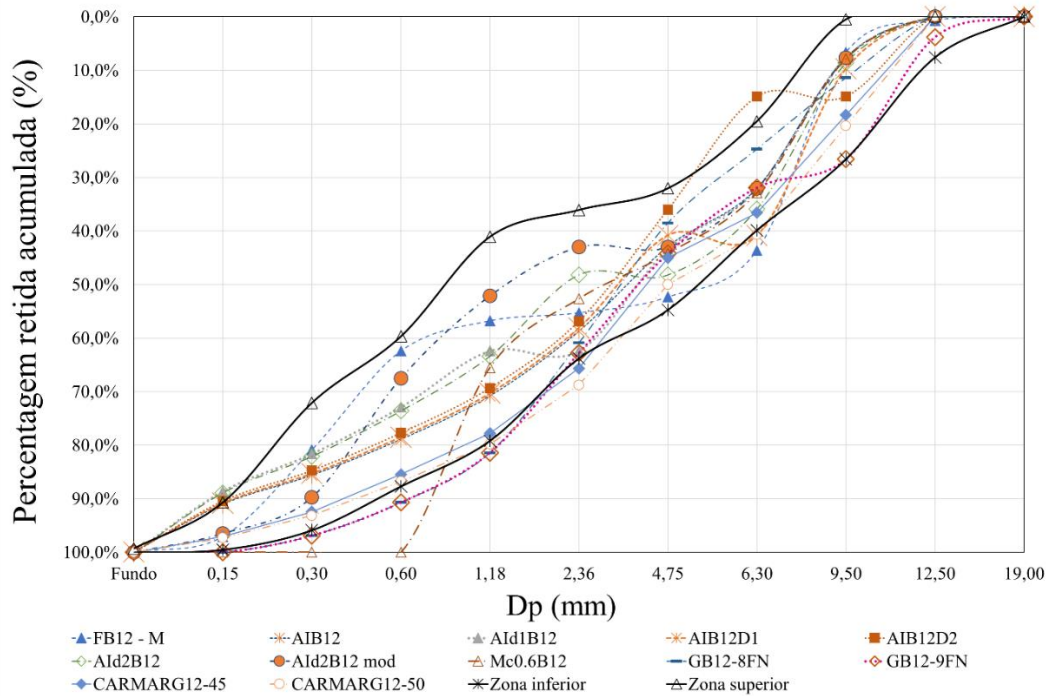


Fonte: Próprio Autor (2019)

Prosseguindo com a investigação da predominância de partículas em composições de agregados, a mesma análise foi feita com esqueletos granulares com o diâmetro máximo do agregado graúdo de 19,0 mm. No grupo G19, tanto os esqueletos granulares produzidos no experimento, quanto àqueles obtidos na literatura, desempenharam-se satisfatoriamente no estado fresco. Nota-se que, devido à predominância das partículas miúdas em #0,15 e #0,30 mm serem menores, as curvas tenderam a se aproximar da zona inferior; acima destas frações, elas tenderam a aumentar a predominância de partículas miúdas em #0,60 mm. A tendência à descontinuidade logo ocorre após a fração #1,18 mm, entretanto, a redução da predominância de partículas a partir desta fração até #6,3 mm é compensada com a maior concentração de partículas nos diâmetros #9,5 mm e #12,5 mm. Isso torna a mistura mais equilibrada ao promover uma distribuição mais bem graduada, sem excessos de frações grosseiras, uma vez que diâmetros maiores de agregado graúdo no CAA indicam tendências à segregação da mistura, caso não haja um maior controle na distribuição de partículas miúdas e graúdas.

Do estudo desenvolvido, a questão da predominância de partículas foi ressaltada, também, na análise das composições de agregados que não foram condizentes para CAA, fato que foi mostrado pela dificuldade das curvas granulométricas se enquadrarem dentro das zonas granulométricas, conforme visto na Figura 6.10.

**Figura 6.10 - Zona granulométrica de composições de agregados (grupo G12) não condizentes para CAA**



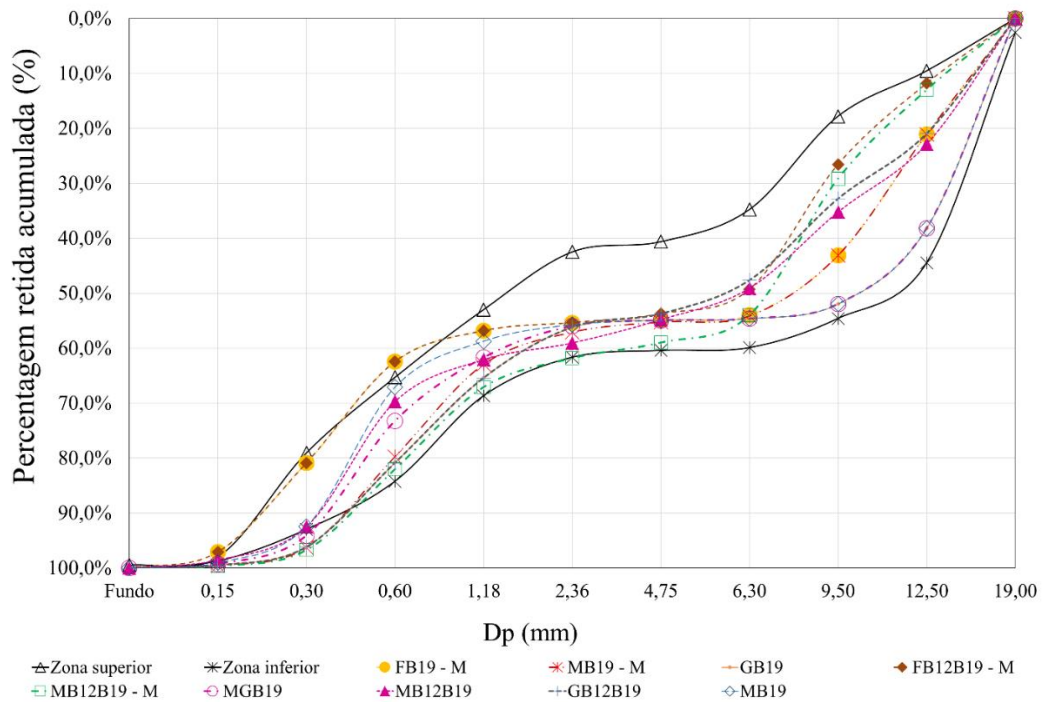
Fonte: Próprio Autor (2019)

A partir destas curvas constatou-se que a questão da menor predominância de partículas miúdas, ou seja, mais próximas da zona inferior, e até fora desta, pode acarretar propriedades do estado fresco não satisfatórias para CAA. Isso se mostra mais claro com a maior predominância de partículas intermediárias #1,18 e #2,36 mm em composições que apresentaram um decaimento de partículas miúdas abaixo de #1,18 mm. Isto valida a comparação dos resultados experimentais de diferentes granulometrias para CAA, uma vez que a falta de adequação ao CAA ressalta a influência dos agregados em suas propriedades, fato esse ocorrido, especificamente, em composições que apresentaram menores PDP ( $6 < PDP < 25$ ) e menores CU ( $9 < CU < 23$ ).

Da mesma forma, fez-se a análise das composições que não atenderam à autoadensabilidade, nas quais pode-se perceber no gráfico (Figura 6.11), que a maior descontinuidade das distribuições e a maior predominância de partículas acima de #9,5 mm, dificultaram as misturas de obterem adequada estabilidade. Neste ponto, o projeto granulométrico de composições com maiores dimensões de agregados graúdos, não só deve analisar a porcentagem de agregado graúdo (PAG), como também a influência de determinados tamanhos de partículas no esqueleto granular, principalmente nas frações intermediárias, nas quais ocorre a necessidade de aumentar a porcentagem retida individual ou, até mesmo, limitar a concentração em diâmetros de partículas graúdas em situações em que a granulometria de

agregados miúdos concentrarem-se em tamanhos muito pequenos (desse modo pode tornar os tamanhos das partículas mais próximos), que não seja adequado para o CAA a redução ainda maior do índice de vazios.

**Figura 6.11 - Zona granulométrica de composições de agregados do grupo G19 não condizentes para CAA**



Fonte: Próprio Autor (2019)

Com os resultados obtidos acima, pode-se comparar visualmente, em termos de distribuição granulométrica contínua e descontínua, a estabilidade da mistura, além dos parâmetros de graduação correspondentes a cada uma, tendo em vista que nem todos os parâmetros foram atendidos ao mesmo tempo, mas que a questão da predominância de partículas tem refletido nos resultados experimentais, como comprovado na literatura.

## 6.6 Conclusão

Considerando-se a avaliação realizada sobre a quantificação da variável de predominância de diâmetros de partículas (PDP), a possibilidade de análise das distribuições granulométricas (DG) contínuas (C) e descontínuas (D), a fixação da porcentagem de agregado graúdo (PAG) e, posteriormente, a aplicação dos PGA determinados previamente para o estabelecimento da proposta destes, pode-se ressaltar o seguinte:

a) Em termos de simulação de composições de agregados com diferentes tipos, mostrou-se vantajosa pela possibilidade de serem desenvolvidas proporções de agregados segundo a representatividade das frações miúdas e graúdas. Com o estabelecimento do critério das porcentagens retidas individuais (PRI) para o cálculo de PDP - razão entre os diâmetros médios graúdo e miúdo -, a dominância das partículas finas e a limitação de partículas mais grossas tornaram-se mais destacadas, gerando-se um entendimento de aproximação e distanciamento dos diâmetros predominantes na curva granulométrica;

b) A utilização de PRI de frações miúdas iguais e acima de 10% e PRI de frações graúdas com diferenças menores que 10% teve a finalidade de preservar a presença dos grãos no sistema granular. Tal avaliação, traduzida nas composições modificadas, assegurou o atendimento das propriedades no estado fresco do CAA, além de constatar que quanto maior a descontinuidade de uma distribuição, mais a mistura tenderá a apresentar-se com perda de estabilidade. Ao ser identificado que as frações intermediárias, geralmente com menores PRI, assumem porcentagens acima ou igual a 10%, a curva de distribuição se torna fechada, entretanto é preciso considerar as dominâncias das partículas acima de #150  $\mu\text{m}$  e abaixo de #0,60 mm para garantir menor fricção entre os grãos;

c) A construção de curvas granulométricas das composições de agregados para o entendimento das modificações desenvolvidas mostrou-se determinante para a comprovação dos PGA que se enquadraram à autoadensabilidade do CAA, fato constatado na adequação às zonas granulométricas definidas para as composições de agregados.

## 7 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS

Uma técnica estatística multivariada conhecida como análise de componentes principais (ACP) foi aplicada, cuja finalidade básica consistiu em agrupar os indivíduos (amostras dos concretos avaliados e modificados no presente estudo) segundo a variação de suas características em relação ao conjunto de dados. Dessa forma, tal técnica possibilitou analisar e interpretar esta variação dos indivíduos agrupados a partir de uma combinação linear de todas as variáveis originais (VARELLA, 2008). Este capítulo é dedicado a avaliação estatística dos parâmetros, na qual todas as variáveis originais foram combinadas, algebricamente, combinadas em componentes principais, reunindo as propriedades importantes.

### 7.1 Interpretação da relação entre os parâmetros de graduação de agregados para CAA

A aplicação da ACP se deu com dados de composições formadas por esqueletos granulares, cujas maiores dimensões dos agregados graúdos ( $D_{máx}$ ) corresponderam a 12,5 mm (Grupo G12). Na análise, foram consideradas tanto as graduações desenvolvidas neste trabalho quanto às encontradas na literatura. Um total de 36 dados de composições de agregados foram incluídas, sendo retiradas de Monteiro *et al.* (2015), Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017), Cavalcanti (2006), Melo (2005) e Gomes (2002). No Apêndice D estão apresentados esses dados. A decisão de utilizar dados experimentais de outros estudos reforçou a investigação dos PGA, sendo uma prática adotada na literatura.

Para isso, a análise estatística PCA foi modelada na dimensão  $R^6$ , definidas com seis variáveis:  $X_1$  – predominância de diâmetros de partículas (PDP),  $X_2$  – coeficiente de uniformidade (CU),  $X_3$  – porcentagem de agregado graúdo (PAG),  $X_4$  – diâmetro de espalhamento (*slump flow* – SF),  $X_5$  – tempo de fluidez no funil V (VF),  $X_6$  – habilidade de passagem (HP). A respeito da variável de resposta IEV decidiu-se não a incluir por não ser medida em alguns casos e apresentar-se, em geral, como altamente estável (classe “0”). Para modelagem, foi utilizado o *software Statistica* versão 13.

As variáveis sofreram um pré-processamento, denominado de autoescalamento e normalização, em uma escala variando de 0 a 1, que consiste em transformar as variáveis na escala  $z$  (média = 0; variância = 1), a fim de atribuí-las um mesmo peso uma vez que as variáveis diferem em ordem de grandeza (ZHOU *et al.*, 2007).

Neste trabalho, foram escolhidas as componentes principais que representaram juntas mais que 70% da variação total. Os resultados dos autovalores, bem como a porcentagem de



variação explicada e a variância acumulada por cada uma das 6 componentes, em ordem decrescente, estão contidas na Tabela 7.1 e na Figura 7.1, para o grupo G12.

**Tabela 7.1 - Número de componentes principais (CP), autovalores ( $\lambda_i$ ) e percentual da variância explicada de cada componente e proporção acumulada (%) pelos componentes para o grupo G12**

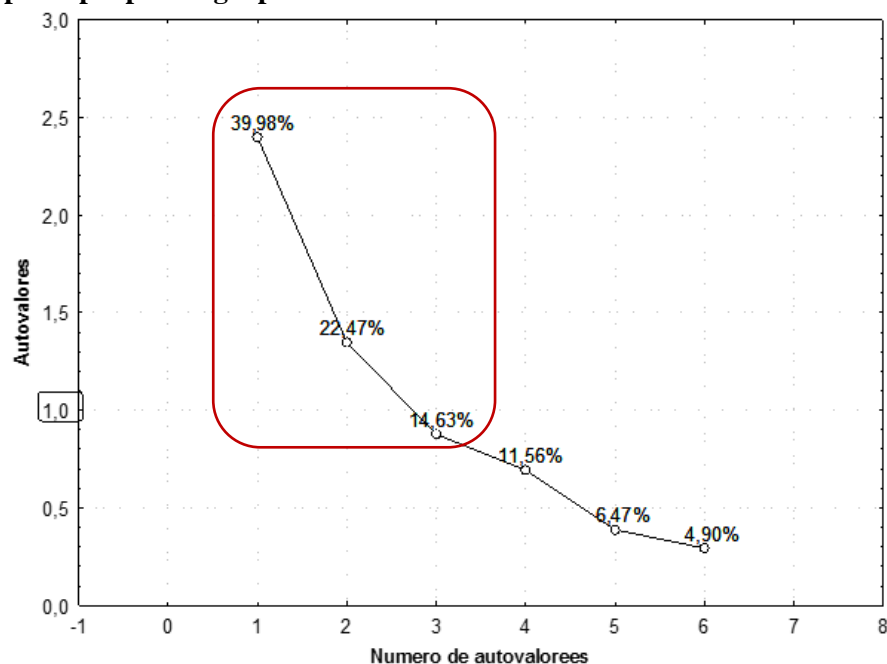
Componente principal	Autovalores	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
1	2,3990	39,9831	39,9831
2	1,3479	22,4653	62,4484
3	0,8776	14,6259	<b>77,0743</b>
4	0,6936	11,5604	88,6347
5	0,3882	6,4693	95,1040
6	0,2938	4,8960	100,0000

Fonte: Próprio Autor (2019)

Os três primeiros autovalores representaram, juntos, cerca de 77,07 % da variância. Portanto, os dados foram resumidos por três componentes principais (CP). Por meio dessas CP, pode-se decidir qual o nível de explicação conseguiu de seus dados. Logo, viu-se que a primeira componente representou 39,98 % da variância, enquanto que a segunda e a terceira componente representaram 22,47 % e 14,63 % da variabilidade dos dados, respectivamente.

Na Figura 7.1, representa-se o método gráfico *Scree plot*, com o número de autovalores e a porcentagem de variação explicada pelos componentes, em ordem decrescente.

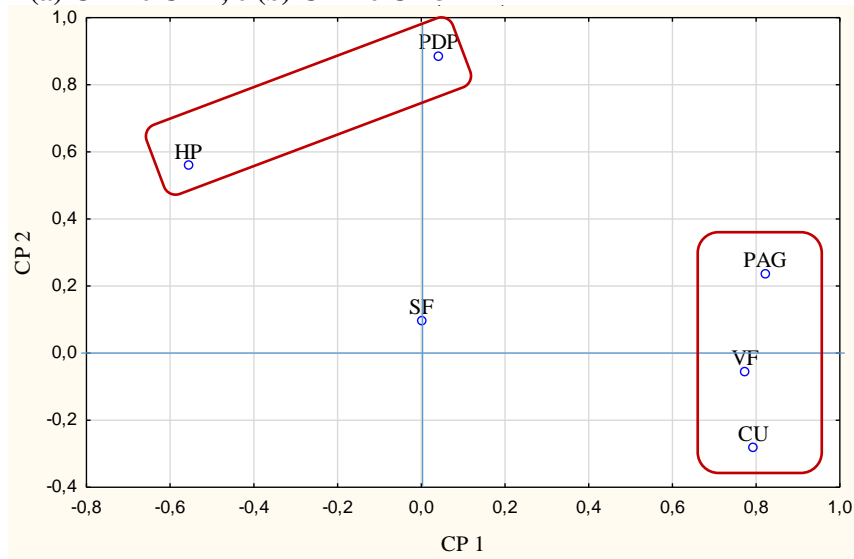
**Figura 7.1 - *Scree plot* dos autovalores explicando as proporções de variação derivadas de cada componente principal para o grupo G12**



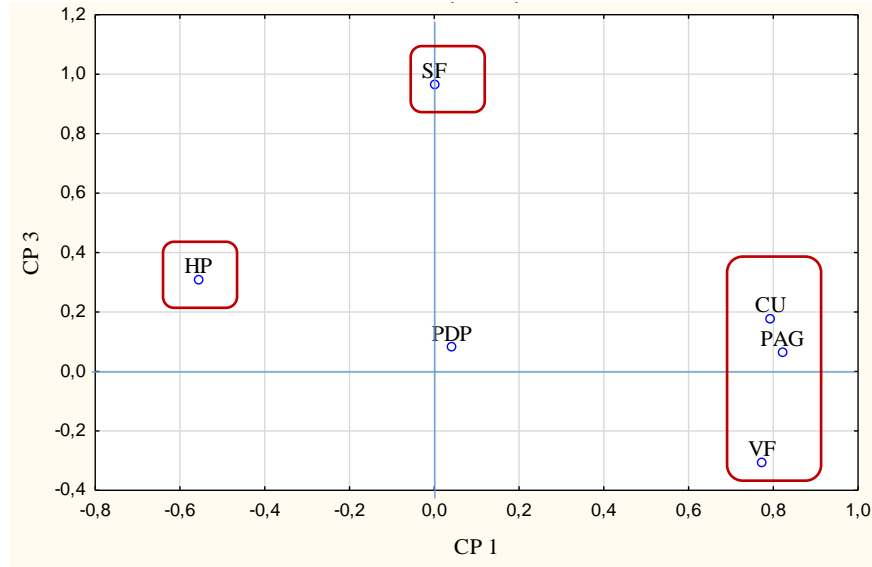
Fonte: Próprio Autor (2019)

Observa-se que até a terceira componente foi detectado uma maior explicação dos dados e houve uma certa estabilização do gráfico a partir da quarta componente, obtendo-se, neste ponto em diante, uma baixa explicação não utilizada na análise. Como o que se pretendia era determinar, em cada combinação linear, um conjunto de variáveis que pudesse representar cada CP, recorreu-se a rotações dos eixos para melhor visualização da disposição dos pontos. A rotação mais utilizada é a *Varimax normalized*, sendo esta a que mantém os eixos perpendiculares entre si. Essa rotação possibilitou uma melhor visualização das componentes, contendo proporções de variação das variáveis melhor representadas, destacados em cada CP. A composição das CP obtidas em função das variáveis originais após a rotação dos eixos é vista na Figura 7.2 e na Tabela 7.2.

**Figura 7.2 - Planos fatoriais contendo a composição das CP com as variáveis originais para o grupo G12 com (a) CP 1 e CP 2, e (b) CP 1 e CP 3**



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor (2019)

Nota-se, nos gráficos dos pesos (Figura 7.2) e na Tabela 7.2, que as variáveis obtiveram cargas maiores que 0,50 (MATIATOS *et al*, 2016) nas três componentes. Conforme a disposição das variáveis, as que melhor explicaram ou representaram a CP 1, foram aquelas que se localizaram mais distantes da origem, em relação ao eixo x, ou seja, foram as combinações de CU (coeficiente de uniformidade), PAG (porcentagem de agregado graúdo), VF (tempo de fluidez) e HP (habilidade de passagem). O coeficiente CU tem o mesmo sinal de VF e PAG e sinal contrário ao de HP. Isto está condizente com a disposição destas variáveis na CP 1, já que os ensaios de fluidez (que avalia a viscosidade aparente do CAA) e habilidade passante, são afetados pela elevada descontinuidade da mistura e a maior concentração de agregado graúdo.

Na CP 2, as variáveis representativas foram PDP (predominância de diâmetros de partículas) e HP (habilidade de passagem). A PDP apresenta o maior peso, contribuindo mais para a CP 2. Assim, tem-se razões para comprovar que a CP 2 modela o comportamento uniforme da mistura, influenciando o desempenho do CAA na resistência ao bloqueio. Adicionalmente, a componente CP 3, modela a fluidez do CAA, devido a variável SF apresentar o maior peso.

Observa-se que, na CP 1, as variáveis CU, PAG e VF estão claramente associadas entre si, bem como PDP e HP na CP 2. Na CP 1, estas variáveis agrupadas foram representativas da uniformidade do concreto. Na CP 2, são representativas da predominância de partículas.

**Tabela 7.2 - Composição das componentes principais com as variáveis originais para o grupo G12**

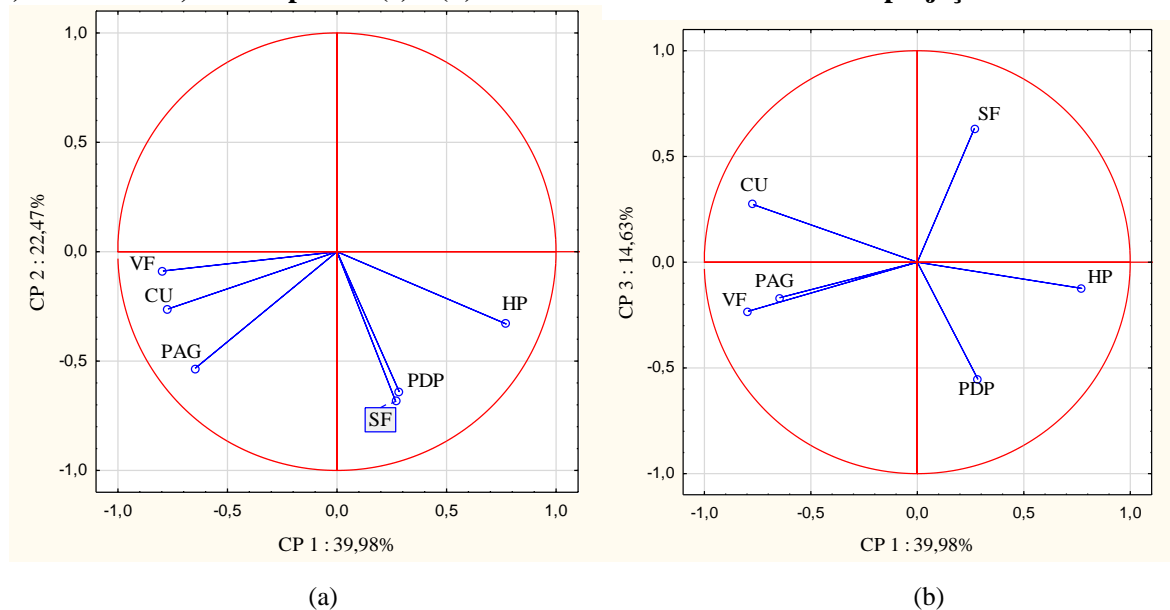
Variáveis originais	Componentes principais		
	CP 1	CP 2	CP 3
PDP	0,05507	<b>0,88735</b>	0,06244
CU	<b>0,78776</b>	-0,29060	0,18964
PAG	<b>0,82380</b>	0,22675	0,06412
SF	-0,00369	0,11759	<b>0,96240</b>
VF	<b>0,77471</b>	-0,07333	-0,29951
HP	<b>-0,54927</b>	<b>0,57499</b>	0,29545

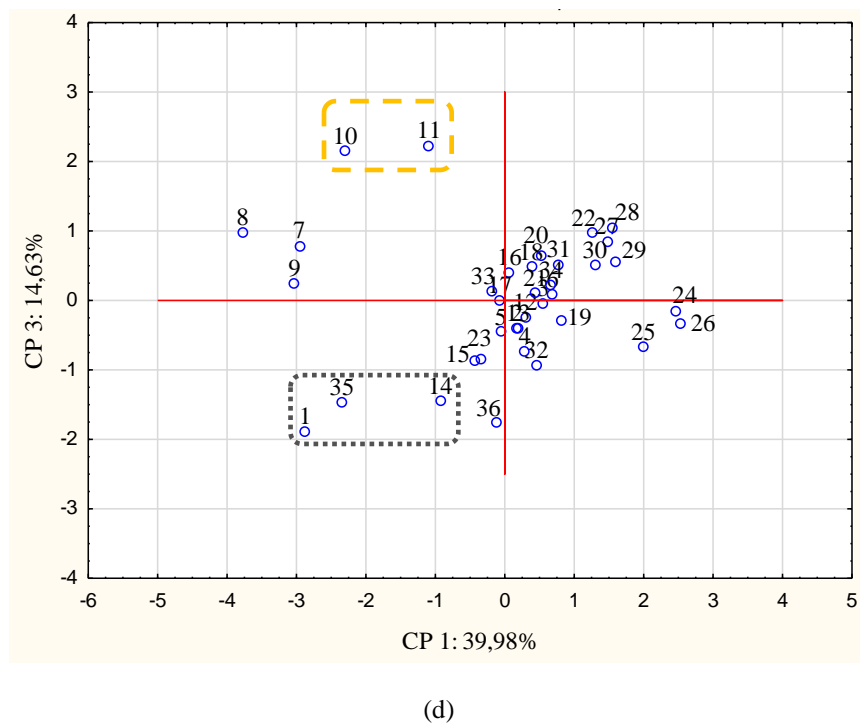
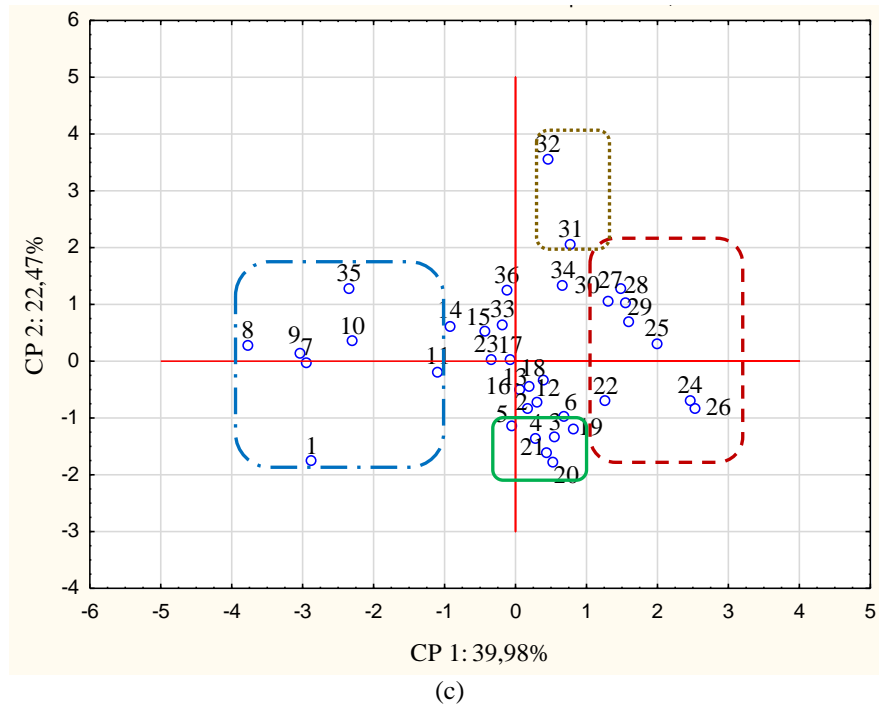
Fonte: Próprio Autor (2019)

Tendo em vista os resultados obtidos dos *factor loadings*, a análise de componentes principais possibilitou a identificação das variáveis que apresentaram alta representatividade. Percebe-se que os pesos têm todos os sinais trocados para cada componente principal, pois os pesos são autovetores normalizados da matriz de covariância.

Na Figura 7.3, mostram-se as projeções espaciais, com a dispersão de variáveis, sendo possível identificar, visual e quantitativamente (vide os dados no Apêndice C), quais variáveis estiveram relacionadas com as amostras em estudo. As variáveis próximas ao círculo unitário possuem maior contribuição.

**Figura 7.3 - Projeções espaciais da ordenação dos vetores das variáveis para (a) CP 1 e CP 2, e (b) CP 1 e CP 3, e de dispersão (c) e (d) dos escores das amostras nestas projeções**





Fonte: Próprio Autor (2019)

Na CP 1, Figura 7.3 a, observa-se que a variável CU (coeficiente de uniformidade) correlacionou-se diretamente com PAG (porcentagem de agregado graúdo) e VF (tempo de fluidez); e inversamente com HP (habilidade passante). Na CP 2, PDP (predominância de diâmetros de partículas) correlacionou-se diretamente com SF (espalhamento) e inversamente com PAG. Em seguida, tem-se a CP 3, sendo constatado PDP se correlacionando diretamente com SF, também (Figura 7.3 b).

No gráfico dos escores, Figura 7.3 c, pode-se concluir que, na CP 1 (à direita do gráfico), um grupo de pontos (amostras), linha vermelha e tracejada, correlacionou-se diretamente com HP, e inversamente com VF, CU e PAG. À esquerda do gráfico, um grupo de pontos (amostras), linha azul e traço-ponto, correlacionou-se diretamente com as variáveis VF, CU e PAG, e inversamente com HP.

Na segunda componente principal (CP 2), observa-se, embaixo do gráfico (Figura 7.3 b), um grupo de amostras (linha verde e cheia) que se correlacionou diretamente com as variáveis SF, PDP e PAG. Acima do gráfico, um grupo de amostras (linha marrom pontilhada) correlacionou-se inversamente com as variáveis SF, PDP e PAG, por possuir os menores valores destes parâmetros no conjunto das amostras.

Na terceira componente (CP 3), notou-se que as amostras (linha amarela tracejada) são diretamente proporcionais a SF e inversamente proporcionais a PDP. Do lado oposto, as amostras em linha cinza pontilhada, diretamente relacionadas à PDP.

Tais resultados confirmaram que as predominâncias de frações miúdas e graúdas influenciaram nas propriedades do estado fresco dos concretos autoadensáveis. Quanto mais presente estiverem as partículas finas em uma mistura, e predominantes suas porcentagens em relação às partículas intermediárias, e ainda assim, estas últimas tiverem diâmetros mais próximos das partículas grossas predominantes, os grãos estarão mais distribuídos. Isso fará com que as distribuições se tornem mais bem graduadas, ou seja, mais fechadas, apresentando-se melhor continuidade. Consequentemente, menores PDP e  $PAG \leq 50\%$  tenderam a reduzir a variável SF. Com isso, a fluidez da mistura mostrou-se satisfatória, uma vez que a menor fricção entre as partículas graúdas e miúdas promove melhor estabilidade ao concreto, como o atendimento aos ensaios de HP, VF e SF. No caso em estudo, HP e VF são inversamente proporcionais, enquanto SF é diretamente correlacionado à PDP, e vice-versa. Comprova-se, então, a relevância destes ensaios e do parâmetro de graduação PDP, na avaliação de composições de agregados para CAA.

A pequena predominância de partículas finas tornou a distribuição mais grossa. Farokhzad *et al.* (2016) afirmam que as partículas menores que #0,6 mm, contribuem positivamente na trabalhabilidade dos CAA, conforme discutido na revisão da literatura. Pela limitação da dimensão do agregado graúdo de 12,5 mm, pode-se verificar que a maior aproximação das partículas graúdas e miúdas (aumento de PRI das frações intermediárias), com maior concentração de partículas graúdas e menor concentração de partículas miúdas causou a diminuição do parâmetro PDP e o coeficiente de uniformidade tornou-se muito pequeno, o que desestabilizou o concreto, fato também constatado na literatura. O que tornou o PDP maior em

distribuições contínuas e descontínuas, que tornaram CU enquadrado no intervalo indicado para CAA, foi a dominância de partículas mais abaixo de #0,30 mm e acima de #6,3 mm, tendo em vista a menor predominância nas frações intermediárias.

Na Tabela 7.3 é apresentado o resumo dos PGA propostos neste estudo.

**Tabela 7.3 - Proposta de parâmetros de graduação das composições de agregados para o grupo G12**

PDP (Predominância de Diâmetros de Partículas)	CU (Coeficiente de Uniformidade)	PAG (%)
$6 < \text{PDP} < 25$	$9 < \text{CU} < 23$	$\leq 50 \%$

Fonte: Próprio Autor (2019)

## 7.2 Conclusão

Considerando os resultados obtidos e aqui apresentados, pode-se concluir que o estudo estatístico de modelagem dos dados em termos da análise de componentes principais (CP) para a obtenção de composições de agregados para concreto autoadensável (CAA), fornece informações de grande relevância sobre a associação das variáveis de três CP. Observa-se que a utilização desta técnica apresentou-se eficiente principalmente no que diz respeito à correspondência entre as variáveis predictoras (PDP, CU e PAG) e as de resposta (SF, VF e HP), o que possibilitou propor os PGA para CAA. A consideração de amostras de CAA do presente estudo e de diferentes autores se deu ao fato de ampliar o tratamento estatístico com distintas formulações de CAA, algo também realizado na literatura, contribuindo para a representatividade dos resultados obtidos e para a proposta em questão.

A utilização do PCA permitiu estabelecer limites para os PGA, os quais podem ser considerados como indicadores, vistos de forma conjunta, para a formulação de concretos autoadensáveis. Por meio desta proposta pode-se ter o conhecimento prévio de esqueletos granulares com mais informações sobre as distribuições granulométricas (DG) dos agregados, a dominância de frações miúdas e graúdas numa dada composição e, conseqüentemente, o enquadramento desta nas zonas granulométricas de composições de agregados para CAA.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS

O estudo desenvolvido contribuiu para aprofundar os conhecimentos relativos à composições de agregados aplicadas ao concreto autoadensável (CAA), baseando-se nos aspectos relacionados aos parâmetros de graduação de agregados (PGA) para otimização do esqueleto granular, alcançando-se, desta forma, os objetivos traçados.

Neste capítulo, além das considerações finais e das sugestões de trabalhos, foram apresentadas algumas recomendações para o desenvolvimento de concreto autoadensável.

### 8.1 Considerações Finais

Sendo como parte exclusiva deste trabalho a obtenção de composições de agregados para CAA, pode-se obter as seguintes considerações:

Quanto ao método experimental de empacotamento e aos parâmetros de graduação (PGA)

- O objetivo principal deste trabalho foi atingido, partindo-se da proposta trazida pelo método de Gomes, utilizando-se do método experimental de empacotamento – o da maior massa unitária e do menor índice de vazios, no estado solto. Viu-se que a determinação da relação entre as proporções de agregados miúdos e graúdos é válida, contribuindo para a obtenção do índice de vazios ( $I_v$ ) do esqueleto granular, entretanto, sem haver algum controle da predominância de partículas. Quando aplicado à determinação de composições de agregados para concreto autoadensável, os parâmetros de graduação PDP (predominância de diâmetros de partículas), CU (coeficiente de uniformidade) e PAG (porcentagem de agregado graúdo) - os PGA propostos neste trabalho - foram essenciais por aprimorarem o processo de otimização do empacotamento de composições de agregados em atendimento à autoadensabilidade do CAA;
- O aprimoramento deste método de obtenção de composições de agregados para CAA pode ser desenvolvido variando-se os tipos de agregados (naturais, industriais e reciclados), as distribuições granulométricas (contínuas e descontínuas) e as proporções de agregados graúdos, mostrando que os tipos de agregados não impuseram restrições para a obtenção da proposta do PGA. Pode-se constatar a evidência de determinados diâmetros de partículas predominantes que dificultaram e/ou favoreceram a autoadensabilidade;
- A variável do experimento  $I_v$  mostrou servir como um indicador do empacotamento dos grãos. Ter o entendimento da concentração de partículas finas e grossas no esqueleto granular



fez deste método fundamental e, ao mesmo tempo, limitado, para avaliar o impacto que as alterações das proporções que cada agregado repercutiu no CAA;

- Buscando-se formular composições de agregados seguindo os PGA avaliados, pode-se obter esqueletos granulares mais propícios para a autoadensabilidade, sendo constatado que os valores-  $q$ , obtido do ajuste da curva de empacotamento teórica do modelo de Alfred com a curva experimental, enquadraram-se nos valores indicados na literatura, com a variação entre 0,21 e 0,27 para misturas de concretos autoadensáveis obtidas tanto em distribuições contínuas (DG-C) quanto descontínuas (DG-D). No entanto, este módulo não distinguiu misturas autoadensáveis das que não apresentaram tal desempenho. Portanto, este parâmetro de empacotamento não pode ser analisado isoladamente.

Quanto aos métodos de dosagem de CAA

- No geral, os métodos de dosagem para CAA buscam garantir o atendimento aos critérios normativos de espalhamento, viscosidade e resistência ao bloqueio. Contudo, a questão do empacotamento ótimo dos grãos que resultam em um maior índice de vazios e a razão de predominância de partículas graúdas e miúdas em composições de agregados para CAA ainda não tem sido consolidada pelos métodos de dosagem de CAA;

- A abordagem da teoria de empacotamento dos grãos na determinação dos PGA para CAA, pode esclarecer a aproximação e o afastamento de frações granulométricas promovido pela continuidade e descontinuidade das distribuições, sendo, deste modo, representado arranjos de partículas menos ou mais empacotadas;

- O foco maior dado à abordagem matemática da razão de predominância de diâmetros de partículas, tratando-se de representar as distribuições contínuas e descontínuas, possibilitou verificar as suas influências nas propriedades de autoadensabilidade do CAA.

Quanto aos parâmetros de graduação de agregados (PGA)

- A simulação numérica de composições de agregados tem-se apresentado eficiente para estudar a proporção retida individual (PRI) de cada fração granulométrica. A partir disso, possibilitou-se avaliar e verificar a concavidade de curvas de distribuições granulométricas contínuas e descontínuas, constatando-se, em geral, que as de concavidade fechada foi

característica da menor distância de separação de partículas graúdas e miúdas (mDPGM), ao contrário das de concavidade aberta com maior distância de separação (MDPGM);

- O parâmetro quantitativo PDP proposto para a determinação da razão de predominância de partículas foi útil para a obtenção de um intervalo que enquadrasse e tornasse mais simples a obtenção de composições de agregados para CAA;

- A proposta de serem considerados PRI acima de 10 % das frações miúdas tratou-se de levar em consideração aqueles predominantes no agregado miúdo, não apenas no “pico” destacado, mas frações em torno deste, possibilitando-se o cálculo do diâmetro médio. Quanto mais próximos os picos das frações miúdas e graúdas, menor PDP é obtido;

- Da mesma forma, analisando as frações graúdas, com as porcentagens consideradas nos “picos”, permitiu-se constatar que diferenças entre as PRI das frações granulométricas não acima de 10 %, foram utilizadas no cálculo do diâmetro médio de  $D_p$ . Isso possibilitou considerar a representatividade dos grãos em torno da maior predominância diâmetros graúdos. Logicamente, diferenças maiores que 10 % não foram consideradas, prevalecendo o diâmetro correspondente ao PRI de maior predominância. Tendo vista a representatividade dos diâmetros de partículas que prevaleciam nas frações graúdas, permite-se verificar não apenas a distância de separação (se maior ou menor), mas também se tais concentrações de partículas corroborariam para a segregação da mistura de CAA;

- A análise quantitativa das distribuições contínuas e descontínuas por meio do parâmetro coeficiente de uniformidade (CU) possibilitou identificar e representar o quanto as partículas miúdas e graúdas estavam distribuídas, avaliando-se os diâmetros correspondentes às porcentagens passantes acumuladas de 60% e 10%. Isso representou não apenas a distribuição (quanto mais contínua ou mais descontínua), como também a maior influência da porcentagem de agregado graúdo (PAG) nas composições de agregados. Tornou-se mais simples constatar que a ausência ou a baixa PRI de frações intermediárias levou a valores de CU fora do intervalo indicado para misturas de CAA; além disso, a baixa PRI em areias industriais e recicladas;

- Distribuições contínuas e descontínuas com concavidade mais fechada da curva granulométrica e com PAG de 50 % apresentaram-se satisfatórias para CAA.

Quanto às zonas granulométricas inferior e superior de composições de agregados para CAA

- A proposta das zonas granulométricas com limites inferiores e superiores possibilitou avaliar o enquadramento das misturas entre duas zonas granulométricas, bem como a tendência

de como as distribuições se aproximaram à essas zonas, o que recaiu na interferência da predominância de partículas graúdas e miúdas. Assim, o enquadramento das composições de agregados em um domínio estabelecido, possibilitou verificar as mais adequadas para a formulação de misturas de CAA;

- Em geral, as distribuições com concavidades mais fechadas apresentaram melhores aproximações dos diâmetros das frações. A presença de partículas finas dos esqueletos granulares foi detectada nas misturas, sobretudo entre os “picos” referentes às frações menores e iguais a #0,60 mm, bem como às maiores e iguais a #6,3 mm;

- É possível obter melhor preenchimento das frações intermediárias com a modificação realizada nas frações granulométricas, sem afetar de forma significativa as frações dominantes, colaborando para reduzir o efeito de “vales” mais expressivos (concavidades mais fechadas) em graduações de agregados para CAA.

Quanto à autoadensabilidade de concretos

- Nos ensaios do estado fresco, os concretos que atenderam à autoadensabilidade foram aqueles com menor porcentagem de agregado graúdo, maior índice de vazios de distribuições contínuas e descontínuas, destacando-se as composições de agregados com distâncias mais próximas dos tamanhos das partículas graúdas e miúdas no atendimento do critério de mobilidade;

- Para o melhor empacotamento das partículas, a adição mineral utilizada além de promover o refinamento da estrutura dos poros, também contribuiu para suprir a ausência de partículas do agregado miúdo no qual a fração granulométrica abaixo de 300 micrômetros não foi predominante. Há que ressaltar, também, o efeito que o superplastificante proporciona ao concreto, agindo na microestrutura da pasta de cimento e na zona de transição, sendo viabilizado pelo seu efeito dispersante;

- Ao serem analisadas as influências de distintas composições de agregados nos CAA, constatou-se a relevância da distribuição granulométrica, da dimensão máxima e da porcentagem de agregado graúdo, ao verificar o quanto as misturas foram propensas à segregação quando contiveram grãos graúdos de 19,0 mm. Este fato foi contornado com a combinação de agregados graúdos de 12,5 e 19,0 mm em composições com porcentagem de agregado graúdo igual a 50 %. Não foi diferente com os agregados miúdos, sendo possível comprovar que a maior quantidade de partículas miúdas no concreto possibilitou uma melhor

estabilidade à mistura, principalmente em concretos com partículas mais densas e maiores de agregados graúdos.

Quanto a aplicação de uma técnica estatística multivariada

- A estatística multivariada ACP, empregada na interpretação da relação entre os parâmetros de graduação de agregados (PDP, CU e PAG) e as propriedades de autoadensabilidade (SF, VF e HP), foi uma contribuição do estudo. Com esta análise foi possível determinar que a maior variabilidade dos dados de misturas de concreto foi representada pela combinação das variáveis preditoras e de resposta em três componentes principais, o que possibilitou identificar a eficiência da técnica multivariável do ponto de vista da identificação da associação das variáveis referentes a cada componente. Além disso, pode-se revelar diferentes grupos de amostras baseados em suas propriedades, de maneira que se pode obter relações direta e inversamente proporcionais de seis variáveis nas componentes principais;

- Pode-se avaliar a influência do arranjo granular no desempenho das misturas de CAA, destacando-se que a maior descontinuidade das composições (valores maiores ou muito pequenos de coeficiente de uniformidade) e maior predominância de partículas miúdas e graúdas retidas em intervalos distantes de tamanhos de grãos podem afetar a uniformidade de misturas de concreto;

- Foi possível perceber uma adequação da distribuição granulométrica das composições aos parâmetros PDP, CU e PAG para o atendimento das variáveis de resposta SF, VF, HP. Com base nos resultados, a influência da predominância de partículas, a distribuição granulométrica bem graduada da composição e a percentagem de agregado graúdo (< 50 %), todos eles foram parâmetros que colaboraram para uma melhor caracterização de composições de agregados, sobretudo na relação que esses parâmetros apresentaram nas propriedades do estado fresco;

Na análise, em geral, observou-se que definir PGA para otimizar composições de agregados, visando a obtenção da autoadensabilidade de concretos, não transparece algo simples e resolvido no ponto de vista estatístico, mas a combinação de cada um na obtenção de esqueletos granulares mais bem projetados com a visão da predominância de partículas distribuídas granulometricamente, como também a limitação do diâmetro e da porcentagem de agregado graúdo tornaram mais simples o processo de otimização para lidar com as diferentes propriedades no estado fresco.

As recomendações para a formulação de composições de agregados para concreto autoadensável estão descritas na Tabela 8.1.

**Tabela 8.1 – Recomendações para formulação de composições de CAA**

Predominância de frações granulométricas	Parâmetros fixados e combinados	Parâmetros de autoadensabilidade
$\leq 0,60$ mm $4,75 \leq D_p \leq 9,5$ mm	PDP: 6 – 25,9 CU: 9 – 23 PAG: 50 % Dmáx. = 12,5 mm	Espalhamento (SF): 60 – 85 cm Funil – V (FV): 3 – 12 s L – Box (HP): 0,8 – 1,0

Fonte: Próprio Autor (2019)

## 8.2 Sugestões de Trabalhos

Buscando dar continuidade ao estudo realizado, sugere-se os seguintes temas para serem abordados em futuras pesquisas:

- Aplicar a redução do volume de pasta por metro cúbico de concreto dentro do conceito da separação das duas fases: pasta e esqueleto granular;
- Avaliar a influência do parâmetro de predominância de diâmetros de partículas nos parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade plástica);
- Modelar sistemas granulares de agregados que possibilitem avaliar a redução de espaços vazios entre si, buscando-se otimizar composições de agregados que resulte em um mínimo volume de pasta, considerando-se os parâmetros de graduação de agregados (PGA) e de autoadensabilidade determinados estatisticamente;
- Aplicar técnicas multivariadas englobando-se, também, os aspectos reológicos e as propriedades mecânicas;
- Avaliar, numericamente, a interferência da forma dos grãos de agregados em ensaios de massa unitária, para a obtenção das proporções de agregados com menores índices de vazios;
- Avaliar composições de agregados reciclados com a influência da predominância de partículas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSON-CARTWRIGHT, M. **Optimization of aggregate gradation combinations to improve concrete sustainability**. 2011. 286f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Toronto, 2011.
- ASHRAF, W. B.; NOOR, M. A.; Laboratory-scale investigation on band gradations of aggregate for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2013): 1776-1782.
- ASHISH, D. K.; VERMA, S. K. An overview on mixture design of self-compacting concrete. *Structural Concrete*, v. 20, n. 1, 2018: 371-395.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados - Amostragem, Rio de Janeiro, 2009, 10p.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro, 2000, 7p.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 30: Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2009, 9p.
- \_\_\_\_\_. NBR 9935: Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. NBR 5564: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2014, 26p.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006, 8p.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem, Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. NBR 15823-1: Concreto autoadensável: Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a, 20p.
- \_\_\_\_\_. NBR 15823-2: Concreto autoadensável: Parte 2: Determinação do espalhamento, tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2017b, 9p.
- \_\_\_\_\_. NBR 15823-4: Concreto autoadensável: Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017c, 11p.
- \_\_\_\_\_. NBR 15823-5: Concreto autoadensável: Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017d, 8p.

\_\_\_\_\_. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015. ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 13276: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projetos de Estrutura de Concretos - Procedimentos. São Paulo, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos, 2018, 12p.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C29/29M-92: Standard test method for unit weight and voids in aggregate, 1992.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete – A review. 11<sup>th</sup> Internacional Cement Chemistry Congress. Durban, 2003.

BASF. Ficha técnica de produto. Glenium<sup>®</sup>51. Aditivo superplastificante de terceira geração.

Disponível em: <https://www.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2014/12/glenium-51-especificacoes-completas.pdf>. Acessado: março de 2019.

BERNARDI, J. V. E.; LACERDA, L. D.; DÓREA, J. G.; LANDIM, P. M. B.; GOMES, J. P. O.; ALMEIDA, R.; MANZATTO, A. G.; BASTOS, W. R. Aplicação da análise das componentes principais na ordenação dos parâmetros físico-químicos no alto rio madeira e afluentes, Amazônia ocidental. *Geochimica Brasiliensis*, 23, 1, 2009: 79-90.

BILLBERG, P. Self-Compacting Concrete for Civil Engineering Structures – The Swedish Experience. In: S.C.C.R.1., Estocolmo, 1999: 1-77.

BONADIA P.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.; Aplicação do conceito de distância de separação interagregado (MPT) a concretos refratários de alta alumina. *Cerâmica*, vol. 45, n. 291, 1999.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H.J. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 11, 2005: 2116 – 2136.

CALADO, C. F. de A.; CAMÕES, A.; JALALI, S.; JUNIOR, B. B. Concreto Autoadensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). Editora da Universidade de Pernambuco – EDUPE, Recife, 2015, 240f.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. 2017. 228f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

CARNEIRO, A. F. B.; CORREIA, C. E. C.; QUEVEDO, V. R. B.; CERRI, J.A.; ARAÚJO, M. S. de; Influência da espessura máxima de pasta e da adição de superplastificante no escoamento de concreto sob vibração. 58<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Outubro, 2016.

CARNEIRO, A. M. P.; BARATA, M. S.; LIMA, J. M.; QUARESMA, G. D. F.; Otimização de misturas binárias de agregados graúdos para produção de concreto. 9<sup>o</sup> Simpósio Internacional de Iniciação Científica, São Paulo, 2001.

CASTRO, A.L., PANDOLFELLI, V.C. “Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil”, *Cerâmica*, v. 55, n.333, p.18-32, 2009.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica*, São Paulo, v. 55, n. 335, p. 233-251, 2009.

CASTRO, A. L.; FERREIRA, F.; Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño. *Revista Ingeniería de Construcción*. v. 31, nº 2, 2016: 91-104.

CAVALIERE, I.S.G., CAMPOS, R. S., BARBOSA, M.P., CASTRO, A.L.; Desenvolvimento de concreto autoadensável com agregados oriundos de RCD: dosagem a partir do conceito de empacotamento de partículas, 58º IBRACON (2016) 1-16.

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

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHANG, P. K. An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, 2004: 623-629.

CHATEAU, X. Particle packing and the rheology of concrete. In: ROUSSEL, N. (Ed.). *Understanding the rheology of concrete*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

CHAVES, A. P.; **Manuseio de sólidos granulados**: Teoria e prática de tratamento de minérios. 2ª edição, v. 5, São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, K. D.; NAGAHAMA, K. DE J. Análise da influência de teores de substituição de agregados de resíduo de construção e demolição em concretos utilizando a análise de componentes principais. *Seminário de Iniciação Científica*, n. 21, 2017.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para Formulação de Concretos com Baixo Consumo de Ligantes: Concretos Reológico, Empacotamento e Dispersão de Partículas**. 2013. 237f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M.; Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos, *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, vol. 10, nº 5, 2017: 998-1024.

DÍAZ, V. O. Método de dosagem de concreto de elevado desempenho. São Paulo: Pini, 1999.  
LARRARD, F. Structures granulaires et formulation des bétons. *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Ouvrages d'art OA 34, 1999. 414p.

DE LARRARD, F. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. 3rd RILEM International symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, France, August, 2009, 8p.

DESTEFANI, A.; NUNES, S.; SOUSA-COUTINHO, J.; Betão auto-compactável com incorporação de resíduo de mármore. In: LLANO-TORRE, A.; MARTI-VARGAS, J. R.; ROS, P. S., V Congresso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, HAC, 2018: 137-146.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle-packing phenomena and their application in materials processing. *Mrs Bulletin*, December, 1997, 22 (12): 19-23.

EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.

EFNARC. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, 2005.

ESMAEILKHANIAN, B.; KHAYAT, K. H.; YAHIA, A.; FEYS, D. Effects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self-consolidating concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 54, 2014: 21-28.



- FARIAS, M. M. de; PALMEIRA, E. M.; Agregados para a construção civil. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. In: ISAIA, G. C., IBRACON, 2010: 483-525.
- FAROKHZAD, R.; MAHDIKHANI, M.; BAGHERI, A.; BAGHDADI, J.; Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 115, 2016: 735-745.
- FENNIS, S. A. A. M. **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. 2011. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Delft University of Technology, Delft, 2011.
- FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Delft University of Technology, the Netherlands, HERON*, vol. 57, nº 2, 2012: 73:101.
- FERNEDA, M. C. **Estudo do desenvolvimento de concreto autoadensável com areia artificial em pré-fabricados**. 2014. 118f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.
- FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. 2005. 285f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- GARCIA-TAENGUA, E.; MARTI-VARGAS, J. R.; Multivariate Analysis of the Fresh State Parameters of Self-Consolidating Concrete. In: *Proceedings of the 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. RILEM Publications SARL (France), 2016: 221-231.
- GERMANN INSTRUMENTS. Rheology using the ICAR Plus – An Introduction, 2017 Disponível em: <<http://germann.org/rheology-icar-plus-introduction>>. Acesso: 10/01/2018.
- GHODDOUSI, P.; JAVID, A. A. S.; SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 53, 2014: 102-109.
- GOLTERMANN, P; JOHANSEN, V.; PALBØL, L. Packing of aggregate: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. *ACI Materials Journal*, 94 (5), 1997: 435-43.
- GOMES; P.C.C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; BERNAD, C. Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete. In: *Second International Symposium on self-compacting concrete*, Tokyo, v. 1, 2001: 377-386.
- GOMES; P.C.C.; GETTU, R.; FITÉ, L. A.; BERNAD, C. Diseño de Hormigones autocompactables de alta resistencia. *Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización*. nº 832, 2002: 30-42.
- GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete**. 2002. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção) - Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, Espanha, 2002.
- GOMES, P. C. C; Barros, R. de B. *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*. São Paulo: Pini, 2009.
- GRAZIA, M. T. de; SANCHEZ, L. F. M.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. *Construction and Building Materials*, 195, 2019: 524–536.
- HELENE, P. R. DO L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HERMANN, A; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L. DA; KLEIN, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9 (1), 2016: 48 – 65.

- HONGYU, K. SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. de O.; Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S – Engineering and Science*, vol. 1, Ed. 5, 2015: 83-90.
- HUNGER, M.; BROUWERS, H. J. H. Flow analysis of water-power mixtures: Application to specific surface area and shape factor. *Cement and Concrete Composites*, 31 (1), 2009: 39-59.
- JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y.; LI, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*, vol. 83, 2017: 146-159.
- KHAYAT, K. H.; HU, C.; LAYE, J.M.; Importance of aggregate packing density on workability of self-consolidating concrete. In: *First North American Conference on Design and Use of Self-Consolidating Concrete*. 2002: 55-62.
- KHAYAT, K.H.; HU, C.; LAYE, J.M. Influence of aggregate grain-size distribution on workability of self-compacting concrete (SCC). In: *Proceedings of the International Conference on High-Performance Concrete*, 2000:1001-1024.
- LADE, P. V.; LIGGIO, C. D. Jr.; YAMAMURO, J. A.; Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 21, n° 4, 1998: 336-347.
- LANG, L.; Rheological properties of cemented tailing backfill and the construction of a prediction model. *Materials*, v. 8, n. 5, 2015: 2076-2092.
- LEITE, G. U. **Uso de planejamento experimental de misturas na otimização da pasta e no empacotamento de agregados para produção de CAA**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- LISBOA, E. M. **Obtenção do Concreto Autoadensável utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. 2004. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- LISBOA, E. M.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F. B. de; BARBOZA, A. S. R. Concreto autoadensável uma opção para os pré-moldados, 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos, São Paulo, 2005.
- LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. *Cerâmica*, vol. 63, 2017: 22-33.
- MA, K.; FENG, J.; LONG, G.; XIE, Y.; CHEN, X.; Improved mix design method of self-compacting concrete based on coarse aggregate average diameter and slump flow. *Construction and Building Materials*, vol. 143, 2017: 566-573.
- MALEWAR, Y.; SALEEM, S.; TITIKSH, A.; Gap grading of aggregates & its effect on the inherent properties of concrete. *Journal of ceramics and concrete sciences*, vol. 2, n° 1, 2017: 1-8.
- MANGULKAR, M. N.; JAMKAR, S. S.; Review of particle packing theories used for concrete mix proportioning. *Vol. 5, n° 4, 2013: 143-148.*
- MARQUES, J. M.; MARQUES, M. A. M.; As componentes principais no descarte de variáveis em um modelo de regressão múltipla. *Revista da FAE. Curitiba*, v. 8., n. 1, 2005: 93-101.
- MARTINS, S. L. M.; GODOY, L. P.; LOPES, L. F. D.; Monitoramento do controle estatístico do processo utilizando ferramentas estatísticas. *Espacios*, Santa Maria, v. 33, n. 6, 2012: 16-21.
- MATIATOS, I.; Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: a case study of Asopos basin (Central Greece). *Science of the Total Environment*, v. 541, 2016: 802-814.
- McGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 44, n° 10, 1961: 513-522.

- MEHDIPOUR, I.; KHAYAT; K. H.; Understanding the role of particle packing characteristics in rheophysical properties of cementitious suspensions: A literature review. *Construction and Building Materials* .161 (2018): 340–353.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2ª.ed. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2014, 751p.
- MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- MELO, C. V. A de; MONTEIRO, R. S.; GOMES, P. C. C.; Estudo do volume de pasta em diferentes composições de agregados para concreto autoadensável. In: LLANO-TORRE, A.; MARTI-VARGAS, J. R.; ROS, P. S., V Congresso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, HAC, 2018: 495-504.
- MENDES, T. M. **Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico suspensões concentradas heterogêneas**. 2008. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F.; Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. *Revista Matéria*, v. 22, n. 4, 2017.
- MIRANDA, C. R. **Pastas de Cimento de Alta Compacidade para Poços de Petróleo – Processo de formulação, propriedade reológicas, resistência mecânica e química**. 2008. 290f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- MONTEIRO, R.; GOMES, P.C.C.; MELO, K.A.; Composições de agregados para obtenção de concreto autoadensável. *IV Congresso Ibero Americano sobre Betão Auto-Compactável – BAC2015*, 2015, 205–214.
- MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. *Material and Structures/ Matériaux et Constructions*, v. 37, n. 266, 2004: 74-81.
- MOSTOFINEJAD D.; REISI M.; A new DEM-based method to predict packing density of coarse aggregates considering their grading and shapes, *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 414–420, 2012.
- MOUTASSEM, F.; Assessment of Packing Density Models and Optimizing Concrete Mixtures. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science (IJCMES)*, Vol-2, Issue-4, July-Aug, 2016, p.29-36.
- NANTHAGOPALAN, PRAKASH; SANTHANAM, MANU.; An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete. In: *Materials and Structures*, Índia, 2012, 45:1167-1179.
- NAZAROO'S FORUM THREAD. Principal Component Analysis (PCA): PCA evaluated (2007/2010), Reconstructing the Text of John 8:1-11. Disponível em: <http://textualcriticism.scienceontheweb.net/RECON/PCA1.html> Acesso em: novembro de 2019.
- NEPTUME, A. I. **Investigation of the effects of aggregate properties and gradation on pervious concrete mixtures**. 2008. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Clemson University, United States, 2008.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. Porto Alegre, 2016.
- NIARAKI, R. J.; FAROKHZAD, R.; Prediction of mechanical and fresh properties of self-consolidating concrete (SCC) using multi-objective genetic algorithm (MOGA). *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 7 (2), 1-13, 2017.

- NGUYEN, T. L. H., ROUSSEL, N., COUSSOT, P., “Correlation between L-box test and rheological parameters of homogeneous yield stress fluid”, *Cement Concrete Research*, v. 36, pp. 1789–1796, 2006.
- NUNES, M. C.; SILVA, E. B. da; OLIVEIRA, D. T. da; BARBOZA, A. da S. R. Produção de um concreto fibroso fluido ecoeficiente considerando a influência do fator de forma e teor volumétrico das fibras de aço. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, vol. 4, nº 3, dezembro, 2012: 60-70.
- OKAMURA, H.; Self-compacting high performance concrete. In: *Concrete International*, v. 17, nº 7, 1997: 50-54.
- OKAMURA, H; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, vol. 01, nº. 01, 2003: 5-15.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. *Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo, Fazendo Arte Editorial, 2000. 145p.
- OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S.; Impact of particle packing concept on dosage of high performance concrete. *Revista Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 1, 2018, e-11962.
- ORDÓÑEZ, M. F. C. **Efeito do empacotamento de partículas nas propriedades mecânicas e tribológicas de misturas de argila-rocha**. 2015. 127f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, 2015.
- ORTEGA, F. S.; PILEGGI, R. G., SEPÚLVEDA, P., PANDOLFELLI, V. C.; Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. *Jornal Cerâmica*, Vol.43, n.283-284, p. 183-189, São Paulo, 1997.
- PANDURANGAN, K.; RAMAKRISHNA, G.; KOTHANDARAMAN, S. Effect of coarse aggregate size and shape on the strength and flow characteristics of self-compacting concrete. *ICI Journal*, p. 1-7, 2012.
- PILEGGI, R. G. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.
- PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 187f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.
- PILEGGI, R. G., STUDART, A. R.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C.; High-performance refractory castables: particle size design. *Refractories Applications and News*, United States, v. 8, n. 5, 2003.
- RAHARJO, D.; SUBAKTI, A.; Mixed concrete optimization using fly ash, silica fume and iron slag on the SCC's compressive strength. *Procedia Engineering*, v. 54, p. 827-839, 2013.
- REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. 252f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). *Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 2, 2005: 1509-1550.

- SANTOS, A. C. P.; ORTIZ-LOZANO, J. A.; VILLEGAS, NOE; AGUADO, A. Experimental study about the effects of granular skeleton distribution on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, v. 78, 2015: 40-49.
- SANTOS, R. A. dos; MEIRA, G. R.; BARBOSA, J.; BRAGA, F. A. V.; FERREIRA, K. do N. Empacotamento de agregados em concretos: utilização de método numérico para otimização de curvas granulométricas. IBRACON, setembro, 2018.
- SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, v. 38, n. 2, 2008:128-136.
- SEDRAN, T.; DE LARRARD, F.; Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. First international RILEM symposium on self-compacting concrete, Rilem Publications, s.a.r.l., 1999: 321-332.
- SHAKHMENKO, G.; BIRSH, J. Concrete mix design and optimization. In: International PhD Symposium in Civil Engineering, 2nd, 1998, Riga Technical University, 1998.
- SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C.; Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. *Cerâmica*, 60 (2004): 345-354.
- SKARENDAHL, A.; PETERSSON, Ö. (2000), Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art. Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L.
- STROEVEN, P., STROEVEN, M., Assessment of packing characteristics by computer simulation. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, nº 8, 1999: 1201–1206.
- STROEVEN, P.; HE, H.; GUO, Z.; STROEVEN, M. Particle packing in a model concrete at different levels of the microstructure: evidence of an intrinsic patchy nature. *Materials Characterization*; 60, 2009: 1088-1092.
- SU, N.; HSU, K-C.; CHAI, H. W.; A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. 31, 2001: 1799-1807.
- TEIXEIRA, C. S.; CORDON, H. C. F. Estudo da Influência do Empacotamento de Partículas nas Propriedades do Concreto. Escola de Engenharia Mauá. EEM/CEUN-IMT.
- TORALLES CARBONARI, B. M. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones.** 1996. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, 1996.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** 2004. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.
- TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis.** 2007. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- TUTIKIAN, B. F.; MARCELO, P.; Concreto autoadensável (CAA) – comparativo entre métodos de dosagem. *RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 5, n. 4, 2012: 515-529.
- UMA, R. N.; SUGANYA, S.; SARANYA, C. V.; **A review on performance of self-compacting concrete using mineral and chemical admixture.** *International Journal of Engineering and Modern Education*. 2017: 157-161.
- VAHDANI, M.; MEHDIPOUR, I.; YOUSEFI, S.; Effect of viscosity modifying admixtures on the rheological properties and stability of self-consolidating cementitious materials. In: 35th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, CI-Premier PTE LTD, Singapore. 2010.
- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** 2004. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VARELLA, C. A. A. Análise multivariada aplicada às ciências agrárias. Análise de Componentes Principais. UFRRJ. Seropédica, RJ, 2008.

VARGAS-NORDCBECK, A.; LEIVA-VILLACORTA, F.; AGUIAR-MOYA, J. P.; LORIA-SALAZAR, L. G.; Principal component and clustering analysis in moisture damage evaluation of Hot-Mix-Asphalt. 96<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, nº17-01582, 2017.

VICENTINI, A. H.; ASSUNÇÃO, C. C.; AKASAKI, J. L.; Estudo do metacaulim para obtenção e produção de concreto autoadensável (CAA). Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, vol. 12, nº 4, 2016: 125-138.

VICINI, Lorena; SOUZA, A.M.; Análise multivariada da teoria à prática, 2005, 215f, Santa Maria: UFSM, CCNE, 2005.

VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete: influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design.** 2010. 177f Tese (Doutorado em Estrutura de Concreto) – Royal Institute of Technology, Stockholm, Suécia, 2010.

WALLEVIK, J. E., “Relationship between the Bingham parameters and slump”, *Cement and Concrete Research*, n.36, 2006: 1214 – 1221.

WALLEVIK, O. H., WALLEVIK, J. E. “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes”, *Cement and Concrete Research*, n.41, 2011: 1279 – 1288.

WONG, V.; CHAN, K. W.; KWAN, A. K. H.; Applying theories of particle packing and rheology to concrete for sustainable development. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, 5 (2), 2013: 844-851.

ZHOU, F.; GUO, H. C., YONG, L.I.U.; HAO, Z. J.; Identification and spatial patterns of coastal water pollution sources based on GIS and chemometric approach. *Journal of Environmental Sciences*, 19 (7), 2007: 805-810.

## APÊNDICE A – COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS DA LITERATURA

### A1 - Estudo de Monteiro *et al.* (2015)

Do estudo realizado pelos autores Monteiro *et al.* (2015), obteve-se os resultados finais das graduações de agregados apresentados nas Tabela A 1 e Tabela A 2. Os resultados foram analisados separando-as por tamanho máximo do agregado graúdo: composições com pedra britada de 12,5 mm (B12) e as que contiveram a pedra britada de 19,0 mm (B19).

**Tabela A 1 - Composições de agregados com um agregado graúdo do estudo de Monteiro *et al.* (2015)**

Aberturas das peneiras (mm)	FB12 - M	MB12 - M	FMB12 - M	FM19 - M	MB19 - M	FMB19 - M
	D <sub>máx</sub> = 12,5 mm			D <sub>máx</sub> = 19,0 mm		
	Distribuição Descontínua	Distribuição Contínua		Distribuição Descontínua		
19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	0,7	0,64	0,64	21	21,4	19,12
9,5	5,96	5,42	5,42	22,1	22,05	20,05
6,3	37	33,81	33,73	10,9	11,04	9,98
4,75	8,67	8,14	8,02	0,9	1,11	0,94
2,36	2,97	4,27	3,59	0,5	1,84	1,35
1,18	1,5	6,53	4,28	1,5	5,86	4,24
0,60	5,63	18,66	12,95	5,6	16,8	13
0,30	18,45	18,4	19,37	18,45	16,56	19,37
0,15	16,2	3,64	10,25	16,2	3,28	10,25
Fundo	2,93	0,49	1,75	2,9	0,43	1,75

Fonte: Próprio Autor (2019)

**Tabela A 2 - Composições de agregados com dois agregados graúdos do estudo de Monteiro *et al.* (2015)**

Aberturas das peneiras (mm)	FB12B19 - M	MB12B19 - M	FMB12B19 - M
	D <sub>máx</sub> = 19,0 mm		
	Distribuição Descontínua	Distribuição Contínua	
19,0	0,0	0,0	0,0
12,5	11,79	12,97	11
9,5	14,74	16,16	13,61
6,3	22,75	24,8	20,44
4,75	4,43	5	4,06
2,36	1,62	2,85	2,36
1,18	1,47	5,25	4,35
0,60	5,63	14,93	13,2
0,30	18,45	14,72	19,32
0,15	16,2	2,92	9,96
Fundo	2,93	0,39	1,7

Fonte: Próprio Autor (2019)

Utilizando-se os mesmos agregados, percebe-se que a presença da areia (M) considerada média (MF = 2,4), em relação à areia fina (MF = 1,8), juntamente com a pedra britada B12, preencheu os “gaps” antes existentes na composição FB12 - M, obtendo-se FMB12 - M, MB12B19 - M, FMB12B19 - M (contínuas).

## A2 - Estudo de Nanthagopalan e Santhanam (2012)

As distribuições granulométricas das 8 composições de agregados para CAA, determinadas por Nanthagopalan e Santhanam (2012), estão apresentadas na Tabela A 3. Estas foram formuladas com diâmetro máximo de 19,0 mm, aplicadas no estudo de otimização de composições.

**Tabela A 3 - Composições de agregados do estudo de Nanthagopalan e Santhanam (2012)**

Aberturas das peneiras (mm)	GB12B19 1NP	GB12B19 2NP	GB12B19 3NP	GB12B19 4NP	GB12B19 5NP	GB12B19 6NP	GB12B19 7NP	GB12B19 8NP
	D <sub>máx</sub> = 19,0 mm							
	Distribuições descontínuas							
19,0	2,56	2,30	2,04	2,04	1,53	2,04	1,53	1,53
12,5	41,89	37,81	34,30	33,74	26,71	33,17	26,15	25,58
9,5	10,13	9,63	11,71	9,13	13,29	6,56	10,71	8,14
6,3	5,31	5,14	6,77	4,97	8,24	3,17	6,43	4,63
4,75	0,52	0,57	0,62	0,62	0,73	0,61	0,72	0,72
2,36	1,24	1,40	1,40	1,55	1,55	1,71	1,71	1,86
1,18	7,00	7,88	7,88	8,75	8,75	9,63	9,63	10,50
0,60	15,56	17,51	17,51	19,45	19,45	21,40	21,40	23,34
0,30	8,72	9,81	9,81	10,90	10,90	11,99	11,99	13,08
0,15	5,80	6,53	6,53	7,25	7,25	7,98	7,98	8,70
Fundo	1,28	1,41	1,41	1,53	1,53	1,59	1,66	1,78

Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao analisar as composições ternárias, distinguem-se casos de distribuições descontínuas (DD), com pequena contribuição dos grãos retidos na peneira de abertura #4,75 mm. Os autores supracitados declaram que os agregados de tamanho máximo de 12,5 mm obtiveram menor quantidade, variando de 5, 10, 15 e 20%, ao contrário do agregado de dimensão máxima de 19,0 mm (variando de 30, 40, 45 e 50%). Essas proporções contribuiriam para elevar a porcentagem retida individual (PRI) na fração de 12,5 mm (mais grossa). Valores de proporções de agregado miúdo (G), variaram de 40, 45, 50, 55 e 60%, contribuindo para o empacotamento



e para o CAA. Apenas as proporções variaram, mantendo-se a fator de empacotamento de 68%, o que representou 32,0 % o índice de vazios em todas as composições.

### A3 - Estudo de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)

No estudo de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017) foram realizados nove esqueletos granulares. Os materiais utilizados compreenderam a pedra britada com  $D_{m\acute{a}x} = 12,5\text{mm}$  e areias finas (A: MF = 1,8; B: MF = 2,18) e grossas (C: MF = 3,06; D: MF = 4,0; E: MF = 4,58) passantes na peneira de #4,75 mm. A partir da combinação desses materiais, obteve-se as granulometrias apresentadas na Tabela A 4.

**Tabela A 4 - Composições de agregados do estudo de Farokhzad *et al.* (2016) e Niaraki e Farokhzad (2017)**

Aberturas das peneiras (mm)	FB12-1FN	FB12-2FN	GB12-4FN	GB12-5FN	GB12-6FN	GB12-8FN	GB12-9FN	GB12-7FN	FB12-3FN
	D <sub>máx</sub> = 12,5 mm								
	Distribuição contínua							Distribuição descontínua	
19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	0,0	0,0	0,0	2,7	3,8	0,0	3,8	7,6	3,8
9,5	11,4	11,4	11,4	14,4	22,8	11,4	22,8	17,1	22,8
6,3	13,3	13,3	13,3	12,2	5,3	13,3	5,3	13,3	5,3
4,75	7,6	7,6	7,6	6,8	6,1	13,8	12,3	0,0	6,1
2,36	3,8	3,8	13,7	11,8	9,8	22,4	18,6	9,9	0,0
1,18	5,0	8,1	18,6	16,7	16,7	20,5	18,6	16,7	6,2
0,60	18,6	24,8	14,9	14,9	14,9	9,3	9,3	14,9	24,8
0,30	12,4	9,9	9,3	9,3	9,3	6,2	6,2	9,3	9,9
0,15	18,6	15,5	8,7	8,7	8,7	3,1	3,1	8,7	15,5
Fundo	9,3	5,6	2,5	2,5	1,9	0,0	0,0	1,9	5,6

Fonte: Próprio Autor (2019)

### A4 - Estudo de Cavalcanti (2006)

Para a produção de CAA, Cavalcanti (2006) utilizou o esqueleto granular de distribuição contínua, apresentado na Tabela A 5, contendo areia média (M) e pedra britada com tamanho máximo característico de 12,5 mm (B12). As propriedades dos CAA mostraram-se compatíveis devido a concentração de partículas miúdas (#0,30 e 0,60 mm) relevantes para aumentar a coesão da argamassa e reduzir a fricção entre as partículas grossas.

**Tabela A 5 - Composições de agregados do estudo de Cavalcanti (2006)**

Aberturas das peneiras (mm)	MB12 - C
	D <sub>máx</sub> = 12,5 mm
	Distribuição contínua
19,0	0,0
12,5	0,2
9,5	11,0
6,3	25,9
4,75	9,3
2,36	5,2
1,18	5,7
0,60	14,3
0,30	21,9
0,15	5,5
Fundo	1,2

Fonte: Próprio Autor (2019)

**A5 - Estudo de Melo (2005)**

Como o que se pretendia era obter uma composição ideal entre duas areias e agregado graúdo com dimensão máxima menor que 10,0 mm, Melo (2005) teve o cuidado de formular misturas para obter as proporções de agregados, a partir de suas curvas granulométricas, sem se deter a índice de vazios. A distribuição granulométrica contínua da composição final é ilustrada na Tabela A 6. Nas misturas de CAA, os agregados utilizados foram: areia fina (F), areia média e agregado graúdo com D<sub>máx</sub> de 10,0 mm.

**Tabela A 6 - Composições de agregados do estudo de Melo (2005)**

Aberturas das peneiras (mm)	FMB12 - ME
	D <sub>máx</sub> = 10,0 mm
	Distribuição contínua
12,5	0
9,5	0,52
6,3	21,73
4,75	16,46
2,36	9,75
1,18	7,60
0,60	13,15
0,30	11,31
0,15	14,58
Fundo	4,92

Fonte: Próprio Autor (2019)

Segundo o autor, a obtenção das proporções de cada material nos esqueletos granulares de composição ternária (PAG = 46,97 %) foi considerada como mistura adequada para CAA.

#### A6 - Estudo de Gomes (2002)

No método de Gomes (2002), a obtenção do esqueleto granular com maior massa unitária e menor índice de vazios, sem compactação, resultou em distintas relações areia/brita. Na Tabela A 7, estão ilustradas as granulometrias analisadas de três composições de distribuição contínua, em que foram usados os seguintes agregados: areia grossa (G) e pedra britada (5 – 12 mm).

**Tabela A 7 - Composições de agregados do estudo de Gomes (2002)**

Aberturas das peneiras (mm)	GB12 – Go1	GB12 – Go2	GB12 – Go3
	D <sub>máx</sub> = 12,0 mm		
	Distribuição contínua		
12,5	0,0	0	0
9,5	2,73	3,25	3,58
6,3	16,8	20,0	22,0
4,75	22,26	26,5	29,15
2,36	11,66	10,05	9,05
1,18	19,84	17,10	15,39
0,60	10,73	9,25	8,33
0,30	7,95	6,85	6,17
0,15	2,96	2,55	2,3
Fundo	4,97	4,35	3,97

Fonte: Próprio Autor (2019)

Observa-se que cada combinação de agregados formuladas com a presença de G e B12 apresentou porcentagens retidas individuais maiores nas frações #6,3 mm e #4,75 mm (agregado graúdo), como também nas frações #1,18 mm e #2,36 mm, mostrando-se maior aproximação dos tamanhos dos grãos. Além da limitação do agregado graúdo, tal fato contribuiu para o aumento do índice de vazios, que se situaram bem próximos (32,5 % para a primeira; 32,8 % para a segunda; e 32,9 %, para a terceira).

#### A7 - Composições de agregados aplicadas no estudo

Com as graduações referentes a cada composição de agregados, os resultados foram analisados separando-as em dois grupos: um contendo as composições que possuísem apenas

a pedra britada de 12,5 mm (B12), Tabela A 8, e o outro contendo as demais composições que tivessem a pedra britada de 19,0 mm (B19), Tabela A 9 e Tabela A 10, sendo estes os tamanhos máximos característicos de cada composição. Complementando o estudo, na Tabela A 10 estão contidas as granulometrias das composições formuladas com a areia artificial e a pedra britada de 12,5 mm (B12).

**Tabela A 8 - Composições de agregados com um agregado graúdo (B12 ou B19)**

Aberturas das peneiras (mm)	GB12	MB12	MGB12	Mc0.6B12	GB19	MB19	MGB19
	D <sub>máx</sub> = 12,5 mm				D <sub>máx</sub> = 19,0 mm		
	Distribuição Contínua				Distribuição Descontínua		
19,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	0,00	0,00	0,00	7,8	38,14	38,14	38,14
9,5	8,41	8,62	8,62	25,0	13,79	13,79	13,79
6,3	26,85	26,96	26,96	11,3	2,68	2,68	2,68
4,75	11,77	12,11	12,07	8,4	0,25	0,34	0,30
2,36	7,20	2,96	3,28	12,9	1,37	0,74	1,02
1,18	9,61	3,58	6,63	34,5	9,11	3,02	5,76
0,60	15,61	9,27	12,82	0,0	15,45	8,34	11,53
0,30	15,59	28,19	23,16	0,0	15,32	25,38	20,86
0,15	3,60	7,32	5,69	0,0	3,35	6,60	5,14
Fundo	1,23	0,98	0,75	0,0	0,51	0,95	0,75

Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao analisar os resultados contidos na Tabela A 8, percebe-se que as composições GB12, MB12 e MGB12 apresentaram continuidade, podendo-se ser justificada pela porcentagem de agregado graúdo (PAG) entre 50 e 55 %. As demais distribuições caracterizaram-se mais bem distribuídas ao longo das frações, destacando-se melhor continuidade na região intermediária (#1,18 mm, #2,36 mm, #4,75 mm). Ocorreram maiores PRI nesta região, nas frações mais finas #0,30 e #0,60 mm e na fração mais grossa #6,3 mm. As graduações das composições que contiveram apenas a pedra britada com D<sub>máx</sub> = 19,0 mm, apresentaram maior descontinuidade. Observa-se, em geral, que as porcentagens retidas individuais (PRI) foram menores nas frações intermediárias (#1,18 mm, #2,36 mm e #4,75 mm) destas distribuições descontínuas, devido à maior concentração de grãos ocorrerem em regiões muito finas (abaixo de #0,60 mm) e muito grossas (acima de #6,3 mm). Com essa deficiência do esqueleto granular mostra uma maior predominância de diâmetros de partículas (PDP) de diâmetros mais grossos (#9,5 mm e #12,5 mm) e mais finos (#0,30 mm e #0,60 mm). Vale destacar que foram as que apresentaram menores Iv.

Na formulação da distribuição descontínua Mc0.6B12, a ausência de partículas abaixo da fração 0,60mm (composição alterada de MB12), fez com que as PRI se redistribuíssem nos

demais intervalos de tamanhos do agregado miúdo, sobressaindo a fração #0,60 mm, tornando o índice de vazios maior ( $I_v = 34,49\%$ ).

**Tabela A 9 - Composições de agregados com dois agregados graúdos (B12 e B19)**

Aberturas das peneiras (mm)	MB12B19	GB12B19	MGB12B19
	D <sub>máx</sub> = 19,0 mm		
	Distribuição Contínua		
19,0	0,0	0,0	0,0
12,5	22,88	20,94	19,07
9,5	12,34	19,24	10,77
6,3	13,87	14,84	13,47
4,75	5,71	6,10	5,59
2,36	4,25	2,43	2,10
1,18	3,05	9,23	6,51
0,60	7,63	15,45	12,82
0,30	22,77	15,32	23,16
0,15	6,06	3,34	5,70
Fundo	1,43	0,04	0,79

Fonte: Próprio Autor (2019)

Conforme Tabela A 9, nota-se que as porcentagens retidas individuais (PRI) concentram-se nas frações graúdas (acima de 6,3 mm) e miúdas (entre 0,30 e 0,60 mm), e tornam as distribuições contínuas, devido à presença das frações intermediárias #1,18 mm, #2,36 mm e #4,75 mm. É interessante observar que quando as concentrações de PRI das frações miúdas aproximam-se de as frações intermediárias, contribui para a melhor distribuição, tornando-a mais contínua.

**Tabela A 10 - Composições de agregados contendo AI e B12**

Abertura das peneiras (mm)	AIB12	AId1B12	AId2B12	AIB12D1	AIB12D2
	Distribuição Contínua	Distribuição Descontínua			
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	7,6	7,7	8,6	9,7	14,9
6,3	24,4	24,6	27,3	31,1	0,0
4,75	10,9	11,1	12,3	0,0	21,1
2,36	15,8	19,0	0,0	17,3	20,8
1,18	12,1	0,0	15,2	12,2	12,5
0,60	8,1	10,5	10,2	8,2	8,4
0,30	6,7	8,7	8,5	6,8	7,0
0,15	5,4	7,0	6,8	5,5	5,7
Fundo	8,9	11,4	11,2	9,1	9,6

Fonte: Próprio Autor (2019)

Comparações similares também foram realizadas com as composições contendo areia industrial (Tabela A 10), estudando-se a descontinuidade provocada em uma composição

original, a AIB12. Constatou-se que, por se tratar de um agregado miúdo obtido da britagem de rochas, as PRI nas frações miúdas não se comparam às contidas nas areias naturais. Então, ocorre uma redução do PDP por conta da concentração de partículas se dá, em geral, a partir de #1,18 mm. Como a porcentagem de agregado graúdo (PAG) foi de 50 %, isto, ainda assim, não foi suficiente para reduzir a concentração de grãos mais grossos. Ressalta-se, novamente, que a escolha do PAG = 50 % se adequou ao estudo de novas composições de agregados devido a recomendação de pesquisadores sobre CAA. Além disso, permite uma melhor forma de comparação do estudo do PDP.

Após os ensaios em laboratório com areias naturais e industriais e agregados graúdos britados, foram realizados os mesmos ensaios com agregados reciclados de concreto, partindo-se da determinação de esqueletos granulares com duas variações de PAG: 45 % (ARMARG12). Na Tabela A 11 estão apresentadas as quatro variações realizadas com ARM e ARG com D<sub>máx</sub> de 12,5 mm.

**Tabela A 11. Composição de agregados reciclados contendo ARM e ARG, sem modificação**

Abertura das peneiras (mm)	ARMARG12
	Distribuições Contínuas
12,5	0,0
9,5	18,4
6,3	18,3
4,75	8,4
2,36	20,7
1,18	12,0
0,60	7,7
0,30	7,0
0,15	4,6
Fundo	3,0

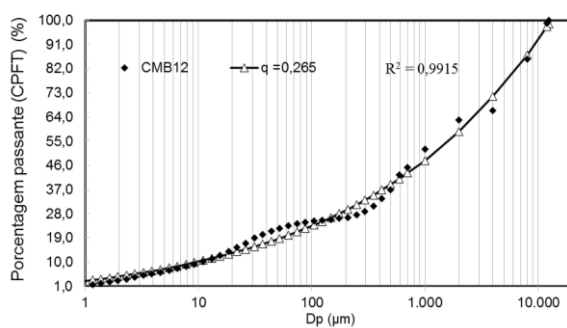
Fonte: Próprio Autor (2019)

Ao verificar as granulometrias das composições de agregados reciclados contidas na Tabela A 11, percebeu-se que a granulometria de ARM e ARG necessitava de algumas modificações para o aumento da predominância de partículas abaixo de #1,18 mm, conseguido com o aumento da porcentagem retida individual (PRI) nas frações #0,30 e 0,60 mm. Tal modificação granulométrica foi estabelecida de modo a resultar em duas composições distintas com PAG de 45 % e 50 %, enquadrando-se nos parâmetros de graduação propostos neste estudo, como também situadas dentro de zonas granulométricas de composições de agregados para CAA.

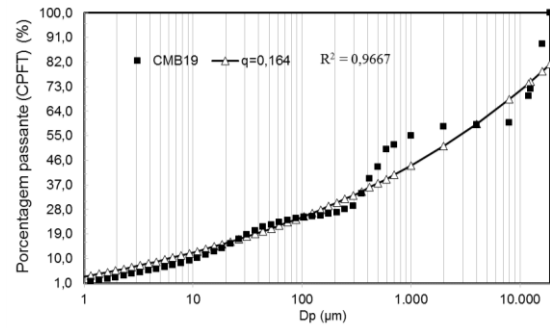
**APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL PELO MODELO DE ALFRED**

Os resultados das análises das curvas granulométricas das misturas de concreto com desenvolvidas no estudo, tanto com agregados naturais, como também com agregados industriais, seguem ilustrados nas Figura A 1 e Figura A 2, respectivamente.

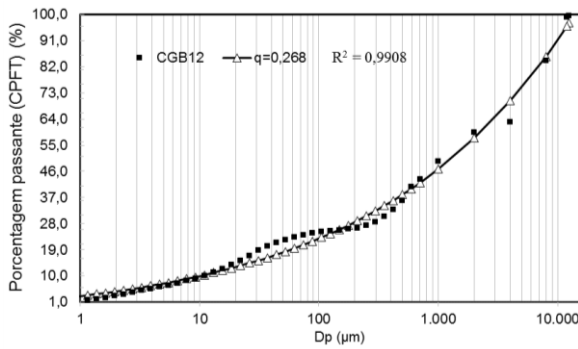
**Figura A 1 - Ajuste de curvas experimental e teórica de empacotamento, com 40 % de teor de pasta, dos concretos produzidos com agregados naturais: (a) CMB12, (b) CMB19, (c) CGB12; (d) CGB19, (e) CMGB12, (f) CMGB19, (g) CMB12B19, (h) CGB12B19, (i) CMGB12B19, (j) CMc1B12C1, (l) CMc2B12C1, (m) CMc3B12C1, (n) CMc4B12C1, (o) CMc0.6B12C1 e (p) CARMARG12-45**



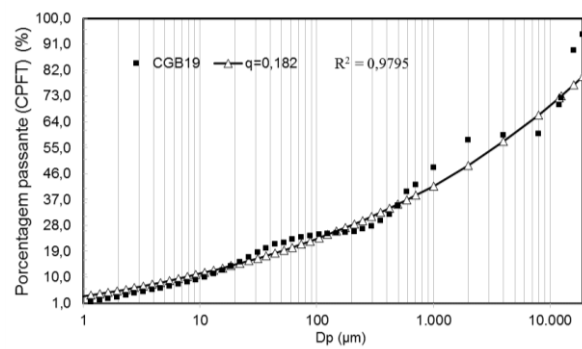
(a)



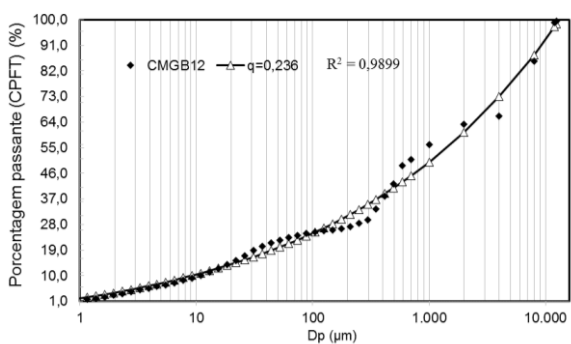
(b)



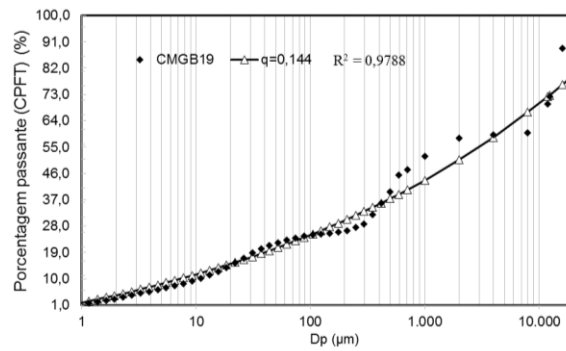
(c)



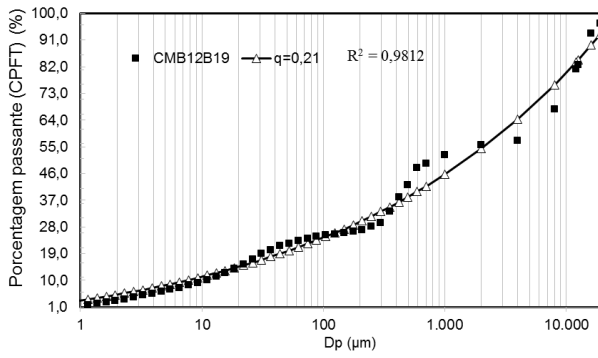
(d)



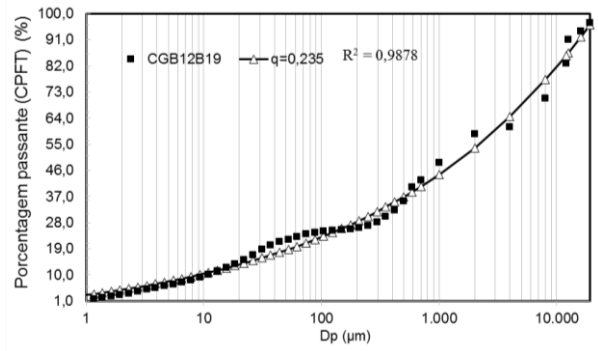
(e)



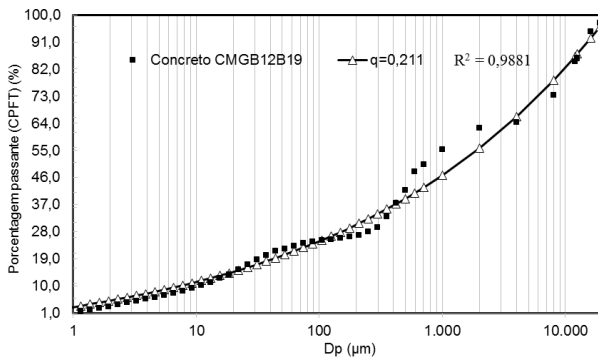
(f)



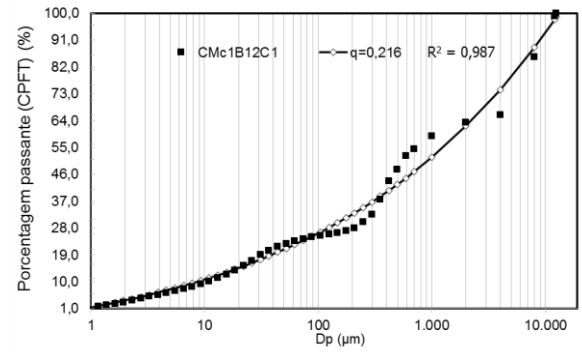
(g)



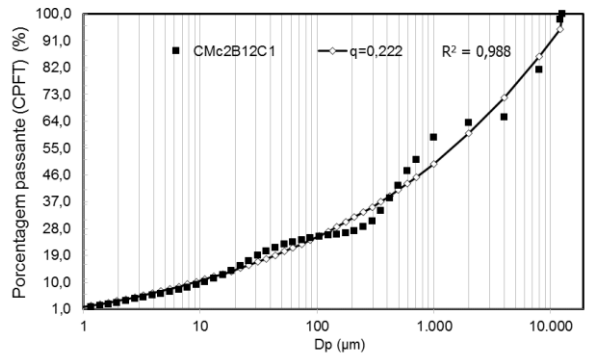
(h)



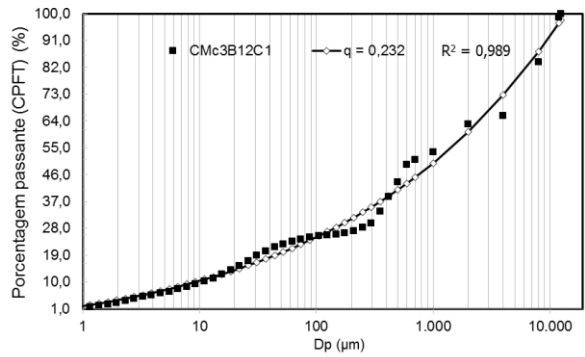
(i)



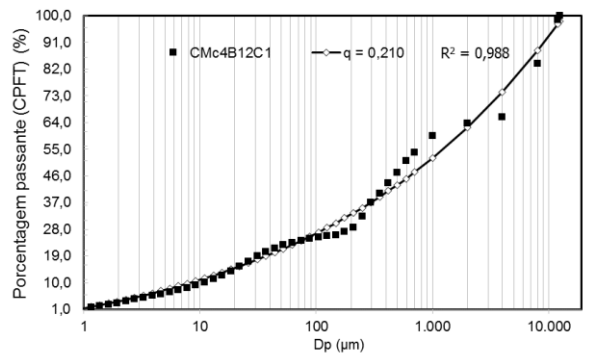
(j)



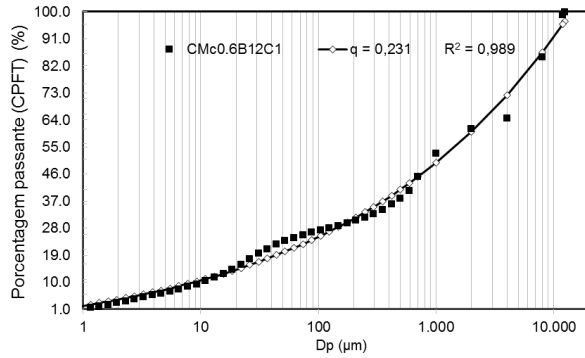
(l)



(m)

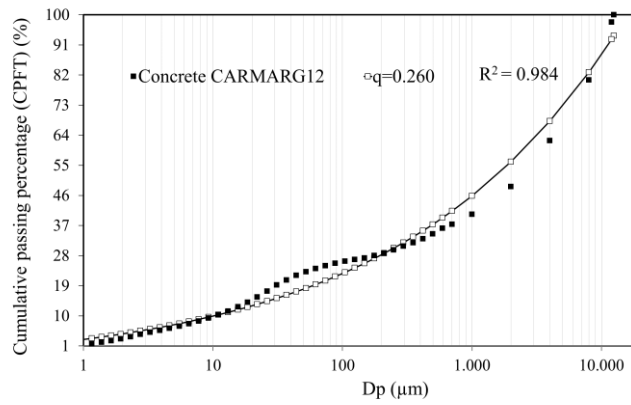


(n)



(o)

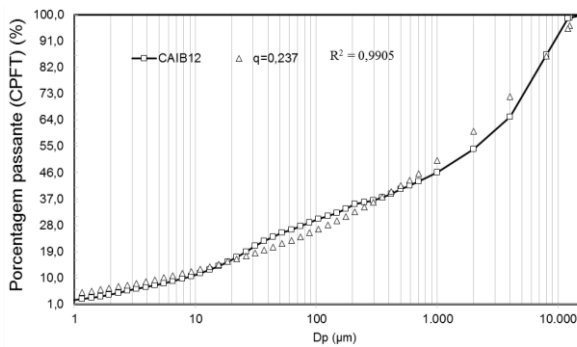




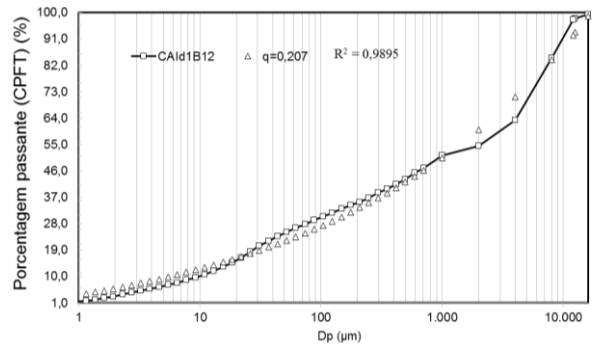
(p)

Fonte: Próprio Autor (2019)

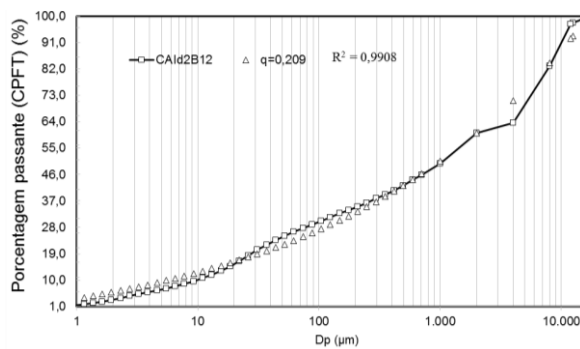
**Figura A 2 - Ajuste de curvas experimental e teórica de empacotamento, com 40 % de teor de pasta, dos concretos produzidos com areia industrial: (a) CAIB12, (b) CAId1B12, (c) CAId2B12; (d) CAIB12D1, (e) CAIB12D2, (f) CAIB212 mod, (g) CAId1B12 mod, (h) CAId2B12 mod, (i) CAId3B12 mod, (j) CAId4B12 mod, (l) CAIB12D1 mod, (m) CARMARG12 – 45 mod e (n) CARMARG12 - 50 mod**



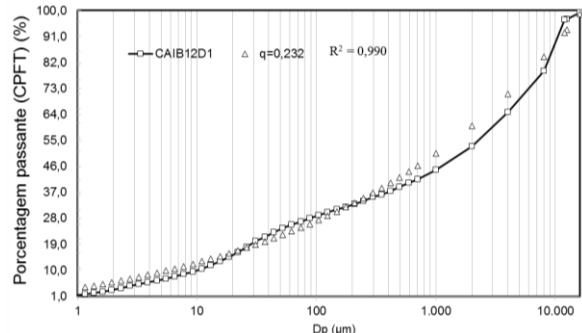
(a)



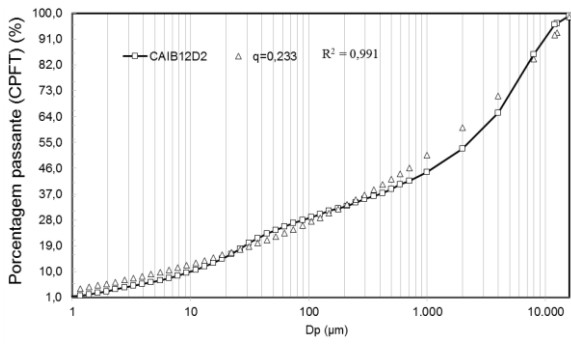
(b)



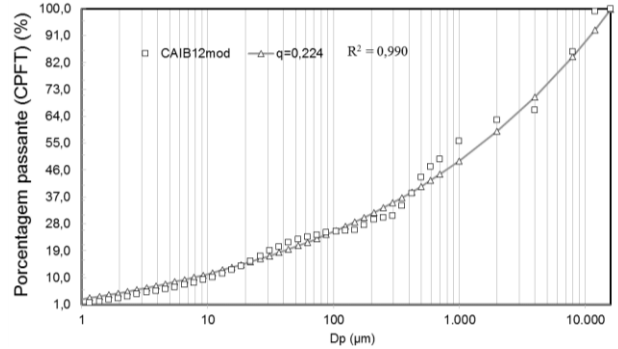
(c)



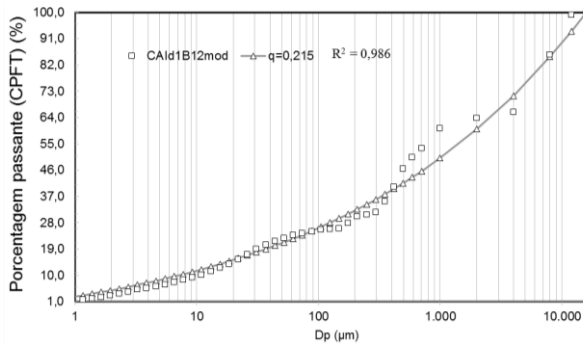
(d)



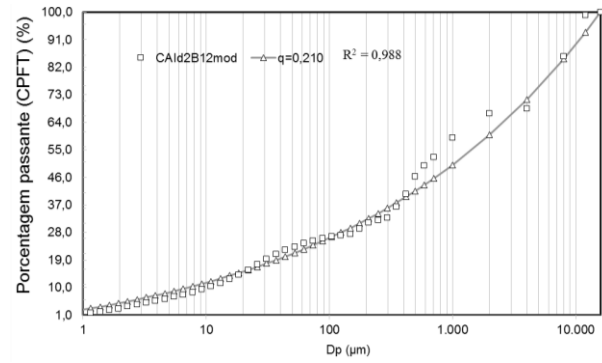
(e)



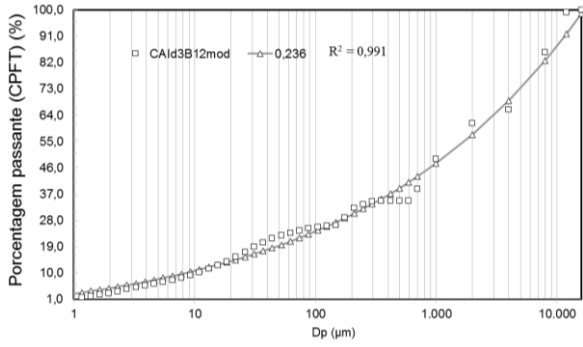
(f)



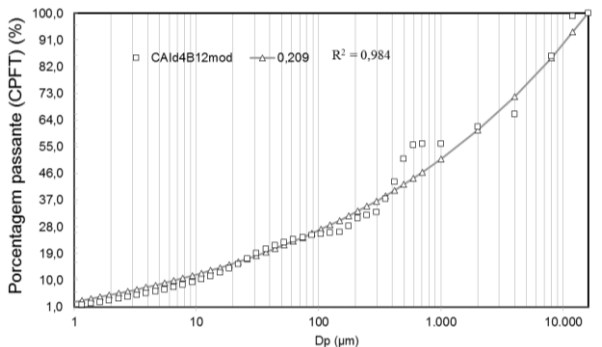
(g)



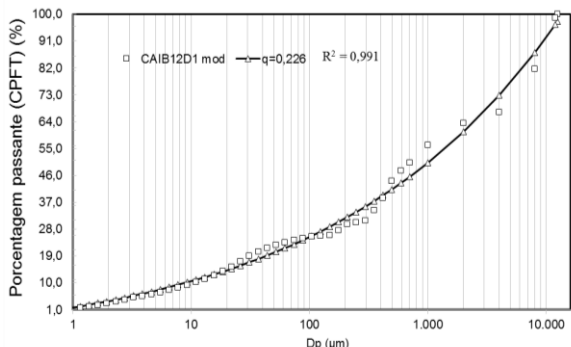
(h)



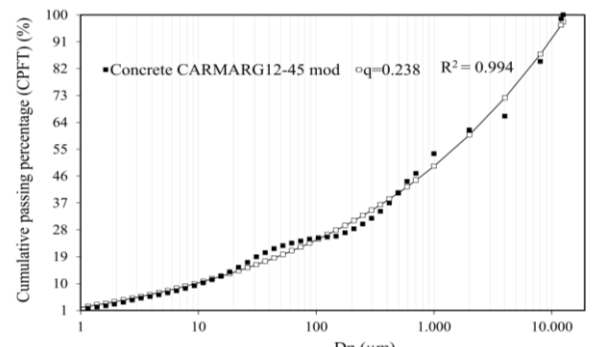
(i)



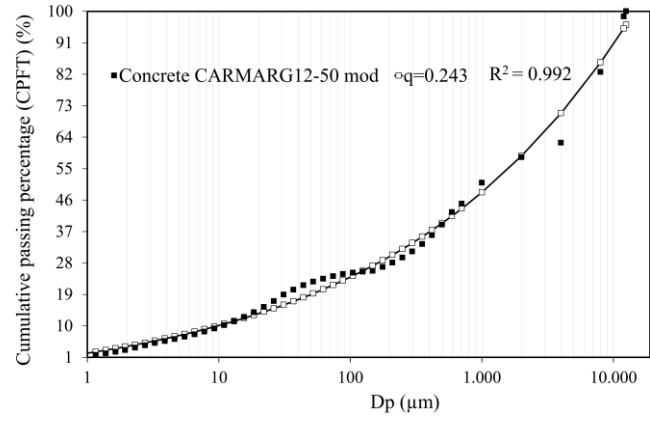
(j)



(l)



(m)



(n)

## APÊNDICE C – DADOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para os dados de composições de concreto contidos nas Tabela A 12 e Tabela A 13, foi aplicada a técnica de análise multivariada “análises de componentes principais”.

**Tabela A 12 - Dados das composições de concreto do grupo G12**

ID	Códigos das Composições	PDP	CU	PAG	SF (cm)	VF (s)	HP
1	CFB12 - M	28,13	30,7	55	68,5	22	0,5
2	CMB12 - M	14,03	15,92	50	74	12	1
3	CFMB12 - M	18,0	23,27	50	75	4	1
4	CMB12	21,14	17,88	50	74,5	9,5	0,92
5	CGB12	14,03	14,22	55	74,5	10,2	0,94
6	CMGB12	14,03	16,57	50	76,25	6,3	1
7	CAIB12	3,56	28,71	50	74,9	25	0,58
8	CAId1B12	4,26	36,34	50	72,3	22	0,33
9	CAId2B12	7,08	39,89	50	66,2	18	0,63
10	CAIB12D1	3,56	36,82	50	75,4	4	0,28
11	CAIB12D2	4,03	26,79	50	81,4	4	0,47
12	CAIB12 mod	14,03	15,44	50	74,1	9,1	0,93
13	CAId1B12 mod	14,03	16,39	50	71,5	8,1	0,9
14	CAId2B12 mod	14,03	17,59	50	60,9	12	0,71
15	CAIB12D1	5,80	10,70	50	66,6	18	1
16	CAId3B12 mod	9,79	19,45	50	74,8	7,6	0,92
17	CAId4B12 mod	8,53	17,41	50	70,6	8,5	0,9
18	CMc1B12C1	7,27	16,66	50	74,8	7,31	1
19	CMc2B12C1	17,59	16,29	50	75,5	5,96	1
20	CMc3B12C1	17,59	20,71	50	82,5	5,65	0,9
21	CMc4B12C1	18,03	22,20	50	78,1	6,97	1
22	CMc0.6B12	7,07	6,93	50	82,5	6	1
23	CMB12 -C	14,03	16,82	50	67	10	0,8
24	CFB12 – 1FN	22,57	9,06	38	79	4,35	0,99
25	CFB12 – 2FN	21,07	9,31	38	71	3	0,85
26	CFB12 - 3FN	25,33	9,95	38	78,5	2,9	0,96
27	CGB12 - 4FN	5,72	12,36	38	72,5	3,5	0,88
28	CGB12 – 5FN	5,72	14,36	38	74	3,3	0,94
29	CGB12 - 6FN	10,67	15,27	38	73	3,3	0,94
30	CGB12 - 7FN	8,88	15,27	38	71	4	0,88
31	CGB12 – 8FN	3,87	7,2	38	69,7	7,6	0,65
32	CGB12 – 9FN	3,87	8,4	38	53	4,5	0,61
33	CGB12 – Go1	3,12	12,33	50	70	10,9	0,88
34	CGB12 – Go2	2,67	13,02	42	68	9,9	1
35	CGB12 – Go3	9,36	11,57	55	60	16,5	0,33
36	CFMB12 - ME	15,79	21,9	47	53,5	3,06	0,8

Fonte: Próprio Autor (2019)

A matriz das coordenadas de amostras de concreto para as CP (em destaque), referentes ao grupo G12, , estão apresentados na Tabela A 13, e as coordenadas das variáveis na Tabela A 14.

**Tabela A 13 - Matriz das coordenadas das composições dos experimentos nas CP para o grupo G12**

ID	Coordenadas		
	CP 1	CP 2	CP 3
1	<b>-2,8711</b>	<b>-1,7620</b>	<b>-1,8818</b>
2	0,1772	-0,8419	-0,3933
3	0,5568	<b>-1,3417</b>	-0,0379
4	0,2909	<b>-1,3656</b>	-0,7254
5	-0,0566	-1,1387	-0,4491
6	0,6887	-0,9806	0,0902
7	<b>-2,9587</b>	-0,0146	0,7885
8	<b>-3,7734</b>	0,2789	0,9834
9	<b>-3,0266</b>	0,1389	0,2497
10	<b>-2,2986</b>	0,3508	<b>2,1497</b>
11	<b>-1,0894</b>	-0,1804	<b>2,2314</b>
12	0,2980	-0,7079	-0,2360
13	0,1922	-0,4573	-0,3988
14	-0,9257	0,6243	<b>-1,4494</b>
15	-0,4321	0,5152	-0,8595
16	0,0684	-0,5086	0,4039
17	-0,0721	0,0240	-0,0009
18	0,3805	-0,3342	0,4826
19	0,8102	-1,1866	-0,2820
20	0,5157	<b>-1,7747</b>	0,6394
21	0,4432	<b>-1,6201</b>	0,1035
22	<b>1,2707</b>	-0,6992	0,9712
23	-0,3435	0,0264	-0,8460
24	<b>2,4619</b>	-0,6865	-0,1637
25	<b>1,9980</b>	0,3174	-0,6746
26	<b>2,5247</b>	-0,8288	-0,3372
27	<b>1,4723</b>	1,2778	0,8465
28	<b>1,5456</b>	1,0172	1,0367
29	<b>1,5962</b>	0,6854	0,5493
30	<b>1,2989</b>	1,0702	0,5116
31	0,7767	<b>2,0581</b>	0,5150
32	0,4583	<b>3,5571</b>	-0,9369
33	-0,1778	0,6398	0,1323
34	0,6683	<b>1,3274</b>	0,2174
35	<b>-2,3438</b>	1,2788	<b>-1,4659</b>
36	-0,1238	1,2417	<b>-1,7642</b>

Fonte: Próprio Autor (2019)

**Tabela A 14 - Matriz de coordenadas das variáveis para o grupo 12**

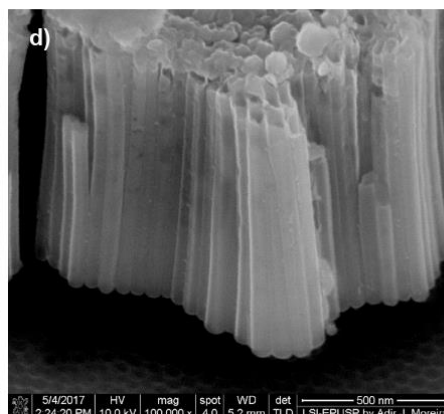
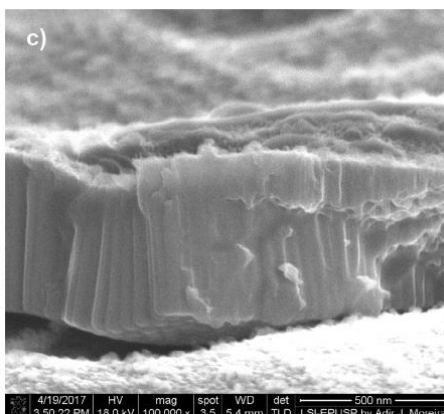
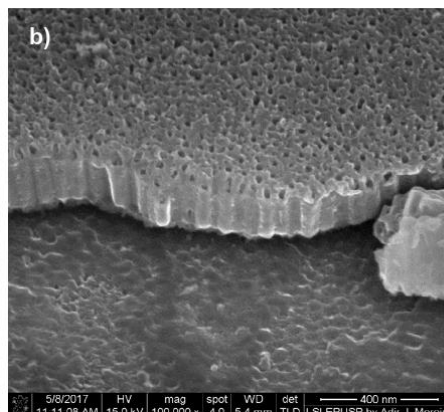
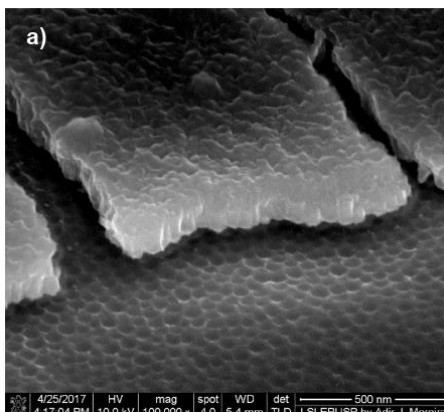
Variáveis	Coordenadas		
	CP 1	CP 2	CP 3
PDP	0,2838	<b>-0,6394</b>	<b>-0,5522</b>
CU	<b>-0,7730</b>	-0,2623	0,2733
PAG	<b>-0,6484</b>	<b>-0,5342</b>	-0,1685
SF	0,2677	<b>-0,6843</b>	<b>0,6325</b>
VF	<b>-0,7959</b>	-0,0882	-0,2324
HP	<b>0,7716</b>	-0,3300	-0,1239

Fonte: Próprio Autor (2019)

APÊNDICE D – ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO



A S S O C I A Ç Ã O  
 B R A S I L E I R A



D E C E R Â M I C A

## A study of packing parameters that influence the fresh properties of self-compacting concrete

*(Um estudo de parâmetros de empacotamento que influenciam as propriedades no estado fresco do concreto autoadensável)*

C. V. A. de Melo<sup>1\*</sup>, P. C. C. Gomes<sup>2</sup>, K. A. M. Moraes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas, Materials Doctoral Program, LEMA, Maceió, Brazil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas, Civil Engineering, LEMA, Maceió, Brazil

### Abstract

Some known self-compacting concrete (SCC) mix-designs are based on the lowest void content as a purpose of an ideal packing. However, a composition with a lower void content is not a guarantee of good synergy between the largest and smallest grain in the fresh state. The purpose of this study was to identify and evaluate different packing parameters in the aggregates gradations that influence on the self-compactability. Nine aggregates combinations (4 binaries, 4 ternaries and 1 quaternary) were used for determination of nine gradations. Tests as slump-flow, L-box and V-funnel were used. The distribution coefficient ( $q$ ) was determined by the Alfred model. The results showed that not all values of  $q$  (between 0.201 and 0.253) attended the values given for SCC, and the gradations with the lowest difference among the coarse and fine particles, higher void content, continuous distributions and 50% of coarse aggregates had better performance.

**Keywords:** aggregate gradations, void content, packing parameters, self-compactability.

### Resumo

Alguns métodos de dosagem de concreto autoadensável (CAA) conhecidos são baseados no menor índice de vazios como uma proposta de empacotamento ideal. Contudo, uma composição com um menor teor de vazios não é garantia de uma boa sinergia entre os grãos maiores e menores no estado fresco. O objetivo deste estudo foi identificar e avaliar diferentes parâmetros de empacotamento nas graduações de agregados que influenciam na autoadensabilidade. Nove combinações de agregados (4 binárias, 4 ternárias e 1 quaternária) foram usadas para determinação de nove graduações. Ensaios como slump-flow, caixa-L e funil-V foram usados. O coeficiente de distribuição ( $q$ ) foi determinado no modelo de Alfred. Os resultados mostraram que nem todos os valores de  $q$  (entre 0,201 e 0,253) atenderam aos indicados para o CAA, e que as graduações com menor diferença entre partículas graúdas e miúdas, maior teor de vazios, distribuição contínua e 50% de agregado graúdo tiveram melhor desempenho.

**Palavras-chave:** graduações de agregados, índice de vazios, parâmetros de empacotamento, concreto autoadensável.

### INTRODUCTION

Developed on the decade of the 1980s in Japan, self-compacting concrete (SCC) has been the subject of numerous studies [1-5]. Being a special concrete, several mix-design methods have been proposed [2, 3, 5-9], highlighting, as basic difference to the dosages for conventional concrete, a higher consumption of paste, smaller size of coarse aggregate and a lower ratio of fine aggregate to coarse aggregate. Including the rheology of SCC, it has been specified a moderate plastic viscosity and a low yield shear stress that have the influence of particle packing, the content of fine materials and the problem of the high coarse aggregate volume in the stability of the concrete [1, 7]. These differences can be better observed

through the reference parameters (RPs) recommended for compositions of SCC. Observing the RPs in Table I, it is noted that SCC presents a smaller coarse aggregate volume, a larger fine aggregate volume, greater fines mass and, consequently, higher paste volume. This high paste volume ensures the self-compactability of the granular particle system, which is directly proportional to the grains dispersion. However, it represents a high cost for the concrete, because the most expensive components of the mixture are the cement and chemical admixture [15], in addition to increasing the possibility of a higher shrinkage [16]. The SCC compositions are evaluated regarding the self-compactability properties, through tests of slump-flow, L-box and V-funnel [2, 4, 8, 10, 11]. Several standards around the world have established these tests and others [17, 18]. In Brazil, NBR 15823-1:2017 [17] highlights the classification, control and acceptance of the self-compacting concrete, which must be met in accordance

\*cassiamelo@ctec.ufal.br

© <https://orcid.org/0000-0002-8541-5998>



with the test methods presented in the standards NBR 15823-2:2017 [19], NBR 15823-4:2017 [20] and 15823-5:2017 [21].

Table I - Reference parameters for SCC mixtures (1 m<sup>3</sup>) [3-5, 7-14].  
[Tabela I - Parâmetros de referência de misturas de CAA (1 m<sup>3</sup>) [3-5, 7-14].]

Parameter	Interval
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	200-475
Fines' mass (kg/m <sup>3</sup> )	400-687
Paste content per cubic meter of concrete (%)	35-42
Coarse aggregate mass (kg/m <sup>3</sup> )	750-920
Fine aggregate mass (kg/m <sup>3</sup> )	710-900
Coarse aggregate volume (m <sup>3</sup> )	28-35
Coarse aggregate volume/total aggregate volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.44-0.65
Fine aggregate volume/total aggregate volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.36-0.60
Fine aggregate volume/mortar volume (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	40-50
Fines content, <2.50 mm (%/m <sup>3</sup> )	19.5-24.5

It is common, in some mix-design methods, to assume the SCC as a material of two phases: the paste (or matrix) and the aggregates [11]. In the first phase, the study of the fluid components predominates (water to cement, w/c, ratio, chemical and mineral admixture dosage), and the second is the aggregate composition that is determined. For this phase, some experimental methods and numerical models have been applied, based on the particle packing principle. The experimental method proposed by O'Reilly [22] consists in obtaining the optimum ratio of fine aggregates to coarse aggregates, through the highest unit weight and the lowest void content, also called intergranular porosity [15], resulting in greater compactness and lower cement consumption. The particularities considered in this method are the shape factor, particle size distribution, texture, being based in particle packing. Besides, the procedure of this method allows its application irrespective of the nature and origin of the aggregates [22]. It is also understood that the wall effect takes into account both the size and shape of the grains, being the mode of interaction that occurs between the surfaces of larger and smaller particles. The method has been used by several researchers in the determination of aggregate compositions for SCC and for other special concretes [4, 6, 10-14, 23-26], highlighting the predominance of compositions whose ratios of fine aggregate to coarse aggregate are around 50% [2, 5, 23, 24, 27]. These ratios and recommendation of the decrease in the coarse aggregate size lead to a greater approximation between the coarse and fine grains, which favors the packing of composition for SCC and has been recommended by several methods.

However, the porosity of a granular mixture becomes larger, i.e., the packing tends to be reduced when increasing the concentration of particles of closer sizes, especially if they are irregular [28]. The contact between the irregular particles can lead to a lower packing density, due to the greater angularity of the grains. That way, the particle arrangement becomes impaired, making it difficult to reach the lowest void content, being considered relevant for influencing the rheological properties and hardened state [28-30].

For systems with particles of very different sizes, much smaller particles are sufficient to fill in the gaps left by the larger particles, thus increasing the packing density, without any distortion of the original packing [29]. According to Chateau [29], it is possible to continue filling the existing voids as many times as necessary, until a multimodal mixture is obtained, intending to insert particles of smaller fraction particle size, which occupy exactly the space left by the particles larger than these. Regarding the role of the fractions of smaller size particles, Moosberg-Bustnes et al. [30] are quite emphatic in saying that a greater relative volume of these fractions can contribute with good results of compactness and workability of the concrete. Thus, there is the question of denser packing in aggregates mixtures, obtained with the highest relation of sizes between the largest and smallest particles, in binary mixtures [31]. Being small this relation of sizes, the packing density is reduced due to the effects of block and wall. The wall effects of aggregates of closer sizes or the loosening effects may increase the void content. Thus, it is necessary to study the aggregate combination so that voids can be minimized [1, 7]. Therefore, when it comes to SCC, the recommendation of approximation of particle sizes can lead to aggregate compositions with larger voids, which lead to a larger paste volume, which may favor the concrete mobility. Other experimental and analytical methods, such as those developed by Fuller-Thompson, Bolomey, Joisel and Faury [32], despite not being applied in the determination of dosage for SCC, also have the principle of ensuring a maximum possible packing, minimizing the void content, by means of reference curves that allow to obtain an ideal grading curve of aggregate compositions, in order to better represent all the particles in the particle size fractions. These models have been the basis for other mathematical models of particle size distribution that have been applied in the determination of SCC compositions in several studies, among them the Alfred model or modified Andersen-Andreasen (A&A) model [25, 28, 33-36]:

$$CPFT (\%) = 100 \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \tag{A}$$

where CPFT is the accumulated percentage of particles below D<sub>p</sub>, which is the size of the coarse particle, D<sub>s</sub> is the size of the smallest particle, D<sub>L</sub> is the size of the largest particle and q corresponds to the distribution coefficient. For SCC, a proposed mixture turns out to have q-value, from 0.22 to 0.25, thus incorporating finer particles [12]. Vanderlei [35] also noted that the reduction of the value of the distribution coefficient occurs due to the increased presence of fines in

SCC, influencing the interaction among the particles. The q-values equal to 0.21 and 0.26 were verified, as well as values lower than 0.28 [25]. Commonly from 0.29 and 0.30, the q-values apply to concretes compacted by vibration [35, 37]. The distribution coefficient has also been referred to as a parameter of dosage, in view of the interest in obtaining compositions of SCC based on the theory of packing [38]. In this context, this study has as objective to evaluate different aggregate combinations of binary, ternary and quaternary compositions applied in the SCC, seeking to identify the parameters of existing packing and reference in the aggregate compositions, and to verify the influence these in attendance to the recommendations for the SCC mix-design and the self-compactability properties.

**MATERIALS AND METHODS**

*Aggregates characterization, combination and composition:* the characteristics of coarse and fine aggregates used in the preparation of these compositions are presented in Table II. Two types of river sand (fine, F, and medium, M, sand) were used as fine aggregate (Fig. 1a). The crushed limestones with a maximum size of 12.5 mm (G12) and 19 mm (G19) were used as coarse aggregate (Fig. 1b). The available Portland cement type II F-32 in accordance with the requirements was utilized. The mineral admixture was marble and granite waste (MGW) with a specific gravity of 2.69 g/cm<sup>3</sup> and particles smaller than 150 μm. Fig. 2 shows the particle size distribution curves of these fine materials obtained by the laser scattering method. High-range water reducing admixture (HRWRA) based on polycarboxylate with a specific gravity of 1.087 g/cm<sup>3</sup> was also utilized.

Table II - Characteristics of aggregates.  
[Tabela II - Características dos agregados.]

Property	G12	G19	M	F
Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	2710	2670	2630	2620
Loose unit weight (kg/mm <sup>3</sup> )	1380	1420	1440	1530
Maximum size (mm)	12.5	19.0	2.4	1.2
Fineness modulus	6.07	6.78	2.69	1.73

The aggregate granular combinations and compositions, assessed in this study, were obtained from [23]. Altogether there were nine aggregates combinations. The combinations followed the increasing order of the size of samples, in the following way: four binaries (FG12, FG19, MG12, MG19); four ternaries (FMG12, FMG19, FG12G19, MG12G19); and a quaternary (FMG12G19). For each combination, the loose unit weight and the void content were determined according to NBR NM 45:2006 [39], method C, in a loose state. Due to a larger unit weight (Mu) and a lower void rate (I<sub>v</sub>) for each combination, the aggregate composition was defined according to the method of O'Reilly [22]. It should be emphasized that, due to the experimental procedure carried out for obtaining the final nine compositions of aggregates,

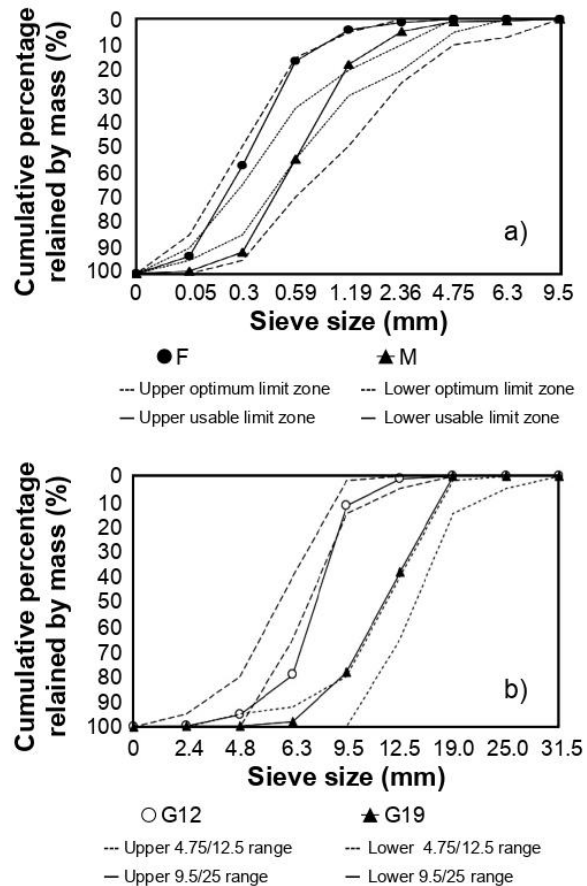


Figure 1: Particle size distribution curves for fine (a) and coarse (b) aggregates.  
[Figura 1: Curvas granulométricas de agregados miúdos (a) e graúdos (b).]

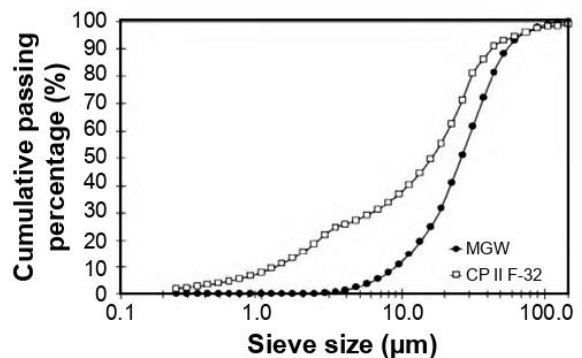


Figure 2: Particle size distribution curves for marble and granite waste and cement CP II F-32.  
[Figura 2: Curvas granulométricas do resíduo de beneficiamento de mármore e granito e do cimento CP II F-32.]

the compositions took into consideration the particle size distribution, shape of the grains and the wall effect caused by particle size differences. In this study, these compositions were evaluated in relation to some parameters that influence

the particle packing:  $I_v$  and the difference between coarse and fine particle sizes. Considering the influence of smaller particles in packing [15, 28-30], the aggregate compositions were presented by means of particle size distribution curves, seeking to obtain a relation regarding the presence of the smallest dimension of aggregates. The different curves of particle size distribution were used for the assessment regarding the continuous or discontinuous polymodal distribution of the compositions. These curves were separated in the following way: compositions with 'G12' and/or 'G19' that contained both 'F' and 'M', the ones which contained only F and those that contained only M. Standardized sieves (19.0, 12.5, 9.5, 6.3, 4.75, 2.36, 1.18, 0.60, 0.30 and 0.15 mm) were used for particle size distribution analysis with the ratio of 2.

*Dosage and properties of SCC:* the dosage of SCC was determined for each aggregates composition [23], resulting in nine compositions of SCC. In these compositions, the paste volume was fixed (40% in relation to the concrete volume) and its composition, varying only the aggregate compositions. The dosages of SCC were evaluated in relation to the reference parameters (RPs) indicated in indicated in Table I. The self-compactability properties of SCC were determined by slump flow, L-box and V-funnel tests [17] and classified by classes defined in the NBR 15823-1:2017. In the slump flow test, three flow diameters ( $D_f$ ) were measured, two perpendicular and a third, which corresponded to the least favorable diameter, immediately at the end of the flow. The visual stability index (VSI) of slump flow was subjectively determined, depending on the uniformity of the flow diameter, the coarse aggregate distribution throughout the flow and the paste segregation on the edges of the final diameter. In the trial of L-box, the passing ability parameter (HP) of SCC was evaluated among the obstacles (3 steel bars spaced  $40 \pm 1$  mm).

*Method of particle packing:* the particle packing model (PPM), called Alfred model (or modified A&A model) [28, 34, 38], was implemented in the program EMMA (Elkem Material Mix Analyzer) [40] and in spreadsheets developed in the software Microsoft Excel. EMMA was used to obtain experimental grading curves of concrete mixtures, without modification of the particle size distribution. For the evaluation of packing theoretical curves (predicted), through spreadsheets in order to assess the dosing parameter  $q$ , it was verified initially the approximation of the experimental curve of each mixture of concrete to the corresponding theoretical curve, assuming any value of  $q$ . In this program, the dosages of concretes were inserted per cubic meter of concrete, just considering the solid materials (cement, admixtures and aggregates). The packing curves were represented graphically in cumulative percentages passing finer than (CPFT, %) as ordinate, in arithmetic scale, and depending on the size of particles ( $D_p$ ,  $\mu\text{m}$ ) as abscissa, in logarithmic scale. For determination of CPFT of these theoretical curves, in addition to the distribution coefficient, the following conditions were provided: fixed sizes  $D_L$  and  $D_S$  of each experimental mixture; and variable  $D_p$  which

was the parameter that depended on the sieve sizes. With the experimental grading curves, exported from EMMA, and the theoretical curve obtained from the spreadsheets, the quadratic error of differences was determined ( $E^2$ ) between the experimental and theoretical CPFTs, for each particle size ( $D_p$ ); finally, the sum of these quadratic differences ( $\Sigma E^2$ ) was calculated. In this assessment, it was verified what values of  $q$  corresponded to a particular distribution coefficient ( $q$ -value) indicated for SCC ( $0.21 \leq q \leq 0.28$ ) [25, 28, 35, 40]. With the use of linear programming, specifically with the use of the tool 'solver', the objective function  $\Sigma E^2$  was minimized, making the values of  $D_L$ ,  $D_S$  and  $q$  informed, and the variables that needed to be changed, returned by the solver and maintained as a solution to the objective function for each concrete composition. Thus, the deviations were optimized and the parameter  $q$  for each mixture was reached. As a result, curves of non-linear adjustment of the PPM and a statistical coefficient of determination  $R^2$  were obtained, corresponding to the optimized values of  $q$ . Superimposing these curves with experimental grading curves of each composition, it was verified how the experimental data of mixtures behaved with the predicted data. Finally, the distribution coefficients ( $q$ -values), generated by the adjustment, indicated which mixtures fit or not the values indicated for self-compacting concrete.

## RESULTS AND DISCUSSION

*Aggregate gradations:* the final selected aggregate gradations, in a total of nine aggregate compositions, for each combination (binary, ternary and quaternary), were defined by the largest unit weight ( $\mu$ ) and the lowest void content ( $I_v$ ), Table III. It was observed, in general, that the percentages of coarse aggregates (PCA) ranged from 50% to 55%, and the fines from 45% to 50%, regarding the total aggregate content, which was in agreement with those found in the literature [2, 23, 24, 27]. The variation found in the  $I_v$  or intergranular porosity [15] is justified by the different proportions, particle size fractions (particle size) and shape of the grains present in different combinations and compositions. Test results are reported in Table III which show that standard deviations of void content were smaller than 0.5%, indicating that the data tended to be close to the mean void content. It is important to know that the  $\mu$  and  $I_v$  referred to the mean value of three determinations. It was verified that the value of  $I_v$  varied with the difference in size between the particles of coarse and fine aggregates. The higher this difference, the lower was the  $I_v$ ; for example, the combination FG19, which had a particle size difference between coarse and fine aggregates larger than the FG12, had  $I_v$  (27.6%) lower than  $I_v$  (30.1%) of the latter, and both had  $I_v$  lower than the MG12 (34.7%), which had the smallest particle size difference between coarse and fine aggregates in relation to both. This showed that, when the concentration of approximate sizes of particles or similar increased, the packing became reduced, consequently, increasing the  $I_v$  [29]. This fact showed that the compositions with the

Table III - Aggregate gradations and properties; adapted from [23].  
 [Tabela III - Graduações e propriedades de agregados; adaptado de [23].]

Combination	Aggregate composition (%)				Physical property		
	Fine aggregate		Coarse aggregate		Mean void content (%)	Standard deviation of void content (%)	Mu (kg/m <sup>3</sup> )
	F	M	G12	G19			
FG12	45.0	-	55.0	-	30.1	0.23	1866.3
FG19	45.0	-	-	55.0	27.6	0.44	1917.0
MG12	-	50.0	50.0	-	34.7	0.12	1743.5
MG19	-	45.0	-	55.0	31.3	0.20	1822.4
FMG12	23.0	27.0	50.0	-	33.6	0.38	1767.7
FMG19	23.0	27.0	-	50.0	30.9	0.32	1822.9
FG12G19	45.0	-	25.0	30.0	31.9	0.13	1804.5
MG12G19	-	40.0	27.0	33.0	32.6	0.23	1796.3
FMG12G19	22.0	28.0	22.0	28.0	32.1	0.27	1803.4

greatest difference in size between particles of coarse and fine aggregates (GDPCF), FG12 (30.1%), FG19 (27.6%), FG12G19 (31.9%), MG19 (31.3%) and FMG19 (30.9%), developed a greater filling of the voids, leading to values of  $I_v < 32.0\%$  and consequently a higher composition packing, according to the literature [29, 30]. In turn, the compositions with a smaller particle size difference between coarse and fine aggregates (SDPCF), MG12 (34.7%), FMG12 (33.6%), MG12G19 (32.6%) and FMG12G19 (32.1%), had  $I_v > 32.0\%$ . Another fact related to compositions of GDPCF, is that the percentage of coarse aggregates (PCA) was 55%, with the exception of FMG19, which was 50%, which may have occurred due to the presence of a further fine material 'M', which reduced the difference in size between the coarse and fine particles and, consequently, reduced the percentage of coarse aggregate. And in the SDPCF, PCA was 50%, with the exception of MG12G19 of 60%, similar to what occurred with FMG19, only in this case the 'G12' favored the increase in the percentage of all the coarse particles.

It should be noted, also in the compositions with GDPCF, that the presence of 'F' and the absence of 'M' and 'G12' favored the lower content of  $I_v$  and larger packing in relation to the compositions with SDPCF. For an assessment of the aggregate gradation in the function of the absence of M and G12, in Fig. 3 the resultant curves of the particle size distribution of the aggregate compositions are shown, seeking to obtain a relation as to the continuity and discontinuity of these compositions. It is noted in Figs. 3a and 3b that the compositions FMG12, FMG12G19, MG12 and MG12G19 with more open particle size distribution curves and with less expressive low points indicated continuous distributions, whereas those compositions with more expressive low points, which was more closed due to the absence of G12 (FMG19, MG19) and M (FG12, FG19, FG12G19), Fig. 3c, led to a greater tendency to discontinuity. In addition, these curves showed GDPCF characteristics, and the other curves with a tendency to continuity were SDPCF. However,

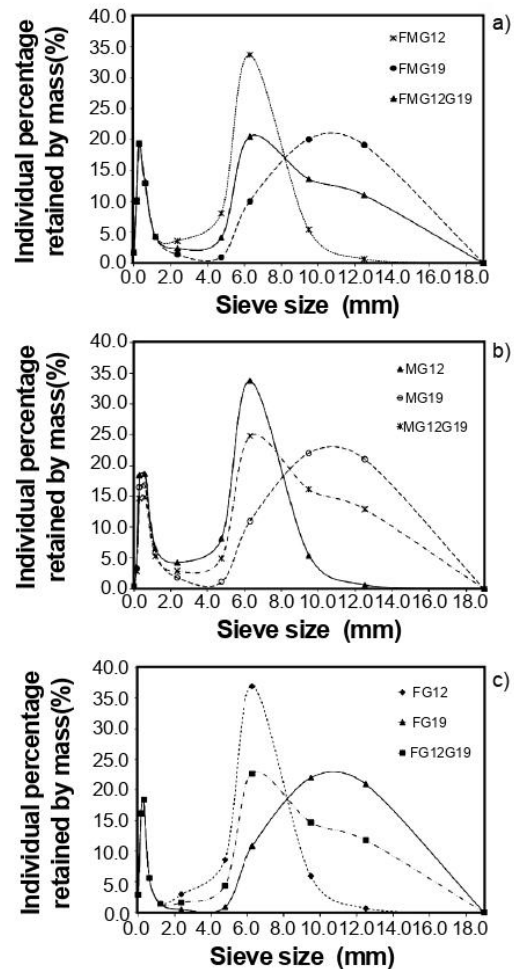


Figure 3: Particle size distributions curves with the fine aggregate combinations: a) F and M; b) M; and c) F.  
 [Figura 3: Curvas de distribuição granulométrica com as combinações de agregados miúdos: a) F e M; b) M; e c) F.]



Table IV - Dosage and reference parameters of SCC.  
[Tabela IV - Parâmetros de referência e de dosagem de CAA.]

Parameter	Material	CFG12	CFG19	CMG12	CMG19	CFMG12	CFMG19	CFG12G19	CMG12G19	CFMG12G19
Range of aggregates										
Mam 710-900 (kg/m <sup>3</sup> )	Fine sand (F)	723	716	-	-	368	365	717	-	351
	Medium sand (M)	-	-	801	717	432	429	-	639	446
Mag 750-920 (kg/m <sup>3</sup> )	Crushed gravel 12.5 (G12)	881	-	801	-	800	-	399	432	351
	Crushed gravel 19.0 (G19)	-	873	-	874	-	794	478	527	446
Reference parameter (RP)										
Vag/Vat 0.44-0.65 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		0.54	0.55	0.50	0.55	0.50	0.50	0.54	0.60	0.52
Vam/Vat 0.35-0.60 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		0.46	0.45	0.50	0.45	0.50	0.50	0.46	0.40	0.48
Vag/Vc 28-35 (%/m <sup>3</sup> )		32	33	30	33	33	30	33	36	30
Vam/Varg 40-50 (%/m <sup>3</sup> )		44	44	47	44	44	43	41	38	46

Note: for each composition of SCC (40% of paste volume), 400 kg/m<sup>3</sup> cement, 200 kg/m<sup>3</sup> MGW (marble and granite waste) filler, 200 kg/m<sup>3</sup> water, and 7.97 kg/m<sup>3</sup> admixture were used; Mam-fine aggregate mass; Mag-coarse aggregate mass; Vag-coarse aggregate volume; Vam-fine aggregate volume; Vat-total aggregate volume; Vc-concrete volume; Varg-mortar volume.

when it comes to the aggregate compositions for SCC, it is recommended to reduce both the maximum dimension and the coarse aggregate volume, making them approaching the maximum volume and size of fine aggregates [4, 5, 11, 14]. Therefore, there was a tendency, in the formulation of the aggregate composition for the SCC, of an approximation of the grains of coarse and fine aggregates. These trends, according to the analysis of the studied compositions, led to obtaining compositions with a continuous distribution, SDPCF, and consequently higher  $I_v$ , distancing from a maximum packing, due to the intermediate diameter that led to highest void content. Therefore, it contributed to a greater paste volume in the concretes, justifying the high content of this paste in the SCC necessary to reach the self-compactability requirements.

Composition of SCC: after defining the aggregate compositions (Table III) and fixing the composition and paste volume according to [23], the concrete compositions, ranges of aggregates and reference parameters (RPs) to

SCC, referenced in the literature (Table I), are presented in Table IV. The concretes were named from the aggregate combinations, for example, combination FG12 refers to concrete as CFG12. In general, the dosages of aggregates used in the compositions of SCC (Table IV) complied with the ranges of content of aggregates and the RP indicated to SCC, with the exception of CMG12G19, that presented higher consumption for coarse aggregate, 959 kg/m<sup>3</sup>, and inferior for fine aggregate, 639 kg/m<sup>3</sup>. The content of fines, although high, 20.2% in concrete volume, with a mass of 600 kg/m<sup>3</sup>, fit in the value specified for SCC. In continuation, these compositions to SCC produced experimentally are analyzed numerically by PPM.

Self-compactability properties: the results of the self-compactability tests, and the classes that specify the SCC [17], are presented in Table V. It was observed that despite the  $D_f$  of SCC was above the minimum recommended limit ( $D_f > 550$  mm), some SCC by analysis of VSI did not present satisfactory stability. These instabilities were confirmed in

Table V - Results of the self-compactability tests and classes in accordance with the NBR 15823:2017 [17, 19-21].  
[Tabela V - Resultados de ensaios e classes de autoadensabilidade conforme NBR 15823:2017 [17, 19-21].]

Concrete	$D_f$ (mm)	Class SF	VSI	Class VSI	TFV (s)	Class VF	Box L, H2/H1 (mm)	Class HP
CFG12	685.0	SF2 <sup>a</sup>	1	Stable	22	VF2 <sup>d</sup>	0.50 (block)	
CFG19	775.0	SF3 <sup>b</sup>	2	Unstable	16 <sup>c</sup>	VF2 <sup>d</sup>	0.78 (block)	
CMG12	740.0	SF2 <sup>a</sup>	0	Highly stable	12	VF2 <sup>d</sup>	1.0	
CMG19	790.0	SF3 <sup>b</sup>	3	Highly unstable	6	VF1 <sup>e</sup>	0.50 (block)	One should
CFMG12	750.0	SF2 <sup>a</sup>	0	Highly stable	4	VF1 <sup>e</sup>	1.0	obtain
CFMG19	815.0	SF2 <sup>a</sup>	0	Highly stable	6	VF1 <sup>e</sup>	1.0	PL2 $\geq$ 0.80
CFG12G19	790.0	SF3 <sup>b</sup>	2	Unstable	4	VF1 <sup>e</sup>	>0.80 (block)	
CMG12G19	785.0	SF3 <sup>b</sup>	3	Highly unstable	6	VF1 <sup>e</sup>	0.50 (block)	
CFMG12G19	765.0	SF3 <sup>b</sup>	0	Highly stable	6	VF1 <sup>e</sup>	1.0	

Note:  $D_f$ -flow diameter; SF-slump flow; VSI-visual stability index; TFV-V-funnel time; VF-apparent viscosity in the V-funnel; HP-passing ability; <sup>a</sup>-660 to 750; <sup>b</sup>-760 to 850; <sup>c</sup>-segregated; <sup>d</sup>-9 to 25; <sup>e</sup>-<9.

the L-box test, where these SCC did not meet the passing ability parameter (HP). The SCC that did not meet the HP were GDPCF CFG12, CFG19, CFG12G19 and CMG19, with characteristics of  $I_v < 32.0\%$ , DGD and PCA=55%, with the exception of CFMG19, with PCA=50%, that complied with HP. Whereas the SCC with SDPCF (MG12, CFMG12, CFMG12G19), with characteristics of  $I_v > 32.0\%$ , continuous distribution and PCA=50% met HP, with the exception of CMG12G19 that showed flow blockage, behavior that may be related to the dosage of PCA=60% (Figs. 4a and 5a). It was verified that the concretes with PCA $\geq$ 55% (CFG12, CFG19, CFG12G19, CMG19, CMG12G19) showed instability and blockage, as it can be seen for CFG19 (Figs. 4d and 5d) and CFG12G19 (Figs. 4c and 5c). Whereas the concretes with PCA=50%, CMG12, CFMG12, CFMG19 and CFMG12G19 (Figs. 4b and 5b), showed no instability and blockage. These facts proved the recommendation of mix-design methods to SCC, whose content of coarse aggregate has to be limited [2-4]. Therefore, it was evidenced in this study that SCCs with the characteristics of aggregate compositions of SDPCF, continuous distribution and PCA=50% were favorable to obtaining stable mixtures, meeting HP.



Figure 4: Images of concretes after slump flow test: a) CMG12G19; b) CFMG12G19; c) CFG12G19; and d) CFG19.

[Figura 4: Imagens de concretos após ensaio de slump flow: a) CMG12G19; b) CFMG12G19; c) CFG12G19; e d) CFG19.]

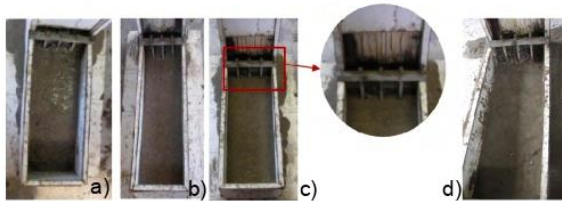


Figure 5: Images of concretes after L-box test: a) CMG12G19; b) CFMG12G19; c) CFG12G19; and d) CFG19.

[Figura 5: Imagens de concretos após ensaio de caixa-L: a) CMG12G19; b) CFMG12G19; c) CFG12G19; e d) CFG19.]

*Evaluation of SCC by PPM:* the curves of the experimental and theoretical adjustments with the corresponding values of the distribution coefficient (q-value) and coefficient of determination ( $R^2$ ), statistical measure, for each concrete are presented in Fig. 6. In Table VI, these coefficients are presented for each concrete mixture. Analyzing the adjusted curves and the values of q associated to the concretes with binary aggregates composition, it should be noted that in CFG12, CFG19 and CMG19 (Figs. 6a, 6b and 6d, respectively), there was a greater dispersion of data from the experimental grading curves with the curves of the predicted models, resulting in an adjustment to the packing with distribution coefficients of 0.194, 0.152 and 0.126,

respectively, with statistical coefficients of determination ( $R^2$ ) of 98.37%, 97.89% and 96.56%, respectively (Table VI), which meant that the adjusted model explained these percentages of the variability in the experimental data. It was observed that the packing of these concretes presented values of q lower than those indicated for SCC, and was related to the packing of mixtures with a greater quantity of fine particles [25, 28, 37]. Regarding the CMG12 (Fig. 6c), there was a smaller dispersion with the theoretical curve of packing with  $q=0.253$ , this value within the limits indicated for SCC, with  $R^2$  explaining 98.94% of the observed data. Whereas the concretes with ternary composition CFG12G19 and CFMG19 (Figs. 6e and 6h, respectively) showed greater dispersion of the experimental data with the predicted data, obtaining in the adjustment  $q=0.174$  and  $0.184$ , respectively, also smaller than the q-value indicated to SCC. The values of the coefficients of determination were equal to 98.50% and 98.63%, respectively, these being the percentages of model explanation concerning the experimental data. In the case of the ternaries CMG12G19 and CFMG12 (Figs. 6f and 6g, respectively), values of q were obtained equal to 0.238 and 0.219, respectively, within the indicated values for SCC, where lower dispersion of the observed data was verified in relation to the predicted data. In these compositions, the coefficients of determination were 98.74% and 99.06%. Regarding the quaternary CFMG12G19, Fig. 6i, the theoretical packing curve of best fit was obtained with  $q=0.201$ , near to those found in the literature for compositions of SCC, with a lower dispersion of the experimental values, with a coefficient of determination  $R^2=0.990$ , i.e., 99.0% of the observed data were explained by the model.

Based on non-linear adjustment, it was possible to evaluate that the coefficients of determination achieved values close to 100%, Table VI, which meant that the data variability was explained by the regression model, concentrating on the points of data close to the adjusted regression line. The values of  $R^2$  below 98.65%, Table VI, were the ones corresponding to the experimental grading curves of mixtures of concrete that showed higher deviations around the curve of the predicted model. It was verified, therefore, that the coefficient of determination for each type of concrete suffered a direct impact of experimental data in regression analysis. Analyzing Table V and the results presented in Table VI, no significant differences between the experimental grading curves and the predicted ones were notorious. These differences showed the limitations of both experiments, due to the number of sieves used and the size of the aggregates obtained, as well as the theoretical model, which is based on spherical particles and does not take into account the various characteristics present in the aggregates for concrete. According to the results, the q-value varied with the influence of finer particles. The higher the content of coarse grains, the lower the q-value obtained. This confirmed the tendency of the modified A&A model to change the q-value, reducing or increasing, depending on the increase or withdrawal of smaller particles from the mixture, respectively. For the evaluated curves, it was verified that the

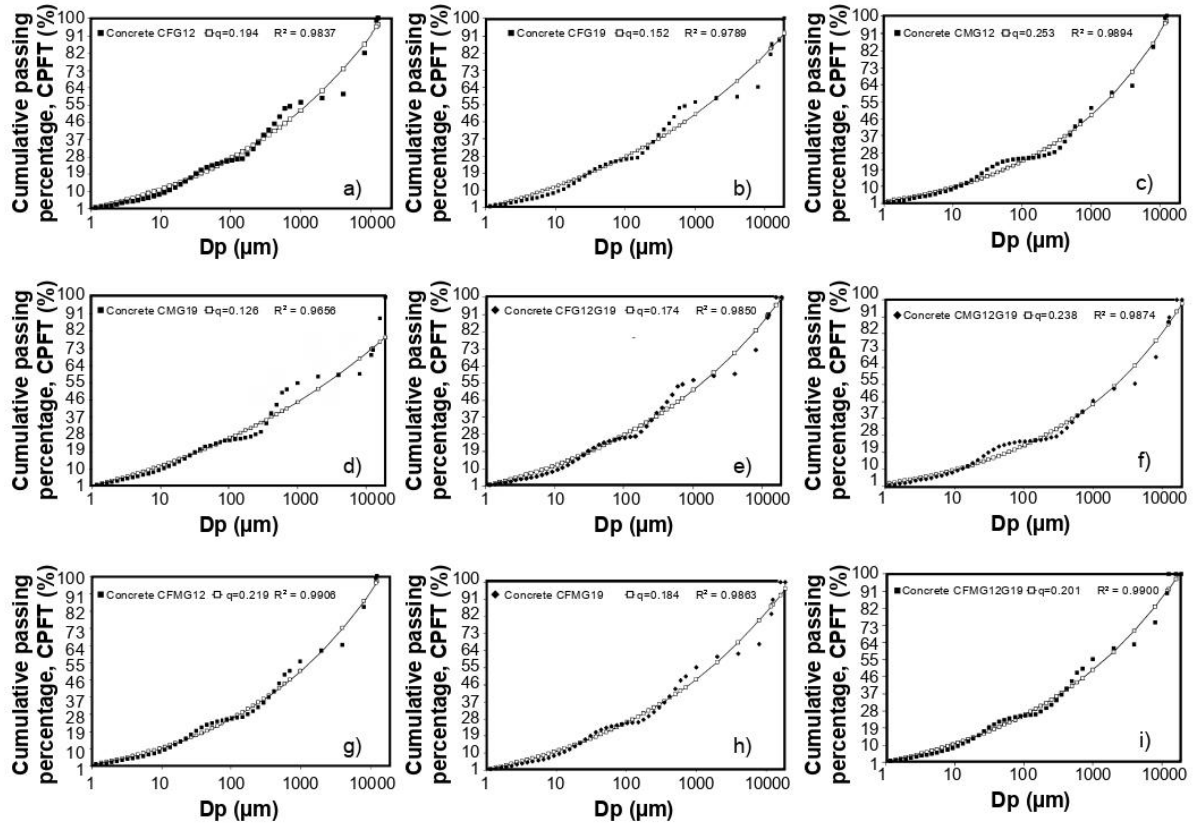


Figure 6: Cumulative particle size distribution curve and coefficients  $q$ -value and  $R^2$  of non-linear adjustment (Alfred model) for concrete mixture CFG12 (a), CFG19 (b), CMG12 (c), CMG19 (d), CFG12G19 (e), CMG12G19 (f), CFMG12 (g), CFMG19 (h), and CFMG12G19 (i). [Figura 6: Curva de distribuição granulométrica acumulada e coeficientes  $q$  e  $R^2$  do ajuste não linear (modelo de Alfred) para a mistura de concreto CFG12 (a), CFG19 (b), CMG12 (c), CMG19 (d), CFG12G19 (e), CMG12G19 (f), CFMG12 (g), CFMG19 (h) e CFMG12G19 (i).]

most accentuated differences of the experimental grading curves occurred in the compositions CFG12, CFG19, CMG19, CFG12G19 and CFMG19, due to the granulometry of coarse particles being concentrated on some intervals of the sieves, and less on CMG12, CMG12G19, CFMG12, and CFMG12G19, showing the best fulfillment of particles in fractions available.

*Comparative analysis of the results:* the aggregate compositions obtained experimentally by the method of loose unit weight presented distinct characteristics, resulting from granular arrangement itself, but which, in fact, were due to the effectiveness of the used experimental method (O'Reilly [22]). In this method, it is considered that the irregular shape of the grains and the aggregate granulometry were predominant for obtaining the  $I_v$  of each composition, being this parameter indicative of the reached packing. In this study, it was possible to observe that the  $I_v$  was directly related to the difference between coarse and fine particles (DPCF), proving the theory of packing [7, 29, 30]. In addition, the SDPCF belongs to the aggregate compositions with continuous distribution and a lower percentage of coarse aggregate (PCA). These characteristics led to SCC

with better mobility, confirming the recommendation of mix-design methods to SCC [2, 4-6, 14]. Finally, analyzing the compositions of SCC by the method of particles packing (PPM) and using the program EMMA and the tool solver, it was possible to determine the distribution coefficient ( $q$ -value) and the corresponding  $R^2$ , both used to evaluate and confirm the packing parameters of compositions of SCC. Therefore, in Table VI, in order to investigate the relationship between the characteristics of packing of aggregate compositions and the SCC, with the parameters of mobility, the data obtained in the different applied methods are exhibited.

Through the results contained in Table VI, it was observed in general that the concretes that presented packing characteristics favorable for obtaining the SCC ( $I_v > 32.0\%$ , SDPCF, PCA=50%, FGD) had the value of  $q$  within the one indicated in the literature for SCC, and coefficients of determination  $R^2$  closer to 100%, and complied better the self-compactability ( $0 \leq VSI \leq 1$  and HP). However, the concretes that presented characteristics of less favorable packing ( $I_v < 32.0\%$ , GDPCF, PCA=55%, DGD) to obtain the SCC, the value of  $q$  was different from those indicated for SCC and



Table VI - Packing details of the concretes and aggregates grading distributions and self-compactability parameters.

[Tabela VI - Detalhes de empacotamentos de distribuições granulométricas de agregados e de concretos e parâmetros de autoadensabilidade.]

Parameter	CFG19	CFG12	CFMG19	CMG19	CFG12G19	CFMG12G19	CMG12G19	CFMG12	CMG12
q	0.152	0.194	0.184	0.126	0.174	0.201	0.238	0.219	0.253
R <sup>2</sup>	0.9789	0.9837	0.9863	0.9656	0.9850	0.9900	0.9874	0.9906	0.9894
I <sub>v</sub> (%)	27.6	30.1	30.9	31.3	31.9	32.1	32.6	33.6	34.7
DPCF	G	G	G	G	G	S	G	S	S
PCA (%)	55	55	50	55	55	50	60	50	50
DG	D	D	D	D	D	C	C	C	C
VSI	2	1	0	3	2	0	3	0	0
HP	N	N	A	N	N	A	N	A	A

Note: G-greater; S-smaller; D-discontinuous; C-continuous; N-non-compliance; A-complied.

R<sup>2</sup> less close to 100%, in addition to presenting difficulties in complying with self-compactability ( $2 \leq VSI \leq 3$ , and HP=N). As an exception, the concrete CMG12G19, even with  $q=0.238$ , was not favorable to self-compactability (VSI=3 and HP=N), being attributed PCA=60%, percentage outside RP generally applied to SCC, which destabilized the concrete and led to the blockage. Another exception was CFMG19, which even in favor of self-compactability (VSI=0 and HP=A) did not meet the parameters of packing suitable for SCC ( $q=0.184$ ,  $I_v < 32.0\%$ , GDPCF, DGD), being attributed to PCA=50%, usually indicated to SCC. Therefore, the analysis of comparison of different parameters proved that the PCA around 50% favors a better performance of SCC, and confirmed what has been generally recommended and found in the literature for the dosage of coarse aggregates in the formulation to SCC [2, 4, 5, 23, 24]. Since it is a concrete that requires a greater cement paste volume, it was concluded that the continuous distributions were the most indicated. Thus, there was a contradiction between the highest voids index and the best packing. In the continuous distributions, it was seen that, for a smaller difference between the particles of coarse and fine aggregates, SDPCF (for example, the composition CFMG12G19), the dosages of concrete tended to be more uniform and mixtures with theoretical grading curve on the q-value between 0.201 and 0.253; unlike the discontinuous which had a greater difference between the sizes of coarse and fine aggregates, GDPCF (for example, the composition FG12), the dosages of concrete tended to be more unstable and with grading curve predicted for q between 0.126 and 0.194.

## CONCLUSIONS

In this study, an experimental investigation on how aggregate gradations showed different behaviors when employed in dosages of SCC was demonstrated. According to the results obtained from this survey, the conclusions are as follows: i) the value of void content ( $I_v$ ) was influenced by both the difference between the largest and smallest sizes of particles as well as the aggregate particle size

distribution, that is, smaller  $I_v$  in general occurred in the compositions with the greatest difference in size between particles of coarse and fine aggregates (GDPCF), and the largest  $I_v$  occurred in compositions with smaller particle size difference between coarse and fine aggregates (SDPCF); ii) the absence of intermediate particle aggregates between fine and coarse aggregate (M and G12, respectively) showed high interference in the grading curve of aggregate compositions, being characterized as discontinuous granulometric distribution. These compositions defined as GDPCF had a greater tendency to discontinuity, and the compositions with SDPCF were characterized as continuous granulometric distributions; iii) concretes with compositions that presented lower  $I_v$ , GDPCF and discontinuous distributions, in general, did not meet the parameter of passing ability and presented instability caused by excess paste. These concretes induced that a smaller volume of paste would be sufficient for filling of void content and self-compactability. The same occurring in mixture with a larger coarse aggregate volume, which did not comply with the reference parameters (RPs) commonly found in the literature for dosages of SCC. In general, continuous distribution, approaching the diameters of fine and coarse aggregates, that is SDPCF, and aggregate proportion with 50% of coarse aggregate had appropriate behavior of fresh properties as SCC. Such findings were identified from the analysis of the visual aspect of concretes, in compliance with the visual stability index (VSI) criterium recommended by standard NBR 15823-2:2017, confirming the results of compliance and non-compliance to the concrete self-compactability, as well as to the parameters RPs, DPCF and PCA (percentage of coarse aggregates); iv) on the numerical analysis by particle packing model (PPM) through spreadsheets, for the determination of the q-values of Alfred model, it was realized that minor deviations of granulometric curves of mixtures occurred in continuous distributions; regarding the discontinuous ones, besides presenting deviations along the curve, the concrete mixtures had a greater coarse aggregate volume, which compromised the self-compactability requirements, presenting non-cohesive mixtures and segregation, being precisely to



those with q-value between 0.126 and 0.194. In general, the distribution coefficients between  $0.201 \leq q \leq 0.253$  were determined in the SCC; and v) concretes with aggregate gradation of greater  $I_v$ , SDPCF, continuous distributions and with 50% of coarse aggregate were more favorable to obtaining SCC, noting a tendency of approximation of the coarse and fine grains in the formulations of the granular skeleton to SCC, distancing from a maximum packing.

#### ACKNOWLEDGMENTS

To CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, for the scholarship; to FAPEAL - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas for the support and incentive to the scientific research development; to PPG Materials; the authors are thankful to BASF Construction Chemicals Brazil Ltd for providing the admixtures for the experimental program; to the projects Universal and PROCAD/Casadinho; to the group MECOEFIGON/UFAL for the involvement and participation of Professors and scientific initiation students.

#### REFERENCES

- [1] P. Ghoddousi, A.A.S. Javid, J. Sobhani, *Constr. Build. Mater.* **53** (2014) 102.
- [2] H. Okamura, K. Ozawa, *Struct. Eng. Int.* **6**, 4 (1996) 269.
- [3] P. Billberg, "Self-compacting concrete for civil engineering structures: the Swedish experience", *S.C.C.R.1* (1999).
- [4] P.C.C. Gomes, R. Gettu, L. Agulló, L. Bernard, in 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Self-Compact. Concr., Tokyo (2001) 377.
- [5] P.C.C. Gomes, R. Gettu, L. Agulló, L. Bernard, *Cem. Hormigón* **832** (2002) 30.
- [6] B.F. Tutikian, M. Pacheco, *Rev. Ibracon Estrut. Mater.* **5**, 4 (2012) 500.
- [7] F. De Larrard, in 3<sup>rd</sup> Rilem Int. Symp. Rheology Cement Suspens. Fresh Concr. (1999).
- [8] A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah, *ACI Mater. J.* **94**, 6 (2001) 429.
- [9] N. Su, K.-C. Hsu, H.-W. Chai, *Cement Concr. Res.* **31**, 12 (2001) 1799.
- [10] Ö. Petersson, P. Billberg, B.K. Van, in Int. Rilem Conf. Product. Methods Workab. Concr., P.J.M. Bartos, D.L. Marris, D.J. Cleand (Eds.), E&FN Spon (1996) 483.
- [11] P.C.C. Gomes, A. Barros, *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*, Pini, S. Paulo (2009).
- [12] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, *Cement Concr. Res.* **35**, 11 (2005) 2116.
- [13] E.M. Lisboa, P.C.C. Gomes, F.B. Lima, A.S.R. Barboza, R.M. Lameiras, in X Enc. Nac. Tecnol. Amb. Constr. (2004).
- [14] K.A. Melo, A.M.P. Carneiro, *Constr. Build. Mater.* **24** (2010) 1529.
- [15] B.L. Daminieli, R.G. Pileggi, V.M. John, *Ibracon Struct. Mater. J.* **10**, 5 (2017) 998.
- [16] E. Rozière, S. Granger, P. Turcry, A. Loukili, *Cement Concr. Comp.* **29**, 8 (2007) 626.
- [17] NBR 15823-1, "Concreto autoadensável - parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco", Ass. Bras. Norm. Técn., Rio Janeiro (2017).
- [18] EFNARC, "The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use" (2005).
- [19] NBR 15823-2, "Concreto autoadensável - parte 2: determinação do espalhamento e tempo de escoamento - método do cone de Abrams", Ass. Bras. Norm. Técn., Rio Janeiro (2017).
- [20] NBR 15823-4, "Concreto autoadensável - parte 4: determinação da habilidade passante - método da caixa-L", Ass. Bras. Norm. Técn., Rio Janeiro (2017).
- [21] NBR 15823-5, "Concreto autoadensável: parte 5: determinação da viscosidade - método do funil V", Ass. Bras. Norm. Técn., Rio Janeiro (2017).
- [22] V. O'Reilly Diaz, *Método de dosagem de concreto de elevado desempenho*, Pini, S. Paulo (1998).
- [23] R.S. Monteiro, P.C.C. Gomes, K.A. Melo, in IV Congr. Ibero-Am. Betão Auto-Compact., BAC2015 (2015) 205.
- [24] P.C.C. Gomes, *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*, UPC (2002).
- [25] A.L. Castro, J.B.L. Liborio, V.C. Pandolfelli, *Cerâmica* **55**, 335 (2009) 233.
- [26] B.M. Toralles-Carbonari, "Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones", Tesis Doct., Esc. Técn. Super. D'Enginyers, UPC, Barcelona (1996).
- [27] A.M.P. Carneiro, M.S. Barata, J.M. Lima, G.L. Quaresma, in 9<sup>o</sup> Simp. Int. Inic. Cient. (2001).
- [28] I.R. Oliveira, A.R. Studart, R.G. Pileggi, V.C. Pandolfelli, *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*, Fazendo Arte Ed., S. Paulo (2000) 224.
- [29] X. Chateau, in "Understanding the rheology of concrete", N. Roussel, Woodhead Publ., France (2012).
- [30] H. Moosberg-Bustnes, B. Lagerblad, E. Forsberg, *Mater. Struct. Construct.* **37**, 266 (2004) 74.
- [31] P. Goltermann, V. Johansen, L. Palbol, *ACI Mater. J.* **94**, 5 (1998) 435.
- [32] O.G. Bolivar, "Diseño de mezclas de hormigón: métodos empíricos y analíticos", Colômbia (2004).
- [33] C. Vogt, "Ultrafine particles in concrete: influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design", Thesis, Royal Inst. Technol., Stockholm (2010).
- [34] F.S. Ortega, R.G. Pileggi, P. Sepúlveda, V.C. Pandolfelli, *Cerâmica* **43**, 283-284 (1997) 183.
- [35] R.D. Vanderlei, "Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas", Tese Dr., USP, S. Carlos (2004).
- [36] L. Londero, A. Lenz, Í.M.R. Santos, N.S. Klein, *Cerâmica* **63**, 365 (2017) 22.
- [37] M.N. Mangulkar, S.S. Jamkar, *Int. J. Sci. Eng. Technol.* **4**, 5 (2013) 143.
- [38] I.S.G. Cavaliere, R.S. Campos, M.P. Barbosa, A.L. Castro, in 58<sup>o</sup> IBRACON (2016) 1.

[39] NBR NM 45, “Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios”, Ass. Bras. Norm. Técn., Rio Janeiro (2006).

[40] V. Roubtsov, “EMMA user guide”, [http://emma.sourceforge.net/userguide\\_single/userguide.html](http://emma.sourceforge.net/userguide_single/userguide.html).  
(*Rec. 26/10/2018, Rev. 24/01/2019, Ac. 08/03/2019*)

